

MTA Doktori Értekezés

A PRECÍZIÓS MEZŐGAZDASÁGI TECHNOLÓGIÁK ALKALMAZÁSA A KUKORICA TERMÉSSINGADOZÁS MÉRSÉKLÉSÉRE

Kakuszi-Széles Adrienn

DEBRECENI EGYETEM

Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar

Debrecen

2025

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	4
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	6
2.1. A klímaváltozás hatása a kukoricatermesztésre	6
2.2. Termesztéstechnológia alkalmazása a klímaváltozás mérséklésében	9
2.2.1. Hibridválasztás szerepe a kukoricatermesztésben	9
2.2.2. Vetésidő optimalizálása a kukoricatermesztésben	11
2.2.3. Öntözés szerepe és hatása a kukoricatermesztésben	13
2.2.4. N-műtrágyázás hatása a kukoricatermesztésre	14
2.2.5. N-műtrágyázás, az öntözés és a környezeti tényezők hatása a kukoricatermesztésre	15
2.2.6. N-műtrágyázás, az öntözés és a környezeti tényezők hatása a kukorica minőségére	16
2.3. N-műtrágya kijuttatásának ütemezése	18
2.4. A kukoricanövény nitrogén-ellátottságának monitorozása precíziós mezőgazdasági döntéshozatali eszközökkel (SPAD, UAV NDVI és LAI)	19
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	22
3.1. A kísérleti tér elhelyezkedése, talajadottsága	22
3.2. A kísérleti tér klimatikus jellemzői	22
3.3. A kísérletek beállítása, elrendezése és a termesztéstechnológiai eljárások ismertetése	25
3.3.1. Vetésidő kísérlet	25
3.3.2. Nitrogén alap- és fejtrágyázás tartamkísérlet	26
3.4. Mért paraméterek és mérési eszközök: a precíziós mezőgazdasági (PrM) módszerek alkalmazása	27
3.4.1. Minolta SPAD-502 klorofillmérő alkalmazása a kukoricanövény N-ellátottságának monitorozására	27
3.4.2. SunScan lombkorona-elemző alkalmazása a kukoricanövény levélfelületének (LAI) monitorozására	28
3.4.3. UAV-alapú képfelvételek alkalmazása a kukoricaállomány állapotának vizsgálatában	28
3.4.4. Kukorica minőségének vizsgálata FOSS-Infratec készülékkel	29
3.5. Az alkalmazott statisztikai módszerek az eredmények értékelésére	29
4. EREDMÉNYEK	32
4.1. Az időjárás értékelése a kukorica (<i>Zea mays</i> L.) tartamkísérletek 2011–2023 közötti időszakára vonatkozóan	32
4.2. A kukorica fenológiai folyamataira vonatkozó hőmérséklet-alapú agrometeorológiai indexek alkalmazása és a hőfelhasználás hatékonysága különböző N-műtrágyakezelések mellett (2018–2019)	35
4.3. A kukoricatermesztés tartamkísérleti eredményeinek vizsgálata: relatív klorofilltartalom (SPAD érték), szemtermés, keményítő- és fehérjetartalom változásának értékelése eltérő környezeti feltételek mellett (2011–2023)	40
4.3.1. Környezeti tényezők és a N-műtrágyázás hatása a kukorica SPAD értékére (2011–2023)	40
4.3.2. Környezeti tényezők és a N-műtrágyázás hatása a kukorica termésére (2011–2023)	47
4.3.3. Környezeti tényezők és a N-műtrágyázás hatása a kukoricamag keményítőtartalmára (2011–2023)	54

4.3.4. Környezeti tényezők és a N-műtrágyázás hatása a kukoricamag fehérjetartalmára (2011–2023)	57
4.3.5. A termés mennyiségi, minőségi paraméterei és a relatív klorofilltartalom (SPAD) közötti összefüggések elemzése különböző N-műtrágyázási szinteken (2011–2023)	62
4.4. Vetésidő kukoricatermesztésre gyakorolt hatása (2011–2013)	70
4.4.1. Vetésidő hatása a termésre és az optimális vetésidő meghatározása (2011–2013)	70
4.4.2. Vetésidő hatása a kukorica hibridek hőhasznosítási hatékonyságára (HUE) (2011–2013)	75
4.4.3. Vetésidő hatása a kukoricamag fehérje- és olajtartalmára (2011–2013)	77
4.4.4. Vetésidő hatásának modellezése a kukorica kelésére és virágzására (2011–2013)	83
4.5. Kukoricatermesztés aszálystressz alatt: termés-előrejelzés precíziós mezőgazdasági (PrM) döntéshozatali eszközökkel (2021–2022)	89
4.5.1. A N-műtrágyázás hatása a kukorica SPAD és LAI értékeire különböző fenofázisokban: Integrált előrejelzési modell fejlesztése (2021–2022)	89
4.5.2. A N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica SPAD értékére (2022)	99
4.5.3. A N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica UAV-alapú NDVI értékére (2022)	105
4.5.4. A N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica szemtermésére (2022)	108
4.5.5. A kukorica szemtermése és a különböző kísérleti változók közötti kölcsönhatás (2022)	108
4.5.6. A spektrális indexek és N-műtrágyázás kapcsolata (2022)	111
4.5.7. A spektrális indexek és a szemtermés kapcsolata (2022).....	113
5. ÖSSZEFOGLALÁS	116
6. LEGFONTOSABB EREDMÉNYEK	132
IRODALOMJEGYZÉK	I
ÁBRA- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK	A
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	D

1. BEVEZETÉS

*„Felfedezni valamit annyit tesz, mint látni,
amit mindenki lát, és közben arra gondolni,
amire még senki.”*

(Szent-Györgyi)

A becslések szerint 2050-re kilencmilliárd ember ételmezését kell a világnak ellátnia, ehhez azonban 60%-kal kell növelni az élelmiszertermelést [Van Dijk 2021]. A kukorica az állati takarmány kulcsfontosságú összetevője, és egyre jelentősebb szerepet tölt be a globális agrár-élelmiszer-rendszerekben és a biztonságos táplálkozásban [Ranum et al. 2014, Erenstein et al. 2022, Grote et al. 2021]. A három fő növény (búza, rizs és kukorica) együttesen 94 fejlődő országban több mint 4,5 milliárd ember ételmezési kalóriájának 42%-át fedezi [FAOStat 2021]. Számos ipari termék forrása, pl. keményítő- és izocukorgyártás, szeszgyártás, gyógyszer-, textil- sör-, és papíripar [Wrigley et al. 2016]. A kukorica továbbá kiemelkedő megújuló energiaforrássá vált, különösen az Egyesült Államokban, ahol a kukoricatermelés mintegy 40%-át teszi ki [Ramsey et al. 2023], bár továbbra is fennállnak a földhasználattal kapcsolatos aggályok, valamint az élelmiszertermeléssel való verseny [RFA 2022]. A globális felhasználása: takarmány: 61%, ipar: 22%, élelmiszer: 17% [FAO 2020]. Magyarországon a takarmány- és ipari felhasználása jelentős, ez a mennyiség 2018–2022 között mindkét esetben 2,1–2,5 millió tonna között változott, a vetőmagipar 29–32 ezer tonnát hasznosít [KSH 2022]. Számítalan felhasználása miatt (több mint 3000 termék) a világ agrárgazdaságának egyik fő mozgatórugója.

A globális kukoricatermesztés jelenleg mintegy 200 millió hektáron folyik, amely az elmúlt 20 év alatt 48%-os növekedést jelent. A termelése közel kétszeresére növekedett, 630 millió tonnáról 1163 millió tonnára [Erenstein et al. 2022, FAOStat 2024]. Az előrejelzések szerint azonban az éves kereslet 2050-re elérheti a 3,3 milliárd tonnát [FAO 2022]. A világ legnagyobb kukoricatermesztője az USA, 2024-ben 382 millió tonna termelésével a legnagyobb mértékben járult hozzá a globális termeléshez (31,5%). Az Egyesült Államokat követte Kína (277 millió tonna) 22,8%-os, Brazília (129 millió tonna) 10,6%-os, az Európai Unió (59 millió tonna) 4,9%-os és Argentína (55 millió tonna) 4,5%-os részesedéssel [USDA/FAS 2024].

Az Európai Unió szinte minden országában termesztene kukoricát, területe mintegy 8 millió hektár. Az előrejelzések alapján a kukoricatermelése 2030-ra 73 millió tonnára nő, aminek 70%-át takarmányként fogják felhasználni. Ezen kívül 23%-át ételmezési és ipari célokra, míg 7%-át bioetanol előállítására fordítják [Oláh és Popp 2018]. Legnagyobb

kukoricatermelők Franciaország, Románia, Németország, Magyarország Spanyolország és Olaszország, ahol országonként több mint 1 millió hektáron folyik a termesztése. A termésmennyiség azonban évenként eltérően alakul, átlagos kukorica-évjáratokban a hazai termésmennyiség a piacvezető országok mennyiségétől 20–30%-kal eltér [Oláh és Popp 2018]. Az évjáratok hatását jól tükrözi, hogy Magyarország az Unión belül pl. 2021-ben a 6920 ezer tonna termelésével a 4. helyet foglalta el, 2022-ben a 2765 ezer tonna termelésével a 7. helyre esett vissza. A jelentős kukoricatermelő országok, mint pl. Franciaország (-29,2%), Románia (-45,8%), Olaszország (-22,7%), Spanyolország (-21,9%) és Németország (-14,0%) termelése is nagymértékben csökkent. A termésátlag vonatkozásában is jelentősek a szélsőségek. Magyarországon az elmúlt 20 évet tekintve az országos termésátlag $6,4 \text{ t ha}^{-1}$, alsó értéke $3,4 \text{ t ha}^{-1}$, felső értéke $8,6 \text{ t ha}^{-1}$ volt [KSH 2022]. Számottevő ingadozásának egyik legnagyobb befolyásoló tényezője a klímaváltozásnak köszönhető egyre szélsőségesebb időjárási feltételek [Lobell et al. 2011, Gammans et al. 2017, Waqas et al. 2021].

Az elmúlt 13 évben részletes vizsgálatokat végeztünk a kukorica termésingadozásának időjárás okozta kedvezőtlen hatásának mérséklésére. Tanulmányoztuk az ebben kulcsfontosságú szerepet betöltő hibridválasztást, vetésidőt, öntözést és műtrágyázást, ezen belül is a nitrogén kijuttatott mennyiségét és annak alkalmazási időpontját a növény folyamatos ökofiziológiai állapotának megfigyelésével a precíziós technológia által nyújtott lehetőségek hatékony felhasználásával. Különös figyelmet fordítottunk a kukoricamag minőségének és a termesztéstechnológiai elemek összehangolására.

Összességében e kutatás eredménye alapján olyan integrált gazdálkodási stratégiák alakíthatók ki, amelyek optimista jövőképet tesznek lehetővé a gazdálkodók számára, hogy fenntartható módon alkalmazkodjanak a változó éghajlati viszonyokhoz, és egyúttal maximalizálják a kukorica szemtermését, miközben javítják a termés minőségét is. Ezek az eredmények nemcsak a gazdálkodók számára adnak új lehetőségeket, hanem a kutatások révén a tudományos közösség számára is fontos adatokat szolgáltatnak a precíziós gazdálkodás fejlesztéséhez és az éghajlatváltozás hatásainak mérséklésére.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

*„Minél távolabbra nézünk vissza a múltba,
annál messzebbre látunk a jövőben.”*
(Churchill)

2.1. A klímaváltozás hatása a kukoricatermesztésre

Jelenleg az éghajlatváltozás okozta kedvezőtlen időjárási szélsőségek, a szárazság és a vízhiány a növények növekedésének és fejlődésének, a terméshozamok és a minőség kritikus akadályai világszerte [Xu et al. 2008, Iversen és Norby 2014, Lobell et al. 2014, Avramova et al. 2015, Song et al. 2018]. A három fontos éghajlati paraméter, a hőmérséklet, a csapadék és a fény közül a hőmérséklet a növény fejlődésének az elsődleges befolyásoló tényezője [Marton et al. 2005, Girijesh et al. 2011, Hatfield és Prueger 2015].

A globális földfelszíni átlaghőmérséklet körülbelül 0,89 °C-kal (0,69–1,08) emelkedett az 1901–2012 közötti időszakban [IPCC 2013], az előrejelzések 2030-ra 1,5 °C-os hőmérséklet-emelkedést valószínűsítene [IPCC 2018]. A hőmérséklet-emelkedés a termesztési zónákat 150–250 km-rel tolja el a sarkok felé [Harnos 2008]. Várhatóan a csapadék mértéke is változik, és még nagyobb regionális eltérést mutat majd, különösen Európa déli részein várható gyakoribb és hosszabb ideig tartó száraz időszak [Trnka et al. 2014].

Magyarországon is problémát jelentenek a klímaváltozás okozta időjárási szélsőségek. Az ország évi középhőmérséklete 10–11,5 °C, az évi átlagos csapadék 500–800 mm (1991–2020), területei eloszlása jelentősen különbözik [OMSZ 2022]. Az év legmelegebb hónapja a július, átlagértéke 21,2 °C. Az éghajlati modellek eredményei alapján Magyarországon mind éves, mind évszakos szinten folytatódni fog az átlaghőmérséklet emelkedése. Évi átlagban 2050-re 1–2 °C-os, 2071–2100-ra 3–4 °C-os növekedés várható. A nyári átlaghőmérséklet-növekedés 3,5–4,5 °C, augusztusban elérheti akár a 6 °C-ot is. A csapadék mennyisége a modell szerint országosan csökkenést mutat, különösen július és augusztus hónapokban, azonban az ország északkeleti és északnyugati területein növekedés is előfordulhat [Bihari et al. 2018].

Magyarországon a kukorica effektív hőösszegigénye 1100–1400 °C, 10 °C-os bázishőmérséklettel számolva [Menyhért 1985]. A kukorica hibridek egyes fenológiai szakaszának eléréséhez meghatározott hőegység-akkumuláció szükséges [Nandini és Sridhara 2019, Ahmed és Saikia 2020]. A fenofázisok időtartama meghatározza a szárazanyag-felhalmozódás sebességét és megoszlását a különböző növényi részekben [Hao et al. 2016, Mirosavljević et al. 2018, Shrestha et al. 2018]. A növények növekedésére, fenológiai

fejlődésére és a betakarítás időpontjának becslésére széles körben alkalmazzák a hőmérséklet-alapú GDD, HTU, PTU és HYTU agrometeorológiai indexeket [Rajput et al. 1987, Wurr et al. 2002, Roy et al. 2005]. Ezen indexek azon az elgondoláson alapulnak, hogy a fenológiai fejlődés üteme lineárisan viszonyul a hőmérséklethez az alaphőmérséklet és az optimális hőmérséklet közötti tartományban [Monteith 1981].

A hőstressz az egyik legsúlyosabb környezeti terhelés [Seleiman et al. 2021, Sheoran et al. 2022], amely jelentős mértékű károsodást okoz a növényben és a termés mennyiségében [Gombos és Nagy 2019], különösen, ha jelentős csapadékhiánnyal párosul [Cairns et al. 2013]. A magas hőmérséklet felgyorsítja a fejlődési sebességet, ami rövidebb vegetatív és reprodukciós fázisokat eredményez [Hatfield et al. 2011, Lizaso et al. 2018]. A kukoricanövények érzékenyek a hőstresszre ($>30\text{ }^{\circ}\text{C}$), a hőstressz gátolja a csírázást, a víz- és tápanyagfelvételt [Siebert et al. 2014], ezáltal a növekedést és a fejlődést [Zhang és Zhou 2019, Li et al. 2020, Ahmad et al. 2022]. $25\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletnél az egyöntetű kelés 4–7 nap elteltével következik be. Ettől az értéktől alacsonyabb és magasabb hőmérséklet lassítja a csírázási folyamatot [Silva-Neta et al. 2015]. A virágzás fenofázisában, a rövidebb vagy hosszabb hőstressz anyagcserezavart okoz, különösen a fotoszintézisben [Xu et al. 2011, Song et al. 2014], amely visszafordíthatatlan terméscsökkenéshez vezet [Sánchez et al. 2014, Shim et al. 2017], továbbá negatívan befolyásolja a bibeszálak számát és a szemek fejlődését [Edreira et al. 2011]. A reprodukciós fázisban a hőstressz a bibeszálak kiszáradását, a pollenek sterilitását és rossz szemtelítődést okoz [Sánchez et al. 2014]. A $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ feletti nappali hőmérséklet hatására csökken a szemszám és a szemtömeg [Neiff et al. 2016], ami 31%-os terméscsökkenést jelent [Yang et al. 2017]. A szemtelítődési fázisban korlátozza a keményítő felhalmozódását, így rontja a szemek minőségét [Lu et al. 2014].

Az alacsony hőmérséklet negatívan befolyásolja a csírázást, csökkenti a csírázási sebességet [Chen et al. 2012, Khaeim et al. 2022], a gyökerek morfológiáját [Hund et al. 2007], a növények növekedését, a levél területét, és a növény korai szakaszában a levelek deformálódását [Santos et al. 2019] okozza. Az alacsony hőmérsékleti stressz csökkenti a klorofillszintézist, felgyorsítja a klorofill bomlását, gátolja a fotoszintetikus aktivitást [Allen és Ort 2001, Hörtensteiner és Kräutler 2011, Gong et al. 2014, Li et al. 2018]. A vegetatív szakaszban 8–10%-os, a reprodukciós szakaszban 18%-os klorofilltartalom csökkenést okoz [Mansouri-Far et al. 2010, Romano et al. 2011]. A V6 és V9 fenofázis között 7 napig tartó $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti hőmérséklet jelentősen késlelteti a virágzás beindulását [Hayashi 2016]. Csökken a pollen életképessége

[Kumar et al. 2015], a bibe fogékonysága és a megporzás eredményessége [Moriondo et al. 2011]. Kevesebb a csővön lévő szemszám, ami hozamvesztést okoz [Hatfield et al. 2011, Lizaso et al. 2018, Waqas et al. 2021]. Lobell és Field [2007] 8,3%-os termés csökkenést mutatott ki. Megváltoztatja továbbá a genetikai tulajdonságokat [Bhat et al. 2020], ami szintén termés csökkenést okoz [Grant et al. 1989, Ahmad et al. 2016, Zhu et al. 2018, Mimić et al. 2020, Salgado-Aguilar et al. 2020, Krell et al. 2021]. Az alacsony hőstressz jelentősen csökkenti a kukorica termésstabilitását [Waqas et al. 2017].

A klímaváltozás hatással van a talajra, emelkedik a talajhőmérséklet és tendenciájában erősebb, mint a léghőmérséklet [Zhang et al. 2001, Qian et al. 2011, Yeşilirmak 2014]. Vetéskor a magágy hőmérséklete és nedvességi állapota a talaj legfelső 5 cm-es rétegében serkentheti vagy késleltetheti a kukorica kelését [Kaspar et al. 1990]. A csírázás már alacsony talajhőmérsékleten, 6 °C-on is megindulhat, azonban a folyamat nagyon lassú és a csírázási erély nagymértékben csökken [Miedema 1982, Nagy 2008]. Amennyiben a talajhőmérséklet 10 °C alatti, a kicsírázott mag 14, -2 °C-nál 5, és -4 °C-nál 4 óráig életképes [Modi és Asanzi 2008]. A talajhőmérséklet 1 °C-os változása nagymértékben befolyásolja a növény fejlődését [Barlow et al. 1977, Stone et al. 1999]. A gyökérzóna alacsony hőmérséklete (9 °C) a kukorica növekedését stagnálja [Mozafar et al. 1993], gátolja a levélfelület növekedését [Thiagarajah és Hunt 1982], a virágzást [Cutforth és Shaykewich 1989, Hayhoe és Dwyer 1990, Hayhoe et al. 1996], és a fiziológiai érettséget [Daynard 1972, Afuakwa et al. 1984, Cutforth és Shaykewich 1990, Akman 2009].

A hőmérséklet-emelkedés mellett hosszabbodtak a csapadék nélküli időszakok és növekedett a gyakoriságuk [Lakatos et al. 2011, Jongman et al. 2012, Georgakakos et al. 2014, Szemerits et al. 2023], valamint egyre nő a túlzott csapadékmennyiség okozta belvízi veszélyeztetettség [Lehner et al. 2006, Taylor et al. 2013, Jolánkai et al. 2022]. A kukorica termését leginkább a csapadék tenyészidőszakon belüli mennyisége és eloszlása határozza meg [Monteith 1991, Huang et al. 2015]. A növény vízigénye Magyarországon jelentősen meghaladja a tenyészidőszakban lehullott csapadékmennyiséget, a kukorica fő termőterületein a vízhiány akár elérheti a 200 mm-t is, míg a Dunántúl délnyugati részén kevesebb hiánnyal lehet számolni (40–80 mm) [Nagy 2007].

A kukorica termésvesztése a szárazságstressz intenzitásától, időtartamától, a növény fejlődési fázisától és a genetikailag meghatározott stressztűrésétől függően 30–90% között változhat [Rizhsky et al. 2002, Bartels és Sunkar 2005, Sah et al. 2020]. A vízstressz gátolja a

gyökerek vízellátását, a tápanyagfelvételt, negatív hatást gyakorol a kukorica fenológiájára, növekedésére [Lobell et al. 2015], növeli a meddő tövek számát [Csathó et al. 1991], jelentősen csökkenti a növénymagasságot, a levélfelületet [Laskari et al. 2022], a szárátmérőt [Khan et al. 2015, Chukwudi et al. 2021], az egy csövön lévő szemek számát, a magméretet [Smith et al. 2004] és az ezermagtömeget [Csathó et al. 1991]. Csökkenti a szárazanyag-beépülés sebességét és időtartamát [Quattar et al. 1987], illetve a termést [Hütsch et al. 2015, Jung et al. 2017], továbbá rontja a minőséget [Abaza et al. 2023]. Legnagyobb károsodást a virágzási és szentelítődési szakaszokban okozza [Barron et al. 2003, Barnabás et al. 2008], ezen időszak alatti szárazságstressz akár 20–50%-os termésvesztést is előidézhet [Sah et al. 2020]. A szárazság- és hőstressz együttes fellépésekor a stresszhatás fokozottan jelentkezhet, jóval nagyobb kárt okozva.

Nemzetközi és hazai kutatók szoros kapcsolatot állapítottak meg a csapadékmennyiség és annak eloszlása, a növények tápanyag-ellátottsága és a termés között [Andresen et al. 2001, Tilman et al. 2002, Tollenaar és Lee 2002, Hu és Buyanovsky 2003, Wilhelm és Wortmann 2004, Marton et al. 2007, Rácz és Nagy 2011, Jolánkai et al. 2013, Széles et al. 2013].

Az éghajlatváltozás globális bibliográfiai átfogó elemzése a kukoricatermesztés tekintetében érdekes eredményeket tárt fel: 1–4 °C-os hőmérséklet-emelkedés a melegebb területeken 5–14%-os, míg a hűvösebb, hidegebb területeken kevesebb, mint 5%-os hozamcsökkenést okoz. A csapadék mennyiségének csökkenése 25–32%-kal csökkenteni fogja a termést 2030 és 2099 között [Ocwia et al. 2023].

A klímaváltozás okozta szélsőséges időjárás láthatóan és érzékelhetően mindenhol veszteségeket idéz elő a növénytermesztésben, de a mértéke eltérő lehet. A megfelelő szakértelem és a célzott technológia még a legrosszabb időjárási körülmények között is képes csökkenteni a károkat [Jolánkai et al. 2022].

2.2. Termesztéstechnológia alkalmazása a klímaváltozás mérséklésében

2.2.1. Hibridválasztás szerepe a kukoricatermesztésben

Az időjárási szélsőségek káros hatásainak elkerülése érdekében egyre fontosabbá válik a precíziós termesztéstechnológia alkalmazása, ami segíti a szélsőséges időjárási viszonyokhoz alkalmazkodó, hatékony gazdálkodást [Tamás 2001, Láng et al. 2007, Németh et al. 2007, Nagy 2017, Steward et al. 2018, Pepó et al. 2019, Harsányi et al. 2021, Nyéki és Neményi 2022, Neményi 2022].

A kukorica terméspotenciálja nagyon magas, 25 t ha^{-1} (abszolút száraz termés), ami a gabonafélék közül a legnagyobb, amely csak mesterséges környezeti feltételek mellett realizálható [Tollenaar és Lee 2002, Cassman et al. 2003]. A gyakorlatban a különböző agroökológiai feltételek mellett a termesztett kukorica terméspotenciálja kisebb vagy nagyobb mértékben csökkenhet a környezeti stresszhatások következtében. Az alapvető környezeti feltételek (fény, hőmérséklet, víz, tápelemek) hiánya, illetve többlete ugyanis stresszhelyzethez vezet, amely a kukorica növekedését és fejlődését gátolja, korlátozza a termesztését [Duvick és Cassman 1999, Evans és Fischer 1999, Lobell et al. 2009, Bruce et al. 2002, Videnović et al. 2013].

A megfelelő genotípus kiválasztásának főbb szempontjai: termőhelynek megfelelő érésidő, jó termőképesség és termésbiztonság, tőszám-sűrítettség, betegség-ellenállóság, gyors és hatékony vízleadó képesség, illetve a szemtermés végső felhasználása [Pepó 2006, Nagy 2021, Berzsenyi 2024]. Mindezek mellett a globális felmelegedés miatt egyre jobban előtérbe kerülnek az olyan módszerek alkalmazása, amelyek növelik a hibridek stressztűrő képességét az aszályal szemben [Anjum et al. 2017]. Ennek az egyik módszere a szárazságtűrő hibridek nemesítése. A szárazságstresszt jól tűrő képességgel és magas terméspotenciállal rendelkező hibridek hatékonyabb vízfelhasználásra képesek, és alkalmasak a vízhiányos állapotok kezelésére, ezáltal az éghajlatváltozás negatív hatásainak ellensúlyozására [Hoffmann et al. 2012, Cooper et al. 2014, Mubeen et al. 2020].

A tenyészidő hossza a hibridek meghatározó tulajdonsága [Marton et al. 2020, Nagy 2021], amely a termőképességgel pozitív összefüggésben van. A hosszabb tenyészidejű hibridek esetében hosszabb az asszimilációs időszak és nagyobb termőképességgel rendelkeznek [Hegyi et al. 2007, Nagy 2007, Djurović et al. 2014]. A nemesítésnek, különösen a stressztolerancia növekedésének köszönhetően vannak olyan rövid tenyészidejű hibridek, amelyek termőképessége megközelíti a hosszabb tenyészidejűek termőképességét [Tollenaar és Wu 1999, Vulchinkov et al. 2013].

Magyarország mérsékelt égöv kontinentális klíma határán helyezkedik el, ahol 20 év átlaga alapján a legeredményesebben a középérésű hibridek szerepelnek, azonban a terméstöbbségük mindössze $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ -al volt több mint a korai hibridek termése. Termésingadozás szempontjából is ez a csoport volt érzékenyebb, amely nagymértékben befolyásolja az évenkénti nyereséget. A késői hibridek termése közel azonos volt a korai hibridekkel [Nagy 2008]. A FAO 240-nél rövidebb és a FAO 500-nál hosszabb tenyészidejű hibridek termesztését Szieberth és Széll [1998] kockázatosnak tartja.

Tartamkísérletek eredményei alapján a genotípus jelentőségét Bocz [1981] 25%-ban, 25 év átlagában Győrffy [1976] 26%-ban, és 35 év átlagában Berzsényi és Győrffy [1995] 30%-ban határozták meg.

2.2.2. Vetésidő optimalizálása a kukoricatermesztésben

A kukorica vetésidőpontjának meghatározása a termesztéstechnológia kulcsfontosságú eleme és időpontjának módosítása szükséges az éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodáshoz [Wang et al. 2016]. Az optimális vetésidőpont területenként változhat az éghajlati, a talajtani viszonyok és a hibridek tenyésztése közötti különbségek miatt [Tsimbaa et al. 2013, Sorensen et al. 2000, Széles és Huzsvai 2020]. Alapvető tényező a növények fejlődése és növekedése szempontjából, valamint a legfontosabb tényező a hibridek terméspotenciáljának feltárásában [Turgut és Balci 2002].

A vetés időpontjának helyes megválasztásával elkerülhető a hideg- és hőstressz kockázata a kritikus növekedési fenofázisban [Caubel et al. 2018], és minimálisra csökkenthető a virágzás és a szemtelítődés fázisában [Tian et al. 2019].

A vetés időpontjának megváltoztatása módosítja a fotoszintézist, a növény növekedési ütemét és a fenológiai szakaszainak hosszát, ami a potenciális szemtermés és terméskomponensek változását eredményezi [Cirilo és Andrade 1994].

A kukorica csírázásához meleg talajra van szükség, számos kutató [Pásztor 1962, Győrffy et al. 1965] a kedvező talajhőmérsékletet tartósan 10–12 °C-ban határozta meg a vetés mélységében. Newmann [1982] középkötött vályogtalajon reggel 7–8 órakor 5–10 cm mélységben mért 10 °C-ot, agyagtalajokon 11–12 °C-ot, homokos talajokon 8–9 °C-ot tartja megfelelőnek a csírázáshoz. Marton et al. [1997] különbséget mutatott ki a hibridek keléskori hőküszöb értékében, ez az érték egyes hibrideknél 4 °C, míg más hibrideknél 8 °C volt.

A korai vetést befolyásolhatják a nedves talajviszonyok és a vetés idején a hűvösebb hőmérséklet, különösen a kelés során [Kimmelshue et al. 2022]. Alacsony hőmérsékleten a magok felszívják a vizet, de a gyökér- vagy hajtásnövekedés nem indul meg, ami a magok rothadásához, rossz kelési százalékhoz [Maresma et al. 2019] és alacsony termésmennyiséghez vezet [Revilla et al. 2003]. A korai vetés előnyösebb lehet, amennyiben kedvező a hőmérséklet a csírázáshoz és a keléshez, valamint megfelelő a hibridválasztás (Cold teszt) [Árendás 2000]. A nemesítési programoknak köszönhetően megjelentek a hidegtűrő képességgel és erős kezdeti fejlődéssel rendelkező hibridek. A hidegtűrő hibridek előnye, hogy korábban vethetők, ezáltal

hosszabb a vegetációs idő, a virágzás korábban lezajlik, elkerülve a nyári aszályt és hőséget, ami magasabb termést eredményez [Csepregi-Heilmann et al. 2023]. Azokat a hibrideket, amelyek jó csírázáskori hidegtűréssel rendelkeznek 10–15 nappal korábban vethetők [Sárvári 2005], nagyobb gyökértömeggel rendelkeznek, ezáltal jobb a tápanyagfelvétel, a tenyészidő hossza rövidebb és nagyobb termés realizálható [Máté 2002].

A késői vetésnél a mag 5 nap alatt kikel, ha a hőmérséklet 21–30 °C között van és a vetés mélységében a nedvesség megfelelő, azonban a kelés jelentősen elhúzódik (15 nap) 12–16 °C hőmérséklet mellett [Menyhért 1985]. A késői vetés hatással van a fotoszintézisre és késlelteti a nővirágzás időpontját [Shimono et al. 2010], a vetés 3 hetes késése esetén egy héttel késik a nővirágzás [Berzsenyi et al. 1998], továbbá befolyásolja annak intervallumát, csökkenti a napok számát a fiziológiai érést, ezáltal a termés nagyságát [Maresma et al. 2019]. A termés csökkenése mellett magasabb szemnedvességgel kell számolni különösen a késői érésű hibrideknél [Marton et al. 2011]. A késői vetésre a rövid tenyészidejű hibridek kevésbé érzékenyek [Rácz et al. 2005].

Optimális időben történő vetésnél megfelelő környezeti feltételek mellett a kelés dinamikusabb, a növényegyedek legnagyobb része a kelés kezdetétől számítva 2–3 napon belül kikel [Zagyi et al. 2024], a kelés homogén, ezáltal az állomány fejlődése egyöntetű, mely meghatározza a termés mennyiségét [Subedi és Ma 2005, Szabó et al. 2022] és minőségét [Ványiné Széles és Nagy 2012, Széles et al. 2014].

Szoros összefüggés van a vetésidő és a termés között, amelyet az évjárat nagymértékben befolyásol [Berzsenyi és Lap 2001b, 2005ab, 2008, Nagy 2009, Ványiné et al. 2010]. Száraz, aszályos évjáratban a termés az optimális vetésidőben volt a legnagyobb, míg kedvező vízellátottságú évjáratban a korai vetés eredményezett nagyobb termést [Nagy 2009]. A késői vetésekben a termés csökkenés mértéke 30–40% is lehet a korai vetésekhez viszonyítva [Berzsenyi és Lap 2001b]. A korai vetésekben 5–8%-kal kevesebb a betakarításkori szemnedvesség tartalom a késői vetéshez képest [Sárvári 2000, Gajdos et al. 2013], és a szárítási költségek is kisebbek [Sárvári 2014].

A magasabb szem- és biomassa-hozam elérése érdekében a termesztéstechnológia kritikus eleme az optimális időben történő vetés. Az optimális vetésidő meghatározásakor eltérő következtetésekre jutottak a kutatók, ugyanis a különböző régiókban végzett agronómiai kísérleteket nem lehet térben és időben reprodukálni, mivel a klimatikus és a talajtényezők eltérnek [Sorensen et al. 2000]. A szimulációs növénytermesztési modellek alkalmazásának

nagy jelentősége van a környezeti stresszhatások (magas hőmérséklet, szárazságstressz) és a kukorica vetésidejének meghatározásában, növekedésének és fejlődésének, valamint a termés előrejelzésének pontos értékelésében [Wilkins és Singh 2001, Huzsvai és Rajkai 2009, Tao és Zhang 2010, Fodor 2012, Dobor et al. 2016, Wang et al. 2018, Lamichhane és Soltani 2020, Széles és Huzsvai 2020].

A kukorica és az őszi búza optimális vetési időpontjának becslésére 4M termésmodellt alkalmaztak, amelynek eredményeként megállapították, hogy a klímaváltozás következtében a jövőben (2071–2100 időszak) a kukorica vetési ideje körülbelül 12 nappal korábban, míg az őszi búza vetése körülbelül 17 nappal később várható [Dobor et al. 2016].

2.2.3. Öntözés szerepe és hatása a kukoricatermesztésben

A kukorica vízigénye – hibridek genetikai tulajdonságaitól és egyéb abiotikus tényezőktől függően – igen magas, 460–600 mm [Fageria et al. 1991, Bocz et al. 1992, Berzsenyi 2012, Szász 2000]. A vízigény a tenyészidőszak alatt változik, a korai vegetatív fázisban aránylag kicsi [Çakir 2004], a legkritikusabb időszak a címerhányástól a szemtelítődési időszak közepéig tart [Nielsen et al. 2010, Megyes et al. 2000, Pepó 2014, Rudnick et al. 2017, Zhang et al. 2019], ekkor a napi vízfogyasztása $4,5\text{--}5,5\text{ mm ha}^{-1}$ ($45\text{--}55\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$) [Szalóki 1989, Bocz 1992, Futó et al. 2018], Pepó [2014] $4\text{--}6\text{ mm ha}^{-1}$ között határozta meg a napi vízigényt, ami a szemtelítődést követően csökken.

A növény vízellátását meghatározza a talaj- és levegőhőmérséklet közötti különbség és a talaj szellőzőtsége. Magas léghőmérsékleten a növény vízellátása nem megfelelő, mivel több víz távozik a levelekből, mint amit a gyökerek a hideg talajból pótolni tudnak [Huzsvai 2002, Huzsvai et al. 2004].

Elégtelen természetes vízellátottság esetén lényeges elem az öntözés, amely aszály esetén a növényállomány életébe történő leghatékonyabb beavatkozás, és általa elérhető a kiegyenlített vízellátás [Wienhold et al. 1995, Márton 2005, Bharati et al. 2007, Kumar 2008, Sheldon et al. 2023]. Öntözés hatására a gyökérzet mélyebbre hatol, ezzel megnő az aktív felszívó felület [Hu et al. 2008, Wasson et al. 2012]. Az öntözés a levélhőmérséklet szabályozásának fontos módja [Sadok et al. 2021], növeli az asszimilációs felület nagyságát, az asszimilációs tevékenység időtartamát és a levelek produktivitását [Huzsvai 2002, Li et al. 2020, Spitkó et al. 2022], a termés mennyiségét [Boyer et al. 2014], és javítható a termésstabilitás [Yang et al. 2023].

Az öntözővíz mennyiségének növekedésével a kukorica termés hozama lineárisan nő egy bizonyos tartományon belül [Wang et al. 2021], azonban a túlzott öntözés vízpazarlás, és nem

csak nem növeli a kukorica termését [Ványiné Széles et al. 2012, Yan et al. 2021, Dou et al. 2022], hanem növeli a talaj sótartalmát, továbbá a talajban oxigénhiányt okozva gátolja a növények növekedését azáltal, hogy befolyásolja a fotoszintézist, a sztóma vezetőképességet és a gyökerek légzését [Terazawa et al. 1992]. Csökkenti továbbá a gyökér víz- és tápanyagfelvételi képességét, csökken a gyökéraktivitás, ami tápanyaghiányt eredményez a növényekben [Bradford és Hsiao 1982, Steffens et al. 2005], és a N-tartalom jelentős csökkenése miatt a levelek elsárgulnak [Habibzadeh et al. 2013], illetve nitrát (NO_3^-) formában történő kimosódást is okoz [Siyal et al. 2012]. Mind a túlzott, mind a nem megfelelő öntözés jelentősen csökkentheti a jövedelmezőség lehetőségét [Nafziger 2016].

2.2.4. N-műtrágyázás hatása a kukoricatermesztésre

A kukoricatermesztés kritikus termesztéstechnológiai eleme a kiegyensúlyozott tápanyagellátás [Csajbók et al. 2005, Micskei et al. 2012, Ványiné Széles et al. 2012, Sárvári és Pepó 2014, Pepó és Karancsi 2017], különös tekintettel a N-ellátásra [Sucunza et al. 2018, Rhezali és Aissaoui 2021, Cassman és Dobermann, 2022], mivel ez a növényi biokémiai és élettani folyamatok alapvető eleme [Leghari et al. 2016, Kalaji et al. 2017, Zhao et al. 2018, Veres et al. 2019, Anas et al. 2020, Liang et al. 2020].

A nitrogén-kijuttatás adagjának és arányának nem megfelelő optimalizálása azonban számos problémát okoz a termesztésben [Chen et al. 2021], lassítja a növekedés ütemét, csökkenti a szemtermést és növeli a nitrogénvesztést, ezáltal befolyásolja a környezet minőségét [Hammad et al. 2011, Walling és Vaneckhaute 2020, Kizilgeci et al. 2021, Nosheen et al. 2021, Feroz et al. 2024].

A N felvételének mértéke a növény fejlődése során, valamint az évek és a termőhelyek között igen változó [Gastal és Lemaire 2002]. A nitrogénfelvétel a kukorica csírázásakor a legkisebb, 6–7 leveles kortól intenzívebb és a legnagyobb értéket a virágzás időszakában éri el. A szentelítődés során is jelentős a nitrogénfelvétel és -beépülés [Győrffy et al. 1965, Blackmer és Schepers 1996, Abendroth et al. 2011]. A N elérhetősége befolyásolja a vetőmag csírázását, a növények növekedését, a gyökér- és levélfunkciókat és a termés mennyiséget [Muratore et al. 2021].

A megfelelő mennyiségű N-műtrágya és a kellő időben történő kijuttatása elősegíti és növeli a kedvező földalatti fitotömeg-produkciót, a növénymagasságot [Nagy 1978, Anda 1987], a szárátmérőt [Ullah et al. 2015, Poorebrahimi et al. 2018], az asszimilációs felületet [Anda 1987], a kedvező harvest index értéket [Berzsenyi 1988, 1996, Hunt és Parsons 1974] és a

termésképző komponensek mennyiségét [Nagy 1978, Karancsi 2013], ezáltal a szemtermés növekedését [Torbert et al. 2001, Hejazi és Soleymani 2014, Bojtor et al. 2021].

A nitrogénhiány a növények alacsony növekedését eredményezi, ami csökkenti a fotoszintézis sebességét [Tóth et al. 2002], a levelek keskenyebbek, ami a sugárzás elnyelésének és annak hasznosulásának (fotoszintézis) veszteségét eredményezi [Bavec és Bavec 2002], ezáltal csökkenti a levélterület-indexet [Berzsenyi 1988, 1993, Micskei et al. 2009], továbbá kisebb a növényben a szárazanyag-akkumuláció, lassú a szárazanyag-felhalmozódás dinamikája [Hanway és Russel 1969, Berzsenyi 1993, Dobos és Nagy 1998] és csökken a szemtermés. A túlzott mennyiség alkalmazása azonban pazarló, túlságosan nagy vegetatív növekedést eredményez, késlelteti a fiziológiai érést, a növények érzékenyebbek a betegségekre és a rovarkártevőkre, nem javítja a NUE-t [Khan et al. 2014], növeli a költségeket [Széles et al. 2019], rontja a vízháztartást és a minőséget [Nazir et al. 2016]. A kijuttatott mennyiségnek mindössze 40–50%-át veszi fel a növény [Kronzucker et al. 2000, Coskun et al. 2017], a fennmaradó mennyiség nagy része nitrogéntartalmú üvegházhatású gázok formájában a légkörbe kerülhet, kimosódhat, és a felszíni és felszín alatti vizekbe kerülve nitrátszennyezést okozhat [Gastal és Lemaire 2002, Wang et al. 2019].

2.2.5. N-műtrágyázás, az öntözés és a környezeti tényezők hatása a kukoricatermesztésre

A talajban a tápanyag- és a vízfelvétel egymástól független folyamatok, mégis elválaszthatatlanul összefüggenek, kölcsönhatásban állnak egymással. A két tényező kombinációjától és egyensúlyától függően pozitív vagy negatív hatást gyakorolnak a növény növekedésére és fejlődésére [Frank 1969, Márton 1969, Viets 1972, Bocz és Nagy 1981, Szlovák, 1986], meghatározzák a biomassa és a termés mennyiségét [Di Paolo és Rinaldi 2008, Sandhu et al. 2019, Swift et al. 2019].

A növény számára a N elérhetősége kulcsfontosságú tényező, felvételét, illetve felvehetőségét és érvényesülését az éghajlati viszonyok nagymértékben befolyásolják [Bocz 1976, Láng et al. 1983, Nagy 1995, 1988, Szász 1988, Ruzsányi és Pető 1993, Hall et al. 1994, Bragagnolo et al. 2013, Jolánkai 2014]. A felmelegedett talaj biztosítja az intenzívebb tápanyagoldódást, a nagyobb talajoldat tápanyag-koncentrációt, a gyökéren keresztül történő jobb tápanyagfelvételt. A növények számára az elérhetőséget nagymértékben a talajban elérhető víz mennyisége szabályozza [Plett et al. 2020]. A nem megfelelő talajnedvesség korlátozza a N elérhetőségét [Gonzalez-Dugo et al. 2010], a tápanyagszállítást és gátolja a

tápanyagfelvételt, ami a tápanyag hasznosulásának csökkenéséhez vezet, mivel a levegő helyettesíti a vizet a talaj pórusaiban [Cregger et al. 2015].

Függetlenül attól, hogy csapadékos vagy száraz év volt, megbízható volt a különbség minden évben a nem műtrágyázott kezelések és a 120 kg N ha⁻¹ műtrágyázott kezelések kukoricatermése között, amely 20 év átlagában 5 t ha⁻¹ volt [Nagy 2017]. Az évjárat hatása 40% az extenzív technológia alkalmazása esetén, azonban az ökológiai negatív hatásokat intenzív technológia alkalmazásával jelentősen mérsékelni lehet [Pepó et al. 2019].

Az öntözés mennyisége és a műtrágyázási arány befolyásolja a levélterület-indexet, a föld feletti biomassza-mennyiséget, a szemtermés nagyságát és kémiai összetételét [Győri 1987, Győri és Sipos 2005, Pepó et al. 2016, Kaplan et al. 2017], illetve a növények és a magok nitrogén felhalmozódását [Yan et al. 2021]. A két tényező kölcsönhatása a termésnövelő hatásán túl csökkenti az évenkénti termésingadozást és mérsékli a termesztés kockázatát [Pandey et al. 2000, Zwart és Bastiaanssen 2004, Nagy 2021], biztosítja a kukoricatermés stabilitását az évek során, átlagosan körülbelül 25%-kal, száraz évszakban pedig több mint 80%-kal növeli a termést [Żarski és Kuśmierk-Tomaszewska 2023]. A túlzott mértékű műtrágyázás nagy mennyiségű öntözéssel a magas kukorica hozam elérése érdekében alacsony víz- és műtrágyafelhasználási hatékonyságot okoz [Guo et al. 2022, Wang et al. 2023]. Számos kutató által megállapítást nyert, hogy az optimális vízellátáshoz közeledve a trágyahatás nő, majd a káros víztöbbletet elérve jelentősen csökken [Szász 1972, Harmati 1987, Ruzsányi 1992, Cameron et al. 2013].

A debreceni tartamkísérletek eredményei az agrotechnikai tényezők: a trágyázás 48, az öntözés 28, a talajművelés 18 és a növényszám 6%-ban való részesedését igazolták [Nagy 1997].

2.2.6. N-műtrágyázás, az öntözés és a környezeti tényezők hatása a kukorica minőségére

A kukorica fő összetevői a keményítő, a fehérje és az olaj. Az érett kukorica magban 60–72% keményítő, 9–12% fehérje, 4–6% olaj, 3–3,5% nyersrost és 1,5–2,0% hamuanyag található [Móroczné Salamon 2004, Jahangirlou et al. 2021, Kovács 2021]. A keményítő és a fehérje nagyrészt az endospermiumban raktározódik (a szemtömeg kb. 90%-a), míg az olaj túlnyomórészt az embrióban (a szem tömegének kb. 10%-a) [Flint-Garcia et al. 2009]. A kukoricafehérjét nagyrészt zein alkotja (40–50%), a zein azonban kis mennyiségben tartalmaz lizint és triptofánt [Menyhért 1985]. A kukorica csírájából kiváló minőségű étkezési olaj nyerhető.

A produktívabb és még biztonságosabb termesztés érdekében a kukorica hibridek nemesítésénél a jó minőség háttérbe szorult, ez a hibridek tápláló értékének fokozatos csökkenését eredményezte, különösen a fehérje- és az olajtartalom csökkenése miatt [Uribe-larrea et al. 2004, Zhang et al. 2008], az új generációs kukorica hibridek olajtartalma azonban már meghaladja a 8%-ot [Barrera-Arellano et al. 2019, Katral et al. 2024].

A kukoricamag fehérjetartalma elsősorban a genetikai tulajdonságoktól függ, azonban meghatározzák az éghajlati tényezők [Izsáki 2007, Hegyi et al. 2008, Hegyi és Berzy 2009, Izsáki 2009, Baenziger et al. 2001, Széles et al. 2018, Butts-Wilmsmeyer et al. 2019]. A magas hőmérséklet és a tenyészidőszak alatti korlátozott csapadékmennyiség megváltoztatja a kukoricaszem fehérje-, olaj- és keményítőtartalmát [Josipović et al. 2010]. A szemtelítődés ideje alatt (R1-től R3-ig) a magas hőmérséklet megváltoztatja a fehérjék kémiai szerkezetét [Monjardino et al. 2005, Rahman 2005, Ristic et al. 2009], így a szemek minősége kifogásolható [Lu et al. 2014, Siebers et al. 2017, Waqa et al. 2021]. A fehérjetartalmat elsősorban a hőegység, a júniusi, júliusi és augusztusi csapadékmennyiség és -megoszlás befolyásolja [Asghari és Hanson 1984]. A késői reprodukzív szakaszban a 15 °C alatti hőmérséklet bizonytalanná teszi az asszimilációs folyamatot, ami a nem megfelelő minőségű összetevők és a rossz fizikai szemcseszerkezet miatt a szem minőségének romlását eredményezi [Yan et al. 2015].

A súlyos vízstressz, a virágzás és a szemtelítődés időszakában csökkenti a keményítő-, de növeli a fehérjekoncentrációt [Da Ge et al. 2010], de olajkoncentrációban jelentős változást nem mutatott [Barutçular et al. 2016], míg Kaplan et al. [2017] olajtartalom-csökkenést mutatott ki. A késői vegetatív szakaszban jelentkező vízstressz növelte a mag olajkoncentrációját [Ali et al. 2010] a stresszmentes állapotokhoz viszonyítva.

A kukorica magminősége kedvezően befolyásolható a termőhely, a hibrid és technológia választásával [Marton et al. 2008, Aguirrezábal et al. 2015, Correndo et al. 2021, Hammad et al. 2023], és mindezek kölcsönhatása különböző minőségi tulajdonságokkal rendelkező magokat eredményeznek, amelyek sokféle felhasználásra alkalmasak [Jahangirlou et al. 2022]. Az agrotechnikai tényezők közül a szemminőséget leginkább befolyásoló tényező a vetésidő [Abdala et al. 2018], a tápanyag-ellátottság [Miao et al. 2006, Cirilo et al. 2011, Ványiné Széles és Nagy 2012] és az öntözés [Sadras 2005]. A hatékony tápanyagellátás – különös tekintettel a nitrogénre – növeli a kukoricaszemek fehérjetartalmát [Breteler 1976, Pierre et al. 1977, Da Silva et al. 2005, Hasaneen et al. 2009, Hegyi et al. 2007, Wang et al. 2008, Izsáki 2009, Radulov et al. 2010, Holou és Kindomihou 2011, Árendás et al. 2014, Sebetha et al. 2015] és a

szem fehérjekoncentrációját [Babnik et al. 2002, Liu et al. 2021], de az alacsony nitrogénellátottság csökkenti azt [Tsai et al. 1992, Hammad et al. 2023]. A műtrágya hatással van az olajtartalomra és az olajban lévő savakra [Jellum és Widstrom 1970, Ray et al. 2019], és kismértékben csökkenti a keményítőtartalmat [Illés et al. 2020].

Az öntözés hatására magas olajtartalom alakul ki, az öntözővíz mennyiségének csökkentése és a magas nitrogénszint kombináció, jelentős keményítőtartalom-növekedést eredményez [Kaplan et al. 2019], de csökken az olajtartalom [Kresović et al. 2018].

2.3. N-műtrágya kijuttatásának ütemezése

A tápanyag-visszapótlás a jó hibridválasztás mellett a leghatékonyabb eszköze a terméspotenciál maximális kihasználásának és a termés növelésének [Pepó et al. 2006, Grassini et al. 2011, Muschietti-Piana et al. 2018]. A N-kijuttatás aránya és időzítése fontos gazdálkodási döntés a kukoricatermesztés szempontjából. A nitrogén-alaptrágyázás optimális időszaka tavaszra tehető [Timmons és Cruse 1990], nagyobb gazdasági megtérülést biztosítva, kevesebb nitrogénveszteséggel [Vetsch és Randall 2004, Davies et al. 2020], azonban a vetés előtt nagy adagban kijuttatott N-hatóanyag jelentős része elillanhat, esetleg kimosódhat. Ennek oka, hogy a növényfejlődés korai időszakában a gyengén fejlett gyökérzet képtelen hozzáférni a talajtartalékokhoz [Alley et al. 2009]. A tavaszi alap- és fejtrágyázás alkalmazása csökkenti a nitrogénveszteséget [Tóth 2002, Kalocsai et al. 2004], növeli a nitrogénellátás hatékonyságát, javítja a tápanyagellátás gazdaságosságát, a termés nagyságát, egybevetve a termelés hatékonyságát [Csathó 2003, Muthukumar et al. 2007, Sitthaphanit et al. 2010].

Számos szerző vizsgálta a N-műtrágya kijuttatás időzítésének hatását a kukorica termésmennyiségére, azonban a kutatás egységes megállapításokat nem hozott, az eredmények gyakran helyspecifikusak. A termésmennyiség tekintetében jó stratégiának bizonyult az őszi kijuttatás mennyiségének csökkentése és fokozottabb alkalmazás a vegetatív szakaszban [Cassman et al. 2002]. A N-műtrágya közvetlen vetés előtti kijuttatása és az osztott kijuttatás között megbízható különbség nem volt kimutatható [Jaynes 2013, Rubin et al. 2015]. A N-műtrágya teljes mennyisége a V2, vagy egyenlően elosztva a V2 és V6, illetve a V12 szakasz között egységes, következetes eredményt nem hozott [Janes 2013]. Egy korábbi vizsgálat azonban azt mutatta, hogy V2 és a V16 fenofázis között kijuttatott N-mennyiség alacsonyabb termésmennyiséget eredményezett, mint a V2 szakaszban végzett egyszeri kijuttatás [Janes 2006]. A három egyenlő arányban – közvetlen vetés előtt, V6 és V14 szakaszban – kijuttatott

N-mennyiség terméseredménye között szignifikáns eltérés nem volt [Ventera és Coulter 2015]. Az osztott kijuttatással 4,5%-kal magasabb szemtermés volt elérhető az egyszeri vetés előtti kijuttatással szemben [Randall et al. 2003].

A V10-ig [Walsh et al. 2012], vagy V11-ig [Scharf et al. 2002] és a V12 fenológiai fázisig végrehajtott fejtrágyázás jó stratégia a hozamok optimalizálására és a nitrátveszteség csökkentésére, a VT [Walsh et al. 2012] és a V12 [Binder et al. 2000, Jaynes és Colvin 2006, Ruiz Diaz et al. 2008] fenofázis utáni, illetve az R1 [Scharf et al. 2002, Nasielski és Deen 2019] szakaszban kijuttatásának alkalmazása termésnövekedést okoz. Mindent egybevetve elmondható, hogy korábbi tanulmányok azt igazolták, hogy az osztott kijuttatás nem volt hatással a terméshozamra (Fernandez et al. 2020, Nasielski et al. 2020). Ugyanakkor nem lehet figyelmen kívül hagyni, hogy a N-megosztás hatását meghatározza az elővetemény és a szármaradvány-kezelés (Kismányoky 2014), valamint az időjárás és a genotípus [Széles et al. 2019, Kabir et al. 2021].

2.4. A kukoricánövény nitrogén-ellátottságának monitorozása precíziós mezőgazdasági döntéshozatali eszközökkel (SPAD, UAV NDVI és LAI)

A kukorica-szemtermés nyomon követése nagymértékben függ a kukorica levelének klorofilltartalmára vonatkozó megbízható információktól a vegetációs időszak alatt, amelyre nagy szükség van a N-műtrágyázás megfelelő, környezeti károkozás nélkül történő alkalmazásához [Tei et al. 2017, Gaj et al. 2020]. A klorofill a növény fotoszintetikus pigmentje, amely központi szerepet játszik a fényelnyelésben, az energiaátalakításban és a növényben lejátszódó szerves szintézisben [Hörtensteiner és Kräutler 2011]. Mivel a klorofilltartalom szorosan összefügg és korrelál a levél nitrogén-koncentrációjával, fontos mutatója a növények nitrogénállapotának, fejlődésének, növekedésének és szemtermésének nyomon követéséhez [Ghimire et al. 2015]. Lehetőséget biztosít továbbá a nitrogénműtrágya kijuttatásának ütemezésére és az optimális mennyiség meghatározására [Yang et al. 2018].

A precíziós mezőgazdasági (PrM) technológia alkalmazása e tekintetben elengedhetetlen különböző környezeti feltételek mellett [Neményi és Milics 2007, Hemathilake és Gunathilake 2022]. Alkalmazásával statisztikailag igazolhatóan növelhető a hozam és a jövedelem a környezetterhelés csökkentése mellett [Popp et al. 2018]. A PrM technológia speciális berendezések, érzékelő eszközök, valós idejű kinematika (RTK) és drónok (UAV) felhasználására támaszkodik a növények egészségi állapotára, a klorofillra, a nitrogénre és a talaj nedvességtartalmára vonatkozó valós idejű megfigyelések eléréséhez [Zhang et al. 2002]. Az optikai érzékelő eszközök, mint például a klorofill (SPAD) mérő költséghatékony és

roncsolásmentes, kézi PrM technológia, amelyet a növény *in situ* trágyázásának vagy N-állapotának nyomon követésére használnak, hogy segítsék a szemtermés előrejelzésének javítását [Sárdi et al. 2015, Khoddamzadeh és Dunn 2016]. A SPAD-502 klorofillmérő a levelek sugárzás elnyelésén alapul a vörös (R) (650 nm) és a közeli infravörös (NIR) (940 nm) tartományban. A 650 vagy vörös hullámhossz a levél klorofilltartalmával korrelál, míg a 940 vagy NIR a levél nedvességtartalmának és a növény vastagságának részleteit adja meg [Blackmer és Schepers 1995]. Korábban különböző tanulmányokban PrM eszközként használták a hatékonyabb irányítás és a szemtermés javítása érdekében [Zheng et al. 2015]. A műszerrel mért relatív klorofilltartalom értékek levélszinten szorosan kapcsolódnak a levél N-értékéhez és a teljes klorofillkoncentrációhoz a különböző fejlődési szakaszokban, amit számos kutató megerősített, többek között Berzsényi és Lap [2001a], Ványiné Széles et al. [2012], Rhezali és Aissaoui [2021]. A pilóta nélküli légi jármű (UAV) alapú multispektrális távérzékelési technológia fejlettebb PrM technológia, amelyet széles körben használnak a fenofázis információk kinyerésére, a SPAD előrejelzésére, a karotinoidok és a levélfelület index (LAI) becslésére [Liu et al. 2016, Zarco-Tejada et al. 2016]. A LAI roncsolásmentes monitorozására azonban gyakran indirekt módszereket alkalmaznak, erre példa a Sunscan lombkorona-analizátor [Oguntunde et al. 2012, Wilhelm et al. 2000]. A levélterület-index (LAI) a lombkorona kulcsfontosságú paramétere [Gower et al. 2019] a növény növekedésének és élettani fejlődésének [Brisco et al. 1998], tükrözi a termésnövekedést és jelzi a potenciális terméshozamot [Aboelghar et al. 2011, Sun et al. 2023]. A LAI pontos és gyors becslése a modellezésben, a hagyományos és a precíziós mezőgazdaságban való alkalmazásához is hozzájárul [Nie et al. 2016]. A LAI-t különböző stresszhatások, környezeti és technológiai feltételek: a genotípus [Menyhért et al. 1980], a növényszám [Berzsényi 1989], különösen a víz- és műtrágya-stressz mértéke [Bencze és Futó 2016, Mahama és Dóka 2017, Cheng et al. 2022], nagymértékben módosítják [Mänd et al. 2010]. A növény precíz víz- és műtrágya kezelésének értékeléséhez a LAI monitorozása nélkülözhetetlen [Irmak et al. 2022, Jiang et al. 2022, Qiao et al. 2022].

Az UAV-k optikai és termikus infravörös szenzorai azonban számos vegetációs indexet képesek levezetni, mint például a normalizált vegetációs index (NDVI), a normalizált vöröshatár index (NDRE), amelyet a biomassza, a klorofill és a nitrogéntartalom becslésére, valamint a termések előrejelzésére használnak nagy térbeli felbontásban [Deng et al. 2018, Spitkó et al. 2022], rugalmassággal, valamint gyors és roncsolásmentes diagnosztikával [Tsouros et al. 2019, Nevavuori et al. 2020]. Ez nyereséges és költséghatékony [da Silva et al.

2020], de csak a felmérések optimális időzítésével érhető el [Latella et al. 2021]. A növények klorofill- és N-ellátottsági állapotának a PrM technológiából történő nyomon követése és mérése azonban nagymértékben függ a talaj nedvességtartalmától, amelyet a természetes csapadék és öntözés befolyásol [Irmak et al. 2022, Liu et al. 2022]. Tanulmányok bizonyították a SPAD és az UAV PrM technológia hatékony alkalmazását a gabonatermés nyomon követésére stresszes és stresszmentes környezetben [Boursianis et al. 2022, Jiang et al. 2022, Wang et al. 2022]. Erről számolt be egy európai kísérleti elrendezésben Le Bail et al. [2005] és Wang et al. [2022] tanulmánya is.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

*„Fontos, hogy mindent mérjünk, ami mérhető,
és megpróbáljuk mérhetővé tenni, ami még nem az.”
(Galilei)*

3.1. A kísérleti tér elhelyezkedése, talajadottsága

A kutatást a Debreceni Egyetem Látóképi Kísérleti Telepén (47° 33' É, 21° 26' K, 111 m tengerszint feletti magasság) végeztük. A kutatás alapját a Vetésidő kísérlet (2007–) és a N-alap- és fejtrágyázás kísérlet (2011–) biztosította.

A kísérlet talaját magas agyagos vályogtartalommal (42%), humuszos réteggel (80–100 cm) és közepes tömörséggel lehet jellemezni, és az alföldi mészlepedékes csernozjom (Mollisol-Calciustoll vagy Vermustoll, USDA) közé sorolható. A talaj átlagos pH_{KCl} értéke 6,6; nitrogénnel való ellátottsága közepes (humusztartalom: 2,6%, összes N = 0,14–0,18%). A talaj a felső 80 cm-es rétegben meszes, de 100 cm-től mérsékelten meszes (12%). A talaj eredeti AL-oldható P_2O_5 tartalma 130 mg/kg, AL-oldható K_2O tartalma 240 mg/kg. A tartamkísérletben termesztett növények vízellátása szempontjából mértékadó talajszelvényben (0–2 m) a talaj mintegy 600–700 mm vizet képes megtartani, tárolni, amelynek kb. 65%-a a diszponibilis víz mennyisége. A kísérleti területen a talajvíz átlagos mélysége 3–5 m [Pepó és Csajbók 2014].

3.2. A kísérleti tér klimatikus jellemzői

A Debrecen-Látóképen folyó kísérletek időjárási viszonyainak értékelését a Debreceni Egyetem Agrometeorológiai és Agroökológiai Monitoring Központ (2019-ig), illetve a Földhasznosítási, Műszaki és Precíziós Technológiai Intézet (2019-től) által működtetett, közvetlenül a kísérleti parcellák mellett elhelyezett automata meteorológiai állomás hőmérséklet és csapadék adatainak alapján végeztük el. Az eredetileg 10 perces felbontású adatbázisból meghatározásra kerültek az elemzéshez jobban használható napi, dekád, valamint havi átlagok, illetve összegek. A sokévi átlagtól való eltérések vizsgálatához a HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. (jogelőd: Országos Meteorológiai Szolgálat) Debrecen-Repülőtér állomásának 30 éves (1981–2010) éghajlati adatait használtuk. A talajhőmérséklet 5 db HOB0 UA-002 Pendant hőmérsékleti adatgyűjtővel végeztük. A mérőeszközök március végén 5 cm mélységbe kerültek elhelyezésre. A vegetációs időszak meteorológiai jellemzőit a 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. A tenyészidőszak (április-szeptember) meteorológiai jellemzői (Debrecen 2011–2023)

Hónapok	Havi csapadékadatok, mm												
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Április	15	21	47	39	23	16	51	37	39	17	27	54	48
Május	54	72	75	69	52	68	27	60	104	45	64	10	33
Június	23	93	32	8	57	146	67	61	47	119	10	19	82
Július	175	65	17	126	34	87	73	42	116	188	30	21	46
Augusztus	44	4	33	45	84	72	61	97	14	70	32	28	86
Szeptember	6	23	47	97	49	64	76	21	46	44	19	162	41
Hónapok	Havi középhőmérséklet, °C												
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Április	12,9	12,3	12,6	12,4	11,1	13,3	10,7	16,0	12,4	10,8	8,2	9,0	9,3
Május	16,8	17,1	17,7	15,3	16,7	16,4	17,1	19,7	14,0	14,0	14,5	17,6	16,4
Június	21,0	21,1	20,4	19,2	20,4	21,1	22,2	20,2	22,8	19,6	22,1	22,2	19,5
Július	21,4	23,8	22,0	21,2	23,1	22,3	22,3	21,6	21,0	20,9	23,9	23,4	22,5
Augusztus	22,3	23,0	22,4	20,0	24,1	20,8	23,3	23,2	23,0	22,6	20,5	23,5	22,7
Szeptember	19,1	19,1	14,7	16,7	18,5	17,6	16,4	17,1	17,1	17,9	16,2	15,3	20,0
Hónapok	Hőségnapok száma ¹ , db												
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Április		2	1										
Május		5	3			2	2	2					
Június	9	7	10	3	8	7	12	3	12	5	10	9	3
Július	11	17	14	5	15	14	13	4	6	8	19	17	11
Augusztus	11	17	13	8	21	10	19	19	18	12	9	18	17
Szeptember	7	6			7	5	2	3	2	2		1	3
Hónapok	Csapadékos napok száma, db												
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Április	5	6	10	11	3	10	16	8	12	3	13	14	11
Május	9	10	11	16	13	12	12	7	20	10	13	3	9
Június	11	14	7	6	9	16	11	14	8	15	8	5	10
Július	16	8	2	12	8	12	13	12	8	12	10	9	11
Augusztus	4	2	4	9	5	10	7	5	5	5	12	8	10
Szeptember	2	3	9	11	7	9	17	5	12	5	6	21	9

Megjegyzés: ¹Napi maximum hőmérséklet ≥ 30 °C.

A különböző agrometeorológiai indexek, a Növekedési foknap (GDD), a Fototermikus egység (PTU), Heliotermikus egység (HTU) és a Hidrotermikus egység (HYTU) az alábbi képlet alapján kerültek kiszámításra:

Növekedési foknap (GDD)

$$GDD = \sum \left(\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} - T_b \right)$$

ahol, $T_{\max}$ (°C) a napi maximum hőmérséklet, $T_{\min}$ (°C) a napi minimum hőmérséklet, T_b (°C) a bázishőmérséklet. A bázishőmérsékletnél kisebb napi középhőmérséklet esetén, azaz ha $\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} < T_b$, akkor $\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} = T_b$ értékkel számoltunk, így a termikus hőegység adott

napi értéke 0 [McMaster és Wilhelm 1997]. A T_b azt a hőmérsékletet jelenti, amely alatt a fejlődési ütem 0-nak tekinthető. A szakirodalmi adatokhoz igazodva a hőösszege számítását $T_b=10$ °C értékkel végeztük [Davidson és Campbell 1983, Gallagher 1979].

Fototermikus egység (PTU)

$$PTU = \sum DL \cdot \left(\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} - T_b \right)$$

ahol, DL (óra) a nappalhosszúság. A PTU napi értéke a napi hőegység és az adott nap nappalhosszúságának szorzata [McMaster és Smika 1988].

Heliotermikus egység (HTU)

$$HTU = \sum SH \cdot \left(\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} - T_b \right)$$

ahol, SH (óra) a napi napfénytartam, a HTU napi értéke a napi hőegység és az adott nap napsütéses óráinak szorzata. Közvetlen napfénytartammérés (Campbell-Stokes féle mérőeszközzel) adatai nem álltak rendelkezésre, így az Országos Meteorológiai Szolgálat debreceni állomásának globálsugárzásból számított napfénytartam adatait használtuk.

Hidrotermikus egység (HYTU)

$$HYTU = \sum RH \cdot \left(\frac{(T_{\max} + T_{\min})}{2} - T_b \right)$$

ahol, RH (%) a relatív légnedvesség napi középértéke, a HYTU napi értéke a napi hőegység és az adott nap átlagos relatív nedvességének szorzata. A relatív nedvesség napi átlagát óránkénti adatok alapján számoltuk.

Hőfelhasználás hatékonyság (HUE, kg ha⁻¹ °C⁻¹ day⁻¹) = Termés/GDD

ahol, $\sum$ GDD = kumulatív növekedési foknap [Haider et al. 2003]

Fototermikus felhasználási hatékonyság (PTUE, kg ha⁻¹ °C⁻¹ day⁻¹ hr⁻¹) = Termés/PTU

ahol, $\sum$ PTU = Fototermikus egység

Heliotermikus felhasználási hatékonyság (HTUE, kg ha⁻¹ °C⁻¹ day⁻¹ hr⁻¹) = Termés/HTU

ahol, $\sum$ HTU = Heliotermikus egység

Hidrotermikus felhasználási hatékonyság (HYTUE, kg ha⁻¹ °C⁻¹ day⁻¹ %⁻¹) = Termés/HYTU

ahol, $\sum$ HYTU = Hidrotermikus egység

3.3. A kísérletek beállítása, elrendezése és a termesztéstechnológiai eljárások ismertetése

3.3.1. Vetésidő kísérlet

A 0,25 hektáros, négyismétléses, véletlen blokk elrendezésű kis parcellás kísérlet 2007-ben került beállításra (1. ábra).

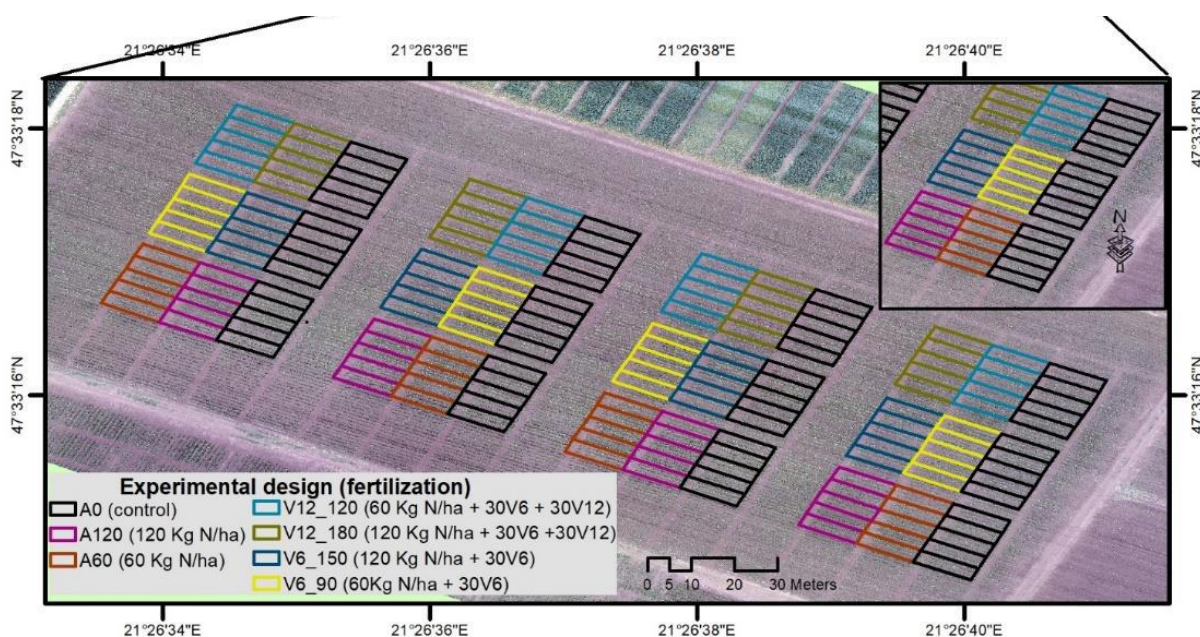


1. ábra. Vetésidő kísérlet elrendezése (Alapítás: Széles A., 2007)

A szántóföldi kísérlet minden évében korai (V1), optimális (V2) és késői (V3) vetést alkalmazunk. Az elővetemény (őszi búza) lekerülése után a területre 150 kg N ha^{-1} , $65 \text{ kg P}_2\text{O}_4 \text{ ha}^{-1}$ és $130 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ műtrágya-hatóanyag lett kijuttatva. A 34%-os ammónium-nitrát mennyiségének 50%-a őszi, 50%-a tavasszal magágykészítés előtt, a foszfor és a kálium 100%-ban a 27 cm mély, őszi szántással lett bedolgozva a talajba. Vetésmélység 5 cm volt. A növényszámot 73 ezer növény ha^{-1} -ra állítottuk be. A parcellák 4 sorosak, sortávolság: 76 cm. A 2011, 2012 és 2013 években ugyanazon igen korai (Mv 255 FAO 290), korai (Mv 350 FAO 350) és középérésű (M Koppány FAO 420) hazai nemesítésű kukorica hibrideket vontuk be az elemzésbe. A V1 vetés: 2011. 04. 06., 2012. 04. 06., 2013. 04. 04., a V2 vetés: 2011. 04. 27., 2012. 04. 19., 2013. 04. 15. és a V3 vetés: 2011. 05. 10., 2012. 05. 07. és 2013. 05. 06. A betakarítás 2011. 09. 26-án, 2012. 09. 18-án és 2013. 10. 20-án volt. A betakarított szemtermést 14%-os nedvességtartalomra számítva adtuk meg.

3.3.2. Nitrogén alap- és fejtrágyázás tartamkísérlet

A tartamkísérlet elrendezése osztott sávos (split-strip-plot), két ismétléssel. A főparcellákat minden évben öt hibriddel, osztott parcellákat öntözéssel (természetes csapadékelátottság, öntözött) és nitrogénkezelési dózissal alakítottuk ki (2. ábra). A parcellák 4 sorosak, sortávolság: 76 cm. Területe 27,6 m² (szélesség: 3 m, hossz: 9,2 m). A műtrágyázott parcellák között 1,5 m-es utak vannak. A parcellák száma: 180.



2. ábra. A nitrogén alap- és fejtrágyázás tartamkísérlet elrendezése (Alapítás: Széles A., 2011)

A kijuttatott műtrágya minden évjáratban 27%-os MAS (Genezis Pétisó) volt, azaz kémiailag NH₄NO₃ + CaMg (CO₃)₂. Pontos összetétele: 27% nitrogén (N) ammónia (NH₄) és nitrát (NO₃) formában 1:1 arányban 5% kalcium (Ca), ami kalciumoxidban kifejezve 7% CaO, 3% magnézium (Mg), ami magnéziumoxidban kifejezve 5% MgO. A műtrágya-adagokat megosztottuk alap- és fejtrágyakezelésekre. A tavaszi alaptrágyaként kijuttatott 60 és 120 kg N ha⁻¹ dózist kétszeri fejtrágyázás követte V6 és V12 fenofázisban, mennyisége +30 és +30 kg N ha⁻¹ volt. Az alkalmazott N-műtrágyakezeléseket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. Az alkalmazott N-műtrágya mennyiségek és kijuttatásának ideje

Jelölés	Kezelés
A ₀	műtrágyázás nélkül (kontroll)
A ₆₀	60 kg N ha ⁻¹ vetés előtt
A ₁₂₀	120 kg N ha ⁻¹ vetés előtt
V ₆ ₉₀	60 kg N ha ⁻¹ vetés előtt+30 kg N ha ⁻¹ V6 fenofázisban
V ₆ ₁₅₀	120 kg N ha ⁻¹ vetés előtt+30 kg N ha ⁻¹ V6 fenofázisban
V ₁₂ ₁₂₀	60 kg N ha ⁻¹ vetés előtt+30 kg N ha ⁻¹ V6 fenofázisban+30 kg N ha ⁻¹ V12 fenofázisban
V ₁₂ ₁₈₀	120 kg N ha ⁻¹ vetés előtt+30 kg N ha ⁻¹ V6 fenofázisban+30 kg N ha ⁻¹ V12 fenofázisban

A kísérlet minden évben azonos agrotechnika alkalmazása mellett folyik. A betakarítás és szárzúzás után megtörtént az aprított szár talajba keverése tarlóhántó eszközzel egy-vagy két menetben, majd alapművelésként őszi szántás követte. A vetés minden év harmadik dekádjában történt, 73 ezer növény ha^{-1} növény-sűrűséggel az időjárás függvényében, Wintersteiger függesztett szemenkénti parcellavetőgéppel. A 13 év alatt (2011–2023) összesen 26 kukorica hibridet vizsgáltunk, ezek közül a disszertációban két éréscsoportba (FAO 300 és FAO 400) tartozó 18 eltérő genotípusú hibrid került górcső alá. Két fontos talajlakó kártevő, a kukoricabogár (*Diabrotica virgifera*) és a drótféreg (*Agriotes sp.*) ellen vetéssel egy menetben Force 1,5G talajfertőtlenítő szert alkalmaztunk. A tenyészidőszakban a kukorica tökéletes posztemergens gyommentesítésére Principal® Plus Gold, illetve Laudis WG gyomirtó szert használtunk, az összes fontos egy- és kétszikű gyomnövény irtására a kukorica 3–5 leveles fenológiai állapotában. Az öntözővíz kijuttatása a Valley 8120 universal lineár öntözőgéppel történt, az évjárat igényeinek megfelelő víznormával. A parcellák betakarítását automata mérleggel felszerelt Sampo 2010 típusú parcella kombájn segítségével végeztük, mely Oros 2011 típusú kétsoros kukorica-csőtörő adapterrel van felszerelve. A betakarított szemtermést (t ha^{-1}) 14%-os nedvességtartalomra korrigálva adtuk meg. A kezelések (genotípus, N-műtrágyázás, öntözés, évjárat) számának pontos ismertetése az egyes kutatási területek eredményeinél található.

3.4. Mért paraméterek és mérési eszközök: a precíziós mezőgazdasági (PrM) módszerek alkalmazása

3.4.1. Minolta SPAD-502 klorofillmérő alkalmazása a kukoricanövény N-ellátottságának monitorozására

A Minolta SPAD-502 hordozható készüléket (Minolta Camera Ltd., Osaka, Japán) a levelek klorofilltartalmának roncsolásmentes értékelésére használják [Uddling et al. 2007]. Több tanulmány kimutatta, hogy SPAD mérések gyors és pontos információt nyújtanak a kukoricalevél N- és klorofill koncentrációjáról [Dwyer et al. 1995, Earl és Tollenaar 1997, Ványiné Széles et al. 2012, Spitko et al. 2016]. A készülék egy vörös (max. 650 nm) és egy infravörös (max. 940 nm) fotodiódát tartalmaz. A két fotodióda felváltva, azonos fényerővel bocsát ki fényt. A megvilágított terület 6 mm^2 . A kétféle fény áthalad a levéllemezen, és egy része visszaverődik (reflexió), egy része elnyelődik (abszorpció), míg a többi áthatol a levélen (transzmisszió). A levélen áthatoló fényt egy szilikon fotodiódából álló érzékelő veszi fel, és alakítja át analóg elektromos jellé. A műszer felerősíti az elektromos jelet és számmá alakítja. A számítás a levélen áthaladó infravörös és vörös fény intenzitásának arányán alapul. Minél

nagyobb az arány, annál több vörös fényt nyelnek el a növény levelei, ami szoros összefüggésben van a klorofilltartalommal. A SPAD érték 0-tól 100 feletti értékig terjedhet [Konica-Minolta 1989, Connelly 1997]. A méréseket N-kezelésenként minden parcella balról második sorának 6., 7. és 8. növényén mértük. Figyelembe vettük, hogy a klorofilok nem oszlanak el homogénen a levéllemezen [Jordan et al. 2012, Gabriel et al. 2019], ezért a méréseket a legmegfelelőbb helyen, a levél csúcsa és a levélörv felezőpontjában, a levélszéltől és a főértől egyenlő távolságban végeztük. A V6 és az R1 fenofázis között a legkésőbb megjelent teljesen kifejlett levélen, az R1-R6 fenofázis között a csőnél lévő levélen [Costa et al. 2001].

3.4.2. SunScan lombkorona-elemző alkalmazása a kukoricanövény levélfelületének (LAI) monitorozására

A levélfelület-index (LAI) gyors és megbízható becslésére a SunScan lombkorona-elemző rendszert alkalmaztuk, amely a növény lombkoronájában mért fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR) felhasználásával nyújt információt a kukorica LAI értékéről. A SunScan szonda a lombkorona feletti és alatti sugárzás mérései alapján közvetetten becsüli meg a LAI-t, a levélterület és a lombkorona áteresztőképessége közötti elméleti összefüggés alapján [Potter et al. 1996]. A rendszer egy szondából, egy napfényérzékelőből és egy adathordozóból áll. Az 1000×13 mm méretű szondában 64 PAR optikai szenzor található, egymástól 15,6 mm távolságra. Az érzékelők által gyűjtött adatok az adathordozóra kerülnek. Spektrális felbontás: 400–700 nm. A méréseket 2. és a 3. sorok között egyenletesen elosztva végeztük. Az adott parcella LAI értékére 5 mérés átlagából következtettünk. Mérések a V8, V10, V12, Vn (az utolsó levél), VT, R1 R3, R6 fenofázisokban voltak.

3.4.3. UAV-alapú képfelvételek alkalmazása a kukoricaállomány állapotának vizsgálatában

Az UAV-NDVI méréseket Sentra Double 4K TrueNDVI és TrueNDRE érzékelőkkel felszerelt DJI Phantom 4 Pro V2 drónnal végeztük [Csajbók et al. 2022] hat fenofázisban (V6, V8, V12, Vn, R1, R3) a SPAD-mérésekkel egyidejűleg. A repülési magasságot 80 m-re állítottuk be. A pontos parcellahatárokat egy másik PrM műszerrel (Trimble RTK) határoztuk meg [Stoll és Kutzbach 2000]. Az összes georeferált UAV-felvételt összeillesztettük, hogy 2 cm-es térbeli felbontású ortomozaiakat készítsünk a nyílt forráskódú WebODM programban a további elemzéshez [Vacca 2020]. Az egyéb fejlesztett termékek között szerepelt a digitális felszínmodell (DSM) és a digitális terepmodell (DTM), amelyeket nem használtunk fel az elemzéshez. Az ortorektifikált fényképeket nyílt forráskódú QGIS környezetben dolgoztuk fel.

A csatornák (hullámhosszok) pontos elkülönítéséhez egyenleteket használtunk a sávon kívüli csatornák hatásának kivonására [Csajbók et al. 2022]. Ezek közé tartozik az 1), 2) és 3) egyenlet:

$$Red = -0.966 \times DN_{blue} + 1 \times DN_{red}$$

$$NIR = 4.350 \times DN_{blue} - 0.286 \times DN_{red}$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Az így kapott NDVI-képeket a QGIS környezetben elemeztük, hogy a "zonális statisztika" funkció segítségével kiszámítsuk az egyes parcellák átlagos NDVI értékét.

3.4.4. Kukorica minőségének vizsgálata FOSS-Infratec készülékkel

A minőségi értékeket (keményítő, fehérje és olaj) a betakarítást követően közeli infravörös transzmissziós (NIT) technika elven működő Foss-Infratec 1241 gabona minőségelemző műszerrel határoztuk meg [Foss NIRSystems 2000], a betakarítás közben vett 0,5 kg-os kukoricaszem mintákból. A műszer 850 és 1048 nm közötti méréstartományban végez spektrumfelvételt, 2 nm-es lépésközzel, 5 almintát létrehozva. A műszert vezérlő szoftver: ISW 3.10, FOSS Tecator AB 2003.

3.5. Az alkalmazott statisztikai módszerek az eredmények értékelésére

A 13 éves kutatási időszak trendszerű változásának vizsgálatához a tenyészidőszak havi középhőmérséklet és csapadékösszeg adataiban a Finn Meteorológiai Intézet (FMI) által kifejlesztett MAKESENS Excel makrót alkalmaztuk. Az alkalmazás a nem-paraméteres Mann-Kendall teszten és a Sen-féle módszeren alapul, és ennek segítségével határozza meg a trend szignifikanciáját, valamint annak meredekségét [Salmi et al. 2002]. Ez a teszt széles körben elterjedt a meteorológiai idősorok trendanalízisében, beleértve a csapadékkal és hőmérséklettel kapcsolatos vizsgálatokat is [Khalili et al. 2016, Krebs et al. 2021, Kubiak-Wójcicka et al. 2023]. Alkalmazásának feltétele az adatok függetlensége, nem szükséges a normális eloszlás előfeltétele.

A kukorica fenofázisainak elemzéséhez számítógépes szimulációs modellt alkalmaztunk. A korábbi egyetemi együttműködés keretében rendelkezésünkre állt a CERES Maize program forrásnyelvű kódja [Ritchie et al. 1994]. Az eredetileg FORTRAN-ban írt programot átírtuk R-nyelvre, a gyorsabb és rugalmasabb futtatás érdekében [Huzsvai és Szőke 2014]. A CERES Maize program a kelést a vetésmélység függvényében modellezi. Feltételezi, hogy a vetés után

a talaj felső rétegében van annyi nedvesség, hogy a csírázás már másnap beindul. A keléshez szükséges hőidőt az alábbi képlettel határozza meg:

$$DD = 15 + 6 * SD \text{ (cm)}$$

ahol, a DD foknap és a SD vetés mélység (cm)

Az 5 cm-es talajhőmérséklet modellezésére valódi nemlineáris regresszió-analízist használtunk. A legjobban illeszkedő szinusz modell kiválasztásakor az eltérés négyzetösszeget minimalizáltuk. A szinusz modell általános alakja az alábbi volt:

$$ST = a + b * \sin\left(\frac{2\pi * (JDay - c)}{365}\right)$$

ahol a $JDay$ Julianus napok, az a , b , c regressziós paraméterek.

Az illeszkedés jószágát a maradékok szórásának nagyságával jellemeztük.

A kezelések (vetésidő, N-műtrágyázás, öntözés, genotípus, fenofázis, évjárat) relatív klorofill-koncentrációra (SPAD érték), termésre és minőségre gyakorolt hatását általános lineáris modellel (GLM) vizsgáltuk [Huzsvai és Vincze 2013]. A különböző kezelések átlagértékeinek összehasonlítását Duncan multiple range teszt (DMRT) segítségével elemeztük [Tallarida és Murray 1987] az elsőfajú hiba felhalmozódásának elkerülése érdekében. A DMRT egy poszt-hoc statisztikai elemzés a kísérleti elrendezés különböző kezelési módjai közötti szignifikáns különbségek vizsgálatára [Meena et al. 2022]. Szignifikánsan összehasonlítja a különböző kezelési csoportok összes lehetséges párjának átlagát. A szignifikancia-szintet 5%-nak választottuk. A kiértékelést az SPSS 23, valamint az R program legújabb változatával végeztük [R Core Team 2018].

A nitrogénkezelések SPAD-ra és UAV-NDVI-re gyakorolt hatását nem öntözött és öntözött körülmények között a boxplot eloszlású ábrákon vizsgáltuk, szignifikáns * $p < 0,5$; ** $p < 0,1$; *** $p < 0,001$ átlagos különbségábrázolással a Duncan-teszt alapján az OriginLab-ban [Moberly et al. 2018].

A független változó (N-műtrágyázás) és a függő változók (SPAD érték, keményítő- és fehérjetartalom) közötti összefüggést, valamint a N-műtrágya és a termés közötti összefüggést logaritmikus függvénnel vizsgáltuk.

Továbbá parabolikus (kvadrátikus) regressziós elemzéssel vizsgáltuk a N-műtrágyakezelés és a SPAD, illetve az NDVI értékek közötti szignifikáns kapcsolatot. A független változó a nitrogénkezelés, a függő változók pedig a SPAD és az UAV-NDVI voltak. A szignifikáns kapcsolatot a determinációs együttható (R^2) alapján értékeltük.

A termésbecsléshez kétváltozós, illetve többszörös lineáris regresszió-analízist alkalmaztunk. Független változó a szemtermés, függő változók a SPAD, LAI, UAV-NDVI voltak. Az illesztés során az eltérés-négyzetösszegeket minimalizáltuk (OLS). Az illesztés jóságát a többszörös R^2 és RMSE értékével jellemeztük.

4. EREDMÉNYEK

„Számítalan kísérlet sem képes bizonyítani azt, hogy igazam van; de egyetlen kísérlet is bebizonyítja, ha nincs igazam.”

(Einstein)

4.1. Az időjárás értékelése a kukorica (*Zea mays* L.) tartamkísérletek 2011–2023 közötti időszakára vonatkozóan

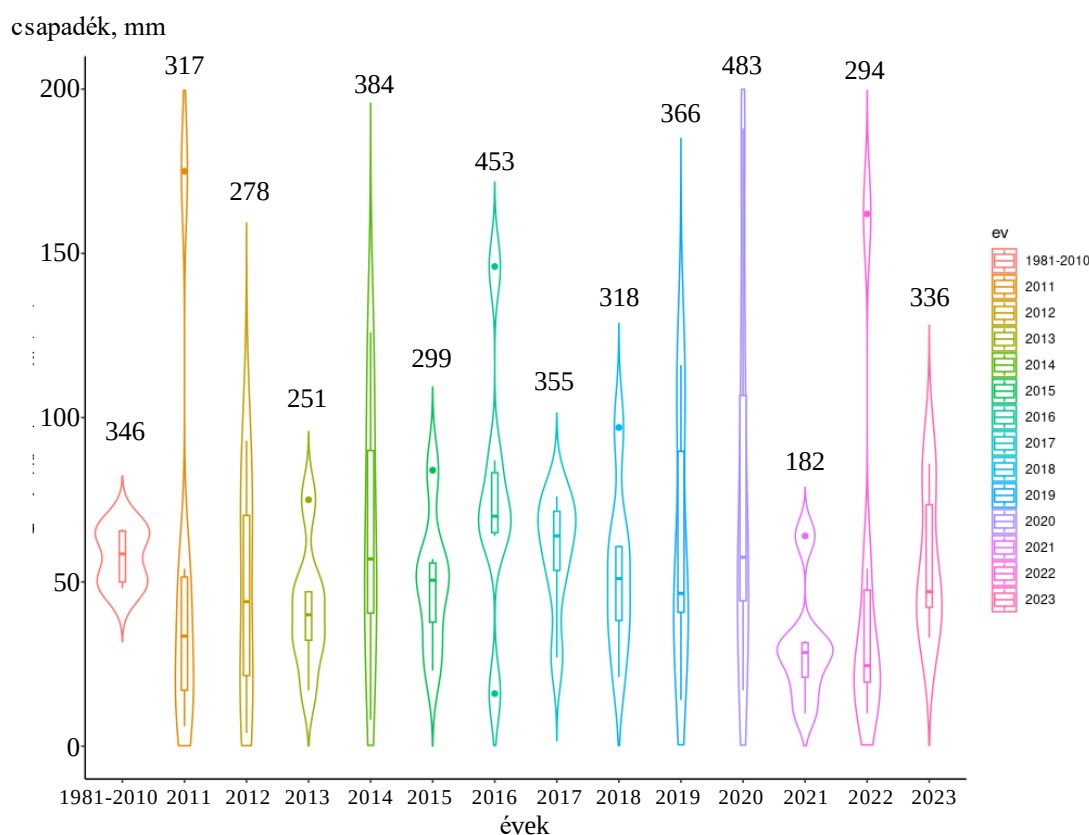
Az elmúlt évtizedekben az időjárási szélsőségek egyre gyakoribbak, veszélyeztetve ezzel a kukorica termésmennyiségét és minőségét. A 2011–2023 évek közötti időszakban elemeztük a különböző évjáratok, hőmérséklet és csapadék jellemzőit, amelyek döntő jelentőségű mutatók a negatív hatások elkerülésének vizsgálatához. A kutatás részeként továbbá megvizsgáltuk, hogy a 13 éves kutatási időszakban kimutatható-e trendszerű változás a tenyészidőszak havi középhőmérséklet és csapadékösszeg adataiban.

A vizsgált időszakban a téli hónapok (október-március) csapadékmennyisége az átlagtól (1981–2010) +29 mm-rel tért el, és a középhőmérséklet +1,1 °C-kal volt magasabb. A vegetációs időszakot tekintve (április-szeptember) a középhőmérséklet 1,0 °C-kal nőtt, az átlagos csapadékmennyiség pedig 14 mm-rel csökkent az átlaghoz képest.

A kukorica vízellátottsága szempontjából legkedvezőtlenebb helyzet, amikor a vegetációs időszakban (április-szeptember) és az azt megelőző téli hónapokban (október-március) is kevés csapadék hull. Három évben (2012, 2015, 2022) fordult elő, hogy mindkét érték a sokévi átlag alatt alakult.

2012-ben és 2019-ben esett a legkevesebb csapadék a talajok feltöltődésének időszakában, de 2012-ben a tenyészidőszakban még 70 mm körüli hiány is mutatkozott. Egyértelműen a 2022-es év volt a legkedvezőtlenebb. A tenyészidőszakban nem megfelelő időbeli eloszlással összesen 294 mm hullott, ráadásul mindez a szintén rendkívül száraz 2021-es tenyészidőszakot követően. Májusban és júniusban 10 mm, illetve 19 mm csapadék hullott, ami a sokéves átlagnak csak 15, illetve 29%-a. Az aszály júliusban (21 mm) és augusztusban (28 mm) folytatódott, nagy mennyiségű csapadék (162 mm) szeptemberben érkezett, amely már nem befolyásolta a termésmennyiséget. A többi évben (beleértve 2021-et is) a talajok téli félévi feltöltődésével nem volt probléma, a sokévi átlagot meghaladó csapadék hullott október-március időszakban (kivéve 2012, 2014, 2019, 2022). A tenyészidőszakban lehullott csapadékmennyiség alapján, öt olyan száraz év volt, ahol 300 mm-nél kevesebb csapadék

hullott (2012, 2013, 2015, 2021, 2022) és három olyan év volt (2011, 2018, 2023), ahol a csapadék mennyisége 300–340 mm között alakult. Átlag feletti (340 mm felett) csapadékos év, öt év volt (2014, 2016, 2017, 2019, 2020), ezen évek közül is a csapadékösszeg lényegesen meghaladta a sokévi átlagot 2016-ban (453 mm) és 2020-ban (483 mm) (3. ábra). A vízellátás szempontjából kritikus időszakot (virágzás, termékenyülés, korai szemfejlődés), vagyis a nyári hónapokat tekintve [Nagy és Huzsvai 1995, Jolánkai 2005, Pepó 2014] jelentős, 100 és 110 mm közötti csapadékhiány alakult ki 2013, 2021 és 2023 években, míg 2016-ban 124 mm és 2020-ban 196 mm többlet volt.

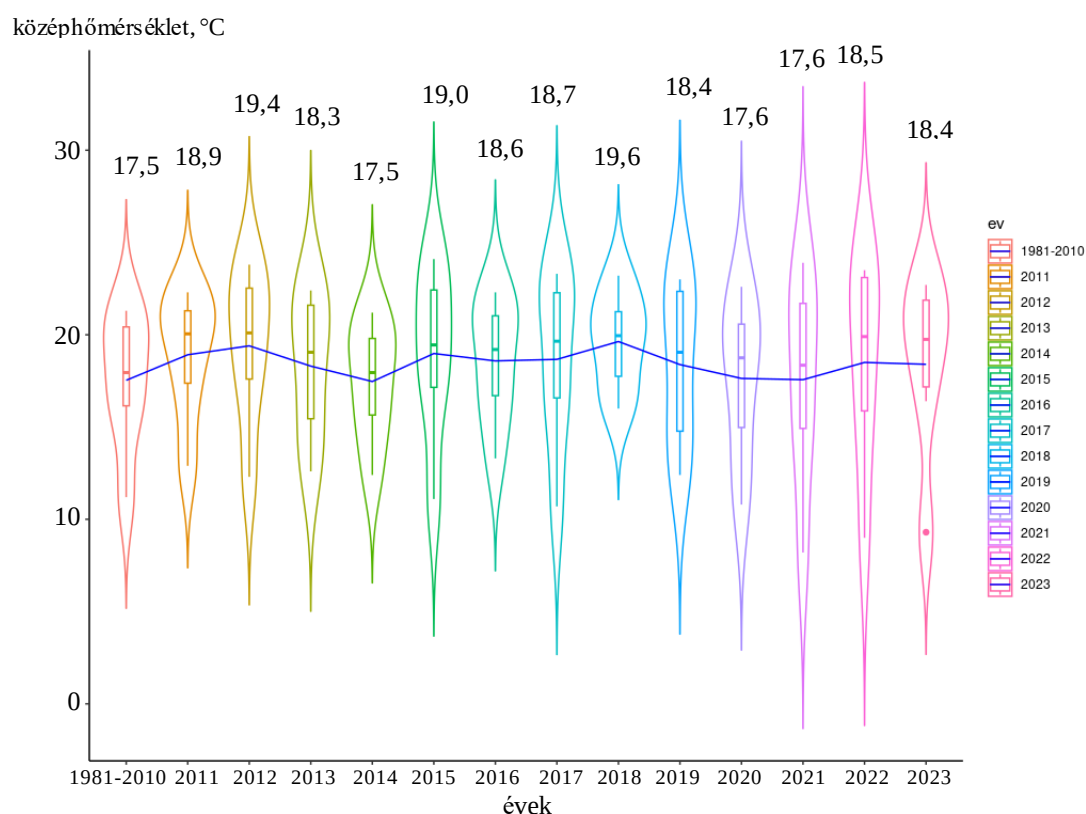


3. ábra. A csapadék mennyiségének alakulása a tenyészidőszakban (Debrecen, 2011–2023)

Megjegyzés: a boxplot diagram a havi adatok eloszlását (átlag/medián és interkvartilis tartományok), illetve a feltüntetett értékek a tenyészidőszak (IV–IX.) össz-csapadékmennyiségét és az OMSZ 1981–2010 átlagát egyaránt mutatja.

A tenyészidőszak április-május időszakának hőmérsékleti viszonyai a 2011–2018 közötti években átlagosan vagy annál melegebben alakult. Igen érdekes, hogy ezzel szemben az utóbbi öt év mindegyikében (2019–2023) jelentős negatív hőmérsékleti anomália jellemezte ezt a két hónapos időszakot, emiatt a kukorica kelése, kezdeti fejlődése a szokásosnál lassabb volt. A nyári hónapokat tekintve 2011, 2013, 2016, 2018, 2020, 2023 években melegebb, illetve 2012, 2015, 2017, 2019, 2021, 2022 években lényegesen melegebb volt az átlagoshoz képest, csupán

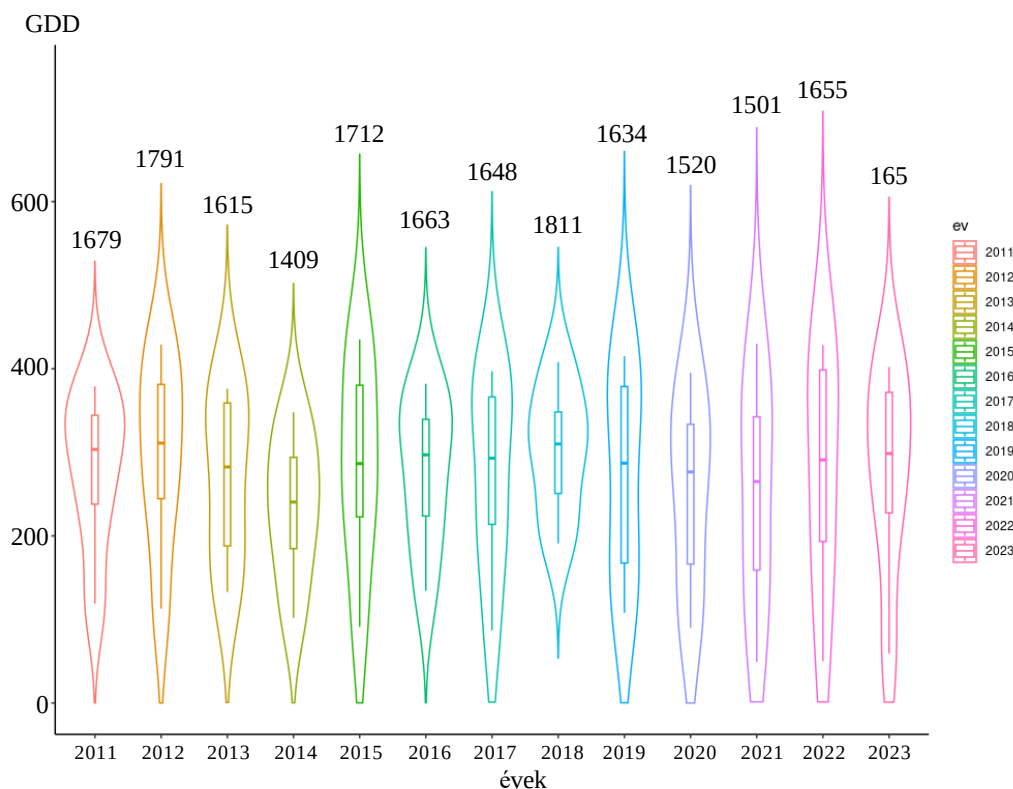
egyetlen évben (2014: 20,1 °C) maradt ezen évszak középhőmérséklete a sokévi átlag alatt. Kedvezőtlen egybeesés, hogy a 2022-es nyár nemcsak a legszárazabb, de egyben a legmelegebb is volt (23,0 °C) az utóbbi öt évben. A szeptember az átlaghoz képest 1,4 °C-kal volt melegebb, különösen 2011 és 2012 években, ahol az eltérés 3,1–3,1 °C. A szeptemberi hőmérséklet a kukorica érésére már nem volt nagy hatással. A hőmérséklet alakulása és a csapadékoság csupán a vízleadás ütemét befolyásolta. A tenyészidőszak középhőmérséklete három év kivételével (2014, 2020, 2021) meghaladta az átlagot (4. ábra).



4. ábra. A középhőmérséklet alakulása a tenyészidőszakban (Debrecen, 2011–2023)

Megjegyzés: a boxplot diagram a havi adatok eloszlását (átlag/medián és interkvartilis tartományok), illetve a feltüntetett értékek és a kék vonal a tenyészidőszak (IV–IX.) átlagos középhőmérsékletét és az OMSZ 1981–2010 átlagát egyaránt mutatja.

A vegetációs időszak hőösszege (GDD) 2011 és 2023 között 1409 és 1811 GDD érték között változott. Az alsó értéket a 2016. év, míg a felső értéket a 2018. év képviselte. Minden év GDD értéke meghaladta Menyhért [1985] által közölt 1400-as értéket (5. ábra). Áprilisi hónapban a legalacsonyabb GDD érték a vizsgált időszak utolsó három évében volt (49, 50 és 59). A nyári hónapok legmagasabb GDD értéke egyértelműen a 2022. évben (1194), a legalacsonyabb 2014-ben (912) volt.



5. ábra. A növekedési foknap (GDD) havi eloszlása a tenyészidőszakban (Debrecen, 2011–2023)
Megjegyzés: a boxplot diagram az adatok eloszlását (átlag/medián és interkvartilis tartományok), illetve a feltüntetett értékek a tenyészidőszak (IV–IX.) kumulált GDD értékét egyaránt mutatja.

A trendvizsgálat eredménye megerősítette előzetes várakozásainkat. Részben a viszonylag rövid adatsor (13 év) és az adatok (különösen a csapadék) nagy szórása miatt, az adatsorok többségénél nem mutatható ki szignifikáns trend. Kivételt képez az áprilisi középhőmérséklet csökkenő trend: $-0,31^{\circ}\text{C}/\text{év}$ ($p < 0,05$) és a májusi csapadék csökkenő trend: $-2,35 \text{ mm}/\text{év}$, alacsony P-érték mellett ($p < 0,10$).

4.2. A kukorica fenológiai folyamataira vonatkozó hőmérséklet-alapú agrometeorológiai indexek alkalmazása és a hőfelhasználás hatékonysága különböző N-műtrágyakezelések mellett (2018–2019)

A növények fejlődésére és növekedésére jelentős hatással vannak az agrometeorológiai tényezők [Charalampopoulos 2021, Sattar et al. 2023, Berzsenyi 2024]. Kutatásunk részét képezte, két eltérő FAO számú (Sushi FAO 340 és Fornad FAO 420) kukorica hibrid fenológiai szakaszainak kialakulásához szükséges kumulatív hőegység meghatározása különböző hőmérsékleten alapuló agrometeorológiai indexek, mint a növekedési foknap (GDD), a heliotermikus egység (HTU), a fototermikus egység (PTU) és a hidrotermikus egység (HYTU) segítségével. Továbbá elemeztük, a magasabb szemtermés elérése érdekében, hogy a N alap-

és fejtrágyázás milyen mértékben befolyásolja a hőfelhasználási hatékonyságot (HUE). A vizsgálatba két eltérő évjáratot (2018, 2019) vontunk be. Kiemelt jelentőségű volt a kelés-nővirágzás (VE-R1), a nővirágzás-fiziológiai érettség (R1-R6), illetve a kelés-fiziológiai érés (VE-R6) fázisok mellett, a kelés-6 levél (VE-V6), a kelés-12 levél (VE-V12), kelés-címerhányás (VE-VT), a kelés-tészta állapot (VE-R4), a címerhányás-fiziológiai érettség (VT-R6) fenofázisok értékelése.

A kukorica 2018. év tenyészidőszakának időjárását (április-szeptember) alacsonyabb csapadékelátottság és magasabb középhőmérséklet jellemezte, mint a 2019. évet. A GDD, PTU, HTU és HYTU hibridenként eltérően alakult mindkét évben (3. táblázat).

3. táblázat. Az agrometeorológiai indexek alakulása a Sushi és a Fornad kukorica hibridek fenológiai szakaszaiban (Debrecen, 2018–2019)

Fenológiai fázisok	2018.				2019.			
	Halmazott							
	GDD (nap °C)	PTU (nap °C óra)	HTU (nap °C óra)	HYTU (nap °C %)	GDD (nap °C)	PTU (nap °C óra)	HTU (nap °C óra)	HYTU (nap °C %)
	Sushi (FAO 340)							
VE-V6	186	2754	2109	9967	193	2916	1574	14191
VE-V12	466	7155	4966	28400	463	7216	4831	32935
VE-VT	580	8970	5892	35827	644	10100	7268	44157
VE-R1	594	9198	5944	36812	682	10693	7692	46162
VT-R6	793	11967	8071	47727	780	11374	8247	49225
R1-R6	779	11740	8019	46742	742	10781	7823	47221
VE-R4	832	12954	8357	51231	961	14980	10597	65053
VE-R6	1373	20937	13964	83554	1424	21474	15515	93383
Fornad (FAO 420)								
VE-V6	202	3005	2288	11019	214	3251	1797	15680
VE-V12	550	8493	5549	34075	488	7621	5129	34846
VE-VT	598	9272	6000	37104	667	10456	7582	45273
VE-R1	621	9626	6179	38552	700	10990	7890	47056
VT-R6	847	12668	8632	50989	777	11279	8082	49201
R1-R6	825	12314	8453	49541	743	10746	7774	47418
VE-R4	882	13735	8702	54849	1007	15670	11029	68389
VE-R6	1446	21940	14633	88093	1444	21735	15665	94474

A termesztési körülmények és a hibridek együttes hatása a hőegységre (GDD) Malo és Ghosh [2018] eredményeihez hasonlóan minden fenológiai szakaszban szignifikáns volt. 2018-ban a hosszabb tenyészidejű Fornad kukorica hibridnek a teljes tenyészidőszak alatt és az egyes fejlődési fázisok eléréséhez is magasabb hőösszegre (GDD) volt szüksége, mint a rövidebb

tenyészidejű Sushi kukorica hibridnek, ami igazolta, hogy a különböző éréscsoportok különböző GDD-összegeket igényelnek [Berzsényi 2024]. Legnagyobb eltérés a vegetatív (VE-V12) fázisban volt, a felhalmozott GDD-érték különbség 84 °C volt. Az R1 fenofázist a Sushi hibrid alacsonyabb GDD (594 °C) alatt érte el, mint a Fornad hibrid (621 °C). A reprodukzív fázisban jelentősebb a különbség a két hibrid GDD értékében, a VT-R6 fázisban 54 °C és az R1-R6 fázisban 46 °C különbség alakult ki. A keléstől a fiziológiai érettségig (VE-R6) a Fornad hibrid 1446 °C, míg a Sushi hibrid 1373 °C kumulált GDD-t igényelt.

A Fornad hibrid kumulatív GDD-értéke a vegetatív fejlődési szakasz végéig 2019-ben magasabb volt, mint a Sushi hibridnek. Az eltérés 21 °C és 25 °C között változott. A reprodukzív szakaszban a különbség kiegyenlített. A teljes tenyészidőszakot tekintve a Fornad hibridnél magasabb GDD-érték halmozódott fel (1444 °C), mint a Sushi hibridnél (1424 °C). A PTU, HTU és a HYTU a tenyészidőszakban (VE-R6), mind 2018. évben mind 2019. évben a Fornad hibridnél magasabb volt. Két szakaszban, VE-VT és az R1-R6 szakasz között 2019-ben a Sushi hibridnél kumulálódott több PTU, HTU és HYTU.

A hőfelhasználás hatékonyságot (HUE) Rao et al. [1999] és Malo és Ghosh [2018] eredményeivel egyezően az eltérő időjárási viszonyok és a tápanyagszintek befolyásolták. A legalacsonyabb agrometeorológiai indexek (HUE, PTUU, HTUE, HYTUE) mindkét évben és mindkét hibridnél a nem műtrágyázott (A_0) kezelésben volt, ahol a termés szintje a legalacsonyabb ($p < 0,05$). A HUE a Sushi hibridnél 2018. évben $4,398 \text{ kg ha}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$ volt $6,039 \text{ t ha}^{-1}$ szemtermés mellett, és 2019. évben a HUE $6,259 \text{ kg ha}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$ volt $8,910 \text{ t ha}^{-1}$ -nál. Az A_0 kezelésben 2019. évi hőfelhasználás hatékonyság 42,3%-kal magasabb volt ($p < 0,001$), mint az előző évi HUE érték. A Fornad hibridnél 2018. évben a HUE $4,920 \text{ kg ha}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$ volt $7,114 \text{ t ha}^{-1}$ szemtermés mellett, amely 11,8%-kal volt magasabb a Sushi hibridnél. A 2019. évben HUE $6,346 \text{ kg ha}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$ volt $9,161 \text{ t ha}^{-1}$ szemtermés mellett, ebben az évben a két hibrid hőfelhasználási hatékonysága között nem volt szignifikáns különbség. A Fornad hibrid hőfelhasználási hatékonysága azonban 2019. évben 29,0%-kal nagyobb volt, mint 2018. évben.

A magasabb HUE, illetve a többi agrometeorológiai mutató (PTU, HTUE, HYTUE) a magasabb értéket a szignifikánsan ($p < 0,05$) legmagasabb termésnél érte el, hasonlóan, He et al. [2020] eredményeihez, amely hibridenként és évenként eltért. A Sushi hibridnél a legmagasabb hőfelhasználási hatékonyságot a 2018. évben a $V6_{150}$ kezelésben regisztráltuk, ahol a HUE $9,59 \text{ kg ha}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$ volt $13,167 \text{ t ha}^{-1}$ szemtermés mellett, és a 2019. évben A_{120} kezelésben, ahol a HUE $9,502 \text{ kg ha}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$ volt $13,527 \text{ t ha}^{-1}$ -nál. E két HUE érték azonosnak tekinthető. A Fornad hibridnél 2018-ban a legmagasabb HUE érték ($8,78 \text{ kg ha}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$) az A_{120} ,

kezelésben alakult ki 12,695 t ha⁻¹ mellett. Kedvezőbb időjárási körülmények között (2019) a legmagasabb hőfelhasználási hatékonyság a V6₁₅₀ kezelésben volt (9,71 kg ha⁻¹ °C⁻¹ nap⁻¹), 14,023 t ha⁻¹-nál. A két év közötti HUE százalékos növekedése 10,5% volt (4–5. táblázat).

4. táblázat. A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a Sushi és a Fornad kukorica hibridek szemtermésére (Debrecen, 2018–2019)

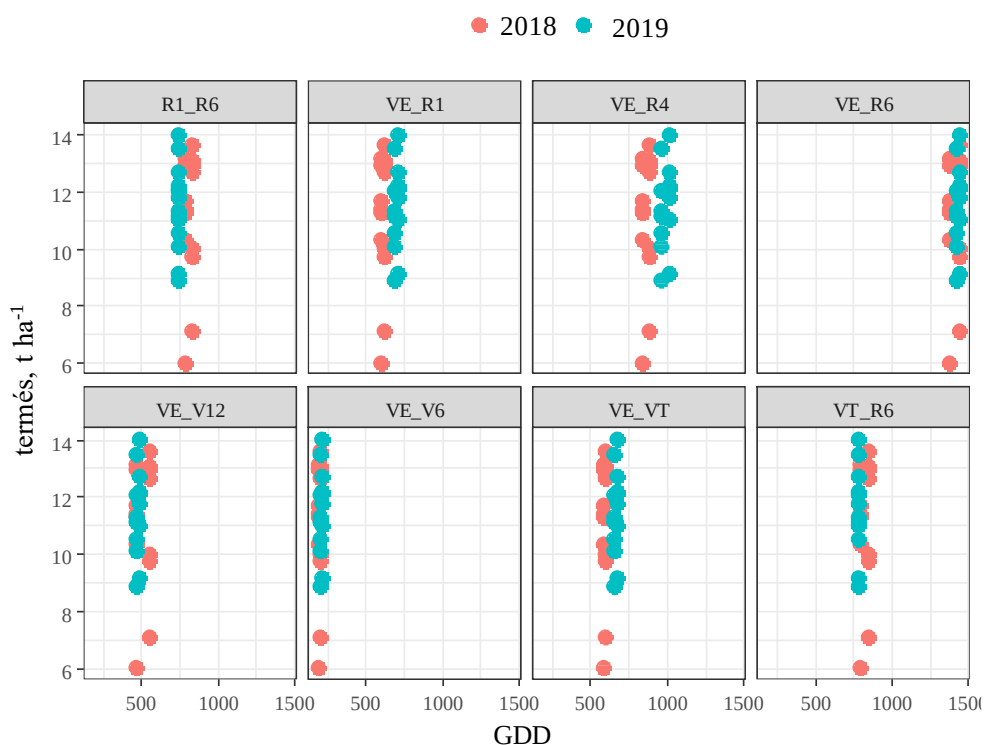
Hibridek	Évek	N-műtrágyakezelés						
		A ₀	A ₆₀	A ₁₂₀	V6 ₉₀	V6 ₁₅₀	V12 ₁₂₀	V12 ₁₈₀
Sushi	2018	6,039a	10,341bc	11,303c	11,707bc	13,167d	11,414b	12,945bc
	2019	8,910a ***	11,157c nsz	13,527e ***	11,328c nsz	12,062d nsz	10,565bc ***	10,109b ***
Fornad	2018	7,114a	10,023b	12,695c	9,767b	13,105c	13,614c	12,939c
	2019	9,161a ***	12,124bc **	12,711c nsz	11,808bc nsz	14,023d **	11,033b ***	12,227bc nsz

Megjegyzés: a soron belül a különböző kisbetűk jelzik a Duncan-teszt alapján (p<0,05) a N-műtrágyakezelések közötti eltérést 2018 és 2019. évben. Az oszlop belül a t-teszt alapján ***p=0,001%; **p=0,01%; nsz=nem szignifikáns jelölések jelzik az évek közötti eltérést.

5. táblázat. A Sushi és a Fornad kukorica hibridek hőfelhasználási hatékonysága (Debrecen, 2018–2019)

Műtrágya- kezelések	2018				2019			
	Halmazott							
	HUE (kg ha ⁻¹ °C ⁻¹ nap ⁻¹)	PTUE (kg ha ⁻¹ °C ⁻¹ nap ⁻¹ óra ⁻¹)	HTUE (kg ha ⁻¹ °C ⁻¹ nap ⁻¹ óra ⁻¹)	HYTUE (kg ha ⁻¹ °C ⁻¹ nap ⁻¹ % ⁻¹)	HUE (kg ha ⁻¹ °C ⁻¹ nap ⁻¹)	PTUE (kg ha ⁻¹ °C ⁻¹ nap ⁻¹ óra ⁻¹)	HTUE (kg ha ⁻¹ °C ⁻¹ nap ⁻¹ óra ⁻¹)	HYTUE (kg ha ⁻¹ °C ⁻¹ nap ⁻¹ % ⁻¹)
	Sushi (FAO 340)							
	A ₀	4,398	0,288	0,432	0,072	6,259	0,415	0,574
A ₉₀	7,532	0,494	0,741	0,124	7,837	0,520	0,719	0,119
A ₁₂₀	8,232	0,540	0,809	0,135	9,502	0,630	0,872	0,145
V ₆₁₂₀	8,527	0,559	0,838	0,140	7,957	0,528	0,730	0,121
V ₆₁₅₀	9,590	0,629	0,943	0,158	8,473	0,562	0,777	0,129
V ₁₂₁₅₀	8,313	0,545	0,817	0,137	7,421	0,492	0,681	0,113
V ₁₂₁₈₀	9,428	0,618	0,927	0,155	7,101	0,471	0,652	0,108
Fornad (FAO 420)								
A ₀	4,920	0,324	0,486	0,081	6,346	0,421	0,585	0,097
A ₉₀	6,932	0,457	0,685	0,114	8,398	0,558	0,774	0,128
A ₁₂₀	8,781	0,579	0,868	0,144	8,805	0,585	0,811	0,135
V ₆₁₂₀	6,755	0,445	0,667	0,111	8,180	0,543	0,754	0,125
V ₆₁₅₀	9,064	0,597	0,896	0,149	9,714	0,645	0,895	0,148
V ₁₂₁₅₀	9,416	0,621	0,930	0,155	7,636	0,507	0,704	0,117
V ₁₂₁₈₀	8,949	0,590	0,884	0,147	8,470	0,563	0,781	0,129

A vizsgálatunk igazolta Nandini és Sridhara [2019] és Ahmed és Saikia [2020] eredményeit, hogy az egyes fenológiai szakaszokhoz minden évben közel azonos GDD szükséges (6. ábra).



6. ábra. A GDD és a termés alakulása a kukorica hibridek átlagában (Debrecen, 2018–2019)

A tenyészidőszak egészére vizsgálva a hőösszeg-értékeket összegezve megállapítható, hogy az egyes évek között a Sushi hibridnél az eltérés nem volt jelentős, a Fornad hibrid esetében pedig lényegében azonosság volt tapasztalható. Mindez igazodik a hőösszeg-koncepció lényegéhez, azaz, hogy egy fenológiai fázis bekövetkezése akkor várható, ha a hőösszeg értéke eléri az adott növény (faj, fajta, hibrid) adott fázisához szükséges hőösszeg igényét [Gilmore és Rogers 1958, Rao et al. 1999, Bonhomme 2000, Malo és Ghosh 2018].

A hibridek közötti tenyészidő különbség megmutatkozott a hőösszegben, bár kedvezőbb körülmények között (2019) ez kisebb volt, mint 2018-ban. A nagyobb FAO számú hibridnek 2019-ben a virágzás eléréséhez ugyan magasabb hőösszegre volt szüksége, mint a kisebb FAO számú hibridnek, de a reprodukzív fázisban nem volt különbség a hőösszeg igényben. 2018-ban mindkét részfázisban megmutatkozott a nagyobb tenyészidejű Fornad hibrid magasabb hőösszeg igénye.

A fototermikus egységek egyes növények esetében kisebb hibával alkalmazhatók a fenofázis hosszúság becslésére, mint a GDD [McMaster és Smika 1988, Bouzo és Favar 2014]. A kísérletünk két évében a PTU tenyészidőszakra vonatkozó értékei szintén közel azonosak

voltak a két évben, az eltérések (Sushi hibrid 2,6%, Fornad hibrid 0,9%) lényegesen kisebbek, mint a tenyésznapok számának relatív eltérései. Eredményünk Malo és Ghosh [2018] következtetésével egyezően arra utal, hogy ez az agrometeorológiai index a kukorica esetében is alkalmas lehet a fenológiai fázis hosszának becslésére. Mindenképpen megmarad azonban a PTU korlátozott érvényessége, alkalmazhatósága, mivel nem veszi figyelembe a fotoperiódus érzékenység időbeli változását, a kritikus nappalhosszt, illetve a genotípusok közötti akár jelentős eltéréseket az érzékenységben. A fotoperiódus és hőmérséklet együttes hatásának leírására a PTU-nál összetettebb, jól parametrizálható formulák alkalmazhatók [Bonhomme 2000, Birch et al. 1998, Yan et al. 1998]. A HTU és HYTU egységek nagy eltérései (7–12%) a két tenyészidőszak között arra utal, hogy nem alkalmasak a fenológiai fázisok hosszának becsléséhez.

A hő hasznosításának hatékonysága (HUE) a szemtermés szempontjából egyezően Rao et al. [1999] és Malo és Ghosh [2018] eredményeivel, eltérést mutatott a hibridek között. A minimális HUE-t mindkét hibridnél a nem műtrágyázott kezelés (A_0) mutatta az időjárási tényezőktől függetlenül. A maximális HUE hibridenként eltérő N-műtrágyakezeléseknél alakult. Kedvezőtlenebb környezeti feltételek mellett (2018) a N-műtrágyázás az A_0 kezeléshez viszonyítva jelentősen növelte a hőfelhasználási hatékonyságot, amely a Sushi hibridnél jelentősebb volt (V_{6150} ; 118%), mint a Fornad hibridnél (A_{120} ; 79%). Kedvezőbb évjáratban (2019) alacsonyabb volt a százalékos növekedés, amely azonban mindkét hibridnél közel azonos volt (Sushi A_{120} , 51%; Fornad V_{6150} , 53%).

4.3. A kukoricatermesztés tartamkísérleti eredményeinek vizsgálata: relatív klorofilltartalom (SPAD érték), szemtermés, keményítő- és fehérjetartalom változásának értékelése eltérő környezeti feltételek mellett (2011–2023)

4.3.1. Környezeti tényezők és a N-műtrágyázás hatása a kukorica SPAD értékére (2011–2023)

A kukorica egy olyan növény, amely jelentős mennyiségű tápanyagot igényel a magas össz-szárazanyag-termés elérése érdekében. Különösen a nitrogén (N) műtrágyázás, amely kulcsfontosságú inputtényező az összes szárazanyag-termelés növelésében, mivel a megfelelő nitrogénszint hozzájárul a növényi növekedéshez és a terméshozam maximalizálásához. A levelek klorofilltartalmának (SPAD) valós idejű monitorozása a kritikus növekedési szakaszokban lényeges, mivel lehetővé teszi a termésnövekedés állapotának pontos értékelését és a precíziós mezőgazdasági gyakorlatok alkalmazását. A kutatásunk fő célja, hogy feltárja a kukorica (*Zea mays* L.) N-műtrágyázási arányokra adott reakcióinak eltéréseit, két

éréscsoportba (FAO 300 és FAO 400) tartozó 18 hibrid, 13 éves (2011–2023) adatsor elemzése alapján. A vizsgálatokat a „Nitrogén alap- és fejtrágyázás” tartamkísérletben végeztük az „Anyag és módszer” fejezetben leírtak alapján.

A kezelések (N-műtrágyázás, fenofázis, éréscsoport és az évek) összevont varianciaelemzése azt mutatta, hogy a fő tényezők közül az éréscsoport kivételével szignifikánsan befolyásolták a SPAD értéket ($p < 0,001$). A legnagyobb hatással az Mean Squares (MS) érték alapján a fenofázis volt, ezt követte a N-műtrágyázás, míg az év hatása a legkisebbnek bizonyult. Kölcsönhatás nem volt kimutatható az éréscsoport $\times$ N-műtrágyázás között. A fenofázis $\times$ éréscsoport kivételével ($p < 0,05$) a további 2-irányú interakciók erősek ($p < 0,001$), ezek közül is az év $\times$ fenofázis volt a jelentősebb. A 3-irányú kölcsönhatások közül az év $\times$ éréscsoport $\times$ N-műtrágyázás kölcsönhatás volt szignifikáns ($p < 0,001$). A 4-irányú kölcsönhatás megbízhatóan nem érvényesült (6. táblázat).

6. táblázat. A kukorica SPAD értékének összevont varianciaanalízis eredménye (Debrecen, 2011–2023)

Tényező	DF	SS	MS	F
Év (É)	12	17115,298	1426,275	136,855***
Fenológiai fázis (F)	2	34738,120	17369,060	1666,608***
Éréscsoport (Écs)	1	12,702	12,702	1,219 ^{nsz}
N-műtrágyázás (N)	6	16177,154	2696,192	258,707***
2-interakció				
É $\times$ F	24	12253,506	510,563	48,990***
É $\times$ Écs	12	1240,816	103,401	9,922***
É $\times$ N	72	3791,642	52,662	5,053***
F $\times$ Écs	2	75,159	37,579	3,606*
F $\times$ N	12	5374,563	447,880	42,975***
Écs $\times$ N	6	100,901	16,817	1,614 ^{nsz}
3-interakció				
É $\times$ F $\times$ Écs*	24	580,404	24,183	2,320***
É $\times$ F $\times$ N	144	2366,268	16,432	1,577***
É $\times$ Écs $\times$ N	72	95,526	13,132	1,260 ^{nsz}
F $\times$ Écs $\times$ N	12	46,259	3,855	0,370 ^{nsz}
4-interakció				
Év $\times$ F $\times$ Écs $\times$ N	144	1251,655	8,692	0,834 ^{nsz}

Megjegyzés: *** $p < 0,001$; * $p < 0,05$; nsz=nem szignifikáns

Az évenként elvégzett varianciaanalízis, a fenológiai tényező hatását a SPAD értékre a legsúlyosabb aszályos évben (2022) nem mutatta, a többi évben jelentős hatást ($p < 0,001$) gyakorolt. A N-műtrágyázás kedvező hatása minden évben megmutatkozott ($p < 0,001$), kivétel volt a 2019. év, ahol a hatás nem volt szignifikáns. Az éréscsoportok hatása a SPAD értékre évjáratonként eltért. Három évben (2013, 2015, 2022) volt a legjelentősebb ($p < 0,001$). Három évben (2017, 2021, 2023) a különbség 1%-os, és három évben (2011, 2016 és 2020) 5%-os

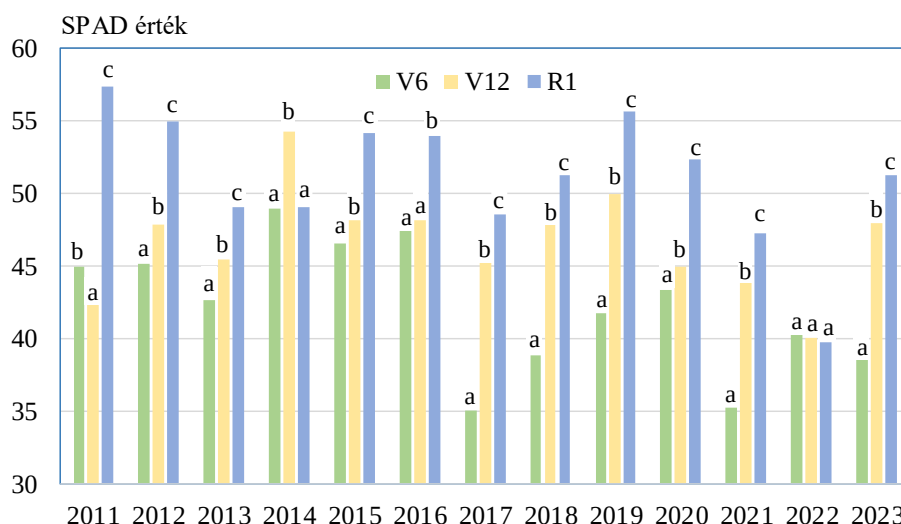
szinten igazolt. Nem volt megbízható hatása négy évben (2012, 2014, 2018, 2019). A fenofázis $\times$ N-műtrágyázás kölcsönhatás a 2011. és 2019. év kivételével szignifikáns volt. Egy évben (2022) 5%-os, két évben (2015, 2022) 1%-os és nyolc évben 0,1%-os szinten megbízható hatást mutatott. Az éréscsoport $\times$ N-műtrágyázás a 2016. ($p < 0,01$) és a 2018. ($p < 0,05$) években, míg a fenofázis $\times$ éréscsoport kölcsönhatás mindössze a 2011. évben volt szignifikáns ($p < 0,001$). A 3-irányú kölcsönhatás egyik évben sem mutatott megbízható hatást (7. táblázat).

7. táblázat. A kukorica SPAD értékének évenkénti varianciaanalízise (Debrecen, 2011–2023)

Tényező	DF	MS-érték				
		2011	2012	2013	2014	2015
Fenológiai fázis (F)	2	29,632***	279,490***	118,734***	58,001***	107,443***
Éréscsoport (Écs)	1	4,316*	1,158 ^{nsz}	22,567***	0,696 ^{nsz}	16,729***
N-műtrágyázás (N)	6	4,290***	31,215***	57,182***	15,552***	17,888***
F $\times$ Écs	2	14,407***	2,464 ^{nsz}	1,204 ^{nsz}	0,267 ^{nsz}	0,783 ^{nsz}
F $\times$ N	12	0,849 ^{nsz}	4,675***	9,673***	7,059***	2,984**
Écs $\times$ N	6	0,491 ^{nsz}	0,865 ^{nsz}	1,235 ^{nsz}	0,511 ^{nsz}	1,992 ^{nsz}
F $\times$ Écs $\times$ N	12	0,227 ^{nsz}	0,587 ^{nsz}	10,168 ^{nsz}	0,586 ^{nsz}	0,155 ^{nsz}
Tényező		2016	2017	2018	2019	2020
Fenológiai fázis (F)	2	203,834***	436,966***	129,683***	208,855***	165,071***
Éréscsoport (Écs)	1	4,386*	9,738**	0,811 ^{nsz}	0,668 ^{nsz}	4,788*
N-műtrágyázás (N)	6	115,318***	39,359***	29,822***	0,788 ^{nsz}	25,164***
F $\times$ Écs	2	0,259 ^{nsz}	1,703 ^{nsz}	1,329 ^{nsz}	1,328 ^{nsz}	0,531 ^{nsz}
F $\times$ N	12	8,102***	8,344***	5,859***	0,986 ^{nsz}	4,636***
Écs $\times$ N	6	4,003**	0,401 ^{nsz}	2,181*	0,566 ^{nsz}	2,170 ^{nsz}
F $\times$ Écs $\times$ N	12	0,827 ^{nsz}	1,183 ^{nsz}	1,688 ^{nsz}	0,851 ^{nsz}	0,332 ^{nsz}
Tényező		2021	2022	2023		
Fenológiai fázis (F)	2	114,470***	0,27 ^{nsz}	195,405***		
Éréscsoport (Écs)	1	8,312**	42,625***	9,566**		
N-műtrágyázás (N)	6	14,751***	21,692***	20,917***		
F $\times$ Écs	2	0,247 ^{nsz}	2,345 ^{nsz}	0,549 ^{nsz}		
F $\times$ N	12	2,599**	2,337*	8,470***		
Écs $\times$ N	6	1,070 ^{nsz}	0,833 ^{nsz}	1,176 ^{nsz}		
F $\times$ Écs $\times$ N	12	0,294 ^{nsz}	1,692 ^{nsz}	0,342 ^{nsz}		

Megjegyzés: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; nsz=nem szignifikáns.

Az évek környezeti tényezői eltérő módon alakították az egyes fenológiai szakaszok SPAD értékét (7. ábra). A lemagasabb SPAD érték a V6 és V12 fenofázisokban 2014. évben, az R1 szakaszban 2011. évben volt, míg a legalacsonyabb a V6 szakaszban 2017. évben, a V12 és az R1 fenofázisban 2022. évben volt. A legalacsonyabb és a szignifikánsan legmagasabb ($p < 0,05$) SPAD érték közötti különbség – a kezelések átlagában – a V6 fenofázisban 40%, a V12 szakaszban 35,7% és az R1 fenofázisban 44,6% volt. A szórás (SD) értéke a V12 fenofázisban alacsonyabb volt ($SD=3,6$), mint a V6 ($SD=4,5$) és R1 ($SD=4,6$) szakaszokban. A V12 fenofázis SPAD értékei kevésbé voltak változékonyság, a variációs koefficiens (CV) 7,7% volt, míg a V6 fenofázis volt a legváltozékonyság (CV=10,6%). A fenofázisok SPAD érték átlagát tekintve a legalacsonyabb értékkel a 2022. év rendelkezett, míg a szignifikánsan legnagyobb ($p < 0,05$) a 2014. év, az eltérés 27%.



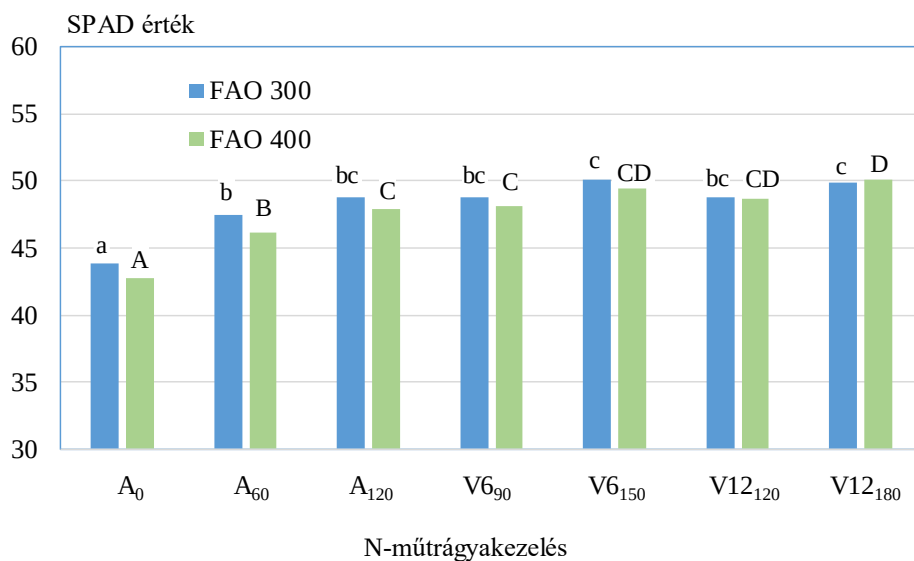
7. ábra. Az évjárat hatása a kukorica hibridek V6, V12 és R1 fenológiai szakaszának SPAD értékére (Debrecen, 2011–2023)

Megjegyzés: években belül a különböző betűvel jelzett SPAD értékek szignifikánsan különböznek egymástól a Duncan-teszt alapján, $P \leq 0,05$ valószínűségi szinten.

A V6-V12 fenológiai szakasz között legnagyobb SPAD érték növekedés – a kezelések átlagában – 2017. évben volt (29,4%), de jelentős, 20% feletti növekedés mutatkozott 2018., 2021. és 2023. években. A V12 és az R1 fenofázis között 2011. évben 35,7%-os volt a legnagyobb növekedés, a többi évben jelentősen alacsonyabb volt (7. ábra).

A különböző N-műtrágyakezelések eltérő mértékben hatottak a FAO 300 és a FAO 400 csoport hibridjeinek SPAD értékére a 13 év alatt. A fenológiai szakaszok átlagában a Duncan-teszt kimutatta, hogy a FAO 300 éréscsoport esetében öt évben (2012, 2015, 2017, 2018, 2000) az A₁₂₀ kezelés és egy-egy évben az A₆₀ (2022), V6₉₀ (2014) és a V12₁₈₀ (2013), valamint két évben a V6₁₅₀ (2016, 2021) eredményezte a szignifikánsan ($p < 0,05$) igazolt legnagyobb SPAD értéket. Három évben (2011, 2019, 2023) megbízható különbség nem alakult ki a SPAD értékek között a N-műtrágyázás hatására. A legjelentősebb N-műtrágyahatás a V6₁₅₀ kezeléssel volt elérhető a (26,2%; 2021) az A₀ kezeléshez viszonyítva. A FAO 300 éréscsoport 13 év átlagát tekintve – a Duncan-teszt alapján – a V6₁₅₀ kezelés (50,1; $p < 0,05$) bizonyult eredményesnek (8. ábra).

A FAO 400 éréscsoportnál a szignifikánsan igazolt legnagyobb SPAD érték hét évben magasabb (2012, 2014, 2016, 2017, 2018, 2000, 2023), három évben (2013, 2021, 2022) azonos, és egy évben (2015) alacsonyabb tápanyagszinten alakult ki, mint a FAO 300-as éréscsoport hibridjeinél. Két évben (2011, 2019) nem volt kimutatható N-műtrágyahatás a SPAD értékre. Ennél az éréscsoportnál is – hasonlóan a FAO 300 éréscsoportéhoz – V6₁₅₀ kezeléssel volt elérhető a legjelentősebb N-műtrágyahatás (29,6%; 2018) az A₀ kezeléshez viszonyítva. A FAO 400 éréscsoport 13 év átlagát tekintve – a Duncan-teszt alapján – a V12₁₈₀ kezelés (50,1; $p < 0,05$) bizonyult eredményesnek (8. ábra).



8. ábra. A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport SPAD értékére (Debrecen, 2011–2023)

Megjegyzés: a FAO 300 éréscsoportnál a különböző kis betűvel, a FAO 400 éréscsoportnál a különböző nagybetűvel jelzett értékek $p < 0,05$ valószínűségi szintje szignifikánsan különböznek egymástól a Duncan-teszt alapján.

A két FAO csoport szignifikánsan eredményes kezelését összehasonlítva kimutatható volt, hogy a FAO 300-as éréscsoport az A₀ kezeléshez viszonyítva alacsonyabb (V₆₁₅₀; 14,4%) százalékos SPAD érték növekedést ért el, mint a FAO 400-as éréscsoport (V₁₂₁₈₀; 17,3%). A két éréscsoport 13 évi együttes statisztikai elemzése kimutatta, hogy a V₁₂₁₈₀ kezelés hatására alakult ki a legnagyobb ($p < 0,05$) SPAD érték.

A FAO csoportok 13 éves N-műtrágyakezeléseinek elemzése azt mutatta, hogy a V6 fenofázisban a N-műtrágyakezelések között nem volt szignifikáns különbség, míg a V12 és R1 fenofázisban a V₁₂₁₈₀ kezelés biztosította a legnagyobb SPAD értéket. A FAO 300-as éréscsoportnál a V6 fenofázisban a N-műtrágyakezeléseknek nem volt megbízható SPAD érték növelő hatása, a V12 (V₁₂₁₈₀) és az R1 (A₁₂₀) fenofázisban a legnagyobb SPAD érték eltérő kezelés hatására alakult ki. A FAO 400-as éréscsoport esetében mindhárom fenofázisban a V₁₂₁₈₀ N-műtrágyakezelés volt szignifikánsan eredményes.

Mindkét FAO csoportnál a nem műtrágyázott (A₀) kezelésben volt a legnagyobb szórás a SPAD értékekben. A FAO 400 éréscsoport nagyobb változékonyságot (CV=10,4%), mutatott, mint a FAO 300 éréscsoport (CV=8,3%). A CV% alapján a legkiegyenlítettebb a V₆₉₀ (FAO 300) és a V₆₁₅₀ (FAO 400) kezelés SPAD értékei, a standard deviation (SD) a FAO 300-as éréscsoportnál volt kisebb.

A SPAD dinamikáját a N-műtrágyázás nagymértékben befolyásolta, amely évjáratonként és éréscsoportonként is eltérést mutatott. A FAO 300 éréscsoportnál a V6-tól a V12-ig terjedő

időszakban egy év (2017) volt, amikor minden N-műtrágyakezelés ($p < 0,05$) szignifikánsan növelte a SPAD értéket. A növekedés mértéke 30,9% (V_{690}) és 43,5% (V_{12180}) között változott. Két évben (2020, 2022) a N-műtrágyakezelések egyike sem növelte megbízható mértékben a SPAD értéket. Az A_{60} N-műtrágyakezelésnek mindössze két évben (2014, 2017) volt szignifikáns ($p < 0,05$) hatása, átlagosan 24,2%-os növekedéssel. Az A_{120} kezelésnek négy évben (2013, 2016, 2017, 2019) volt SPAD érték növelő hatása ($p < 0,05$), a legnagyobb növekedés 2017-ben (38,1%) volt, de átlagosan a többi kezeléshez viszonyítva a legalacsonyabb növekedést eredményezte (19,5%). A V_{690} kezeléssel szignifikáns ($p < 0,05$) növekedés öt évben (2015, 2016, 2017, 2018, 2019) volt elérhető, átlagosan 24,4%-kal, az alsó határt 5,5% (2016), a felső határt 48,8% (2018) képviselte. A V_{690} és a V_{12120} kezelések öt-öt évben voltak eredményesek ($p < 0,05$), kimagasló növekedés 2018-ban (48,8%) és 2017-ben (41,1%) volt, az átlagos növekedés 24,4% és 23,5%. Hét évben a V_{12180} kezelés biztosította a legnagyobb növekedést ($p < 0,05$), átlagosan 31,5%-kal, a 2021. évi növekedés volt a legnagyobb, 56,5%. Összességében az eredmények azt mutatták, hogy V6-V12 fenofázisok között, minden évben a SPAD érték növekedés a fejtrágyakezelésekben jelentősebb volt, mint az alapkezelésekben (A_{60} , A_{120}).

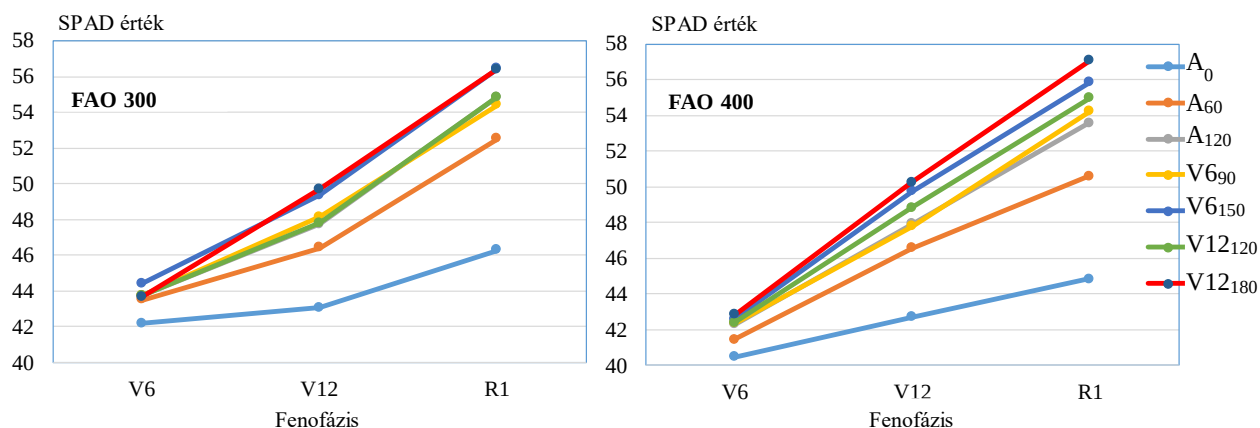
A V12-től az R1-ig a FAO 300-as éréscsoportnál három évben (2011, 2012, 2016) minden N-műtrágyakezelésben tovább növekedett a SPAD érték ($p < 0,05$), míg a két legszárazabb évben (2021, 2022) egyik N-műtrágyakezelésben sem volt statisztikailag igazolt növekedés. E két fázis között a V_{12180} kezelés fejtette ki hatását ($p < 0,05$) a legtöbb évben (8 év; 2011–2013, 2015–2018, 2023), bár az átlagos 17,1% növekedés alacsonyabb volt a többi N-műtrágyakezeléshez képest. A V_{12120} szintén nyolc évben (2011–2018, 2021) mutatott ($p < 0,05$) 20,6%-os átlagos növekedést. A V_{6150} N-műtrágyakezelés hét évben (2011–2013, 2015–2017, 2000) bizonyult eredményesnek ($p < 0,05$), a növekedés mértéke 18,5%. Az A_{60} és a V_{690} N-műtrágyakezelések öt évben voltak eredményesek, azonos átlagos növekedéssel (18,4%). Az A_{120} N-műtrágyakezelés négy évben (2011, 2012, 2016, 2020) fejtette ki szignifikáns ($p < 0,05$) hatását a SPAD értékre, és a 24,9%-os átlagos növekedése jelentősebb volt, mint a többi alkalmazott kezelésé. A legnagyobb SPAD érték növekedés minden N-műtrágyakezelésben 2011. évben volt, ahol a növekedés 31,0% és 40,7% között változott.

A FAO 400 csoportnál V6 fenofázistól a V12 fenofázisig a vizsgált évek közül 2017. és 2023. években minden tápanyagszinten szignifikáns ($p < 0,05$) SPAD érték növekedés volt. Az A_{60} N-műtrágyakezelés hat évben (2012–2013, 2017–2019, 2023) volt eredményes ($p < 0,05$), átlagosan 19,8%-os növekedést eredményezett. A_{120} , a V_{12120} és a V_{12180} N-műtrágyakezelések 8–8 évben növelték szignifikánsan a SPAD értéket, átlagosan az A_{120}

kezelés százalékos növekedése volt a legalacsonyabb (18,3%), míg a legmagasabb V12₁₈₀ (27,9%) kezelésé volt. Egyben a V12₁₈₀ kezelés biztosította a N-műtrágyakezelések közül a legmagasabb átlagos SPAD érték növekedést. A V6₉₀ kezelés mindössze öt évben (2013, 2017, 2019, 2020, 2023) volt szignifikánsan eredményes, 21,8%-os átlagos növekedést elérve. A vizsgált évek közül a legtöbb évben, azaz kilenc évben (2012–2019, 2023) a V6₁₅₀ N-műtrágyakezelés hatása igazolódott ($p < 0,05$), 22,3%-os átlagos növekedéssel. A legalacsonyabb szignifikáns növekedést az A₆₀ kezelés (2013: 5,8%), míg a legnagyobbat a V12₁₈₀ kezelés (2018: 59,5%) mutatta. Az alapkezelések (A₆₀, A₁₂₀) 20,0% alatti, a fejtrágyakezelések 20,0% feletti növekedést ($p < 0,05$) értek el.

A V12 szakasztól az R1 szakaszig a FAO 400-as csoport esetében négy évben (2011, 2012, 2015, 2020) minden tápanyagszint szignifikáns SPAD érték növekedést ért el ($p < 0,05$). A kezelések szignifikáns pozitív hatását tekintve az A₆₀ és az A₁₂₀ kezelések hat-hat évben voltak eredményesek, 18,0% és 20,6%-os átlagos növekedéssel. Az A₁₂₀ kezelés ezzel a 20,6%-os átlagos növekedéssel a kezelések közül a legeredményesebb volt. A V6₉₀ N-műtrágyakezelés nyolc évben (2011–2012, 2015–2016, 2018–2019, 2020, 2023) mutatott szignifikáns növekedést ($p < 0,05$). Az átlagos növekedés 19,3% volt. A V6₁₅₀ N-műtrágyakezelésnek hét évben (2011–2015, 2017–2018, 2020) volt megbízható SPAD érték növelő hatása ($p < 0,05$), átlagosan 19,9%-kal. Az évek jelentős részében, kilenc évben (2011–2013, 2015–2016, 2019, 2020–2021) a V12₁₂₀ kezelés növelte szignifikánsan a SPAD értéket, átlagosan 16,9%-kal, amely növekedés a N-műtrágyakezelések közül a legalacsonyabb. A V12₁₈₀ N-műtrágyakezelés SPAD érték növelő pozitív hatása tíz évben (2011–2017, 2020–2023) bizonyult eredményesnek, az átlagos növekedés mértéke 17,8%. A legalacsonyabb SPAD érték növekedés az A₆₀ (2016: 7,0%), a legnagyobb növekedés a V6₁₅₀ N-műtrágyakezelésben (2011: 44,6%) volt.

Összességében a V6 és a V12 fenofázisok között az évek jelentős részében (7 év) a rövidebb tenészsídejű hibrid csoportnál a V12₁₈₀ N-műtrágyakezelés, a hosszabb tenészsídejű hibrid csoportnál (9 év) a V6₁₅₀ kezelés volt eredményes. Az R1 fenofázisra a FAO 300-as éréscsoportnál az évek többségében (8 év) a V12₁₅₀, míg a FAO 400-as éréscsoportnál (10 év) a V12₁₈₀ N-műtrágyakezelés hatását lehetett kimutatni. A 13 év átlagában, a fejtrágyakezelések nagyobb mértékben növelték a SPAD értéket, mint az alapkezelések, mértéke a FAO 400 éréscsoportnál jelentősebb volt (9. ábra). A legnagyobb SPAD érték növekedést mindkét FAO csoportnál a V12₁₈₀ kezelés mutatta. A FAO 300 éréscsoport esetében azonban a százalékos növekedés kisebb mértékű volt (29,1%), mint a FAO 400 éréscsoportnál (33,4%).



9. ábra. A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és a FAO 400 éréscsoport SPAD érték dinamikájára (Debrecen, 2011–2023)

4.3.2. Környezeti tényezők és a N-műtrágyázás hatása a kukorica termésére (2011–2023)

Az elmúlt 40 évben a globális és a hazai kukoricatermelés jelentősen növekedett, főként a nitrogén (N) műtrágyák használatának köszönhetően [FAOStat 2018, KSH 2023]. A KSH [2023] adatai szerint a műtrágya-hatóanyag értékesítés hatóanyagban a 2000. évtől (258 ezer tonna) fokozatosan növekedett, és 2016–2021 között átlagosan elérte a 428 ezer tonnát, amely 65,9%-os növekedést jelent. A nitrogén műtrágyák túlzott használata azonban környezeti problémákhoz is vezet. A PrM technológia alkalmazása a legjobb megoldás arra, hogy csökkentsék a nitrogén felhasználását és annak káros környezeti hatásait. A nitrogén felhasználásának optimalizálása érdekében kutatásokat végeztünk, amelyek célja a hatékonyabb trágyázási technikák kidolgozása, mint például a nitrogén-kijuttatás időzítése és mennyiségének pontosabb meghatározása a termés maximalizálására. Az értékelés két éréscsoportba (FAO 300 és FAO 400) tartozó 18 hibrid, 13 éves (2011–2023) adatsor alapján történt. A vizsgálatokat a „Nitrogén alap- és fejtrágyázás” tartamkísérletben végeztük az „Anyag és módszer” fejezetben leírtak alapján.

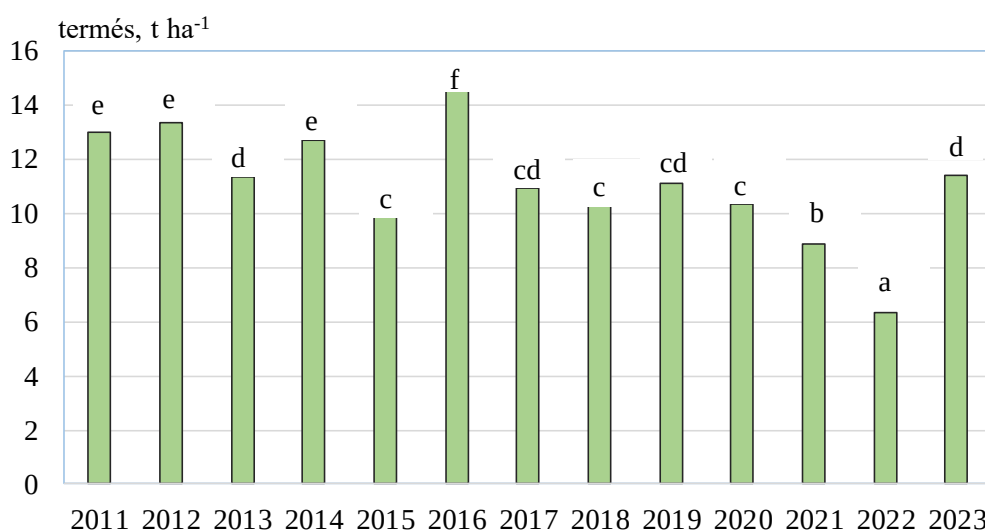
A kukorica hibridek termésének összevont varianciaanalízis eredménye kimutatta természetes csapadékellátottság mellett, hogy a fő tényezők (év, N-műtrágyázás, éréscsoport) szoros ($p < 0,001$) összefüggést mutatnak a termés alakulásával. A N-műtrágyázás hatása volt a legjelentősebb ($p < 0,001$) a Mean Squares (MS) érték (422,558) alapján, illetve a vegetációs időszakban lehullott csapadék mennyiségében, és a felhalmozott növekedési foknapokban (GDD) megmutatkozó különbségek miatt az évjárat (217,197), amely gyakran megfigyelhető a hosszú távú szántóföldi vizsgálatok során [Nagy és Huzsvai 1995, Wilhelm és Wortmann 2004, Berzsenyi 2011, Jolánkai 2014, Peichl et al. 2019, Nagy 2021, Pepó 2022, Ortey et al. 2023]. Az évjárat hatása felülmúlta az éréscsoport (42,844) hatását. Bizonyított az év $\times$ N-műtrágyázás

($p < 0,001$) és az év $\times$ éréscsoport közötti szignifikáns ($p < 0,001$) kölcsönhatás. Az éréscsoport és a N-műtrágya közötti kölcsönhatás, illetve a hármas interakció statisztikailag nem igazolt (8. táblázat). A Duncan-teszt alapján a kukorica termésének a rendkívül csapadékos 2016. év vegetációs időszaka kedvezett a legnagyobb mértékben ($14,569 \text{ t ha}^{-1}$), míg a legkedvezőtlenebb évjárat a súlyosan aszályos 2022. év volt, ahol mindössze $6,354 \text{ t ha}^{-1}$ volt a termésátlag (10. ábra).

8. táblázat. A kukorica termésének összevont varianciaanalízis eredménye (Debrecen, 2011–2023)

Tényező	DF	SS	MS	F
Év (É)	12	2606,368	217,197	117,136***
Éréscsoport (Écs)	1	42,844	42,844	23,106***
N-műtrágyázás (N)	6	2535,345	422,558	227,889***
2-interakció				
É*Écs	12	139,807	11,651	6,283***
É*N	72	623,674	8,662	4,672***
Écs*N	6	10,295	1,716	0,925 ^{nsz}
3-interakció				
É*Écs*N	72	105,550	1,466	0,791 ^{nsz}

Megjegyzés: *** $p < 0,001$; nsz= nem szignifikáns.



10. ábra. Az évjárat hatása a kukorica termésére (Debrecen, 2011–2023)

Megjegyzés: 13 év átlaga: $11,093 \text{ t ha}^{-1}$, Minimum $6,354 \text{ t ha}^{-1}$, Maximum $14,569 \text{ t ha}^{-1}$, Szórás $2,11 \text{ t ha}^{-1}$, CV=19,0%. a különböző betűvel jelzett termések szignifikánsan különböznek egymástól a Duncan-teszt alapján, $P \leq 0,05$ valószínűségi szinten.

A N-műtrágyázás szignifikáns ($p < 0,001$) szemtermést befolyásoló hatását az évenként elvégzett varianciaanalízis a 2011. év kivételével kimutatta. Az MS érték alapján két évtől (2012, 2015) eltekintve meghaladta az éréscsoport hatását (9. táblázat). A két fő hatás egyike sem volt szignifikáns 2011. évben, ami azt jelenti, hogy egy nem vizsgált hatás befolyásolta a termés alakulását. Az éréscsoport $\times$ N-műtrágyázás kölcsönhatás a 2018. ($p < 0,05$) és a 2022.

($p < 0,05$) években volt igazolható, vagyis 11 évben a N-műtrágyázás és az éréscsoportok évenkénti fő hatása önállóan értelmezhető.

9. táblázat. A N-műtrágyázás és különböző éréscsoportba tartozó hibridek és interakcióinak hatása a termésre. Közepes négyzetes eltérései (MS) és az F-érték szignifikanciája az évenkénti varianciaanalízis alapján (Debrecen, 2011–2023)

Tényező	DF	Mean Squares (MS) érték						
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
N-műtrágya (A)	6	1,576 ^{nsz}	15,982 ^{***}	36,648 ^{***}	17,534 ^{***}	26,552 ^{***}	91,863 ^{***}	80,852 ^{***}
Éréscsoport (B)	1	4,596 ^{nsz}	67,108 ^{***}	2,357 ^{nsz}	14,639 [*]	38,520 ^{***}	25,667 ^{**}	6,888 ^{nsz}
A x B	6	,879 ^{nsz}	,294 ^{nsz}	,126 ^{nsz}	,726 ^{nsz}	2,032 ^{nsz}	2,655 ^{nsz}	1,399 ^{nsz}
		2018	2019	2020	2021	2022	2023	
N-műtrágya (A)	6	90,652 ^{***}	32,971 ^{***}	96,261 ^{***}	38,819 ^{***}	21,741 ^{***}	26,124 ^{***}	
Éréscsoport (B)	1	3,888 ^{nsz}	17,365 ^{***}	3,531 ^{nsz}	11,298 ^{**}	7,729 [*]	2,764 ^{nsz}	
A x B	6	4,910 [*]	,368 ^{nsz}	1,057 ^{nsz}	1,016 ^{nsz}	3,391 [*]	1,236 ^{nsz}	

Megjegyzés: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,5$; nsz=nem szignifikáns.

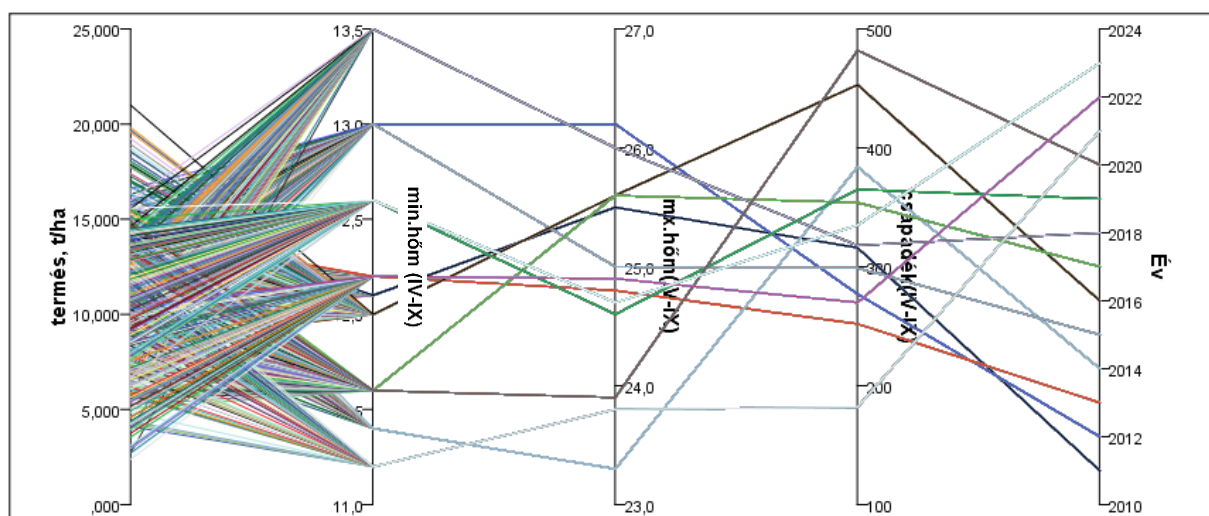
A nitrogén alap- és fejtrágyázás a kutatás éveiben eltérő módon befolyásolta a kukorica termésmennyiségének alakulását. A Duncan-teszt évenkénti eredménye az éréscsoportok átlagában kimutatta, hogy a nem műtrágyázott (A_0) kezelések – a 2011. év kivételével – eredményezték a legalacsonyabb termést, és ebben a kezelésben volt az évek közötti termésingadozás a variációs koefficiens (CV %) érték alapján a legnagyobb (CV=30%). Ezzel szemben a legkisebb variabilitást az A_{120} kezelés mutatott a 13 év alatt (CV=12%), de a magasabb termést biztosító fejtrágyakezeléseknél is a Pepó [2006] által közölt megengedett 10–20% között volt (CV=17%).

Az évenként elvégzett Duncan-tesztel meghatároztuk az adott év statisztikailag igazolt legnagyobb termését biztosító N-kezelést a FAO csoportok átlagában. A lehullott csapadék mennyiség alapján az éveket három csoportba soroltuk: 300 mm alatt, 300–340 mm között és 340 mm felett (11. ábra). A vegetatív időszakban lehullott csapadék mennyiségének alapján öt olyan száraz év volt, ahol 300 mm-nél kevesebb csapadék hullott (2012, 2013, 2015, 2021, 2022). Ezekben az években a statisztikailag igazolt legnagyobb termés eltérő tápanyagmennyiséggel, és annak eltérő időpontban való kijuttatásával volt elérhető. A 60 kg N ha^{-1} alapkezelés (A_{60}) termésnövelő hatása két évben volt statisztikailag megbízható, 2015-ben, ahol 31,8%-os növekedést eredményezett ($p < 0,05$) az A_0 kezeléshez (8,142 t ha^{-1}) képest, elérve a 10,728 t ha^{-1} -t, illetve 2022-ben. Ebben az évben – amely a vizsgált időszak közül a legkedvezőtlenebb volt a túl alacsony vízellátottság és a magas hőmérséklet miatt – az A_{60} kezeléssel 6,954 t ha^{-1} termést lehetett elérni, amely 64,7% növekedést biztosított ($p < 0,05$) a

rendkívül alacsony A_0 kezeléshez ($4,222 \text{ t ha}^{-1}$) viszonyítva. A magasabb 120 kg N ha^{-1} alapkezelés (A_{120}) a 2012. évben 19,7%-os növekedést biztosított ($14,208 \text{ t ha}^{-1}$; $p<0,05$) az A_0 ($11,865 \text{ t ha}^{-1}$) kezeléshez képest. Két évben (2013, 2021) a legnagyobb termésnövelő hatásúnak a 120 kg N ha^{-1} + a V6 fenofázisban további 30 kg N ha^{-1} kijuttatása (V_{6150}) volt tekinthető ($p<0,05$). A 2013. évben az A_0 kezelés $9,090 \text{ t ha}^{-1}$ -os terméséhez viszonyítva 48,3%-kal, illetve 2021. évben $5,884 \text{ t ha}^{-1}$ -os (A_0) terméshez képest igen jelentősen, 93,7%-kal növelte a termés nagyságát. Három olyan év volt (2011, 2018, 2023), ahol a csapadék mennyisége a tenyészidőszakban 300–340 mm között alakult, jó kezdeti vízkészlet mellett. Mindhárom évben az alap 120 kg N ha^{-1} kezelés (A_{120}) biztosította a legnagyobb termést ($p<0,05$), ezen éveken belül 2011-ben volt a legnagyobb ($13,571 \text{ t ha}^{-1}$), ahol a kukorica legfontosabb fenofázisaiban (július-augusztus) a tenyészidőszak csapadékának 69%-a hullott. A legnagyobb termésnövekedést 2018-ban (73,4%), míg a legkisebbet 2011-ben (7,1%) lehetett kimutatni az A_0 kezeléshez képest. Az alacsony növekedés 2011-ben annak köszönhető, hogy a 13 év közül ebben az évben volt a legmagasabb termés az A_0 kezelésben ($12,670 \text{ t ha}^{-1}$). Átlag feletti (340 mm felett) csapadékos év, öt év volt, ahol két évben (2019, 2020) az A_{120} kezelés, míg három évben (2014, 2016, 2017) a V6 fenofázisban kijuttatott fejtrágyakezelések hatására alakult ki a statisztikailag igazolt ($p<0,05$) legnagyobb termésmennyiség. Mind az öt évet figyelembe véve 2016-ban, a 60 kg N ha^{-1} mennyiséget (A_{60}) $+30 \text{ kg N ha}^{-1}$ mennyiséggel növelve (V_{690}) alakult ki a legnagyobb termés ($17,030 \text{ t ha}^{-1}$), amely az A_0 kezeléshez képest ($11,661 \text{ t ha}^{-1}$) 46%-os növekedést jelentett. A legnagyobb termésnövekedést (99,7%) az A_{120} kezelés okozott, ahol a tenyészidőszak csapadékmennyiségének (482 mm) 54%-a hullott a kritikusnak számító július-augusztus hónapokban, ezzel elérve $13,318 \text{ t ha}^{-1}$ mennyiséget. Jelentős volt a V_{6150} fejtrágyakezelés hatása ($14,363 \text{ t ha}^{-1}$), ahol 33,9%-os volt a termésnövekedés az A_0 kezeléshez képest, 384 mm csapadékelátottság mellett. A nem műtrágyázott (A_0) kezeléshez képest az A_{120} alaptrágyakezeléssel 2020-ban ugyan 43,6%-os termésnövekedés volt elérhető, de az öt év közül ekkor volt a legalacsonyabb ($12,968 \text{ t ha}^{-1}$) a termésmennyiség. Összességében az mutatható ki, hogy a tenyészidőszakban lehullott átlagos, illetve átlag feletti csapadékmennyiséghez magasabb termés kapcsolódott, különösen a fejtrágyakezelések esetén.

A kukorica termése 13 év és az éréscsoportok átlagában is a nem műtrágyázott kezelésben (A_0) volt a legalacsonyabb ($8,998 \text{ t ha}^{-1}$), ami a Duncan-teszt alapján jól elkülönült a többi kezeléstől. Az alaptrágyaként kijuttatott 60 kg N ha^{-1} (A_{60}) műtrágya $1,900 \text{ t ha}^{-1}$ -os (21,1%; $p<0,05$), a 120 kg N ha^{-1} alapkezelés (A_{120}) $3,852 \text{ t ha}^{-1}$ -os (42,8%; $p<0,05$) termésnövekedést eredményezett az A_0 kezeléshez képest. Az A_{60} kezelést V6 fenofázisban $+30 \text{ kg N ha}^{-1}$ műtrágyaadaggal növelve (V_{690}) a termésnövekedés mértéke 9,4% volt ($p<0,05$), ezzel elérte $11,925 \text{ t ha}^{-1}$ -os terméseredményt, majd 12 leveles állapotban további 30 kg N ha^{-1} kijuttatására

(V12₁₂₀) a termésmennyiség megbízhatóan nem változott. Az A₁₂₀ kezeléshez képest a +30 kg N ha⁻¹ fejtrágya kijuttatásának hatására (V6₁₅₀) 3,2%-os volt a termésnövekedés. További 30 kg N ha⁻¹ műtrágyaadag (V12₁₈₀) nem szignifikáns termésnövekedést okozott. Megbízható termésnövelő hatásának 13 év átlagában a V6₁₅₀ kezelés bizonyult (13,256 t ha⁻¹), amely 47,3%-os növekedést jelentett a nem műtrágyázott (A₀) kezeléshez mérten. Az eredmények azt mutatták, hogy sem évente, sem a 13 év átlagában a V12 fenofázisban kijuttatott fejtrágyának nem volt megbízható termésnövelő hatása.

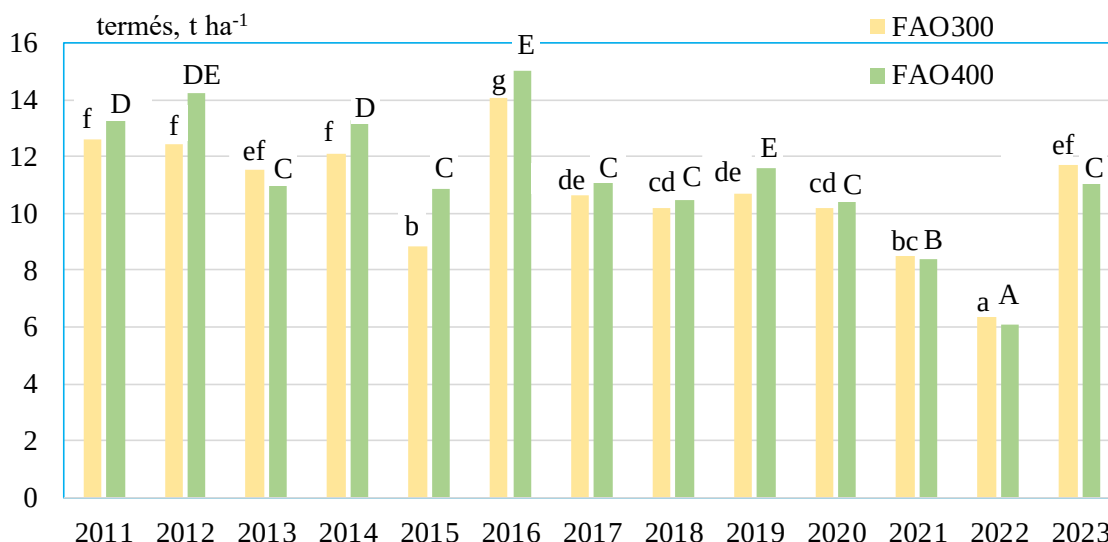


11. ábra. Rendszertérkép, amely a kukorica termése és a tenyésztési időszak időjárásának kapcsolatát mutatja (Debrecen, 2011–2023)

Az elemzést éréscsoportokra kiterjedően is elvégeztük, mivel Kiss [2024] megállapítása szerint is felértékelődött a hibridek tenyészidejének fontossága, és a termésbiztonság szempontjából kulcsfontosságú tényezővé vált. Az éréscsoportokra elvégzett varianciaanalízis (ANOVA) kimutatta, hogy mind a FAO 300, mind a FAO 400 éréscsoport termését az évjárat ($p < 0,001$) és a N-műtrágyázás ($p < 0,001$) statisztikailag megbízható módon befolyásolta, illetve az MS érték azt mutatta, hogy a N-műtrágyázás mindkét éréscsoportnál meghaladta az évjárat hatását. A N-műtrágyázás $\times$ évjárat kölcsönhatás is 0,1% szinten igazolt volt, vagyis a N-műtrágyázás az évjárat változására eltérő hatást mutatott.

Az éréscsoportok szemtermése között a N-műtrágyakezelések átlagában hat évben volt statisztikailag megbízható eltérés, a 2012., 2015. és 2019. években ($p < 0,001$), illetve a 2014., 2016. és 2022. években ($p < 0,05$), ahol a FAO 400 éréscsoport termése volt jelentősebb, kivéve a 2022. évet. A legnagyobb igazolt különbséget 2015-ben (2,004 t ha⁻¹), míg a legkisebbet a 2022-ben (0,558 t ha⁻¹) lehetett kimutatni. A legnagyobb termésmennyiség mindkét éréscsoportnál a 2016. évben (FAO 300, 14,080 t ha⁻¹; FAO 400, 15,057 t ha⁻¹) és a legkisebb

eredmény a 2022. évben (FAO 300, 6,648 t ha⁻¹; FAO 400, 6,060 t ha⁻¹) volt (12. ábra). Összességében a hosszabb tenyészidejű (FAO 400) éréscsoport termése 13 év átlagában, 0,484 t ha⁻¹-al haladta meg a FAO 300 éréscsoport eredményét (10,851 t ha⁻¹), a különbség statisztikailag nem igazolt. A FAO 300-as éréscsoport szemtermése a CV értéket figyelembe véve kevésbé volt változékony (17,6%), mint a FAO 400 éréscsoport termése (21,1%).

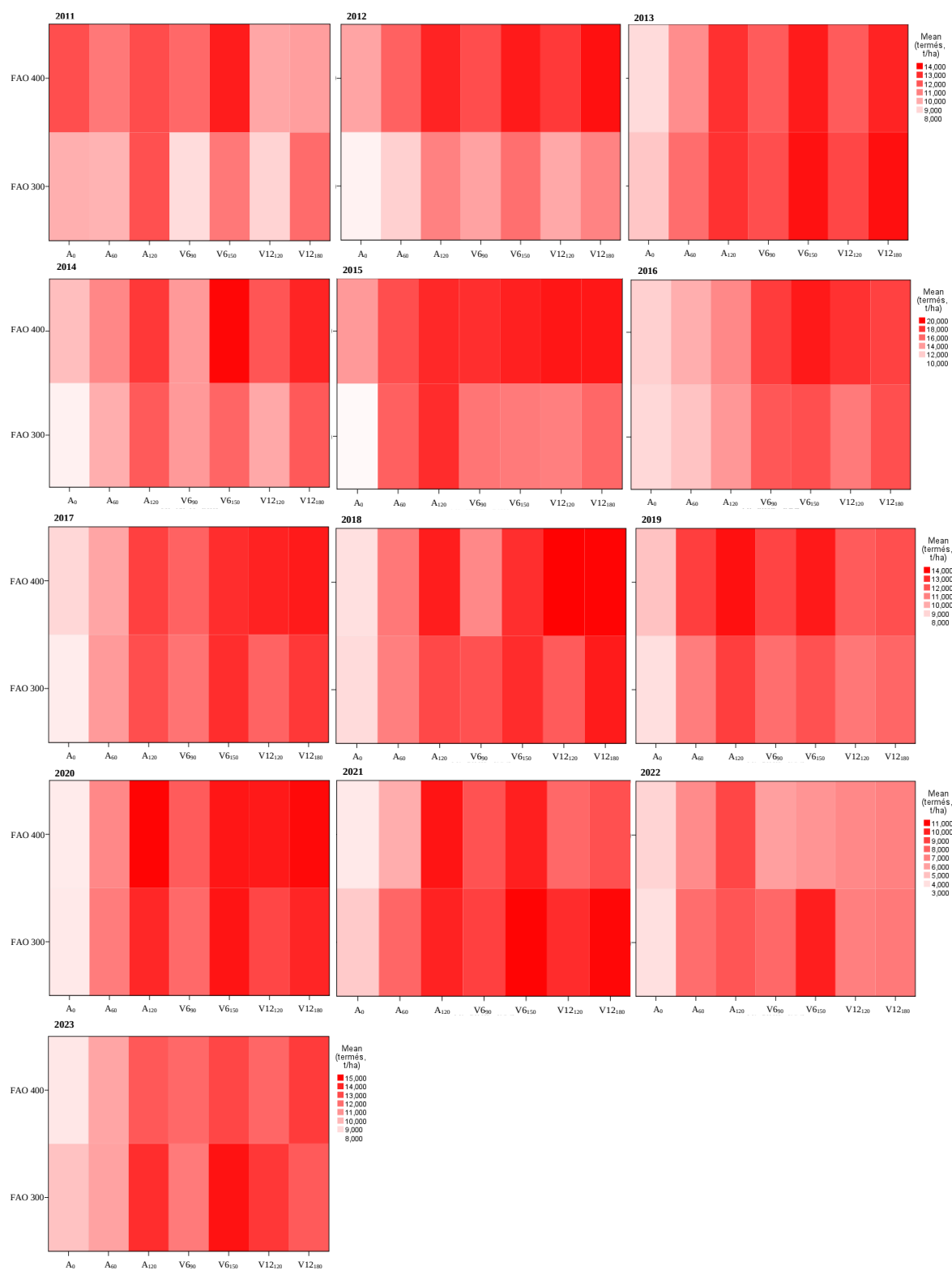


12. ábra. Az évjárat hatása különböző éréscsoportú kukorica hibridek termésére (Debrecen, 2011–2023)

Megjegyzés: a FAO 300 éréscsoportnál a kis betűvel, a FAO 400 éréscsoportnál a nagybetűvel jelzett értékek $p < 0,05$ valószínűségi szinthe szignifikánsan különböznek egymástól a Duncan-teszt alapján.

Értékeljük évenként a két éréscsoportba tartozó kukorica hibridek termésének alakulását a nitrogén alap- és fejtrágyakezelés hatására (13. ábra). A szignifikánsan igazolt ($p < 0,05$) kezelések közül FAO 300-as éréscsoportnál a V6₁₅₀ kezelés biztosította a legnagyobb termést az évek többségében, azaz öt évben (2013, 2017, 2018, 2020, 2023), átlagosan 5,452 t ha⁻¹-al, az A₀ kezeléshez viszonyítva. A FAO 400-as éréscsoport esetében az A₁₂₀ kezelés bizonyult termésnövelő hatásúnak az évek többségében, vagyis hét évben (2012, 2013, 2017, 2020, 2021, 2022, 2023), azonban átlagosan alacsonyabb mértékben (4,679 t ha⁻¹). Összességében a 13 év átlagában mindkét éréscsoportnál a V6₁₅₀ kezelés volt eredményes. A FAO 400 éréscsoport terméseredménye az A₀ kezeléshez viszonyítva százalékosan jelentősebb növekedést mutatott (51,7%), mint a FAO 300 csoport (44,6%). Amennyiben a fejtrágyakezelés hatását vizsgáljuk, az látható, hogy az alap 120 kg N ha⁻¹ + a V6 fenofázisban további 30 kg N ha⁻¹ kijuttatása (V6₁₅₀) a FAO 300-as éréscsoportnál 3,9%-os, míg a FAO 400-as éréscsoportnál alacsonyabb, 2,3%-os növekedést hozott. Ez annak tulajdonítható, hogy a FAO 300-as éréscsoportba tartozó hibridek természetes tápanyag-hasznosító képessége jobb volt, és alacsonyabb, 39,1%-os növekedést eredményezett az A₁₂₀ kezelés hatására, míg a FAO 400 éréscsoportnál ennek a kezelésnek a hatása jelentősebb, a növekedés 48,3% volt. Mindkét éréscsoportnál az évek

közötti változékonyság a legnagyobb a nem műtrágyázott (A_0) kezelésben (FAO 300 CV=28,9%; FAO 400 CV=30,9%) és a legkisebb az A_{120} kezelésben volt (FAO 300 CV=13,4%; FAO 400 CV=12,9%).



13. ábra. A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport termésére (Debrecen, 2011–2023)

Az éréscsoportok között a 13 év folyamán szignifikáns eltérés az A₀ kezelésben három évben (2011: $p < 0,05$; 2012: $p < 0,05$; 2015: $p < 0,001$), az A₁₂₀ kezelésben két évben (2018: $p < 0,05$; 2020: $p < 0,05$) volt. A három fejtrágyakezelésben (V₆₁₅₀, V₁₂₁₂₀ és V₁₂₁₈₀) 2015-ben, ahol mindhárom esetben a szignifikancia szint $p < 0,05$ volt, illetve a 2016. évben V₁₂₁₂₀ ($p < 0,05$) és a 2018. évben szintén a V₁₂₁₂₀ kezelésben ($p < 0,001$). Ezekben a kezelésekben minden esetben a FAO 400-as éréscsoport termése volt eredményesebb. A nem műtrágyázott és az alapkezelésekben a FAO 400-as éréscsoport előnye jelentősen alacsonyabb volt (átlagosan 1,556 t ha⁻¹), mint a fejtrágyakezelésekben (2,640 t ha⁻¹).

4.3.3. Környezeti tényezők és a N-műtrágyázás hatása a kukoricamag keményítőtartalmára (2011–2023)

A keményítőtartalom a kukorica egyik fontos értékmérő tulajdonsága. A kukoricagabona-felhasználók és -feldolgozók egyre nagyobb figyelmet fordítanak a kukoricamag minőségi jellemzői iránt, amit igazol, hogy több keményítőt állítanak elő kukoricából, mint bármely más növényből. A klimatikus tényezők meghatározzák a szemtermés mennyisége mellett a minőséget, így a keményítőtartalmat is. Fő célunk volt 13 éves adatsor alapján vizsgálni, hogy a N-műtrágyázás mint az egyik legfontosabb agrotechnikai tényező, valamint az eltérő éghajlati viszonyok hogyan befolyásolják a kukoricamag keményítőtartalmát, illetve a két éréscsoport összehasonlítására irányultak. Az értékelés két éréscsoportba (FAO 300 és FAO 400) tartozó 18 hibrid, 13 éves (2011–2023) adatai alapján történt. A méréseket a „Nitrogén alap- és fejtrágyázás” tartamkísérletben végeztük az „Anyag és módszer” fejezetben leírtak alapján.

A többtényezős varianciaanalízis (ANOVA) kimutatta, hogy a kukoricamag keményítőtartalmát a fő tényezők (N-műtrágyázás, éréscsoport, évek) mindegyike szignifikánsan befolyásolta, a N-műtrágyázás és az évek 0,1%-os, míg az éréscsoport 1%-os szinten. Az MS érték alapján az évek hatása volt a jelentősebb. Az elsőrendű kölcsönhatások közül az év $\times$ N-műtrágyázás ($p < 0,01$), az év $\times$ éréscsoport ($p < 0,001$) kölcsönhatás érvényesült, és nem volt szignifikáns az éréscsoport $\times$ N-műtrágyázás kölcsönhatása. A 3-as interakció nem vezetett szignifikáns eredményre (10. táblázat).

Az éréscsoport alapján lefuttatott varianciaanalízis a két fő tényező (N-műtrágyázás, évek) szignifikáns ($p < 0,001$) hatását mindkét éréscsoportnál kimutatta. A N-műtrágyázás $\times$ év kölcsönhatás a FAO 400-as éréscsoportnál érvényesült ($p < 0,01$).

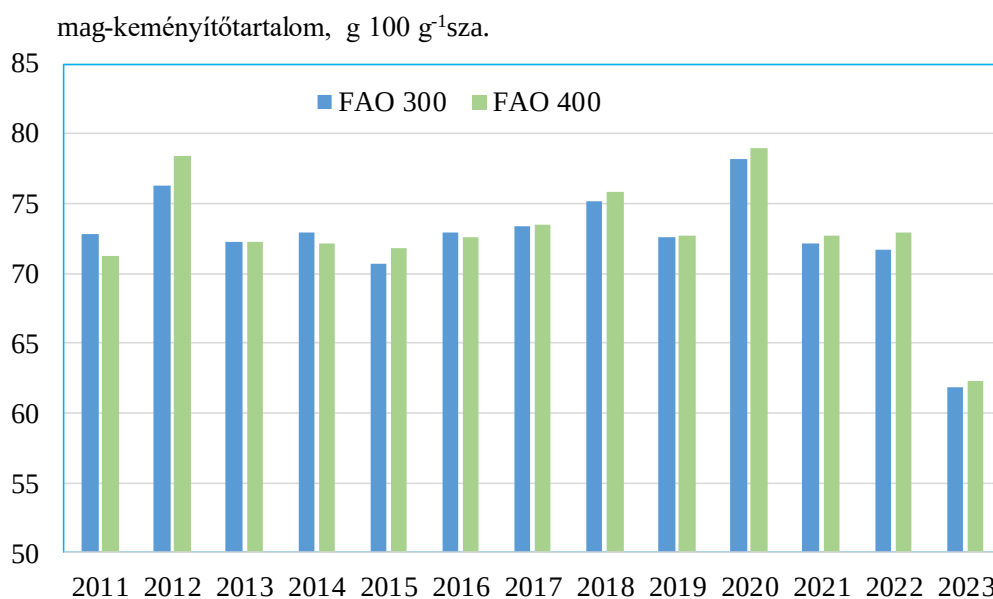
Vizsgálatunkban a keményítőtartalom tartomány 61,9 g és 79 g 100 g⁻¹sza. között változott, szignifikáns különbségeket mutatva. Mind a FAO 300 (78,2 g 100 g⁻¹sza.; $p < 0,05$), mind a FAO 400 (79,0 g 100 g⁻¹sza.; $p < 0,05$) éréscsoport legnagyobb keményítőtartalma – a kezelések

átlagában – a 2020. évben, míg a legalacsonyabb a 2023. évben volt (61,9 g 100 g⁻¹sz.; 62,39 g 100 g⁻¹sz.). A két érték közötti százalékos eltérés a FAO 300 éréscsoportnál 17,6%, a FAO 400 éréscsoportnál 26,8% (14. ábra). Az évek közötti keményítőtartalom-ingadozás a variációs koefficiens (CV %) érték alapján a FAO 400 éréscsoportnál nagyobb (CV=5,5%), mint a FAO 300 éréscsoportnál (CV=5,2%).

10. táblázat. A kukoricamag keményítőtartalmának összevont varianciaanalízis eredménye (Debrecen, 2011–2023)

Tényező	DF	SS	MS	F
Év (É)	12	9003,046	750,254	357,515***
Éréscsoport (Écs)	1	23,724	23,724	11,305**
N-műtrágyázás (N)	6	144,435	24,073	11,471***
2-interakció				
É×Écs	12	151,114	12,593	6,001***
É×N	72	264,936	3,680	1,753***
Écs×N	6	10,159	1,693	0,807 ^{nsz}
3-interakció				
É×Écs×N	72	145,064	2,015	0,960 ^{nsz}

Megjegyzés: ***p<0,001; **p<0,01; nsz=nem szignifikáns.



14. ábra. Az évjárat hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport mag-keményítőtartalmára (Debrecen, 2011–2023)

Az évenként elvégzett varianciaanalízis eredménye azt mutatta, hogy a N-műtrágyázás a 13 vizsgált évből hét évben nem mutatott szignifikáns hatást a kukoricamag keményítőtartalmára. Három évben (2016, 2017, 2019) 0,1%-os, egy évben (2018) 1%-os és két évben (2011, 2023) 5%-os szinten volt igazolt a N-műtrágyázás hatása. Az éréscsoport szignifikáns hatása nyolc évben érvényesült, ebből két évben (2012, 2023) 0,1%-os, egy évben 1%-os, és öt évben (2014,

2015, 2018, 2020, 2022) 5%-os szinten volt igazolt. Az éréscsoport és a N-műtrágyázás között mindössze a 2011. évben volt kölcsönhatás (11. táblázat).

11. táblázat. A N-műtrágyázás és különböző éréscsoportba tartozó hibridek és interakcióinak hatása a kukoricamag keményítőtartalmára. Közepes négyzetes eltérései (MS) és az F-érték szignifikanciája az évenkénti varianciaanalízis alapján (Debrecen, 2011–2023)

Tényező	DF	Mean Squares (MS) érték						
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
N-műtrágya (A)	6	9,155*	5,917 ^{nsz}	0,434 ^{nsz}	1,219 ^{nsz}	3,735 ^{nsz}	14,357***	11,717***
Éréscsoport (B)	1	40,009**	78,621***	0,131 ^{nsz}	4,443*	16,035*	0,396 ^{nsz}	0,365 ^{nsz}
A x B	6	8,415*	0,448 ^{nsz}	1,010 ^{nsz}	0,477 ^{nsz}	0,358 ^{nsz}	0,599 ^{nsz}	0,428 ^{nsz}
		2018	2019	2020	2021	2022	2023	
N-műtrágya (A)	6	7,611**	9,369***	2,359 ^{nsz}	6,432 ^{nsz}	2,481 ^{nsz}	0,446*	
Éréscsoport (B)	1	10,198*	0,006 ^{nsz}	7,497*	7,224 ^{nsz}	11,687*	3,340***	
A x B	6	1,194 ^{nsz}	0,691 ^{nsz}	0,784 ^{nsz}	9,432 ^{nsz}	1,598 ^{nsz}	0,241 ^{nsz}	

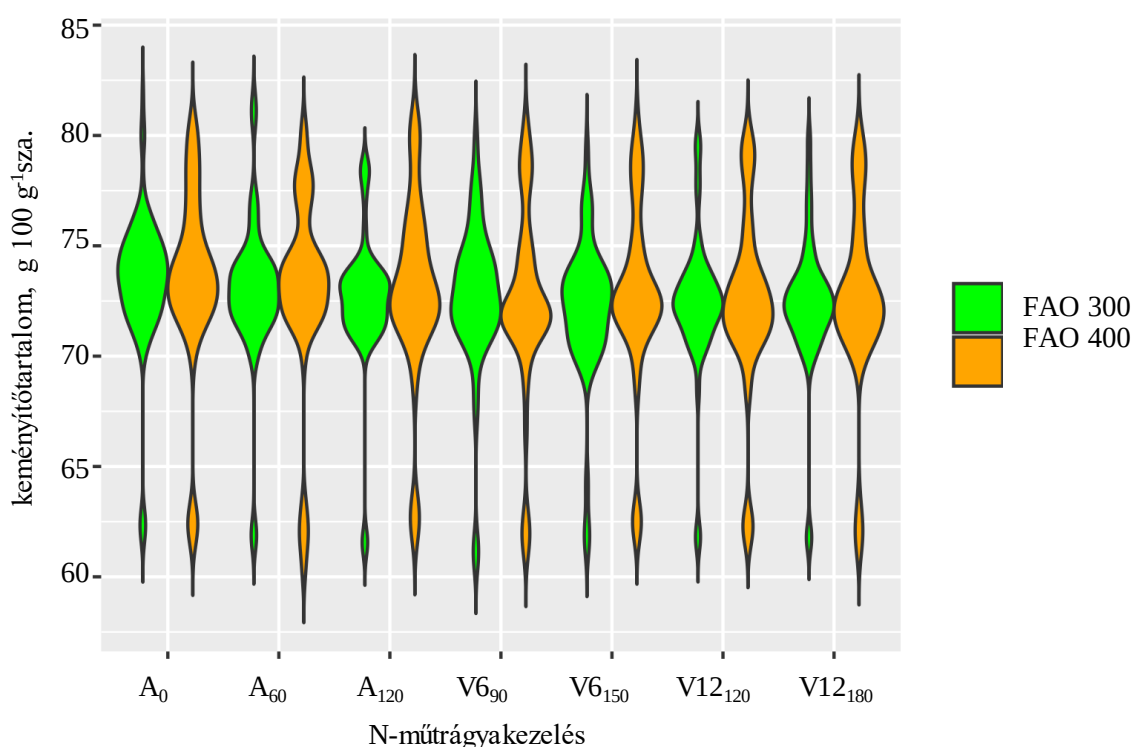
Megjegyzés: *** $p < 0,001$, ** $p < 0,01$; * $p < 0,5$; nsz=nem szignifikáns.

A Duncan-teszt szignifikáns ($p < 0,05$) változást mutatott hét évben (2014–2019, 2023), ahol az A₀ kezelésben volt nagyobb a keményítőtartalom és a N-műtrágyázás hatására csökkentek az értékek. Ezen évek közül a 2023. évben volt a legalacsonyabb (62,4 g 100 g⁻¹sza.) és a legmagasabb a 2018. évben (76,3 g 100 g⁻¹sza.), amely 19,4%-os eltérést jelent. Öt évben (2012–2013, 2020–2022) szintén az A₀ kezelésben volt nagyobb a keményítőtartalom, azonban a Duncan-teszt a hét N-műtrágyakezelés között nem mutatott megbízható különbséget. Egy évben (2011) a V₆₉₀ kezelésben (73,5 g 100 g⁻¹sza.; $p < 0,05$) volt a legnagyobb. Összességében, a 13 év átlagában a nem műtrágyázott (A₀) kezelésben volt nagyobb a keményítőtartalom (73,3 g 100 g⁻¹sza.), SD 3,8 és a CV%=5,3. A N-műtrágyázás hatására a keményítőtartalom csökkent, azonban a csökkenés mértéke szignifikánsan nem igazolt.

Értékeljük évenként a két éréscsoportba tartozó kukorica hibridek keményítőtartalmának alakulását az alap- és fejtrágyakezelés hatására. A FAO 300-as csoport esetében kilenc évben (2012, 2014–2019, 2021, 2023) az A₀ kezelés biztosította a nagyobb keményítőtartalmat, ebből hét év (2014–2017, 2019, 2021, 2023) bizonyult szignifikánsnak ($p < 0,05$). Két évben a fejtrágyakezelések (V₆₉₀, 2011; V₆₁₅₀, 2020) hatására alakult ki nagyobb ($p < 0,05$) keményítőtartalom, míg a 2013. évben a V₆₉₀ és a 2020. évben az A₁₂₀ kezelésben volt nagyobb a keményítőtartalom, azonban ez szignifikánsan nem igazolt. A FAO 400 éréscsoport keményítőtartalmát a kezelések öt évben befolyásolták szignifikánsan ($p < 0,05$), ebből két

évben az A₀ kezelésben (2016, 2019), két évben a V6₁₂₀ kezelésben (2011, 2012) és egy évben az A₁₂₀ kezelésben (2020). A két csoport összehasonlításában azt láttuk, hogy mindkét éréscsoport keményítőtartalmának alakulását a környezeti tényezők befolyásolták. A nagyobb keményítőtartalom mind a FAO 300, mind a FAO 400 éréscsoportnál az A₀ kezelésben volt, azonban szignifikánsan nem különbözött a többi kezelés keményítőtartalmától (15. ábra). Az A₀ kezelésen belül a FAO 400 éréscsoport változékonysága nagyobb volt (CV=5,6%), mint a FAO 300 éréscsoport hibridjeinek (CV=5,2%).

Az egyes N-műtrágyakezelésekben FAO csoportok közötti különbség nem következetes. Mindössze néhány N-műtrágyakezelésben volt szignifikáns eltérés.



15. ábra. A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport keményítőtartalmára (Debrecen, 2011–2023)

4.3.4. Környezeti tényezők és a N-műtrágyázás hatása a kukoricamag fehérjetartalmára (2011–2023)

A kukorica (*Zea mays* L.) a legfontosabb állati takarmány és globális élelmiszer-jelentőségű gabonanövény. A felhasználása szempontjából nagy jelentősége van a magas magfehérjetartalom növelésének. A kukoricamagok körülbelül 10% fehérjét tartalmaznak [Peña-Rosas et al. 2014, Wu és Messing 2014]. Amennyiben 60%-ban kukoricatakarmánnyal etetett baromfi- és sertésállományt veszünk figyelembe, akkor átlagosan a baromfi 15,5%, illetve a sertés 16,5% fehérjét igényel növekedésük során. Ez azt jelzi, hogy a kukorica fehérjetartalma

nem elegendő a takarmány fehérjeszükségletének kielégítésére. A kukoricamag fehérjetartalmának növelése érdekében 13 évig végzett (2011–2023) kutatás során arra kerestük a választ, hogy a változó klimatikus tényezők, az éréscsoport és az eltérő N-műtrágyázás hatására – nem műtrágyázott és hat különböző N dózist alkalmazva –hogyan alakul a kukoricamag fehérjetartalma. Továbbá, ezen hatások számszerűsítése, alkalmazási lehetőségeket nyújtva a jövőbeli éghajlatváltozáshoz való alkalmazkodáshoz, annak ellenére, hogy az eredmények regionálisan változnak. Az értékelés két éréscsoportba (FAO 300 és FAO 400) tartozó 18 hibrid, 13 éves (2011–2023) adatai alapján történt. A méréseket a „Nitrogén alap- és fejtrágyázás” tartamkísérletben végeztük az „Anyag és módszer” fejezetben leírtak alapján.

Az elvégzett többtényezős (N-műtrágyázás, éréscsoport és az évek) varianciaanalízis (ANOVA) vizsgálat mindhárom fő tényező ($P < 0,001$) hatását kimutatta a kukoricamag fehérjetartalmára. Az MS érték nagysága jelzi a környezeti tényező (évek) elsődlegességét, és Izsáki [2009] eredményeivel egyezően a N-műtrágyázás másodlagosságát. A fehérjetartalom ugyan genetikailag meghatározott [Idikut 2009, Randjelovic et al. 2011], de műtrágyázással befolyásolható [Ványiné Széles és Nagy 2012]. A 2-es kölcsönhatások közül az év $\times$ N-műtrágyázás interakció gyakorolt jelentős ($p < 0,001$) hatást a mag-fehérjetartalom változékonyságára. A 3-as kölcsönhatás nem vezetett szignifikáns eredményre (12. táblázat).

12. táblázat. A kukoricamag fehérjetartalmának összevont varianciaanalízis eredménye (Debrecen, 2011–2023)

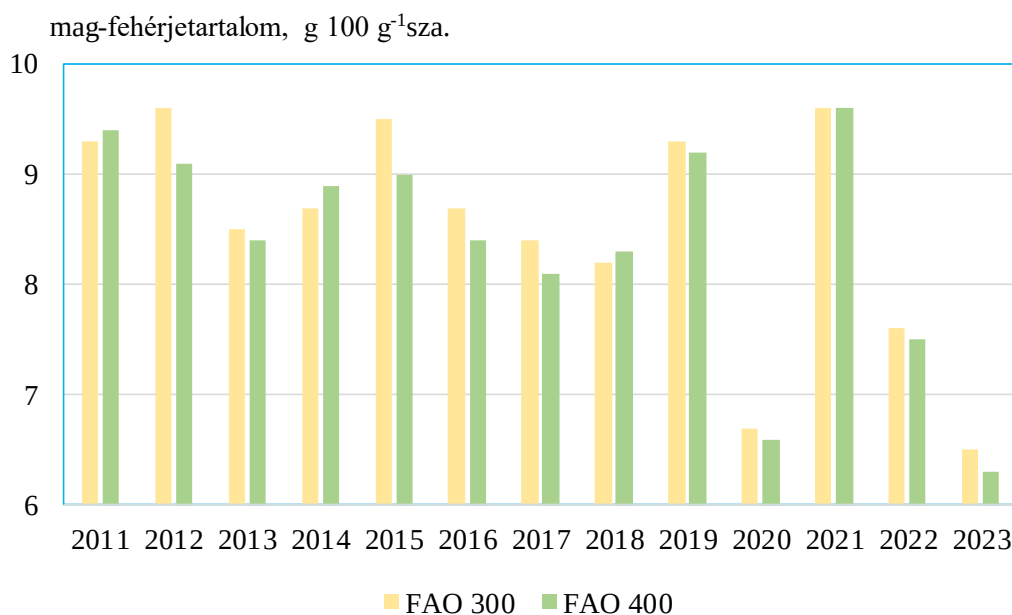
Tényező	DF	SS	MS	F
Év (É)	12	667,831	55,653	144,567***
Éréscsoport (Écs)	1	6,135	6,135	15,938***
N-műtrágyázás (N)	6	201,340	33,557	87,169***
2-interakció				
É $\times$ Écs	12	7,987	0,666	1,729 ^{nsz}
É $\times$ N	72	83,427	1,159	3,010***
Écs $\times$ N	6	4,409	0,735	1,909 ^{nsz}
3-interakció				
É $\times$ Écs $\times$ N	72	28,554	0,397	1,030 ^{nsz}

Megjegyzés: *** $p < 0,001$; nsz=nem szignifikáns.

Az éréscsoport alapján lefuttatott varianciaanalízis, a két fő tényező (N-műtrágyázás, évek), illetve ezen fő tényezők kölcsönhatását ($p < 0,001$) mindkét éréscsoportnál kimutatta.

A FAO 300 éréscsoportnál a mag-fehérjetartalom a N-műtrágyakezelések és az évek átlagában 8,5 g 100 g⁻¹-sza. volt. A legnagyobb fehérjetartalom 2021-ben volt (9,6 g 100 g⁻¹-sza.), amely jól elkülönült a többi év fehérjetartalmától ($p < 0,05$), kivéve 2011, 2012, 2015 és 2019 éveket, ahol az értékek hasonlóak voltak. A legkisebb fehérjetartalom 2023-ban alakult ki (6,5

g 100 g⁻¹sza.), amely a szignifikánsan igazolt legnagyobb értékhez képest 32,3%-os csökkenés. A FAO 400 éréscsoportnál – a FAO 300 éréscsoportéhoz hasonlóan – a szignifikánsan ($p < 0,05$) igazolt legnagyobb fehérjetartalom a 2021. évben volt (9,6 g 100 g⁻¹sza.), míg a legalacsonyabb a 2023. évben (6,3 g 100 g⁻¹sza.), a százalékos változás 34,4% (16. ábra). Összességében a 13 év és a N-műtrágyakezelések átlagában a kukoricamag fehérjetartalma 8,4 g 100 g⁻¹sza. volt. Négy évben (2011, 2012, 2015, 2021) alakult ki magas fehérjetartalom (9,3–9,6 g 100 g⁻¹sza., $p < 0,05$), amely a Duncan-teszt alapján egy csoportot képezett.



16. ábra. Az évjárat hatása a FAO 300 és a FAO 400 éréscsoport mag-fehérjetartalmára (Debrecen, 2011–2023)

Az évenként elvégzett varianciaanalízis kimutatta, hogy a N-műtrágyázás három év kivételével (2011, 2012, 2013) jelentős, szignifikáns ($p < 0,001$) hatást gyakorolt a mag-fehérjetartalomra. Az éréscsoportok öt évben mutattak befolyásoló hatást a fehérjetartalomra, egy évben 0,1%-os (2016), két évben 1%-os (2015, 2017) és két évben 5%-os (2012, 2023) szinten. A N-műtrágyázás × éréscsoport kölcsönhatás mindössze két évben volt szignifikáns (2014: $p < 0,01$; 2018: év $p < 0,05$) (13. táblázat).

A nitrogén alap- és fejtrágyázás a kutatás éveiben eltérő módon befolyásolta a kukorica fehérjetartalmának alakulását. A Duncan-teszt évenkénti eredménye az éréscsoportok átlagában kimutatta, hogy a nem műtrágyázott (A_0) kezelésekben volt a legalacsonyabb a fehérjetartalom minden évben. Három évben (2011, 2012, 2013) a N-műtrágyázásnak nem, és tíz évben volt szignifikáns fehérjetartalom-növelő hatása. A statisztikai elemzés igazolta ($p < 0,05$), hogy hat évben (2014, 2015, 2016, 2017, 2020, 2023) az alap 120 kg N ha⁻¹ (A_{120}) kezelés, míg négy

évben a fejtrágyakezelések növelték ($p < 0,05$) a fehérjetartalmat. Egy évben (2018) a V_{690} , egy évben (2021) a V_{6150} , és két évben (2019, 2022) a V_{12120} kezelések voltak eredményesek. A szignifikánsan igazolt legjobb N-műtrágyázásnak öt évben (2016, 2018, 2019, 2021, 2023) volt 20% feletti fehérjetartalom növelő hatása az A_0 kezeléshez képest. Ezek közül legjelentősebb a 2018. évben volt (25,0%). A legkisebb százalékos növekedés (8,2%) 2023-ban volt. A 13 év átlagában is az A_0 kezelésben volt a legalacsonyabb a fehérjetartalom (7,8 g 100 g⁻¹sza.) és egyben ebben a kezelésben volt az évek közötti változékonyság a legnagyobb (CV%=13,4%). A legkisebb változékonyságot a V_{690} kezelés mutatta (CV=11,7%). Eredményes kezelésnek a 120 kg N ha⁻¹ (A_{120}) bizonyult ($p < 0,05$), és bár a további N-műtrágyázás hatására ugyan növekedett a fehérjetartalom egészen a V_{12180} kezelésig (9,0 g 100 g⁻¹sza.), azonban fehérjetartalmat a Duncan-teszt ugyanazon egy csoportba sorolta, különbséget nem mutatott ki.

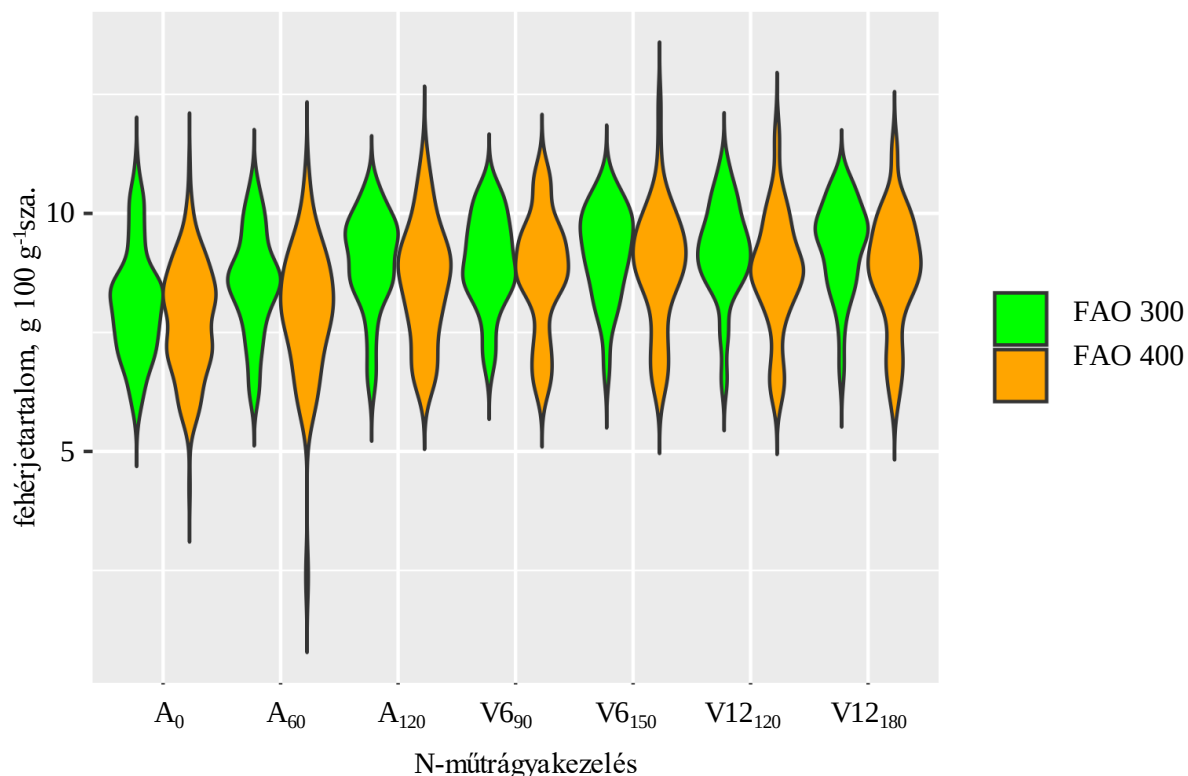
13. táblázat. A N-műtrágyázás és különböző éréscsoportba tartozó hibridek és interakcióinak hatása a kukoricamag fehérjetartalmára. Közepes négyzetes eltérései (MS) és az F-érték szignifikanciája az évenkénti varianciaanalízis alapján (Debrecen, 2011–2023)

Tényező	DF	Mean Squares (MS) érték						
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
N-műtrágya (A)	6	0,242 ^{nsz}	0,654 ^{nsz}	0,205 ^{nsz}	4,667 ^{***}	2,936 ^{***}	8,607 ^{***}	7,937 ^{***}
Éréscsoport (B)	1	0,129 ^{nsz}	3,461 [*]	0,326 ^{nsz}	0,077 ^{nsz}	4,317 ^{**}	3,680 ^{***}	1,914 ^{**}
A × B	6	0,081 ^{nsz}	0,199 ^{nsz}	0,098 ^{nsz}	3,017 ^{**}	0,294 ^{nsz}	0,253 ^{nsz}	0,329 ^{nsz}
		2018	2019	2020	2021	2022	2023	
N-műtrágya (A)	6	9,871 ^{***}	8,540 ^{***}	3,185 ^{***}	4,362 ^{**}	1,036 ^{***}	0,457 ^{***}	
Éréscsoport (B)	1	0,005 ^{nsz}	0,026 ^{nsz}	0,554 ^{nsz}	0,019 ^{nsz}	0,331 ^{nsz}	0,510 [*]	
A × B	6	0,596 [*]	0,114 ^{nsz}	0,149 ^{nsz}	0,200 ^{nsz}	0,050 ^{nsz}	0,012 ^{nsz}	

Megjegyzés: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; nsz=nem szignifikáns.

Külön-külön értékelve az éréscsoportokat a statisztikai elemzés azt mutatta, hogy a FAO 300 éréscsoportnál a N-műtrágyázásnak három évben (2011, 2012, 2013) nem volt, és tíz évben volt fehérjetartalom növelő hatása. Az alap 120 kg N ha⁻¹ kezelés négy évben, míg a fejtrágyakezelések hat évben növelték szignifikánsan ($p < 0,05$) a fehérjetartalmat, az A_{120} kezelés 2014, 2016, 2019 és 2021 években, a V_{690} kezelés két évben (2015, 2023), a V_{6150} kezelés két évben (2018, 2020), és a V_{12180} kezelés szintén két évben (2017, 2022). A legkisebb százalékos növekedés az A_0 kezeléshez viszonyítva a 2023. évben volt (V_{690} ; 9,5%), míg a legnagyobb a 2018. évben (V_{6150} ; 31,0%), de jelentős, 20,0% feletti volt három évben (2016, 2017, 2020). A 13 év átlagában a FAO 300-as éréscsoportnál az A_{120} kezelés növelte szignifikánsan ($p < 0,05$) a fehérjetartalmat, a további fejtrágyakezelések ugyan növelték az

értékeket, de megbízhatóan nem tértek el az A₁₂₀ kezelés fehérjetartalmától (17. ábra). Az évek közötti változékonyság a fehérjetartalom tekintetében a legnagyobb az A₀ kezelésben (CV=13,5%), míg a legkisebb a V6₁₅₀ kezelésben (CV=11,7%) volt.



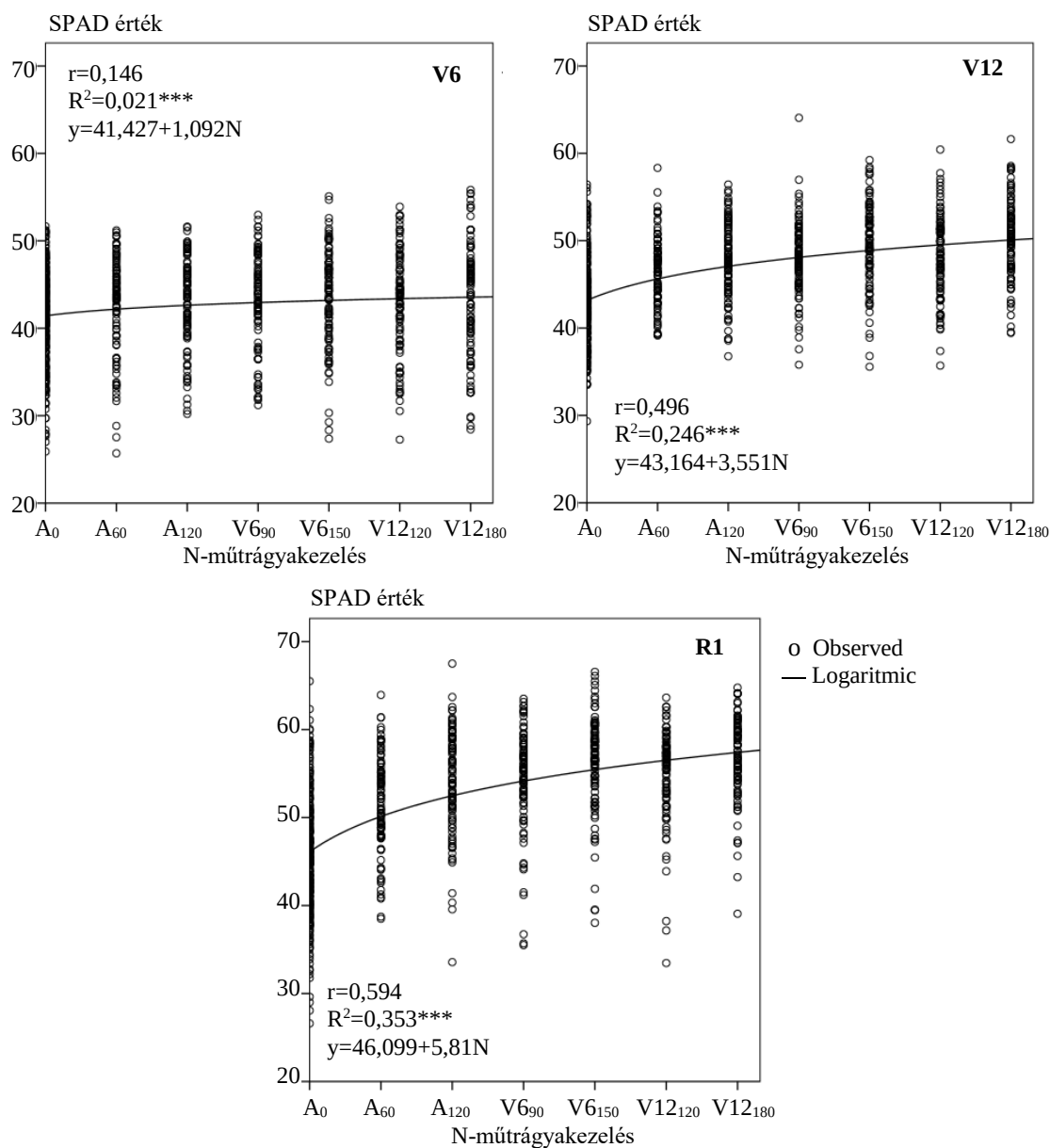
17. ábra. A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport magfehérjetartalmára (Debrecen, 2011–2023)

A FAO 400 éréscsoport esetében a N-műtrágyázásnak egy évben (2013) nem és 12 évben volt megbízható ($p < 0,05$) hatása a fehérjetartalom alakulására. Hét évben az alapkezelések, az A₆₀ (2011, 2016, 2019) és A₁₂₀ kezelés (2014, 2015, 2017, 2020), valamint öt évben a fejtrágyakezelések voltak eredményesek. A V6₉₀ kezelésnek két évben (2018, 2023), a V6₁₅₀ kezelésnek két évben (2012, 2021), valamint a V12₁₈₀ kezelésnek egy évben (2022) volt jelentős hatása. A szignifikánsan igazolt N-műtrágyakezelések közül 20,0% feletti növekedés két évben (2018: 26,7% és 2021: 21,6%) volt az A₀ kezeléshez képest. A legkisebb százalékos növekedés a 2011. évben volt (A₆₀; 5,4%). A 13 év átlagát tekintve a FAO 400 éréscsoportnál is az A₀ kezelésben volt a legalacsonyabb a fehérjetartalom, amely a N-műtrágyázás hatására szignifikánsan ($p < 0,05$) növekedett az A₁₂₀ szintig, a további N-kezelés megbízható növekedést nem eredményezett (17. ábra). A kukorica magfehérjetartalom évek közötti változékonysága a V6₉₀ fejtrágyakezelésben volt a legkisebb (CV=12,6%), míg a legnagyobb az A₆₀ alapkezelésben (16,3%).

4.3.5. A termés mennyiségi, minőségi paraméterei és a relatív klorofilltartalom (SPAD) közötti összefüggések elemzése különböző N-műtrágyázási szinteken (2011–2023)

A N-műtrágya alkalmazása és a klorofilltartalom (SPAD érték) közötti kapcsolatot a kezelések átlagában különböző fenofázisokban elemeztük. Az eredmények alapján a kezelések átlagában a V6 fenofázisban gyenge, de statisztikailag szignifikáns ($r=0,146^{***}$) korrelációt találtunk. A V12 fenofázisban és a nővirágzás (R1) időszakában a korrelációs együttható magasabb értéket mutatott, és közepes erősségű kapcsolatot igazolt ($r=0,496^{***}$; $r=0,594^{***}$) (18. ábra). Az éréscsoportok külön-külön értékelése azt mutatta, hogy a FAO 300 éréscsoport esetében a két tényező összefüggése gyengébb volt (V6: $r=0,126^{**}$, V12: $r=0,475^{***}$), mint a FAO 400 éréscsoportnál (V6: $r=0,168^{***}$, V12: $r=0,515^{***}$). A V12 fenofázisban 22,6% (FAO 300) és 26,5% (FAO 400) volt a N-műtrágyának befolyásoló hatása a SPAD érték alakulására. Az R1 szakaszban az összefüggés mindkét csoportnál erősödött, és a FAO 300 éréscsoport esetében minimálisan ugyan, de erősebb volt ($r=0,601^{***}$), mint a FAO 400 éréscsoportnál ($r=0,594^{***}$). A N-műtrágyázás befolyásoló hatása 35,2% (FAO 400) és 36,1% (FAO 300) között volt.

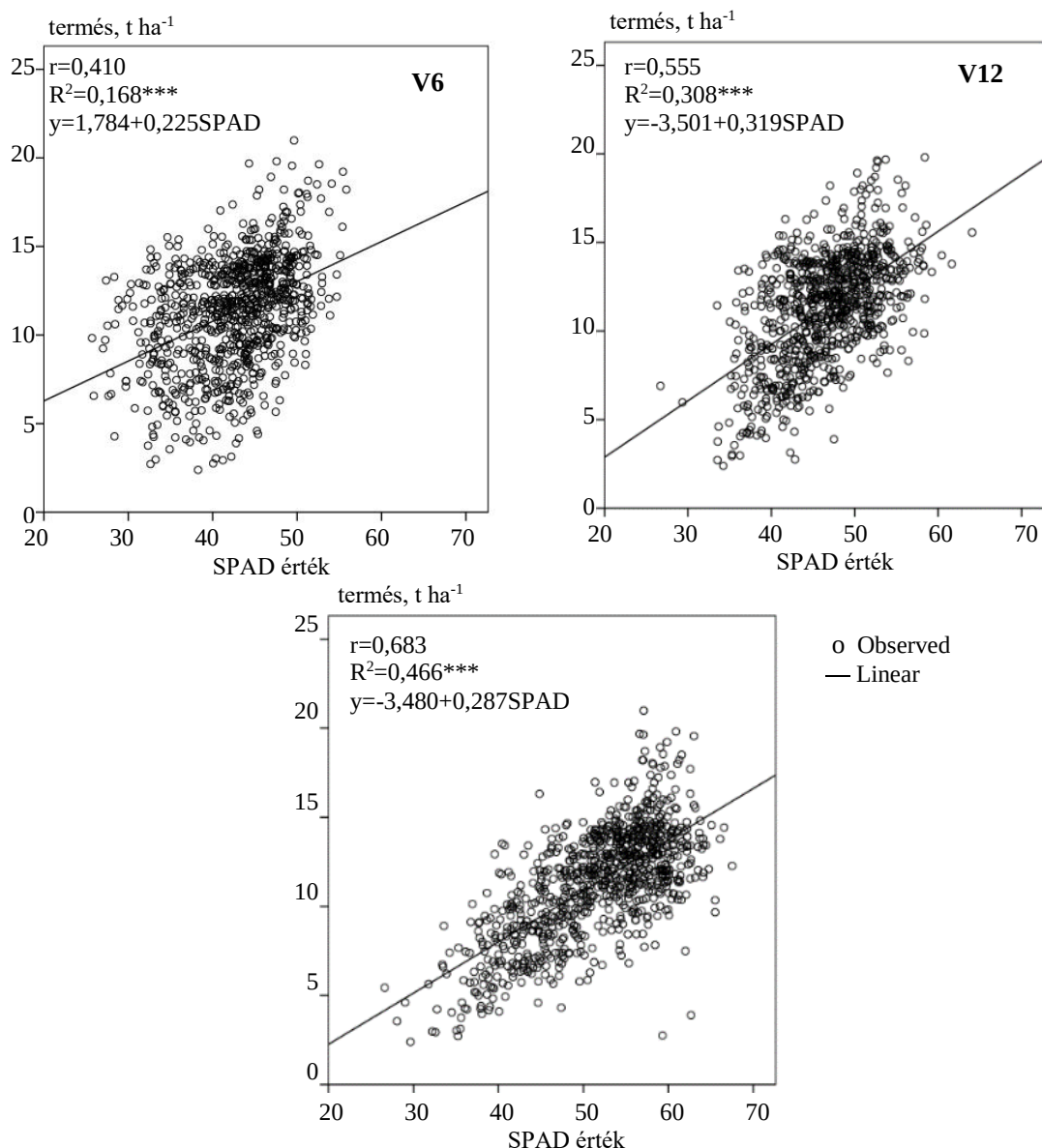
A N-műtrágya és a SPAD értékek közötti kapcsolatot a FAO csoportok átlagában évenként és fenológiai szakaszonként is elemeztük. A V6 fenofázisban öt évben (2012, 2013, 2016, 2020, 2022) igazoltunk szignifikáns kapcsolatot. Ezen évek közül 2016-ban közepes ($r=0,598^{***}$), négy évben pedig gyenge volt a két változó közötti összefüggés, a korreláció a 2022. év ($p<0,01$) kivételével $p<0,001$ szinten igazoltak. A V12 fenofázisban egy év kivételével (2019) minden évben igazoltuk a korrelációt, amelyek $p<0,001$ szinten megbízhatóak, kivéve a 2011. évet ($p<0,01$). Három évben (2011, 2014, 2015) gyenge ($r=0,314^{**}$; $r=0,500^{***}$; $r=0,441^{***}$), négy évben (2012, 2021, 2022, 2023) közepes, míg öt évben (2013, 2016, 2017, 2018, 2020) erősebb, szoros volt a korreláció. A legszorosabb összefüggés a 2016. évben volt ($r=0,862^{***}$). Az R1 fenofázisra minden évben kimutatható volt a pozitív összefüggés $p<0,001$ szinten, a 2019. évet kivéve ($p<0,05$). A 2011. és 2019. években az előző fenofázishoz képest a tényezők közötti nem szignifikáns kapcsolat gyenge korrelációvá változott ($r=0,371^{***}$; $r=0,279^{*}$), két évben közepes (2015, 2022) és kilenc évben szoros volt az összefüggés, mely összefüggés $r=0,719^{***}$ (2021) és $r=0,912^{***}$ (2023) között változott. Ebben a fenofázisban a N-műtrágyázás befolyásoló hatása 13,7% és 83,3% között alakult. Összességében kimutatható volt, hogy az összefüggések erőssége és a N-műtrágyázás hatás a SPAD érték alakulására évenként jelentősen különböző volt mindhárom fenofázisban.



18. ábra. A N-műtrágyázás és SPAD érték közötti összefüggés, logaritmikus regressziós eredménye, V6, V12 és R1 fenofázisban (Debrecen, 2011–2023)

A klorofilltartalom (SPAD érték) és a kukorica termése között, a V6 fenofázisban gyenge ($r=0,410^{**}$) korrelációt mutattunk ki a kezelések (év, FAO csoport, N-műtrágya) átlagában. A fenológiai szakaszok előrehaladtával, a V12 és R1 fázisokra jellemzően erősebb összefüggés mutatkozott: a V12-ben közepes szorosságú ($r=0,555^{***}$), míg az R1 fázisban még erősebb korrelációt ($r=0,683^{***}$) figyeltünk meg (19. ábra).

A FAO csoportokat külön-külön értékelve kimutatható volt, hogy a FAO 400 éréscsoportnál a SPAD érték és a termés közötti összefüggés mindhárom fenofázisban erősebb volt, mint a FAO 300 éréscsoportnál. A V6 szakaszban mind a FAO 300 ($r=0,377^{***}$), mind a FAO 400 éréscsoportnál ($r=0,434^{***}$) gyenge volt az összefüggés. A SPAD érték termést befolyásoló hatása ebben a szakaszban alacsony volt (FAO 300: 14,2%; FAO 400: 18,8%).



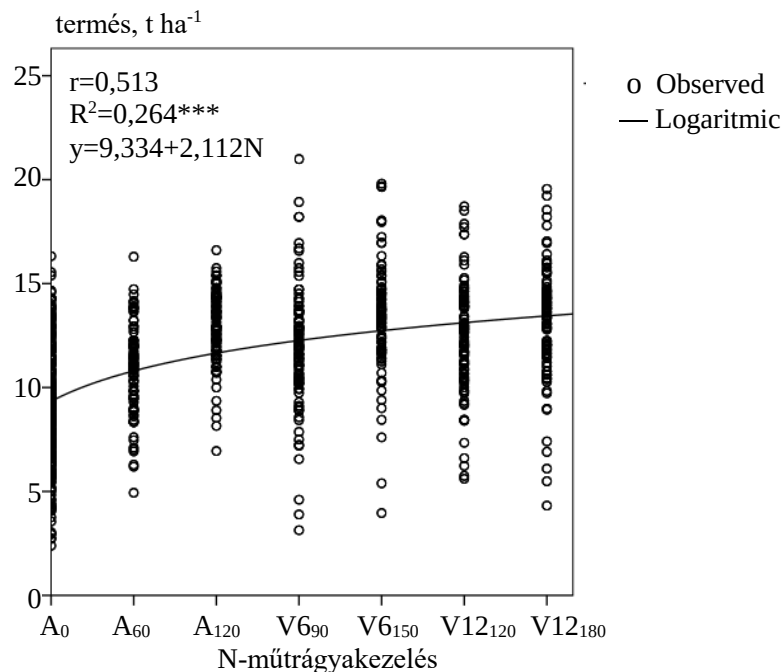
19. ábra. A SPAD érték és a termés közötti összefüggés, lineáris regressziós eredménye V6, V12 és R1 fenofázisban (Debrecen, 2011–2023)

A V12 fenofázisban a két csoport között nagyobb eltérést lehetett kimutatni. A FAO 300 éréscsoport esetében a két tényező közötti kapcsolat ugyan erősödött a V6 szakaszhoz viszonyítva, de még mindig gyenge ($r=0,425***$) volt, míg a FAO 400 éréscsoportnál közepes erősségűvé vált ($r=0,685***$). A FAO 400 éréscsoport esetében jelentős, 43,3%, míg a FAO 300 hibridnél 18,1% volt a SPAD érték befolyásoló hatása. Az R1 fenofázisra a két tényező kölcsönhatása az „r” érték alapján kiegyenlítettebb volt. A FAO 300 éréscsoportnál a kapcsolat a V12 fenofázishoz képest jelentősen erősödött, közepes erősségűvé vált ($r=0,656***$), míg a FAO 400 éréscsoportnál kismértékben változott ($r=0,699***$). A SPAD érték 43,1%-ban (FAO 300) és 48,9%-ban (FAO 400) gyakorolt hatást a termésre.

Az évenként és fenológiai fázisonként elvégzett elemzés az éréscsoportok átlagában kimutatta, hogy a V6 fenofázisban hét évben (2012, 2013, 2015, 2016, 2020, 2022, 2023) volt szignifikáns a két tényező közötti összefüggés, amely a 2023. évben $p < 0,05$, a 2013., 2015. és 2020. években $p < 0,01$ és 2012-ben és 2016-ban $p < 0,001$ szinten igazolt. Ezek az összefüggések gyenge pozitív kapcsolatot mutattak. Az „r” értékek 0,303* (2023) és 0,465*** (2016.) között alakultak. A V12 fenofázisra minden évben – 2019. év kivétel – pozitív szignifikáns korreláció volt igazolható. Az összefüggések $p < 0,001$ szinten igazoltak, kivéve 2011-ben ($p < 0,05$) és 2014-ben ($p < 0,01$). Négy évben (2011, 2012, 2014, 2022) továbbra is maradt a gyenge összefüggés, azonban a többi évben közepes (2015, 2016, 2023) és szoros (2013, 2017, 2018, 2020, 2021) kapcsolattá vált. A legszorosabb összefüggés a 2017. évben volt ($r = 0,836$ ***), ahol a SPAD érték termést befolyásoló hatása 69,9%. Az R1 szakaszra 2011-ben ismét nem lehetett összefüggést kimutatni, míg a vizsgált többi évben tovább növekedett a két tényező közötti összefüggés szorossága. Az összefüggések a 2019. év kivételével ($p < 0,05$) minden évben $p < 0,001$ szinten igazoltak. Az „r”érték alapján növekedett az összefüggés 2012-ben ($r = 0,410$ ***), de továbbra is maradt a gyenge kapcsolat, illetve gyenge volt az összefüggés 2019-ben ($r = 0,320$ *), ahol a V12 szakaszban még nem volt kimutatható összefüggés. Öt évben (2014, 2015, 2016, 2018, 2022) közepes, és szintén öt évben (2013, 2017, 2020, 2021, 2023) szoros volt a korreláció. A legszorosabb összefüggés a 2017. évben volt ($r = 0,838$ ***). A determinációs együttható értékei alapján a SPAD érték hatása a termésmennyiségre a legnagyobb mértékben a V6 fenofázisban a 2016. évben (21,6%) és a V12 (69,9%) és az R1 növekedési fázisban (70,2%) a 2017-es évben volt megfigyelhető. Összességében kimutatható volt, hogy az összefüggések erőssége és a SPAD érték hatás a termés alakulására évenként jelentősen különböző volt, mindhárom fenofázisban.

A *N-műtrágya és a kukorica termése* között közepes szorosságú ($r = 0,513$ ***) korrelációt igazoltunk a kezelések átlagában (20. ábra). Mind a FAO 300 ($r = 0,501$ ***), mind pedig a FAO 400 éréscsoport ($r = 0,528$ ***) esetében a változók közötti összefüggés közepes volt, és a N-műtrágyázás 25,1% és 27,9%-ban gyakorolt hatást a termés alakulására.

Az évenként vizsgált változók közötti korreláció a FAO csoportok átlagában azt mutatta, hogy a 2011. évben nem volt szignifikáns kapcsolat, négy évben közepes (2014, 2015, 2019, 2022) és erős pozitív korreláció volt hét évben (2013, 2016, 2017, 2018, 2020, 2021, 2023), ezen évek közül is a 2020. évben volt a legerősebb az összefüggés ($r = 0,861$ ***). Az összefüggések $p < 0,001$ szinten igazoltak. A determinációs koefficiens értékéből kiindulva a N-műtrágya 2012-ben a legkisebb (19,5%) és 2020-ban a legnagyobb (74,1%) mértékben határozta meg a kukorica termésének alakulását.

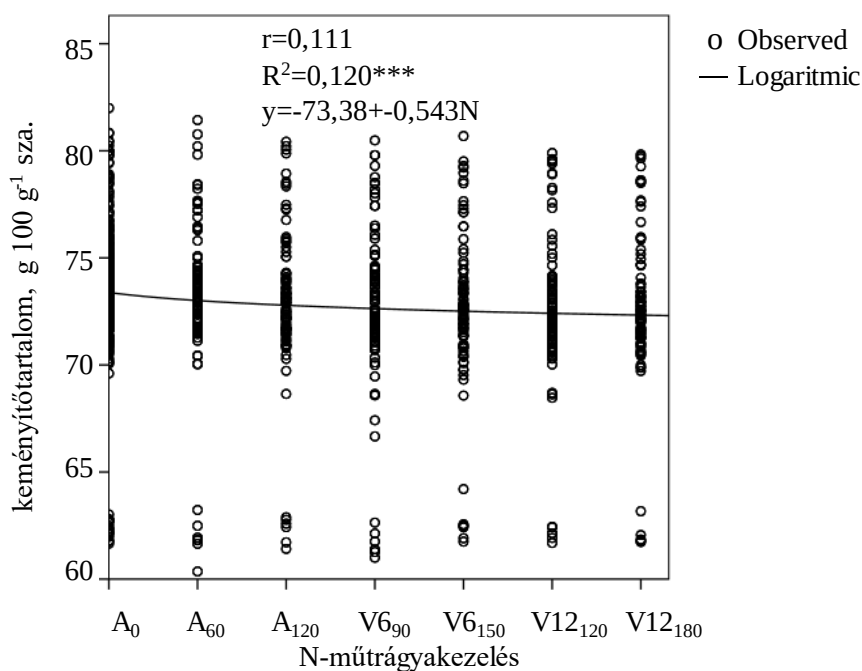


20. ábra. A N-műtrágyázás és a termés közötti összefüggés, logaritmikus regressziós eredménye (Debrecen, 2011-2023)

A FAO csoportok évenkénti N-műtrágyázás és termés összefüggés vizsgálata igazolta, hogy a 2011. évben egyik FAO csoportnál sem alakult ki szignifikáns kapcsolat a két változó között. A FAO 300 éréscsoport esetében egy évben (2012: $r=0,404***$), míg a FAO 400 éréscsoport esetében nem volt gyenge összefüggés a változók között, továbbá közepes erősségű korrelációt lehetett kimutatni a FAO 300 éréscsoportban három évben (2014, 2015, 2019) és a FAO éréscsoportnál négy évben (2012, 2014, 2019, 2022). Szoros összefüggés volt nyolc évben mindkét csoportnál, kis eltéréssel azonos években. Az azonos évek 2013, 2016, 2017, 2018, 2020, 2021 és 2023 évek voltak, ahol a FAO 300 éréscsoportnál a legszorosabb korrelációt 2018-ban ($r=0,912***$), a FAO 400 csoportnál 2020-ban ($r=0,877***$) mutattuk ki. Az összefüggések mindkét éréscsoportnál $p<0,001$ szinten igazoltak. A determinációs koefficiens érték alapján a különböző években a N-műtrágyázás eltérő mértékben, 16,3%–83,1% (FAO 300) és 22,6%–76,9% (FAO 400) között befolyásolta a termés nagyságát.

A keményítőtartalom és a N-műtrágya közötti kapcsolatot vizsgálva a kezelések átlagában nagyon gyenge negatív ($r=-0,111***$) előjelű összefüggést lehetett kimutatni (21. ábra). Nagyon gyenge volt a korreláció mindkét éréscsoportnál is, ami a FAO 300 csoport esetében kisebb mértékben erősebb ($r=-0,143***$) volt, mint a FAO 400 csoportnál ($r=-0,089***$).

Évenként, a FAO csoportok átlagában vizsgálva a két tényező közötti összefüggés három évben (2011, 2013, 2022) nem volt kimutatható. A többi évben az összefüggések $p < 0,001$ szinten igazoltak, kivétel a 2023. év ($p < 0,01$). Gyenge negatív összefüggést hat évben (2012, 2014, 2015, 2018, 2021, 2023), és közepes negatív kapcsolatot három évben (2016: $r = -0,669^{***}$; 2017: $r = -0,647^{***}$ és 2019: $r = -0,659^{***}$) állapítottunk meg. A 2020. év mutatott gyenge pozitív ($r = 0,307^{***}$) összefüggést.



21. ábra. A N-műtrágyázás és a mag-keményítőtartalom közötti összefüggés, logaritmikus regressziós eredménye (Debrecen, 2011–2023)

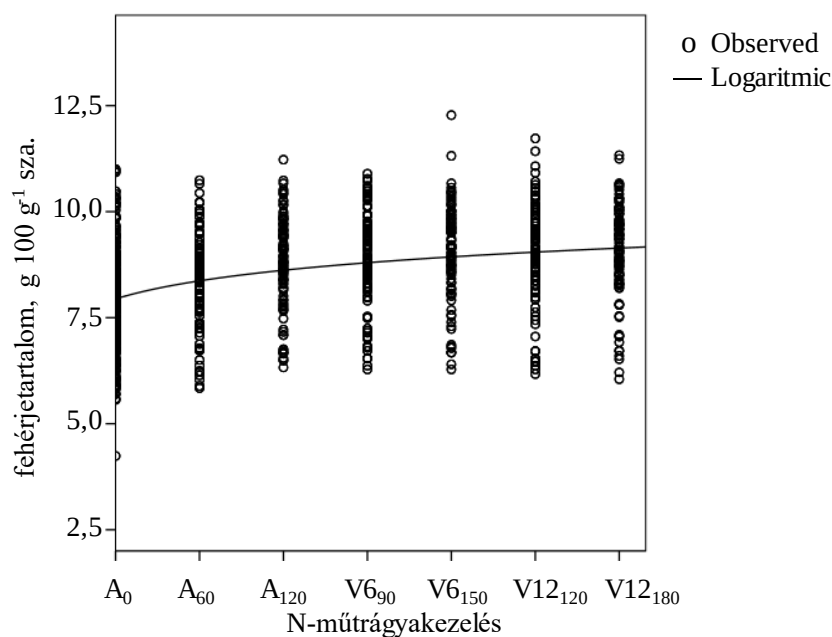
Külön-külön elemezve a FAO csoportok keményítőtartalom és a N-műtrágya közötti kapcsolatát, azt állapítottuk meg, hogy a FAO 300 éréscsoportnál két évben (2011, 2013), a FAO 400 éréscsoportnál öt évben (2011, 2013, 2021, 2022, 2023) nem volt szignifikáns összefüggés kimutatható. Az évek jelentős részében a korreláció negatív volt, mind a FAO 300 éréscsoportnál (9 év), mind a FAO 400 éréscsoportnál (7 év). A 2020-as év mutatott mindkét éréscsoportnál (FAO 300: $r = 0,691^{**}$; FAO 400: $0,324^{***}$), illetve a 2022-es év a FAO 300 éréscsoportnál ($r = 0,276^{***}$) pozitív korrelációt. A legszorosabb negatív összefüggés 2018-ban (FAO 300: $r = -0,788^{***}$) és a 2019. évben (FAO 400: $r = -0,761^{***}$) volt.

A keményítőtartalom és termés között a kezelések átlagában nem lehetett szignifikánsan igazolni az összefüggést. Évenként vizsgálva a két tényező közötti összefüggést – a FAO csoportok átlagában – két évben (2011, 2015) nem volt korreláció a változók között. A 2013. és 2023. évek ($p < 0,05$), illetve a 2018. év ($p < 0,01$) kivételével az összefüggések $p < 0,001$ szinten igazoltak. Negatív összefüggés hét évben volt, amelyek közül az összefüggés négy

évben gyenge (2018, 2019, 2021 és 2023) és három évben közepes (2014, 2016, 2017). Négy évben mutatott a változók közötti összefüggés pozitivitást (2012, 2013, 2020, 2022), de mind a négy évben az összefüggés gyenge volt.

A FAO 300 éréscsoportnál mindössze két évben (2011, 2019), míg a FAO 400 éréscsoportnál öt évben (2011, 2013, 2015, 2021, 2023) nem volt kimutatható a keményítőtartalom és a termés közötti összefüggés. Pozitív összefüggés volt a FAO 300 éréscsoportnál négy évben, amelyből három év gyenge (2012, 2013, 2022) és egy év közepes (2020) összefüggést mutatott. A FAO 400 éréscsoportnál három év (2012, 2020, 2022) összefüggése volt pozitív előjelű, és gyenge volt mindhárom év összefüggése.

A fehérjetartalom és a N-műtrágya között a kezelések átlagában gyenge korrelációt ($r=0,373^{***}$) határoztunk meg, a determinációs koefficiens érték 13,9% (22. ábra). Az összefüggés-vizsgálattal mindkét éréscsoportnál gyenge korrelációt igazoltunk, azonban FAO 300 éréscsoportnál erősebb ($r=0,418^{***}$) volt, mint a FAO 400 csoport esetében ($r=0,345^{***}$). A N-műtrágyázás 17,5%-ban (FAO 300) és 11,9%-ban (FAO 400) határozta meg a kukoricamag fehérjetartalmát.



22. ábra. A N-műtrágyázás és a mag-fehérjetartalom közötti összefüggés logaritmikus regressziós eredménye (Debrecen, 2011–2023)

Évenként vizsgálva a tényezők közötti összefüggést a FAO csoportok átlagában minden évben igazolódott a szignifikáns kapcsolat $p<0,001$ szinten, kivétel a 2011. év ($p<0,05$). Az összefüggés erőssége négy évben gyenge (2011, 2012, 2013, 2014), és szintén négy évben (2015, 2021, 2022, 2023) közepes erősségű volt. Szoros korrelációt igazoltunk öt évben (2016,

2017, 2018, 2019, 2020), ezen évek „r” értékei 0,733 (2020) és 0,846 (2019. között változott. A N-műtrágyázás legnagyobb fehérjetartalom-befolyásoló hatása 71,5% (2017) volt.

A FAO csoportokat külön-külön értékelve kimutatható volt, hogy a FAO 300 éréscsoportnál két évben (2011, 2012) és a FAO 400 éréscsoportnál egy évben (2013) nem volt megbízható összefüggés. A többi években mindkét éréscsoportnál a korreláció $p < 0,001$ szinten igazolt, kivéve a FAO 400 éréscsoport 2014. évi összefüggését ($p < 0,05$).

Gyenge korreláció volt egy (2013: $r = 0,320^{***}$) és közepes két évben (2014: $r = 0,657^{***}$; 2023: $r = 0,645^{***}$) a FAO 300 éréscsoportnál. A FAO 400 éréscsoport esetében három évben (2011, 2014, 2015) gyenge, öt évben közepes (2012, 2020, 2021, 2022, 2023) korrelációt igazoltunk. Szoros összefüggést a két változó között a FAO 300 éréscsoportnál nyolc évben, míg a FAO 400 éréscsoportnál négy évben mutattunk ki. Az „r” érték alapján az összefüggés a FAO 300 éréscsoport nyolc évében erősebb volt (0,829–0,949), mint a FAO 400 éréscsoport négy évében (0,728–0,801). A N-műtrágyázás legnagyobb befolyásoló hatása a mag-fehérjetartalom alakulására a FAO 300 éréscsoportnál 2018-ban (90,1%), míg a FAO 400 éréscsoportnál 2019-ben (64,2%) volt.

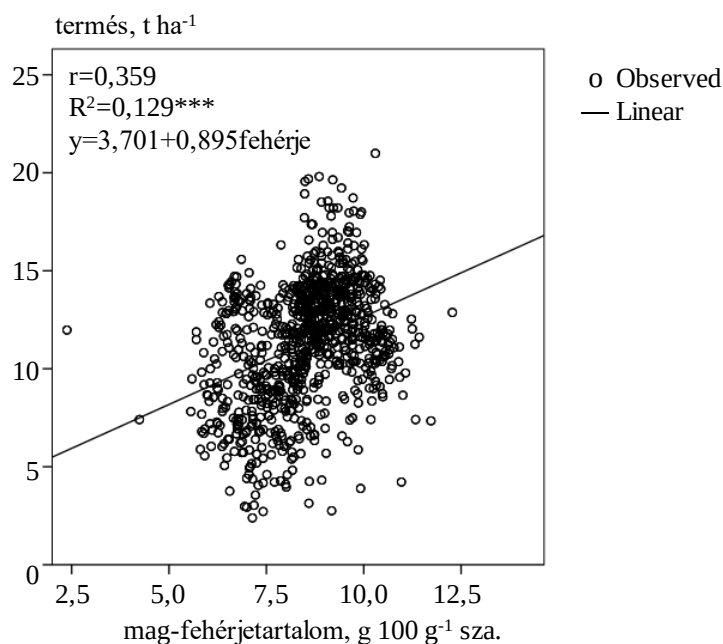
Összességében kimutatható volt, hogy az összefüggések erőssége és a N-műtrágyázás hatás a mag-fehérjetartalom alakulására mindkét éréscsoportnál évenként jelentős eltérést mutatott, illetve a FAO 300 éréscsoportnál az évek jelentősebb részében (8 év) volt szoros korreláció, mint a FAO 400 éréscsoportnál (4 év). A N-befolyásoló hatása 10,3%–90,1% (FAO 300) és 10,6%–64,2% (FAO 400) között változott.

A *fehérjetartalom és termés* között a kezelések átlagában gyenge korrelációt ($r = 0,359^{***}$) határoztunk meg, a determinációs koefficiens érték 12,9% (23. ábra). Gyenge összefüggést lehetett kimutatni mindkét éréscsoportnál, a FAO 300 éréscsoport esetében minimálisan ugyan, de erősebb volt az összefüggés ($r = 0,376^{***}$), mint a FAO 400 éréscsoportnál ($r = 0,340^{***}$).

A FAO csoportok átlagában évenként elvégzett összefüggés-vizsgálat eredménye minden évben $p < 0,001$ szinten igazolt, kivéve a 2022. évet ($p < 0,05$). Öt évben gyenge (2011, 2012, 2013, 2015, 2022), hét évben közepes (2014, 2016, 2018, 2019, 2020, 2021, 2023) és egy évben (2017: $r = 0,725^{***}$) szoros erősségű kapcsolatot lehetett kimutatni. A leggyengébb összefüggés a 2011. évben volt ($r = 0,264^{***}$).

A FAO 300 éréscsoport esetében egy évben (2013), a FAO 400 éréscsoport esetében két (2011, 2022) évben nem mutatott az összefüggés szignifikáns kapcsolatot, míg a többi években mindkét éréscsoportnál a korreláció $p < 0,001$ szinten igazolt, kivéve a FAO 400 éréscsoport 2013. és 2014. éve, ahol $p < 0,01$. A FAO 300 éréscsoportnál két év gyenge (2011, 2023), négy év közepes (2012, 2016, 2019, 2022), és hat év szoros (2014, 2015, 2017, 2018, 2020, 2021) erősségű korrelációt mutatott. A legszorosabb összefüggés a 2021. évben ($r = 0,884^{***}$), míg a

leggyengébb a 2011. évben ($r=0,309^{***}$) volt. A FAO 400 éréscsoportnál gyenge összefüggés jelentősen több évben fordult elő, mint a FAO 300 éréscsoportnál, azaz öt évben (2012, 2013, 2014, 2015, 2016). Közepes korreláció mindkét csoportnál négy-négy évben volt, de nem ugyanazon években. Szoros összefüggés azonban jelentősen kevesebb évben volt (2017, 2019). A leggyengébb összefüggés a 2013. évben ($r=0,281^{***}$), és a legszorosabb a 2017. évben ($r=0,733^{***}$) volt.



23. ábra. A mag-fehérjetartalom és a termés közötti összefüggés, lineáris regressziós eredménye (Debrecen, 2011–2023)

Összességében a két változó közötti korreláció a FAO éréscsoportok átlagában, illetve az éréscsoportokon belül is évenként jelentős eltérést mutatott. A FAO 300 éréscsoportnál hat évben, míg a FAO 400 éréscsoportnál mindössze két évben volt szoros a korreláció.

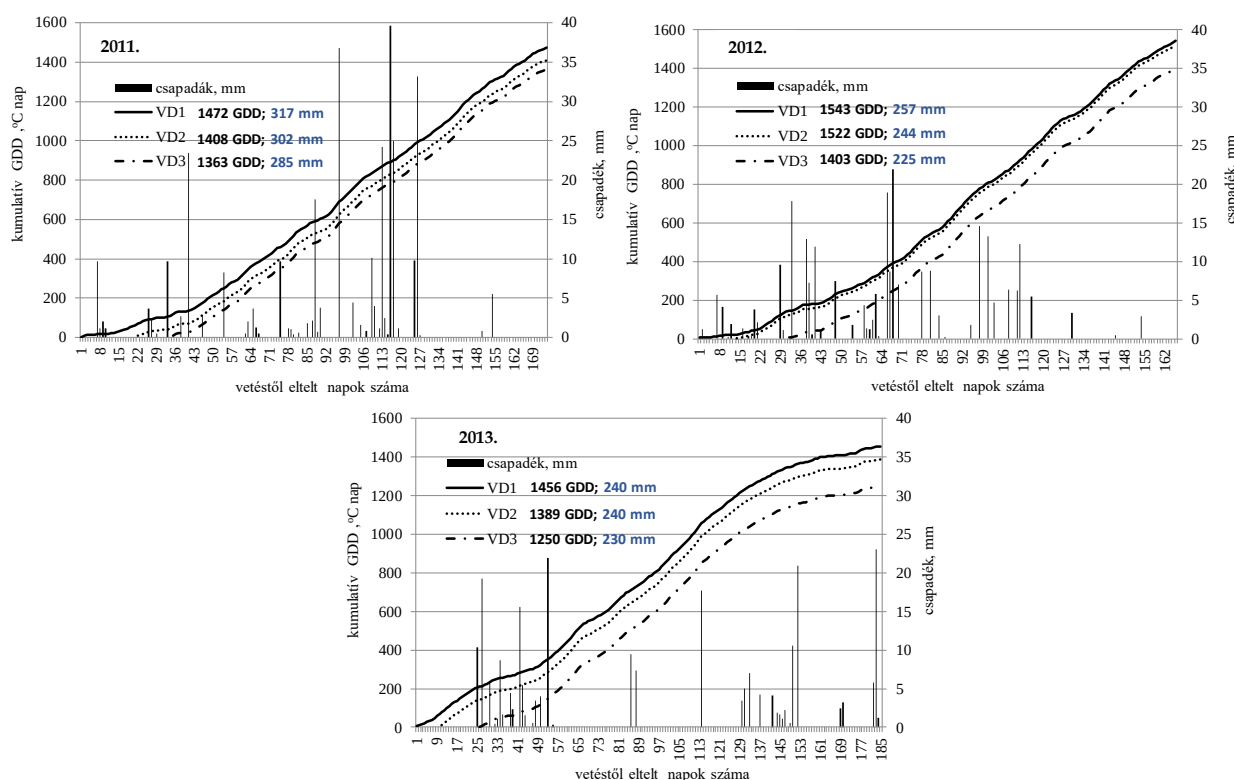
4.4. Vetésidő kukoricatermesztésre gyakorolt hatása (2011–2013)

4.4.1. Vetésidő hatása a termésre és az optimális vetésidő meghatározása (2011–2013)

Bár a vetésidő a termesztéstechnológiában nem számít input tényezőnek, azonban a különböző éghajlati viszonyok között a termőterületek alacsony terméshozamának problémáira hasznos és költséghatékony megoldásokat nyújthat. A kutatás során ezért arra törekedtünk, hogy meghatározzuk, miként befolyásolja a vetésidő az eltérő tenyészsídejű hibridek termését, valamint a megváltozott klímában melyik az optimális vetésidő, lehetővé téve a hibridspecifikus ajánlásokat.

A vizsgálatokat a „Vetésidő” kisparcellás kísérletben végeztük. Három vetésidőt alkalmaztunk, minden év április 4. és május 10. között (VD1, VD2 és VD3, a pontos időpontok az „Anyag módszer” fejezetben található). Három eltérő érésidejű kukorica hibridet (Mv 255 FAO 290, Mv 350 FAO 350 és Mv Koppány FAO 420) vontunk be a szántóföldi kísérletbe 2011 és 2013 között.

A felhalmozott hőegység (GDD) a későbbi vetésekben csökkent, a három év átlagában az 1490 GDD-ről (VD1) 1339 GDD-re (VD3), a csökkenés kimutatható volt mindhárom évben. A legnagyobb mértékű csökkenés 2013-ban volt (24. ábra).



24. ábra. A kísérleti terület csapadékelátottsága és a növekedési foknap (GDD) alakulása a VD1, a VD2 és a VD3 vetés tenyészedőszakában (Debrecen, 2011–2013)

Három év átlagában a varianciaanalízis eredménye alapján az évek ($p < 0,001$) és a genotípus ($p < 0,001$) szignifikáns hatással volt a termésre. A tényezők közül az MS érték alapján, az év módosító hatása volt a legjelentősebb. A környezeti tényezők mindhárom éréscsoportba tartozó hibrid termését 0,1%-os szinten befolyásolták, a vetésidő csak az Mv 255 hibrid termését módosította ($p < 0,001$), míg az Mv 350 és az Mv Koppány hibridnél nem volt szignifikáns hatása (14. táblázat). Az évjáratonként számszerűsített termésmennyiség – a kezelések átlagában – jelentősen eltért egymástól. A terméskülönbség mindhárom évben 0,1%-os szint mellett igazolt. A legnagyobb különbség 2011 és 2013 évek között ($2,537 \text{ t ha}^{-1}$) volt.

14. táblázat. A kukorica vetésidő, a genotípus és az évjárat kezeléseinek varianciaanalízise (Debrecen, 2011–2013)

ANOVA		Hibridek		
		Mv 255	Mv 350	Mv Koppány
Év (É)		***	***	***
Vetésidő (VD)		***	nsz	nsz
É x VD		***	**	***
Évek				
	2011	2012	2013	Átlag
Év (É)				***
Vetésidő (VD)	***	***	nsz	nsz
Genotípus (G)	***	***	***	***
É x VD				***
É x G				***
VD x G	nsz	nsz	***	***
É x VD x G				***

Megjegyzés: ***p=0,001%; **p=0,01%; nsz=nem szignifikáns.

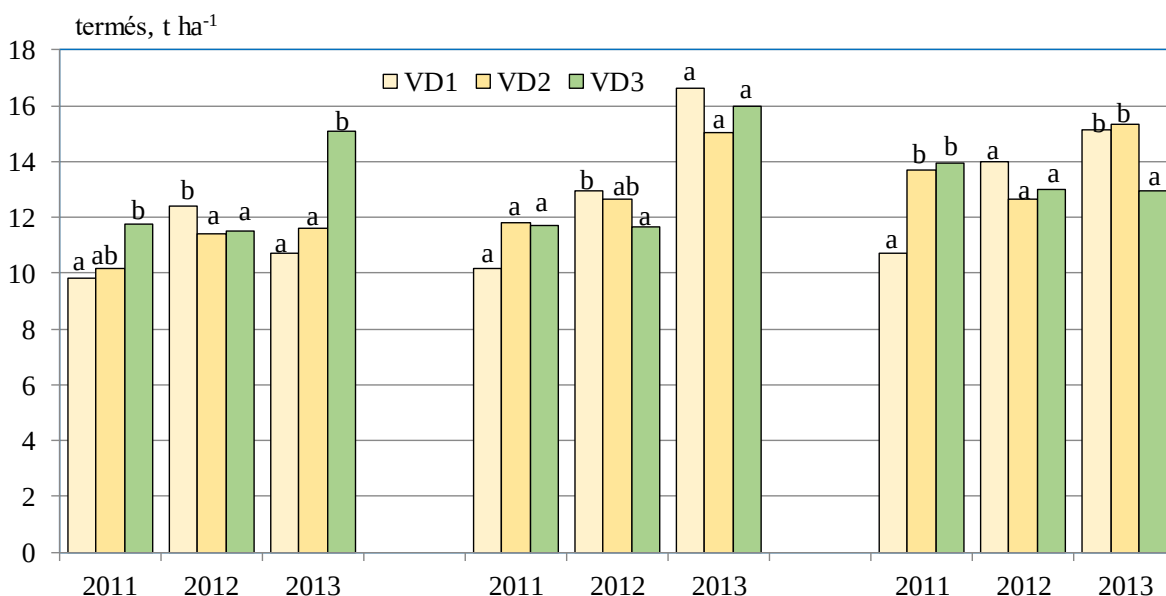
A hibridek átlagtermése 2011-ben a VD3 vetésidőben bizonyult eredményesnek (12,837 t ha⁻¹), ettől az 502 kg ha⁻¹-ral kevesebb terméssel rendelkező VD2 vetés szignifikánsan nem különbözött. Ebben az évben nem igazolódott Kucharik [2008] megállapítása, miszerint a korai vetés járul hozzá a nagyobb termés eléréséhez, ugyanis a VD1 vetés termése (10,209 t ha⁻¹) jelentősen kevesebb volt a VD2 (12,331 t ha⁻¹; p<0,05), illetve a VD3 vetés teljesítményétől (12,837 t ha⁻¹; p<0,001). A hibridek 2012-ben a VD1 vetésidővel érték el a legnagyobb átlagos teljesítményüket (13,335 t ha⁻¹), terméstöbblete a VD2 vetéshez viszonyítva 1,002 t ha⁻¹ (p<0,05), a VD3 vetéshez 1,048 t ha⁻¹ (p<0,05) volt. Ezzel Long et al. [2017] eredményét igazoltuk, miszerint a későbbi vetés terméscsökkenést okoz. A két későbbi vetés (VD2 és VD3) termése között szignifikáns eltérés nem volt kimutatható. A 2013. évben a vetések időpontjai nem befolyásolták az átlagtermés alakulását (15. táblázat).

15. táblázat. A vetésidő (VD) hatása a kukorica hibridek termésére (Debrecen, 2011–2013)

Vetésidő	Szemtermés (t ha ⁻¹)		
	2011	2012	2013
VD1	10,209a	13,335b	14,409a
VD2	12,331b	12,333a	14,346a
VD3	12,837b	12,287a	14,231a

Megjegyzés: a Duncan-teszt alapján az oszlopokon belül különböző betűkkel jelölt termések szignifikánsan eltérnek egymástól p≤0,05 szignifikancia szinten.

A kukorica hibridek termését a vetésidő nem minden évjáratban módosította szignifikánsan. Az Mv 255 kukorica hibridnél 2011-ben egyértelmű eltérést a VD1 (9,185 t ha⁻¹) és a VD3 (11,745 t ha⁻¹) vetésidő mutatott. 2012-ben a VD1 vetés 9%-os terméstöbbletet eredményezett a VD2 (p<0,05) és VD3 (p<0,05) vetéshez viszonyítva. A VD2 és VD3 vetések termése közötti különbség matematikailag nem igazolt. A 2013. év eredményesebb termése a VD3 vetéshez (15,095 t ha⁻¹) köthető. A termésnövekedés mértéke a VD1 vetéshez viszonyítva 41% (p<0,05) és a VD2 vetéshez pedig 30% (p<0,05) volt. Az Mv 350 hibridnél 2011-ben és 2013-ban a statisztikai vizsgálatok matematikailag igazolható különbséget nem mutattak a három vetésidő terméseredménye között. 2012-ben a VD1 vetés bizonyult a legjobbnak (12,928 t ha⁻¹), 11,1%-os hozamnövekedést eredményezett a VD3 vetéshez viszonyítva (1,293 t ha⁻¹; p<0,05). Az Mv Koppány hibridnél a későbbi vetések 2011-ben növelték a hozamot (p<0,05), azonban a VD2 és VD3 vetések között már nem volt szignifikáns eltérés. 2012-ben a VD1 vetés (14,005 t ha⁻¹) termése volt a legeredményesebb, a VD2 és VD3 vetésekben szignifikáns csökkenés nem mutatkozott. 2013-ban a VD1 (15,160 t ha⁻¹) és VD2 (15,356 t ha⁻¹) vetés termése között szignifikánsan különbség nem volt. A VD3 vetésben a csökkenés szignifikáns (p<0,05), mértéke 14,7% és 15,8% (25. ábra).



25. ábra. A vetésidő és az évjárat hatása az eltérő genotípusú kukorica hibridek termésére (Debrecen, 2011–2013)

Megjegyzés: az éveken belül azonos betűvel jelölt hibridek termés adatai a Duncan-teszt alapján nem térnek el szignifikánsan egymástól.

2011-ben a genotípusok termése között a VD1 vetés szignifikáns különbséget nem okozott. A VD2 vetésben az Mv Koppány és az Mv 255 hibridek között volt szignifikáns eltérés ($p < 0,01$), az Mv Koppány hibrid 34%-kal bizonyult eredményesebbnek. A VD3 vetésben az Mv Koppány hibrid alkalmazása volt kedvező, $2,204 \text{ t ha}^{-1}$ -ral ($p < 0,001$) termett többet, mint az Mv 255, és $2,244 \text{ t ha}^{-1}$ -ral ($p < 0,001$), mint az Mv 350 hibrid. Az Mv 255 és az Mv 350 hibridek termésmennyiségében statisztikailag igazolt különbség nem volt. A 2012. évben igazolt különbség a VD1 ($p < 0,05$) és a VD3 ($p < 0,05$) vetésben az Mv Koppány és az Mv 255 hibridek között, illetve a VD2 vetésben az Mv 350 és az Mv 255 ($p < 0,05$) között volt kimutatható. 2013-ban a VD1 ($p < 0,001$) és a VD2 ($p < 0,01$) vetésben az Mv 255 és az Mv 350 hibrid közötti terméskülönbség bizonyult igazoltnak. Az Mv 255 és az Mv Koppány hibrid mindhárom vetésben 0,1%-os szinten tért el egymástól. A VD3 vetésben az Mv Koppány hibridnek az Mv 255 hibridhez viszonyítva $2,166 \text{ t ha}^{-1}$ -os ($p < 0,001$), az Mv 350 hibridhez pedig $3,044 \text{ t ha}^{-1}$ -os ($p < 0,001$) szignifikáns terméstöbblete volt.

Összességében igazoltuk, hogy a termésre – ismételt mérések ANOVA eredménye alapján – a három év átlagában az évek és a genotípus főhatás volt szignifikáns. A tényezők közül az MS érték alapján az év termésre gyakorolt hatása volt a legjelentősebb. A vetésidő nem adott egyértelmű eredményt. Számos szerző [Russelle et al. 1987, Shrestha et al. 2016] a korai vetéssel (április első dekádja) ért el nagy termést, míg mások április harmadik dekádjában történt vetéssel [Johnson és Mulvaney 1980, Berzsenyi és Lap 2001, Videnović et al. 2011], valamint Futó és Sárvári [2003], El Hallof és Sárvári [2004] a késői (május első és második dekádja) vetés esetén kapott nagyobb termést. Az eredményeink alapján egyiket sem tudjuk megerősíteni, azonban a szerzőkkel [Futó és Sárvári 2003, Bruns 2003, Berzsenyi és Lap 2008, Caviglia et al. 2014, Tsimba et al. 2013] egyezően megállapíthatjuk, hogy az évek klimatikus változásai és az adott régió nagymértékben befolyásolják a vetésidő meghatározását. A vetésidő $\times$ genotípus kölcsönhatás alapján a vetésidőnek csak az igen korai hibrid (Mv 255) esetén volt szignifikáns hatása. Ennél a hibridnél a késői vetés magasabb termést eredményezett. Az Mv 350 és az Mv Koppány 420 hibrideknél a vetésidőnek nem volt egyértelmű hatása a termésre, mindhárom VD alkalmazásakor nagy termést produkált.

Egyezően Nagy [2012], Pepó [2012] és Széles et al. [2018] megállapításával az évek eltérő klimatikus viszonyai különböző mértékben befolyásolták a termés nagyságát. A legnagyobb különbség 2011. és 2013. év között ($2,537 \text{ t ha}^{-1}$) volt.

A vetésidő mindhárom évben eltérő módon befolyásolta a kukorica termését. 2011-ben a VD2 és VD3 vetések eredményeztek magasabb terméseket. 2012-ben a VD1 adta a legmagasabb termést, míg 2013-ban nem volt különbség.

Mindhárom évben az igen korai hibrid (Mv 255) termése volt a legalacsonyabb. A legmagasabb termést 2011-ben és 2012-ben a középérésű (Mv Koppány), 2013-ban a korai hibrid (Mv 350) adta. A tenyészidő hossza egyértelműen hordozza a nagyobb termés lehetőségét.

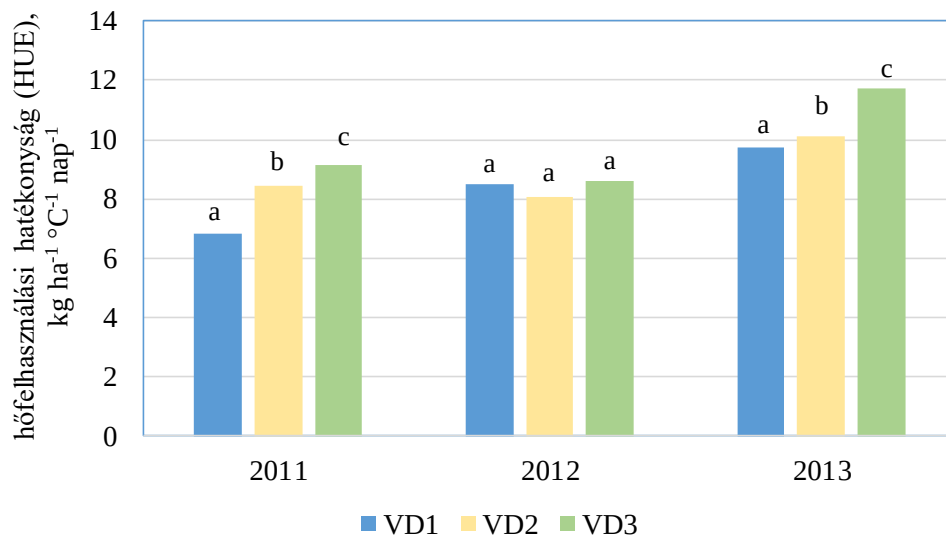
A vizsgált időszak alatt a legkisebb termésingadozása a középérésű (Mv Koppány) hibridnek volt (CV=6,5%). A legnagyobb termésingadozást viszont a korai hibrid (Mv 350) mutatta (CV=18,4%). Az igen korai (Mv 255) hibrid termésingadozása a kettő között helyezkedett el (CV=9,3%). A vizsgálati eredményeink alapján a középérésű hibridek termesztése mérsékli a termesztés kockázatát, és ezek a hibridek a vetésidőre sem érzékenyek.

A kísérleti eredmények hozzájárulnak ahhoz, hogy a megváltozott klimatikus körülményeknél a gazdálkodó megalapozott döntéseket tudjon hozni a magas, stabil termés elérése érdekében.

4.4.2. Vetésidő hatása a kukorica hibridek hőhasznosítási hatékonyságára (HUE) (2011–2013)

A vetésidő és a megfelelő hibrid megválasztása az egyik leghasznosabb termesztési stratégia a kukorica termésének és minőségének szabályozására. A vizsgálat célja a vetésidő hatásának elemzése a kukorica hőfelhasználási hatékonyságának (HUE) szempontjából. Ezen elemzés révén lehetőség nyílik arra, hogy megfelelő intézkedéseket lehessen kidolgozni különböző genotípusú kukorica hibridek terméspotenciáljának javítására változó éghajlati körülmények között. A vizsgálatokat a „Vetésidő kísérletben” végeztük 2011–2013. évek között. Három vetésidőt alkalmaztunk minden év április 4. és május 10. között (VD1, VD2 és VD3, a pontos időpontok az „Anyag módszer” fejezetben található) és három ugyanazon hibrid (Mv 255 FAO 290, Mv 350 FAO 350 és Mv Koppány FAO 420) bevonásával, természetes csapadékellátottság mellett.

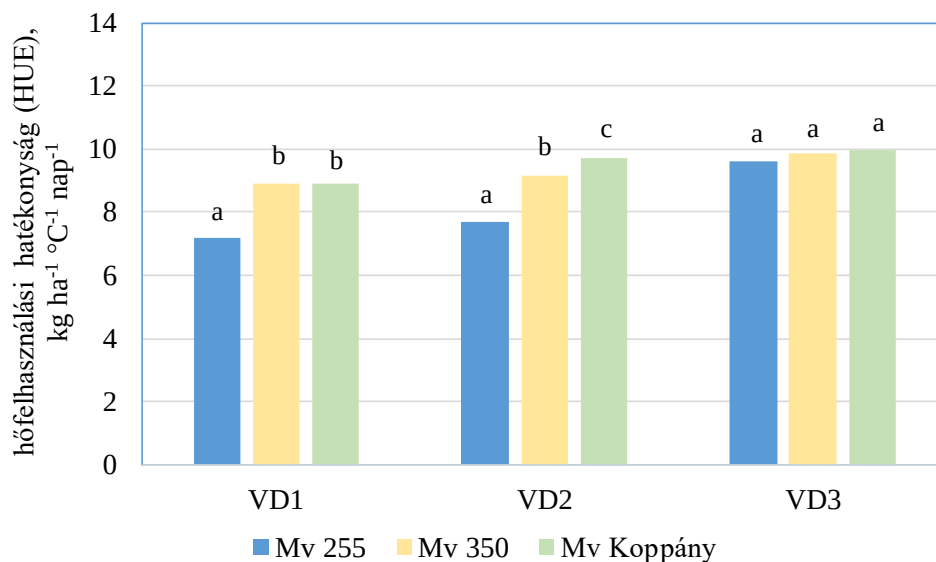
Kimutatható volt, hogy a legalacsonyabb HUE – az évek és a hibridek átlagában – a VD1 vetésidőben ($8,35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$) volt ($p < 0,05$) Amgai [2011] eredményeihez hasonlóan, majd a későbbi vetésekben magasabb lett (VD3; $9,82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$). Évenként vizsgálva a hőhasznosítást a hibridek átlagában, igazolható volt, hogy a VD1 és a VD3 vetés között 2011-ben volt a különbség a legnagyobb ($2,33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$; $p < 0,05$), 2013-ban a növekedés $2,01 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$ volt, míg 2012-ben eltérést nem lehetett kimutatni. A VD2 és VD3 között szintén 2013-ban volt jelentősebb eltérés ($1,72 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$) (26. ábra).



26. ábra. Az évjárat és a vetésidő hatása a kukorica hőfelhasználási hatékonyságára (Debrecen, 2011–2013)

Megjegyzés: évenként az azonos betűvel jelzett értékek $p < 0,05$ valószínűségi szintre szignifikánsan nem különböznek egymástól a Duncan-teszt alapján.

Alacsony hőfelhasználási hatékonysággal az Mv 255 hibrid, és magas HUE-val az Mv Koppány hibrid rendelkezett, az évek átlagában mindhárom vetésidőben. A vetésidő kitolódásával a legnagyobb mértékű hőfelhasználás-növekedést azonban az Mv 255 hibridnél lehetett kimutatni a VD1 vetéstől ($7,21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$) a VD3 vetésre ($9,63 \text{ kg ha}^{-1} \text{ °C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$) ($p < 0,05$) (27. ábra).



27. ábra. A kukorica hibridek hőfelhasználási hatékonysága (HUE) eltérő vetésidőben (Debrecen, 2011–2013)

Megjegyzés: vetésidőnként az azonos betűvel jelzett értékek $p < 0,05$ valószínűségi szintre szignifikánsan nem különböznek egymástól a Duncan-teszt alapján.

A rendelkezésre álló hőenergiát az Mv 255 hibrid maximálisan két évben a VD3 vetéssel (2011: 8,62 kg ha⁻¹ °C⁻¹ nap⁻¹ és 2013: 12,08 kg ha⁻¹ °C⁻¹ nap⁻¹), és 2012-ben az VD1 vetéssel (8,04 kg ha⁻¹ °C⁻¹ nap⁻¹) érte el. A különbségek 5%-os szinten igazoltak. Az Mv 350 hibridnél 2012-ben a VD1 vetésben (8,38 kg ha⁻¹ °C⁻¹ nap⁻¹; p<0,05) volt magas a HUE, míg a másik két évben szignifikáns különbség nem volt kimutatható. Az Mv Koppány hibrid a hőenergiát mindhárom évben és mindhárom vetésidőben jól hasznosította.

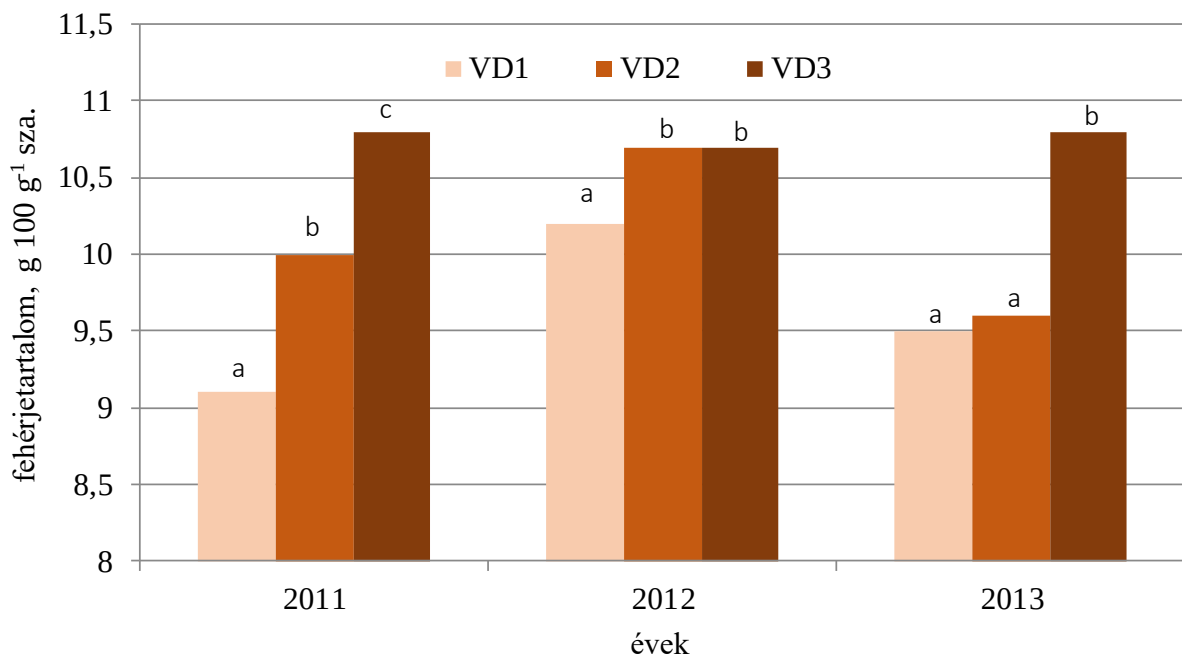
Bizonyítható volt, hogy a kukorica vetésidejének kitolódásával a HUE megbízhatóan növekedett – ellentétében Leelarani et al. [2013] megállapításával –, a hibridek jól tudták hasznosítani a magas hőmérsékletet, mindhárom évben. A rendelkezésre álló hőenergiát az Mv 255 és az Mv 350 a három évben eltérő mértékben, az Mv Koppány hibrid azonban mindhárom évben és mindhárom vetésidőben jól hasznosította. Igazolódott, hogy a hőfelhasználás hatékonyság (HUE) függ a genetikai tényezőktől és a vetésidőtől.

4.4.3. Vetésidő hatása a kukoricamag fehérje- és olajtartalmára (2011–2013)

A kutatás során a jó minőségű kukorica termelési igényére fókuszáltunk a vetésidő megválasztásával. A vizsgálatokat a „Vetésidő” kisparcellás kísérletben végeztük. Három vetésidőt alkalmaztunk, minden év április 4. és május 10. között (VD1, VD2 és VD3, a pontos időpontok az „Anyag módszer” fejezetben található). Három eltérő érésidejű kukorica hibridet (Mv 255 FAO 290; Mv 350 FAO 350; Mv Koppány FAO 420) vontunk be a szántóföldi kísérletbe, 2011 és 2013 között. Kutatásunk a kukorica hibridek fehérje- és olajtartalmára irányult.

A hibridek átlagos fehérjetartalma a VD3 vetésidőben bizonyult eredményesnek (10,8 g 100 g⁻¹sza.) 2011. évben, ettől 7,5%-kal (p<0,05) kevesebb fehérjetartalommal rendelkezett a VD2, illetve 15,7%-kal (p<0,05) a VD1 vetés. A VD2 vetésben elért fehérjetartalom 9,9%-kal (p<0,05) volt nagyobb, mint a VD1 vetésben. A hibridek 2012-ben a legalacsonyabb fehérjetartalmat a VD1 vetéssel érték el (10,2 g 100 g⁻¹sza.), a két későbbi vetés fehérjetartalom növekedést (p<0,05) eredményezett, azonban a VD2 és VD3 vetések között szignifikáns eltérés nem volt kimutatható. A 2013. évben a VD1 és VD2 vetések fehérjetartalma között szignifikáns különbség nem volt. Jelentős növekedést a VD3 vetés eredményezett, a növekedés mértéke a VD1 és VD2 vetéshez viszonyítva 13,7–12,5% (p<0,05) volt (28. ábra).

A későbbi vetéssel (VD3) – Koca és Canavar [2014] megállapításával nem egyezően – ahol a napi hőmérséklet már magasabb, azonban alacsonyabb a tenyészidőszak kumulatív GDD érték, a kukorica mag-fehérjetartalma 12,5%-kal (p<0,05) emelkedett.



28. ábra. Az évjárat és vetésidő hatása a kukoricamag fehérjetartalmára (Debrecen, 2011–2013)
Megjegyzés: évenként a különböző betűvel jelzett mag-fehérjetartalom értékek szignifikánsan különböznek egymástól a Duncan-teszt alapján, $P \leq 0,05$ valószínűségi szinten.

Hasonló eredményre jutottunk, mint Hegyi és Berzy [2009], Izsáki [2009] és Csajbók et al. [2024], miszerint a kukorica mag-fehérjetartalmát jelentős mértékben a genetikai tulajdonságok határozzák meg. Eredményeink azonban rámutatnak arra is több kutató [Badu-Apraku et al. 2005, Széll et al. 2005, Ványiné Széles és Nagy 2012, Széles et al. 2018, 2019] megállapításával egyezően, hogy az ökológiai és agrotechnikai tényezők befolyásoló hatással vannak a kukoricamag fehérjetartalmára. Az Mv 255 kukorica hibrid fehérjetartalmát a vetésidő 2011-ben nem befolyásolta. Az Mv 350 hibridnél a VD2 és VD3 vetésben magasabb fehérjetartalmat lehetett kimutatni, mint a VD1 vetésben. A különbség mindkét esetben szignifikáns ($1,4\text{--}1,6 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sz.}; p < 0,05$) volt, azonban a VD2 és VD3 közötti eltérés statisztikailag nem igazolt. Az Mv Koppány hibrid fehérjetartalma a vetésidő kitolódásával jelentősen nőtt. A legnagyobb növekedés a VD1 és a VD3 között ($2,6 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sz.}; p < 0,05$) volt. 2012-ben a VD2 az Mv 350 hibrid fehérjetartalmát növelte ($0,7 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sz.}; p < 0,05$). A másik két hibridnél a VD1 és a VD3 között volt fehérjetartalom-növekedés, a növekedés mértéke az Mv 255 hibridnél $0,5 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sz.}$ ($p < 0,05$) és az Mv Koppány hibridnél $0,6 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sz.}$ ($p < 0,05$) volt. A 2013. évben mindhárom hibridnél a VD3 vetésidő eredményezte a szignifikánsan nagyobb fehérjetartalmat (16. táblázat).

Az egyes évek változó időjárása az Mv 255 hibrid fehérjetartalmát a VD1 vetésben nem befolyásolta, míg a VD3 vetésben mindhárom évben szignifikáns ($p < 0,05$) eltérést okozott. A VD2 vetésben 2012. év időjárása eredményezett megbízható ($p < 0,05$) növekedést. Az évjárat

módosító hatása az Mv 350 hibridnél a VD3 vetésnél nem érvényesült. A VD1 és VD2 vetésben a 2012. év fehérjetartalma volt a legnagyobb, és megbízható eltérést ($p<0,05$) mutatott 2011. és 2013. évekhez viszonyítva. Az Mv Koppány hibrid fehérjetartalmát a VD1 és VD2 vetésben 2012-ben az időjárási tényezők növelték ($p<0,05$), míg a VD3 vetésnél a 2011. évnek volt kimutatható fehérjetartalom-növelő hatása ($1,0 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sza.}$; $p<0,05$) (16. táblázat).

16. táblázat. A különböző vetésidőpontok hatása a kukorica hibridek mag-fehérjetartalmára (Debrecen, 2011–2013)

Hibridek	Vetésidő	Mag-fehérjetartalom, g $100 \text{ g}^{-1}\text{sza.}$			Vetésidő átlag
		2011	2012	2013	
Mv 255	VD1	9,5Aa	10,0Aa	9,4Aa	9,6a
	VD2	9,7Aa	10,4Bab	9,6Aa	9,9a
	VD3	9,8Aa	10,5Bb	11,5Cb	10,6b
Mv 350	VD1	9,0Aa	10,9Ba	9,0Aa	9,6a
	VD2	10,4Ab	11,6Bb	9,7Aa	10,6b
	VD3	10,6Ab	11,2Ab	10,7Ab	10,8b
Mv Koppány	VD1	8,9Aa	9,9Ba	9,7Ba	9,5a
	VD2	9,9Ab	10,4Bab	9,7Aa	10,0b
	VD3	11,5Bc	10,5Ab	10,4Ab	10,8c

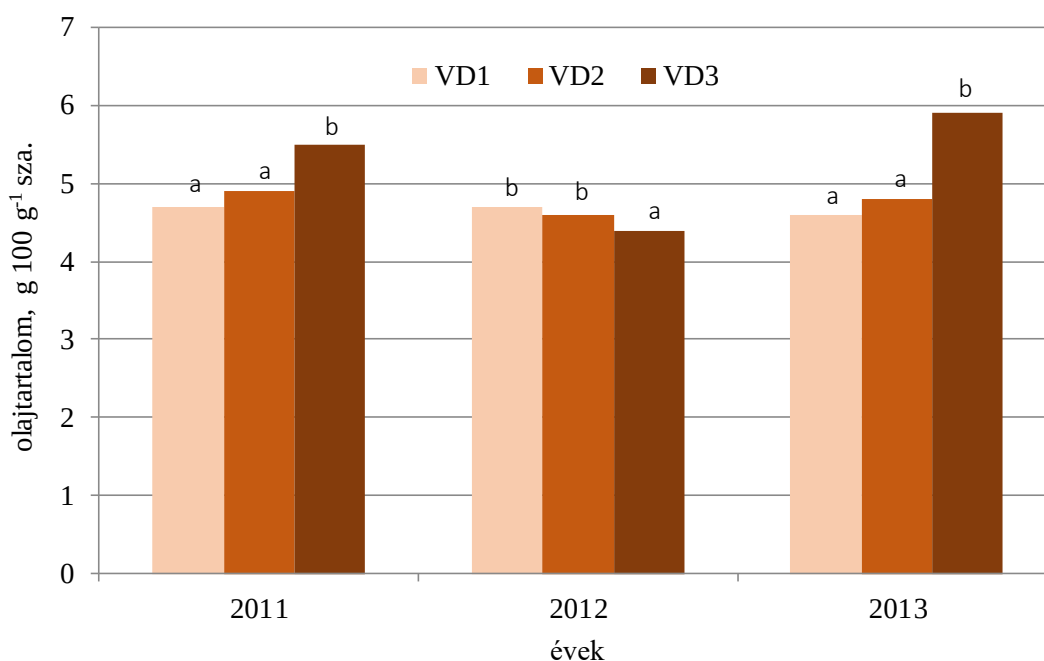
Megjegyzés: az oszlopon belül a különböző kisbetűk jelzik a vetésidők közötti eltérést egy éven belül ($p<0,05$). A soron belül a különböző nagybetűk jelzik az évek közötti eltérést azonos vetésidőben ($p<0,05$).

A genotípusok fehérjetartalma közötti eltérés mértékét nagymértékben befolyásolja az évjárat és a vetésidő. A legnagyobb különbséget a 2011. év VD1 vetésében a korai vetésű Mv 255 és a középérésű Mv Koppány között mutattuk ki, ahol az Mv Koppány fehérjetartalma 6,7%-kal volt alacsonyabb. A VD2 vetésidőben a korai Mv 350 hibrid az Mv 255 hibrid fehérjetartalmától tért el jelentősen (7,2%). A VD3 vetésben volt a legnagyobb százalékos eltérés, az Mv Koppány 17,3%-kal múlta felül az Mv 255 fehérjetartalmát. A 2012. évben az Mv 350 hibrid fehérjetartalma volt nagyobb mindhárom vetésidőben, az Mv 255 hibridet 9%-kal, az Mv Koppányt 10,1%-kal a VD1 vetésidőben, mindkét hibridet azonos mértékben, a VD2 és VD3 vetésidőben 11,5% és 6,7%-kal múlta felül. A 2013. év VD1 vetésében a legnagyobb fehérjetartalom-különbség az Mv 350 és az Mv Koppány között alakult ki, az Mv Koppány 7,8%-kal rendelkezett nagyobb fehérjetartalommal. A VD2 vetésben különbség nem volt kimutatható a hibridek között, míg a VD3 vetésben az Mv 255 hibrid jelentősen meghaladta mind az Mv 350 (7,5%), mind az Mv Koppány (10,6%) fehérjetartalmát (16. táblázat).

A hibridek olajtartalma – a vetésidők átlagában – 2011-ben az Mv 350 hibrid és az Mv Koppány hibridnél azonos $5,2\text{--}5,2 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sza.}$ volt, ettől az Mv 255 hibrid 11,5%-kal

kevesebb ($p < 0,05$) olajtartalommal rendelkezett. 2012-ben mindhárom hibrid olajtartalma jelentős mértékben eltért, az eltérés minden esetben szignifikáns ($p < 0,05$). A korai Mv 350 hibrid olajtartalma volt a legnagyobb, $4,8 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sza.}$ A 2013. évben nem volt szignifikáns különbség a hibrdek között.

Az olajtartalom – a hibrdek átlagában – 2011. évben a VD3 vetésidőben volt a legnagyobb ($5,5 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sza.}$), a VD1 vetésben elért olajtartalom 14,5%-kal ($p < 0,05$), a VD2 vetésben 10,9%-kal ($p < 0,05$) volt alacsonyabb. A 2012-es évben a VD1 és VD2 vetésben elért olajtartalom között szignifikáns eltérés nem volt. A VD3 vetés $4,4 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sza.}$ olajtartalma volt a legalacsonyabb, az eltérés szignifikáns a VD1 és VD2 vetéshez viszonyítva. A kukoricamag olajtartalma 2013-ban teljesen ellentétesen alakult, mint 2012-ben. Ugyanis 2013-ban a VD3 vetés olajtartalma volt a legnagyobb ($5,9 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sza.}$), és ettől szignifikánsan kevesebb volt a VD2 (-18,6%) és a VD1 (-22,0%) vetésben (29. ábra).



29. ábra. Az évjárat és vetésidő hatása a kukoricamag olajtartalmára (Debrecen, 2011–2013)
Megjegyzés: évenként a különböző betűvel jelzett mag-olajtartalom értékek szignifikánsan különböznek egymástól a Duncan-teszt alapján, $p < 0,05$ valószínűségi szinten.

A későbbi vetéssel (VD3) alacsonyabb kumulatív GDD érték mellett a kukoricamag olajtartalma 12,8%-kal ($p < 0,05$) emelkedett.

Az olajtartalom tekintetében a vetésidő hatása 2011. évben az Mv Koppány hibrid esetében volt igazolható. A későbbi vetés (VD3) $1,0\text{--}1,2 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sza.}$ ($p < 0,05$) olajtartalom növekedést eredményezett. Az Mv 255 hibridnél, 2012-ben az olajtartalomban a statisztikai vizsgálatok igazolható különbséget nem mutattak a három vetésidő között. Az Mv 350 olajtartalma a VD2 vetésben $5,0 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}\text{sza.}$ volt, amely szignifikáns ($p < 0,05$) eltérést mutatott a VD3 vetéshez

viszonyítva és nem különbözött igazolhatóan a VD1 vetéstől. Az Mv Koppány hibrid olajtartalma hasonlóan alakult a vetésidők hatására, mint az Mv 350 hibridé. A 2013. évben mindhárom hibrid a legnagyobb olajtartalmat a VD3 vetésben érte el, és a legjelentősebb az Mv 255 hibridé (6,9 g 100 g⁻¹sza.) volt (17. táblázat).

17. táblázat. A különböző vetésidőpontok hatása a kukorica hibridek mag-olajtartalmára, (Debrecen, 2011–2013.)

Hibridek	Vetésidő	Mag-olajtartalom, g 100 g ⁻¹ sza.			Vetésidő átlag
		2011	2012	2013	
Mv 255	VD1	4,6Aa	4,4Aa	4,8Aa	4,4a
	VD2	4,5Aa	4,3Aa	4,5Aa	4,4a
	VD3	4,8Ba	4,2Aa	6,9Cb	5,3b
Mv 350	VD1	4,9Ba	4,9Bb	4,5Aa	4,8a
	VD2	5,3Ba	5,0Bb	4,6Aa	5,0ab
	VD3	5,3Ba	4,5Aa	6,1Cb	5,3b
Mv Koppány	VD1	4,7Aa	4,8Ab	4,8Aa	4,8a
	VD2	4,9Ba	4,6Aab	5,0Ba	4,8a
	VD3	5,9Cb	4,5Aa	5,3Bb	5,2b

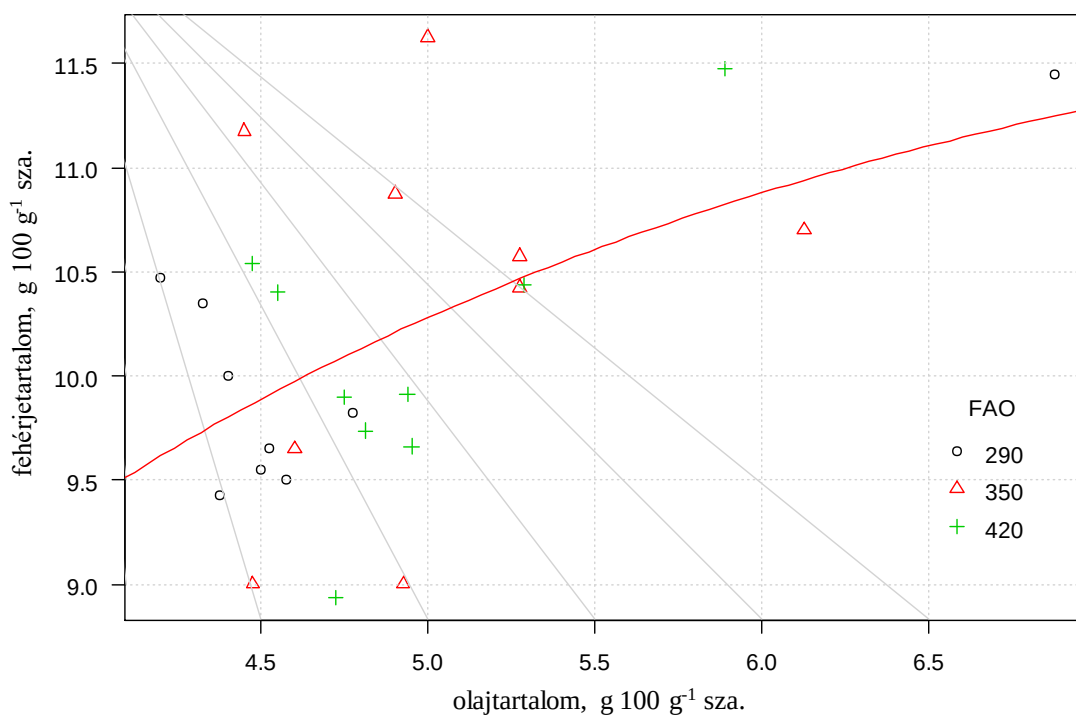
Megjegyzés: az oszlopon belül a különböző kisbetűk jelzik a vetésidők közötti eltérést egy éven belül ($p < 0,05$). A soron belül a különböző nagybetűk jelzik az évek közötti eltérést azonos vetésidőben ($p < 0,05$).

A klimatikus viszonyok nem befolyásolták az Mv 255 hibrid olajtartalmát a VD1 és VD2 vetésben. Az időjárási tényezőknek a VD3 vetésben volt nagyobb hatása, az eltérés mindhárom évben jelentős ($p < 0,05$) volt. Az Mv 350 hibrid legalacsonyabb olajtartalma a VD1 és a VD2 vetésben 2013-ban volt – ahol a vizsgált évek közül a legkisebb volt a kumulatív GDD érték és a csapadék mennyisége –, és szignifikáns ($p < 0,05$) eltérést mutatott a 2011. és 2012. évi olajtartalommal. A VD3 vetésnél az évek közötti eltérés minden esetben szignifikáns, a legnagyobb kumulatív GDD értékkel rendelkező 2012-ben volt az olajtartalom a legkisebb (4,5 g 100 g⁻¹sza.) és a legkisebb hősszeggel rendelkező 2013-ban a legnagyobb (6,1 g 100 g⁻¹sza.). Az Mv Koppány hibridet a VD1 vetésben klímaérzékenység nem jellemezte. A VD2 vetésben a 2012. év olajtartalma tért el igazolhatóan ($p < 0,05$) a másik két év eredményétől. A VD3 vetésben az évjárat hatására jelentős olajtartalom-ingadozás volt. 2011. évben volt az olajtartalom a legnagyobb (5,9 g 100 g⁻¹sza.), és ehhez az évhez viszonyítva 23,7%-kal kevesebb volt 2012-ben és 10,2%-kal 2013-ban (17. táblázat).

Kimutattuk a hibridek olajtartalma közötti évenkénti és vetésidőnkénti eltérést. A legnagyobb különbség a 2011. évben az Mv 350 és az Mv 255 hibrid között alakult ki, a VD1 és VD2 vetésidőben, ahol az Mv 350 hibrid 6,5% és 17,8%-kal múlta felül az Mv 255 hibrid olajtartalmát. A VD3 vetésidőben az Mv Koppány olajtartalma 22,2%-kal volt nagyobb, mint az Mv 255 hibridé. A 2012. évben szintén az Mv 255 és az Mv 350 hibridek közötti különbség

volt jelentős a VD1 és VD2 vetésidőben. Az Mv 350 hibrid olajtartalma 11,4% és 16,3%-kal volt nagyobb. A VD3 vetésidőben az Mv 350 és az Mv Koppány azonos mértékben (7,1%) múlta felül az Mv 255 hibrid olajtartalmát. A 2013. évben a VD1 vetésidőben az Mv 255 és az Mv Koppány azonos mértékben (6,7%) haladta meg az Mv 350 hibrid olajtartalmát. A VD2 vetésidőben a legjelentősebb eltérés az Mv 255 és az Mv Koppány között volt, ahol az Mv Koppány hibrid olajtartalma 11,1%-kal volt nagyobb. A VD3 vetésben az Mv 255 rendelkezett a legmagasabb, míg az Mv Koppány a legalacsonyabb olajtartalommal, két hibrid közötti olajtartalom-csökkenés igen jelentős, 30,2% (17. táblázat).

A fehérje- és olajtartalom közötti pozitív összefüggés statisztikailag igazolt volt, a telítődési függvénnyel jól jellemezhető (30. ábra). A regresszió-analízis alapján a kukorica hibridek maximális fehérjetartalma 12,2%. Ennél több nem tud beépülni a magba. A növekedési tényező (b) értéke 0,368 volt. A mérési adatok alapján a kukoricamag olajtartalmának maximális értéke 7% körül alakult. Az olaj- és fehérjetartalom növekedésével természetesen arányosan csökken a mag keményítőtartalma.



30. ábra. A kukoricamag fehérje- és olajtartalom összefüggés, telítődési függvénnyel, három év átlagában (Debrecen, 2011–2013)

Az olaj- és fehérjetartalom közötti statisztikai összefüggés igazolása nem jelenti a két tényező tényleges összefüggését. A valóságban a két tényező párhuzamosan változik, együtt mozog, egy telítődési függvényhez hasonlóan. Ez akkor áll fenn, ha mindkét beltartalmi értéket közös háttérváltozó vagy háttérváltozók alakítanak. Ezek lehetnek genetikai okok és környezeti tényezők egyaránt. A környezeti tényezők közül a levegő hőmérséklete az egyik legfontosabb tényező.

A három év átlagában a varianciaanalízis eredménye kimutatta, hogy a fehérje- és olajtartalomra mindhárom fő tényező (VD, genotípus, év) szignifikáns ($p < 0,001$) hatással volt. A tényezők közül az MS érték alapján mind a fehérje, mind pedig az olajtartalomra a vetésidő hatása volt a legjelentősebb. A legerősebb szignifikáns interakció a fehérjetartalom tekintetében az év és a kukorica genotípus között volt, ami arra utal, hogy a hibridek közötti különbségek nem ugyanazok a különböző években. Az olajtartalom esetében az év és a vetésidő kölcsönhatás volt a legmarkánsabb.

Megállapítható, hogy a hibridek fehérjetartalma az évek átlagában a VD3 vetésben volt igazoltan ($p < 0,05$) a legnagyobb – az Mv 350 kivételével (VD2) –, és a VD3 vetés eredményezte mindhárom hibridnél a legnagyobb ($p < 0,05$) olajtartalmat is. A környezeti tényezők mindhárom hibridnél a fehérjetartalmat a VD2 ($p < 0,05$), az olajtartalmat a VD3 vetésidőben befolyásolták ($p < 0,05$). A hibridek között a fehérjetartalomban a legnagyobb százalékos eltérés a VD3 vetésidőben (2011), míg az olajtartalomban a VD3 (2013) vetésidőben volt kimutatható.

A magas léghőmérséklet több szerző [Szulc et al. 2013, Halford et al. 2015, Mayer et al. 2016] szerint is különösen a magtelítődési időszakban [Lu et al. 2019] növelte a fehérjetartalmat. A hároméves eredmény azt mutatta, hogy a VD1 és VD2 vetés tenyészidőszakában magasabb a kumulatív hőösszeg (GDD), azonban egyértelműen tudtuk igazolni, hogy a növény fejlődésének korai stádiumában fellépő alacsony hőmérséklet csökkent a kukoricamag fehérje- és olajtartalmát. A későbbi (VD3) vetéssel ugyanis, ahol a napi hőmérséklet már magasabb, azonban alacsonyabb a tenyészidőszak kumulatív GDD értéke, a kukoricamag fehérjetartalma 12,5%-kal ($p < 0,05$), az olajtartalma 12,8%-kal ($p < 0,05$) emelkedett.

Az eredmények jól mutatják, hogy a vetés időpontjára vonatkozó döntés jelentős hatással van nem csak a termésre, hanem a minőségre is.

4.4.4. Vetésidő hatásának modellezése a kukorica kelésére és virágzására (2011–2013)

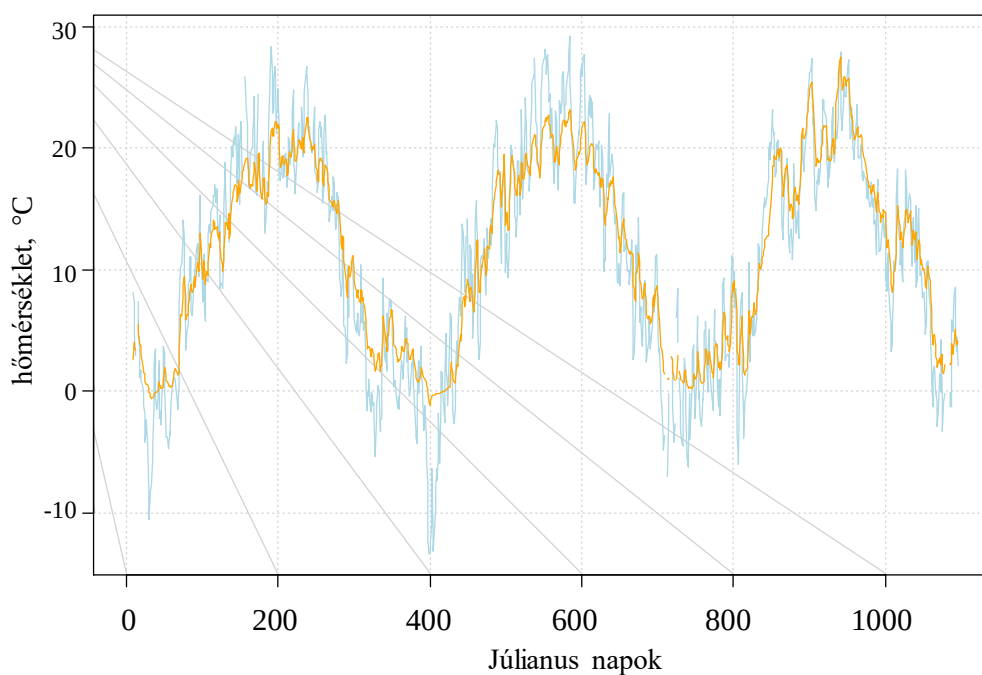
A megfelelő időben történő vetés hasznos módszer a hőmérsékleti körülmények optimalizálására, ami segíthet enyhíteni a nyári hőség kedvezőtlen hatásait a kukorica növekedésére, és elengedhetetlen a kukorica termésének maximalizálásához. A vetésidő modellezése kulcsfontosságú a klímaváltozáshoz való helyes alkalmazkodási stratégiák kidolgozásához. Ennek érdekében kutatást végeztünk, és arra kerestük a választ, hogy lehet-e pontosan modellezni a kelés (VE) és a nővirágzás (R1) idejét az 5 cm-es talajréteg hőmérsékletével (TH), és hogy a vetésidő (VD) miként befolyásolja az eltérő tenyészidejű hibridek VE és R1 időpontját. A vizsgálatokat a „Vetésidő” kisparcellás kísérletben végeztük.

Három vetésideőt alkalmaztunk, minden év április 4. és május 10. között. Három eltérő érésidejű kukorica hibridet (FAO 290, FAO 350, FAO 420) vontunk be a szántóföldi kísérletbe, 2011 és 2013 között.

A 2011–2013 időszak napjait Julianus napokra alakítottuk a későbbi egyértelmű elemzés érdekében. Az első nap 2011. január 1. és az utolsó 2013. december 31. volt, összesen 1 096 nap.

Az 5 cm-es mélységben mért talajhőmérséklet ingadozása sokkal kisebb, mint a felszín felett 2 m-es magasságban mért léghőmérséklet (31. ábra). Az energiamegmaradás törvénye szerint azonban a két hőmérséklet átlagának hosszútávon meg kell egyeznie. Ez nem zárja ki azt, hogy adott időpontban a felszín és levegő hőmérséklete között jelentős különbség alakuljon ki. A három év adataiból számolt átlagos hőmérsékletek az alábbiak voltak:

	Átlag	Minimum	Maximum
talajhőmérséklet 5 cm-es mélységben, °C	11,49	10,49	12,58
léghőmérséklet felszín felett 2 m-es magasságban, °C	11,11	5,85	16,31



31. ábra. A napi átlagos talajhőmérséklet (TH) és a napi átlagos léghőmérséklet (LH) 3 éves adatsora a kísérleti területen (Debrecen, 2011–2013)

A levegő és a talaj átlagos hőmérséklete közötti különbség csekély, mindössze 0,38 °C. Az eltérést a hőmérők mérési pontossága is okozhatja. Igaz, hogy a felszíntől távolodva a levegő hőmérséklete csökken, 100 méterenként átlagosan 0,65 °C-kal [Bartholy et al. 2013]. Ez a 2 méteres magasságban 0,013 °C-t jelent. Ezzel a módszerrel a hőmérők mérési pontossága is

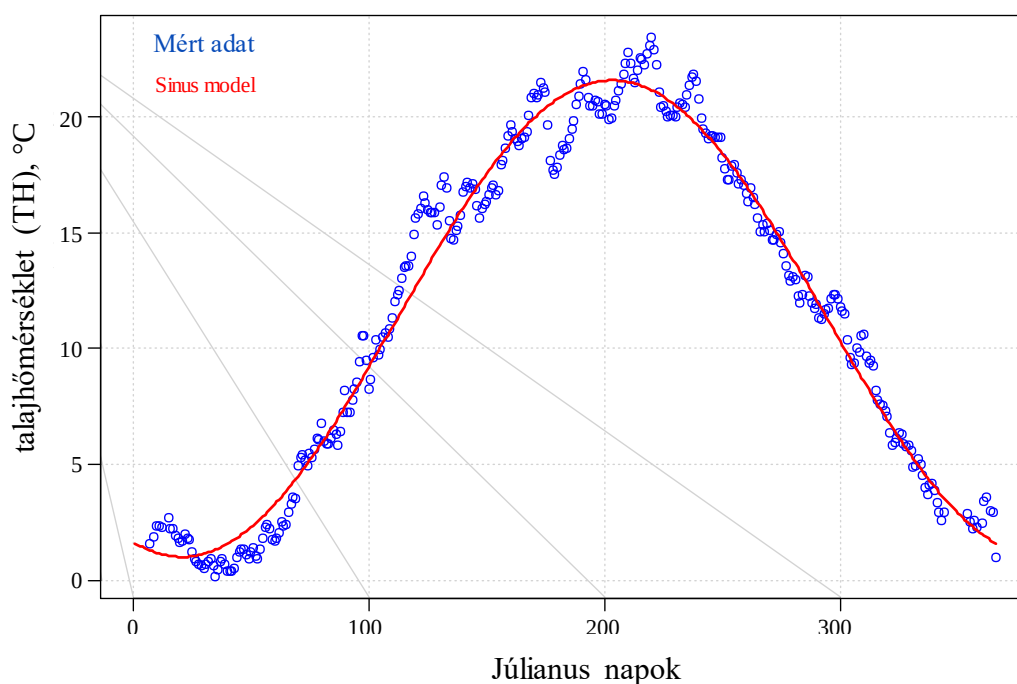
összehasonlítható. Ha a különböző mélységekben elhelyezett hőmérők hosszútávon azonos átlaghőmérsékletet detektálnak, akkor a mérési pontosságuk megfelelő.

A vizsgált időszak (2011–2013) 5 cm-es talajhőmérsékletére szinusz modellt illesztettünk valódi nemlineáris regresszió-analízissel

$$TH = 11,3 + 10,3 * \sin\left(\frac{2\pi * (JDay - 112)}{365}\right)$$

ahol a TH talajhőmérséklet, a $JDay$ Julianus napok, az a, b, c regressziós paraméterek

A szinusz modell pontosan modellezte a talajhőmérsékletet (32. ábra), a maradékok szórása 1,067 volt. Ezzel a modellel előállítható a Ceres Maize kelési algoritmus számára a talajhőmérséklet, illetve a hasznos hőmérséklet akkor is, ha nem állnak rendelkezésünkre mért hőmérsékleti adatok. Algoritmusunk a $\pm 23,45$ és $\pm 65,5$ szélességi fok között alkalmazható. Az a, b, c paramétereket az adott hely értékeit figyelembe véve kell meghatározni.



32. ábra. A napi átlagos talajhőmérséklet (TH) modellezett értékei 3 éves (2011–2013) adatok alapján

Az eredeti modell a talajfelszín feletti 2 m-es léghőmérsékletet használja bemenő adatként, és bázishőmérsékletnek 10 °C-ot. Mivel a kelést a talajhőmérséklet sokkal jobban meghatározza, ezért az 5 cm-es mélységben mért értéket használtuk a szimuláció során. Az 5 cm-es mélységben a talaj átlagban kisebb hőingadozást mutat, és a tenyészidőszakban hűvösebb, mint a 2 m-es léghőmérséklet, ezért a hasznos talajhőmérséklet számításakor 6 °C-os

bázishőmérséklettel kaptuk a legjobb eredményt. Ez a hőmérséklet felelt meg a léghőmérséklet 10 °C-os bázishőmérsékletének.

A szimuláció jóságát a Percentage of Predicted Deviation (%) (PD) mutatóval jellemeztük (18. táblázat). Jamieson et al. [1991] szerint – a PD érték alapján –, ha PD<10% kiváló, 10–20% jó, 20–30% közepes, >30% gyenge a szimuláció eredménye.

$$PD=(p-o)/o*100$$

ahol a PD a mért és a szimulált érték különbsége a mért érték százalékában (%), a p szimulált érték, az o mért érték.

18. táblázat. A vetéstől (VD) kelésig eltelt napok számának mért és szimulált értékei eltérő vetésidőben a kísérleti területen (Debrecen, 2011–2013)

Hibridek	Vetésidő								
	VD1			VD2			VD3		
	O	P	PD (%)	O	P	PD (%)	O	P	PD (%)
2011									
FAO 290	12,5	13,0	4,0	11,25	10,0	-11,1	8,75	8,0	-8,6
FAO 350	12,5	13,0	4,0	12,00	10,0	-16,7	8,50	8,0	-5,9
FAO 420	14,0	13,0	-7,1	12,50	10,0	-20,0	9,25	8,0	-13,5
2012									
FAO 290	12,0	14,0	16,7	12,25	9,0	-26,5	12,0	6,0	-50,0
FAO 350	14,0	14,0	0,0	12,00	9,0	-25,0	12,0	6,0	-50,0
FAO 420	14,0	14,0	0,0	12,50	9,0	-28,0	13,0	6,0	-53,8
2013									
FAO 290	9,0	9,0	0,0	9,00	5,0	-44,4	6,50	6,0	-7,7
FAO 350	11,0	9,0	-18,2	9,25	5,0	-45,9	6,50	6,0	-7,7
FAO 420	10,0	9,0	-10,0	10,50	5,0	-52,4	7,25	6,0	-17,2

Megjegyzés. O: mért érték, P: szimulált érték, PD: mért és a szimulált érték különbsége a mért érték százalékában (%).

A mért és szimulált kelési napok a korai vetés (VD1) esetén közel voltak egymáshoz, a későbbi vetés (VD2, VD3) esetén viszont 2012–2013-ban jelentős eltérést tapasztaltunk. Ennek oka a csírázás. A talaj optimális relatív nedvessége 70–80%, amely szükséges a csírázáshoz [Liu et al. 2010], illetve ha kevesebb vagy több, nem indul be a csírázás és késik a kelés [Ma et al. 2012]. Az eredeti számítógépes modell ezt nem veszi figyelembe. Megoldás lehet, hogy a kelés tényleges idejétől indítjuk el a szimulációt, vagy nagy felbontású talajnedvesség-modellt futtatunk, azonban ezeknek a modelleknek kicsi a pontossága a vetési mélységben.

A gyakorlatban száraz talajon 6–7 cm mélyen vetnek, hogy a mag nedvesebb rétegbe kerüljön, és beinduljon a csírázás. A Maize modellben 1 cm mélység 6 DD-vel növeli meg a kelés idejét. Ez korai vetés esetén egy nappal, késői vetés esetén fél nappal növeli meg a kelési időt (18. táblázat).

A R1 idejének meghatározásához a CERES Maize modell genetikai paramétereit is használja a hőmérséklet és a nappalhosszúság mellett. A genetikai paramétereit a legújabb modell próbálgatással határozza meg (19. táblázat). A legjobb eredményeket az alábbi értékekkel kaptuk.

FAO 290, igen korai, P1: 175, P2:0,7

FAO 350, korai, P1: 190, P2: 0,5

FAO 420, középérésű, P1: 240, P2: 0,1

ahol *P* a juvenilis fázishoz szükséges hőösszeg, *P2* a fotoperiodikus érzékenység (0,00–1,00)

19. táblázat. A vetéstől (VD) a virágzásig (R1) eltelt napok számának mért és szimulált értékei eltérő vetésidőben a kísérleti területen (Debrecen, 2011–2013)

Hibridek	Vetésidő								
	VD1			VD2			VD3		
	O	P	PD (%)	O	P	PD (%)	O	P	PD (%)
2011									
FAO 290	80,50	79,0	-1,9	72,25	73,0	1,0	63,5	68,0	7,1
FAO 350	82,50	82,0	-0,6	73,50	75,0	2,0	64,0	68,0	6,3
FAO 420	89,75	88,0	-1,9	75,25	77,0	2,3	65,0	72,0	10,8
2012									
FAO 290	82,75	75,0	-9,4	72,00	66,0	-8,3	60,00	63,0	5,0
FAO 350	83,00	75,0	-9,6	71,75	66,0	-8,0	63,50	63,0	-0,8
FAO 420	87,50	80,0	-8,6	75,75	72,0	-5,0	66,25	65,0	-1,9
2013									
FAO 290	69,5	65,0	-6,5	63,50	57,0	-10,2	56,50	61,0	8,0
FAO 350	74,0	65,0	-12,2	64,00	57,0	-10,9	57,25	61,0	6,6
FAO 420	76,0	67,0	-11,8	66,75	63,0	-5,6	59,75	64,0	7,1

Megjegyzés. O: mért érték, P: szimulált érték, PD: mért és a szimulált érték különbsége a mért érték százalékában (%).

Az R1 idejét a modell kiválóan jelezte előre. A PD értékek, néhány esettől eltekintve, 10% alattiak voltak. Az alá- és felülbecslések száma nagyjából megegyezett. 2012-ben a VD2 és VD3 késői kelése a virágzási időben nem jelent meg. Hasonlót tapasztaltunk 2013-ban a VD2 vetésidő esetén, bár itt közel 10%-kal később virágzott a kukorica, mint amit a modell előre jelzett. A hibridek tenyésztésidőbeli különbsége a virágzási időben jól megfigyelhető. A korai vetésben (VD1) a különbség kifejezett, a későbbi vetésekben (VD2, VD3) mérséklődik a

különbség. Ennek oka a foknapokban számolt hőidő, amely a későbbi vetésekben gyorsabban kumulálódik a magasabb hőmérséklet miatt. A tenyészidőbeli különbségek alacsony hőmérsékletek esetén észlelhetők.

Összegzés. A talaj hőszigetelő képessége miatt a talaj 5 cm-es mélységének hőmérséklete mindig hidegebb a tenyészidőszakban, mint a felszín vagy a léghőmérséklet. A számítógépes szimulációs modellek, (pl. a CERES Maize modell) a hasznos hőmérséklet számításakor a felszín felett 2 m-es magasságban mért levegő hőmérsékletét veszik figyelembe, és a bázishőmérsékletet is a levegő hőmérsékletére adják meg. A kukorica esetén ez 8–10 °C. A csírázaskor és keléskor a magasabb, kelés után az alacsonyabb bázishőmérsékleteket használják a számítógépes szimulációs modellek. A modell kalibrálása során – a mérési eredményeink alapján –, ha a hasznos hőmérsékletet az 5 cm-es mélységben mért hőmérséklet alapján számítjuk, akkor a bázishőmérsékletnek 6 °C-ot kaptunk. Ez eredményezte a legpontosabb becslést a kelés időpontjára. Amennyiben rendelkezünk a vetés mélységének hőmérsékletével, kiválóan lehet modellezni a kukorica kelését, csak a bázishőmérsékletet 6 °C-ra kell csökkenteni.

A CERES Maize modellben a keléshez szükséges hőidő független a hibrid tenyészidejétől, illetve az egyéb genetikai tulajdonságától. Egyedül a vetés mélységétől függ, hogy mennyi hőösszeg szükséges ahhoz, hogy a csíra megjelenjen a talaj felszínén. Kísérleti adataink ezt az elképzelést megerősítették, hibridtől függetlenül a kelések azonosak voltak. A szimulációs modell rossz becslését, amikor a PD értéke 50% körülire nőtt, a csírázás elhúzódása okozta.

A mai modern számítógépes modellekkel az 5 cm-es talajréteg hőmérséklete kiválóan alkalmazható az R1 idejének pontos előrejelzéséhez. Adataink alapján – néhány esettől eltekintve – a PD értékek 10% alatt maradtak. Itt azonban meg kell jegyezni, hogy a PD meghatározásából adódóan a százalékos értékek kicsit félrevezetőek is lehetnek, hiszen a virágzásnál egy hétnapos csúszás 10%-os PD-t eredményez, míg a kelésnél ugyanez az érték már 50%-os PD-t jelent.

Eredményeink egyeznek [Fodor 2012], Waha et al. [2012], Lamichhane et al. [2020] és Dobor et al. [2016] kutatók eredményeivel, miszerint a növénytermesztési modellek jelentős segítséget nyújtanak a gazdálkodók számára a döntéshozatal során. Az időjárás-előrejelzések figyelembevételével ezáltal képesek módosítani termesztéstechnológiájukat, ami hozzájárul a termés mennyiségének növeléséhez.

4.5. Kukoricatermesztés aszálystressz alatt: termés-előrejelzés precíziós mezőgazdasági (PrM) döntéshozatali eszközökkel (2021–2022)

4.5.1. A N-műtrágyázás hatása a kukorica SPAD és LAI értékeire különböző fenofázisokban: Integrált előrejelzési modell fejlesztése (2021–2022)

Az éghajlatváltozás a világ minden térségét érinti. Lesznek térségek, ahol növekedni vagy csökkenni fog a csapadék mennyisége és megnövekszik az evapotranszspirációs ráta, ami a szárazság növekedését eredményezi [Kogo et al. 2019, Mbaye et al. 2019, Adamo et al. 2022]. Ez azt jelenti, hogy a szárazság, a súlyos vízhiány negatívan befolyásolja a tápanyagfelvételt [Bista et al. 2018, Plett et al. 2020, Dubey et al. 2021], amely a terméscsökkenés egyik oka.

A Debreceni Egyetem kisparcellás kísérletében a kukorica átlagos termése kutatást megelőző években 14–15 t ha⁻¹ volt, ami jóval magasabb, mint e két vizsgált év (2021, 2022) terméseredménye. Ezért a kukoricatermelőknek minél több információra van szükségük arról, hogy az időjárás és a különböző adagú és időzítésű N-műtrágyázás hogyan befolyásolja a kukoricanövény vegetatív és reprodukzív fenofázisát, illetve termését, hogy megalapozott és tudatos döntéseket tudjanak hozni a N-utánpótlásról.

Ennek elérése érdekében a következő kutatási célokat tűzzük ki: (1) Milyen hatást gyakorol a szárazságstressz a relatív klorofilltartalomra (SPAD) és a levélfelület-index (LAI) értékekre? (2) Melyik fenofázisban kezdődik a klorofill lebomlása szárazságstressz alatt? (3) Hogyan befolyásolja a szárazság a fejtárgyaként kijuttatott N-felvételt? (4) Melyik az optimális N-műtrágyamennyiség száraz és extrém száraz időszakban? (5) Melyik változóval illetve változókkal lehet a legpontosabban becsülni a várható termést? (6) Melyik fenofázis jellemzői mutatják a legszorosabb összefüggést a terméssel?

A vizsgálatokat a „Nitrogén alap- és fejtrágyázás” tartamkísérletben végeztük. Két hibrid (Merida FAO 390) és Armagnac (FAO 490) mérési eredményeit értékeltük természetes csapadékelátottság mellett, száraz (2021) és aszályos (2022) években az „Anyag és módszer” fejezetben leírtak alapján.

A klorofillkoncentrációra (SPAD) a kezelések (N-műtrágyázás, fenofázis és évek) összevont varianciaanalízise kimutatta, hogy a fő tényezők mindegyike hatást gyakorolt ($p < 0,001$). Legnagyobb befolyásoló hatása az évjáratnak, majd a fenofázisnak, legkisebb mértékben a N-műtrágyázásnak volt. A kölcsönhatások mindegyike igazolható volt ($p < 0,001$). Az évenként elvégzett ANOVA 0,1%-os szinten kimutatta mindkét évben a fő tényezők (fenofázis, N-műtrágyázás) hatását a SPAD értékre. A 2021. évben a N-műtrágyázásnak, a 2022. évben a

fenofázisnak volt legnagyobb hatása a SPAD érték alakulására. A fenofázis $\times$ N-műtrágyázás kölcsönhatás 2021-ben 5%-os, 2022-ben 0,1%-os szinten volt szignifikáns.

2021-ben az alkalmazott N-műtrágyakezelésekben a legnagyobb SPAD értéket ($p < 0,05$) eltérő fenofázisban lehetett kimutatni (33. ábra). Az A_0 kezelésben a VT (42,4), az A_{60} kezelésben a V8 (42,6), az A_{120} (50,0) és $V_{12_{120}}$ (51,6) kezelésben a V10, a $V_{6_{90}}$ (51,5) és $V_{6_{150}}$ (55,0) fejtrágyakezelésekben az R1, valamint a $V_{12_{180}}$ kezelésben az R3 fenofázisban (56,7) volt. Az igazoltan legnagyobb SPAD értékekhez viszonyítva az R1 szakaszra szignifikáns változás nem volt, míg az R6 fenofázisra 5%-os szinten igazolt volt a SPAD érték csökkenés. A fejtrágyakezelések mutatták a legnagyobb mértékű, 30% körüli csökkenést. A vizsgált tenyészidőszakban (V8-R6) A_0 kezelésben volt a legalacsonyabb (39,2) a SPAD érték, mely kezeléshez viszonyítva a legnagyobb SPAD értéket az alaptrágyaként kijuttatott 120 kg N ha^{-1} + V6 fenofázisban további 30 kg N ha^{-1} műtrágyaadag ($V_{6_{150}}$) biztosította (48,5; $p < 0,05$), a növekedés mértéke 23,7% volt.

A 2022. évben minden N-műtrágyakezelésben – kivétel 60 kg N ha^{-1} (A_{60}) kezelést – a V8 fenofázisban ($p < 0,05$) lehetett a legnagyobb SPAD értéket kimutatni. Az R1 fenofázisra az A_0 kezelés 23,7%-os ($p < 0,05$) csökkenése volt a legjelentősebb, míg az R6 fenofázisra minden kezelésben 76–79%-os csökkenés ($p < 0,05$) mutatkozott. A vizsgált tenyészidőszak (V8-R6) a rendkívül alacsony A_0 kezelés SPAD értékéhez (32,0) képest 20%-os növekedést értünk el a legalacsonyabb 60 kg N ha^{-1} alapkezeléssel (A_{60} ; $p < 0,05$). A magasabb 120 kg N ha^{-1} (A_{120}), illetve a további fejtrágyamennyiség kijuttatása szignifikánsan nem növelte a SPAD értéket (33. ábra).

Két év átlagát tekintve a legnagyobb SPAD érték az A_0 (41,4), A_{120} (46,3) és a $V_{12_{180}}$ (46,5) kezelésekben a V8 fenofázisban ($p < 0,05$), míg az A_{60} (46,9), $V_{6_{90}}$ (48,2), $V_{6_{150}}$ (50,5) és $V_{12_{120}}$ (50,7) fejtrágyakezelésekben a V10 fenofázisban volt ($p < 0,05$). Az R1 fenofázisra – az 5%-os szinten igazolt legnagyobb SPAD értékhez viszonyítva – a legkisebb SPAD érték csökkenés az A_{120} kezelésben (1,9%; nem szignifikáns), az R6 fenofázisra a $V_{12_{180}}$ (47,1%; ($p < 0,05$)) kezelésben volt kimutatható. Mindkét fenofázisra (R1, R6) a $V_{12_{120}}$ fejtrágyakezelésben (8,3%, $p < 0,05$; 52,9%, $p < 0,05$) volt a legnagyobb mértékű csökkenés. A tenyészidőszak tekintetében (V8-R6) A_0 kezelésben volt a legalacsonyabb (35,6) a SPAD érték, mely kezeléshez viszonyítva 5% szinten igazolt legnagyobb SPAD értéket az A_{60} biztosította, a növekedés mértéke 13,5% volt.

Az évjárat jelentősen ($p < 0,001$) befolyásolta a relatív klorofilltartalmat (SPAD). A két száraz év átlagos SPAD értéke 40,1 volt. A 2021. évben az átlagtól magasabb 43,8; míg a rendkívüli aszályos 2022. évben kritikusan alacsony, 36,4 SPAD értéket lehetett kimutatni, a különbség 0,1%-os szinten igazolt. A 2022. évben a N-műtrágyakezelések átlagában a V8 fenofázis

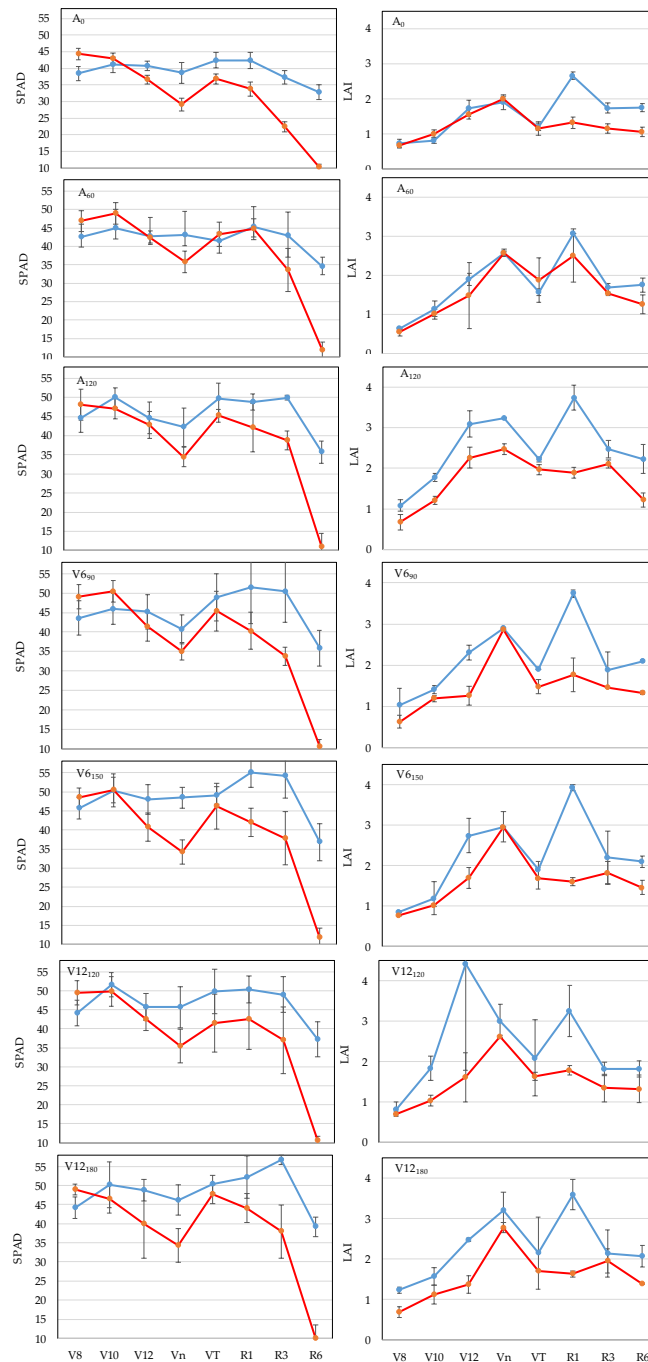
kivételével minden fejlődési szakaszban alacsonyabb ($p < 0,001$) volt a SPAD érték, mint 2021. évben (33. ábra). Eredményeinkkel alátámasztottuk Andrade et al. [2015] és Yordanov et al. [2000] megállapításait, miszerint a szárazság korlátozza a fotoszintézist, a víz- és tápanyagfelvételt, ezáltal csökkentve a fejlődést. Az évek közötti legnagyobb különbség az R3 és az R6 fenofázisban volt, amely 14,4 ($p < 0,001$) és 24,6 ($p < 0,001$) SPAD érték csökkenést jelent. A vizsgált fenofázisok (V8-R6) átlagában 2022-ben minden N-műtrágyakezelésben szignifikánsan jelentősen alacsonyabb volt a SPAD érték. A legkisebb különbséget a V6₉₀ (7,0; $p < 0,05$), a legnagyobbat V6₁₅₀ (9,8; $p < 0,001$) kezelésekben lehetett kimutatni.

A kutatásunk során vizsgáltuk a fenofázis, a N-műtrágya, és az évjárat, valamint a tényezők kölcsönhatását a kukorica LAI értékére. Az összevont varianciaanalízis (ANOVA), illetve az évenként elvégzett ANOVA kimutatta, hogy a fő tényezők mindegyike hatást gyakorolt ($p < 0,001$) a kukorica LAI értékére. Mindkét évben igazolt a fenofázis és a N-műtrágyázás kölcsönhatása (2021: $p < 0,05$; 2022: $p < 0,001$).

A vizsgált években a LAI érték alacsony volt, 2021-ben 0,63 és 3,20, valamint 2022-ben 0,56 és 2,96 között változott. Mindkét évben 300 mm alatt volt a csapadék a tenyészidőszakban, ami jól mutatja – egyezően több kutató megállapításával [Menyhért et al. 1980, Berzsényi 1988, Fard 2023, Futó 2024] –, hogy a szárazság csökkenti a LAI értékeit.

A kukoricanövények LAI dinamikája évenként és N-műtrágyakezelésenként változott (33. ábra). A N-műtrágyakezeléseket értékelve kimutatható volt, hogy 2021-ben – a V12₁₂₀ kezelés kivételével (V12) – a maximális LAI az R1 fenofázisra alakult ki ($p < 0,05$), míg 2022-ben minden kezelésben a Vn fejlődési szakaszra ($p < 0,05$), majd a levelek öregedésével a fiziológiai érettség fenofázisára (R6) fokozatosan csökkent. A levelek LAI értékének csökkenése 2021-ben alacsonyabb volt (41,1%), mint 2022-ben (50%), ami igazolja Sun et al. [2019] eredményét, hogy a levélöregedés a LAI értékétől függ. Mindkét év tenyészidőszakában (V8-R6) az alaptrágyaként kijuttatott 120 kg N ha⁻¹ (A₁₂₀) kezelésben volt maximális a LAI érték (2,48 és 1,73). A nem műtrágyázott kezeléshez (A₀) viszonyítva a 2021. évben 58,0%-os ($p < 0,05$) és a 2022. évben 39,5%-os ($p < 0,05$) volt a LAI növekedés ($p < 0,05$).

Két év átlagát tekintve a legnagyobb LAI érték – az A₁₂₀ és V12₁₂₀ kezelés kivételével – a Vn szakaszban alakult ki. A vizsgált tenyészidőszakban (V8-R6) A₀ kezelésben volt a legalacsonyabb (1,41) a LAI érték, mely kezeléshez viszonyítva a legnagyobb SPAD értéket az alaptrágyaként kijuttatott 120 kg N ha⁻¹ műtrágyaadag (A₁₂₀) biztosította (2,10; $p < 0,05$), a növekedés mértéke 48,9% volt.



33. ábra. A levél relatív klorofilltartalmának értéke (SPAD) és a levélfelület-index (LAI) változása (Debrecen, 2021 és 2022)

Megjegyzés: a SPAD (bal oldali panel), LAI (jobb oldali panel), 2021. év kék szín, a 2022. év piros szín. A nitrogén alap- és fejtrágyakezelések (sorok, A₀-tól V12₁₈₀-ig).

A három fő tényező közül az ANOVA Mean Squares (MS) adata alapján az évjárat befolyásolta legnagyobb mértékben a kukoricalevelek LAI értékét. A két év átlagában a LAI főatlaga 1,74 volt, melyhez képest 2021-ben 14,9%-kal nőtt, míg 2022-ben 26,5%-kal csökkent. A fenofázisok tekintetében 2022-ben minden fenofázisában alacsonyabb volt a LAI érték, azonban a V10, a Vn és VT fejlődési szakaszokban ez az eltérés szignifikánsan nem igazolt. A legnagyobb különbséget (1,57) a nővirágzás (R1) időszakában lehetett kimutatni ($p < 0,001$). Az

extrém száraz év LAI értéket csökkentő hatása az A₆₀ kezelés kivételével minden kezelésben megbízhatóan kimutatható volt. A legnagyobb különbségek a V12₁₂₀ (0,88; $p < 0,05$) és V12₁₈₀ (0,72; $p < 0,01$) fejtrágyakezelések hatására alakultak ki.

Megvizsgáltuk a kukorica hibridek termését és az ANOVA összevont eredménye kimutatta, hogy a kukorica szemtermését két fő tényező, az év ($p < 0,001$) és a N-műtrágyázás ($p < 0,001$) befolyásolta, az évjárat hatása volt jelentősebb. A kölcsönhatások közül az év $\times$ N-műtrágyázás volt szignifikáns ($p < 0,001$), vagyis a szemtermés az évjárat és a N-műtrágyázás hatására eltérően alakult. A N-műtrágyázás szignifikáns ($p < 0,001$) szemtermést befolyásoló hatását az évenként elvégzett varianciaanalízis is kimutatta.

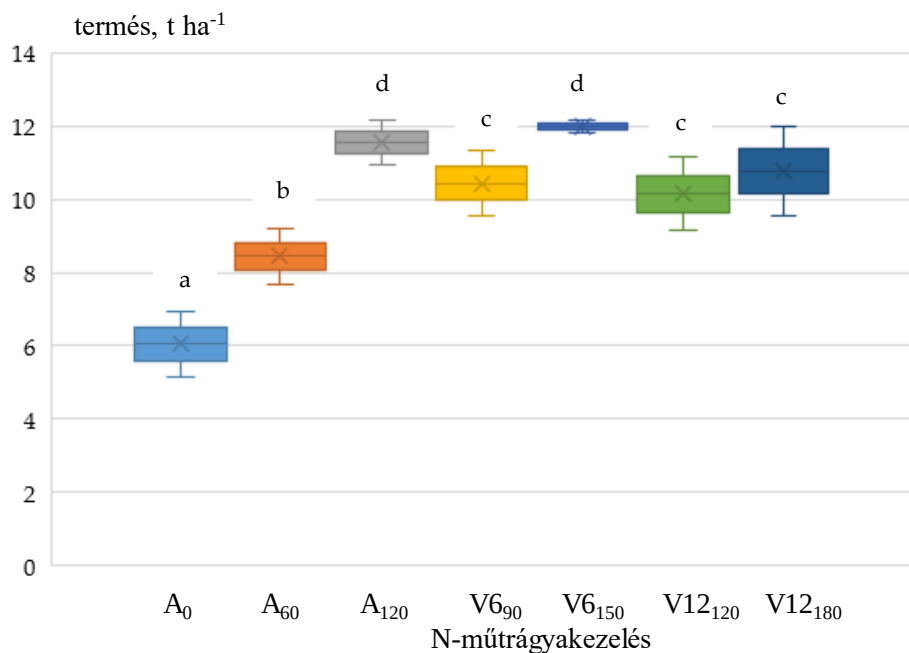
A terméseszkökenés attól függ, hogy a szárazság milyen fejlődési periódusban éri a növényt és a csapadékmentes időszak meddig tart [Çakir 2004, Li et al. 2018, Guna et al. 2019]. Az R1 körüli száraz időszak a kukorica számára legérzékenyebb periódus [Almeida et al. 2014, Neiff et al. 2016, Simon et al. 2023], melyet saját eredményeink igazolnak. A V6 és a V12 fenofázis között 2021-ben mindössze 10 mm, és a V12 fenofázistól R1 időszakig 18 mm csapadék hullott. A 2021. évi szárazság 2022-ben tovább folytatódott. AV6–V12 fenofázis között 19 mm, míg a V12 és R1 között nem hullott csapadék.

Mindkét évben a száraz körülményeknek köszönhetően a V6 és V12 fenofázisban kijuttatott nitrogén-fejtrágyázás alacsonyabb szemtermést eredményezett (2021: 10,830 t ha⁻¹; 2022: 7,476 t ha⁻¹), mint a vetés előtti egyszeri (120 kg N ha⁻¹) alaptrágyázás ($p < 0,001$), amely igazolja a víz- és nitrogénellátási szint összehangolásának fontosságát [Di Paolo és Rinaldi 2008, Li et al. 2015, Rutkowska 2019, Plett et al. 2020]. A nem műtrágyázott (A₀) kezeléshez viszonyítva (2021: 6,056 t ha⁻¹; 2022: 4,101 t ha⁻¹) az A₁₂₀ műtrágyakezelés a 2021. évben 90,7% és a 2022. évben 117%-os termésnövekedést eredményezett (34–35. ábra).

A 2022. évben a súlyosabb aszálynak köszönhetően a 2021. évhez képest a terméseszkökenés minden tápanyagszinten ($p < 0,001$) megmutatkozott. A nem műtrágyázott (A₀), valamint a V6₉₀ és a V12₁₈₀ fejtrágyázott kezelésekben a csökkenés mértéke meghaladta a 30%-ot. A legnagyobb terméseszkökenés 36,3% a V12₁₈₀, míg a legkisebb 12,1% a 60 kg N ha⁻¹ vetés előtt kijuttatott (A₆₀) kezelésben volt.

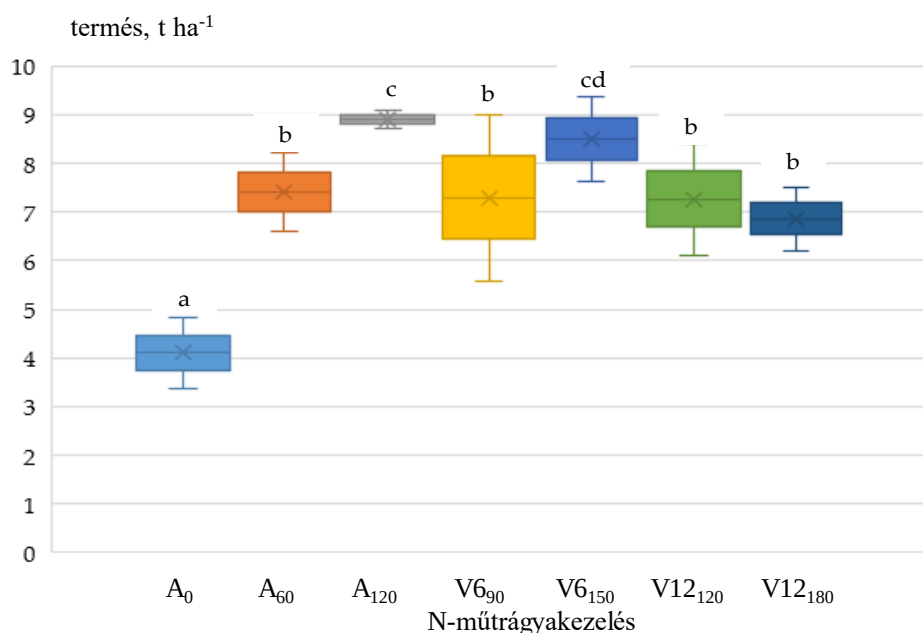
Számos kutatás igazolja a klorofillkoncentráció és a nitrogén korrelációját [Schepers et al. 1992, Nagy 2010, Rorie et al. 2011, Ványiné Széles és Nagy, 2012, Bai és Purcell 2019]. A SPAD és a termés közötti összefüggés vizsgálata során az R3 fenofázis ($R^2 = 0,716$) során kaptuk a legjobb illeszkedést (20. táblázat). Az R6 fázisban viszont ez a kapcsolat gyakorlatilag megszűnik. Az elemzés alapján a V8 fenofázistól az összefüggés egyre erősebb lesz az R3

fázisig (36. ábra). Eredményeink megerősítik Kaler et al. [2020] kutatását, miszerint a kukorica minél tovább zöld marad és a fotoszintézis zavartalanul folyik, annál nagyobb termés érhető el.



34. ábra. A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a kukorica termésére (Debrecen, 2021)

Megjegyzés: a különböző kisbetűkkel jelölt értékek N-műtrágyakezelései szignifikánsan eltérnek egymástól a Duncan-teszt alapján $p < 0,05$ valószínűségi szinten.

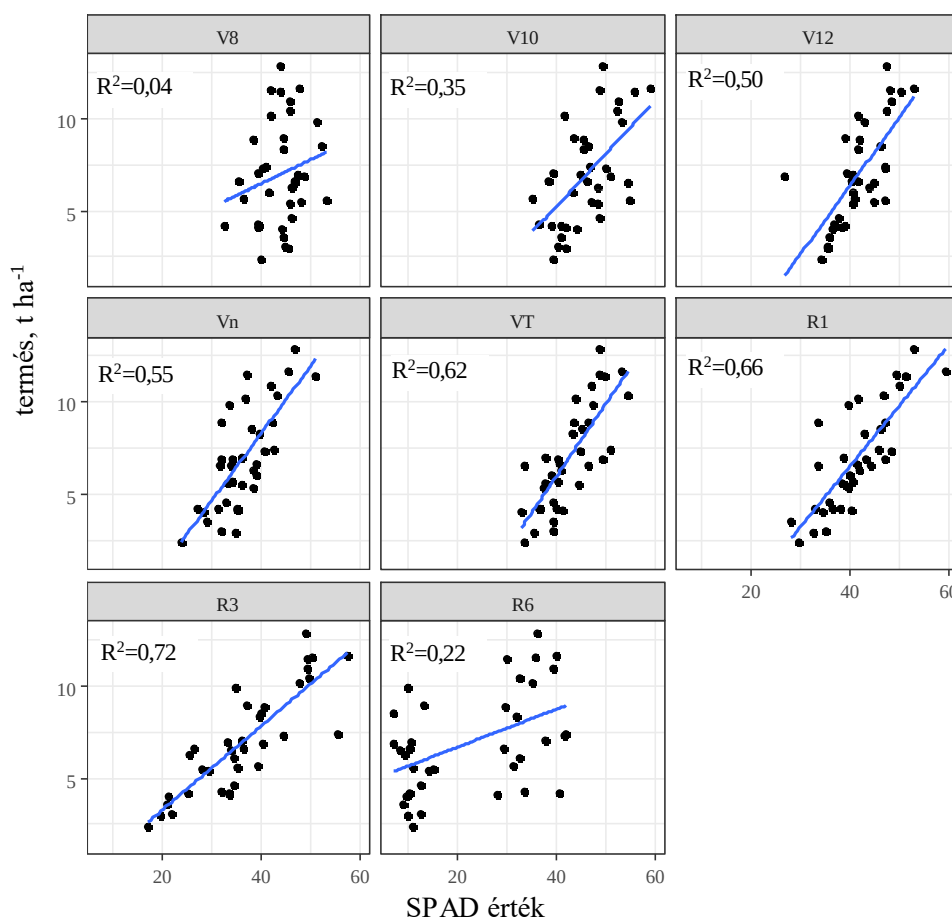


35. ábra. A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a kukorica termésére (Debrecen, 2022)

Megjegyzés: a különböző kisbetűkkel jelölt értékek N-műtrágyakezelései szignifikánsan eltérnek egymástól a Duncan-teszt alapján $p < 0,05$ valószínűségi szinten.

20. táblázat. Többszörös R-négyzet és maradék standard hiba (RMSE)

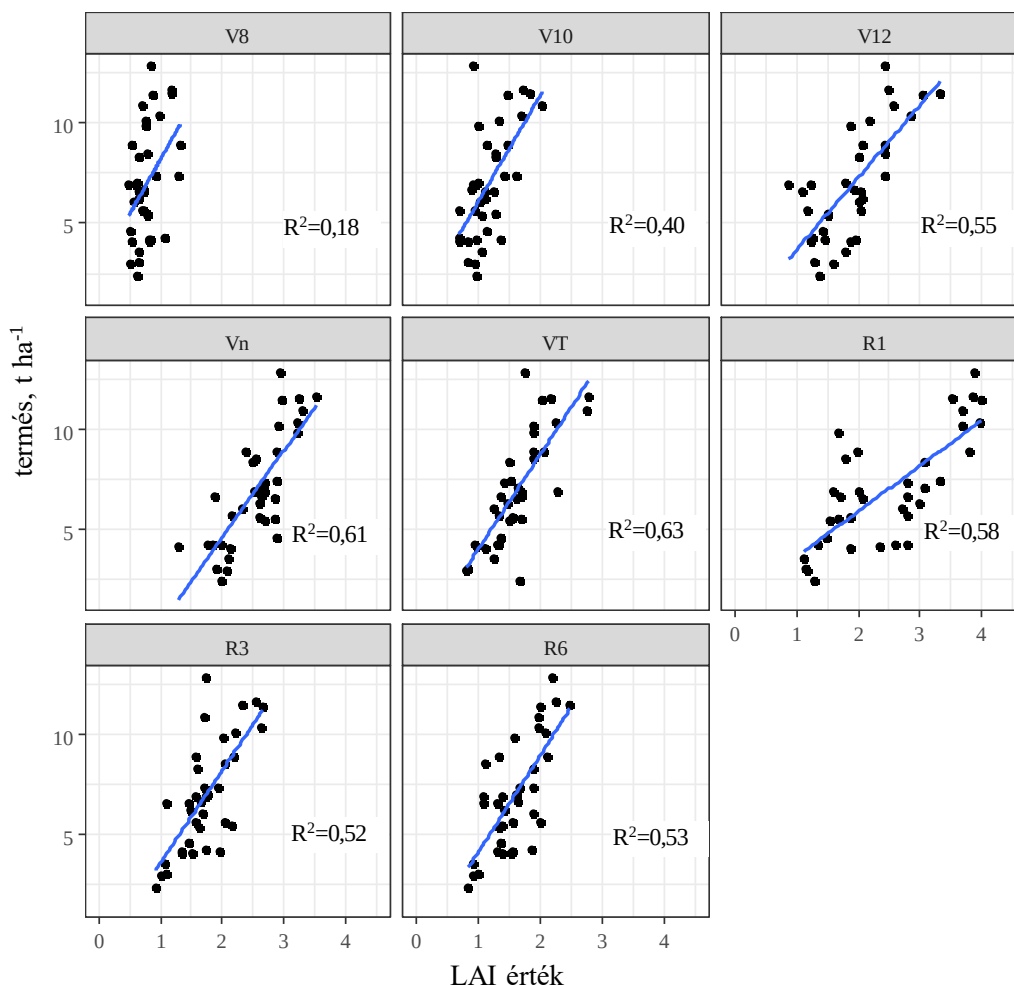
Kukorica fenofázis	R ² (SPAD)	R ² (LAI)	R ² (SPAD+LAI)	RMSE (SPAD+LAI)
V8	n.s.	0,177	0,267	2,469
V10	0,352	0,396	0,475	2,089
V12	0,500	0,226	0,515	2,008
Vn	0,545	0,611	0,734	1,486
VT	0,624	0,627	0,762	1,408
R1	0,655	0,575	0,704	1,569
R3	0,716	0,521	0,733	1,489
R6	0,221	0,526	0,562	1,908



36. ábra. A kukorica termése a relatív klorofilltartalom (SPAD) függvényében (Debrecen, 2021–2022)

A LAI és a termés közötti összefüggés elemzése szignifikáns pozitív korrelációt mutatott, amely egyezik számos kutató megállapításával [Tajul et al. 2013, Campos-Taberner et al. 2016, Berdjour et al. 2020, Ren et al. 2023]. A legszorosabb illeszkedés a VT fenofázisban volt

kimutatható ($R^2=0,627$), ellentétben Liu és Wiatrak [2012] megállapításával, akik kísérletükben az R1 fenofázisban állapították meg a legszorosabb összefüggést. A VT fázist követően a LAI és a termés kapcsolata egyre csökkent (37. ábra).



37. ábra. A kukorica termése a levélterület-index (LAI) függvényében (Debrecen, 2021–2022)

Mivel a SPAD érték a klorofillkoncentrációval függ össze, ezért önmagában nem képes jellemezni a szervesanyag-beépülés mennyiségét. Ehhez ismerni kell, hogy mekkora felület végzi a fotoszintézist, azaz a LAI-t. Akkor kapjuk a legnagyobb biomasszát, ha a SPAD és LAI minél nagyobb. A SPAD és a LAI együttes hatásának értékeléséhez becsülő modellt alkottunk.

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \times \text{LAI} + b_2 \times \text{SPAD}$$

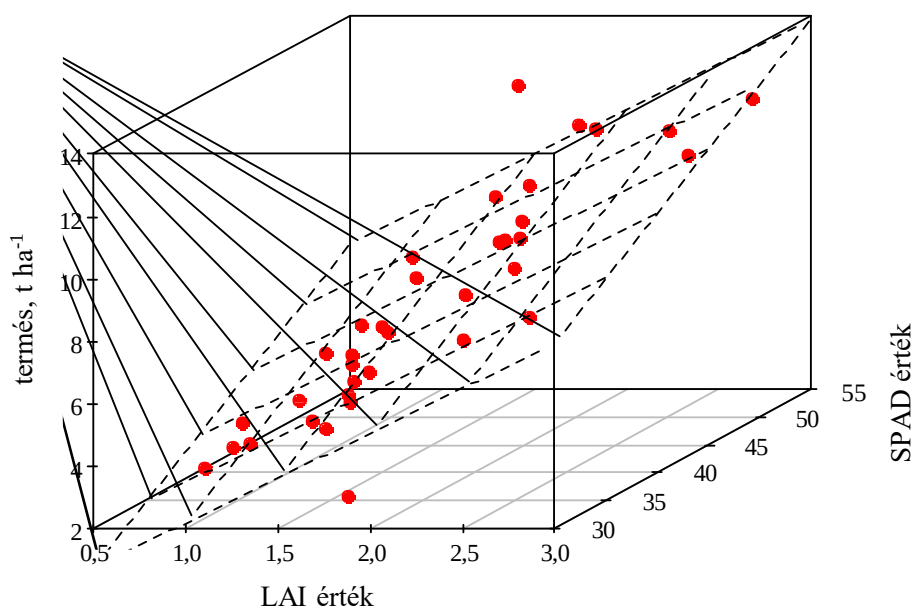
ahol, $\hat{y}$ = a becsült termés, b_0 = tengely metszet, b_1 = LAI meredeksége, b_2 = SPAD meredeksége.

A becsülő modell megalkotása során az Occam-elvet tartottuk szem előtt. Kevés paraméterrel, minél korábbi fenofázisban, megfelelő pontosságú terméselőrejelzést céloztunk meg. A mérési adatok ábrázolása után a SPAD és termés, valamint a LAI és termés közötti kapcsolat

lineárisnak mutatkozott. Mindkét magyarázó változót bevonva a modellben egy regressziós síkot kaptunk, amelynek a paramétereit multiple linear regression modellel becsültük meg. Méréseink alapján a SPAD és LAI együttes hatását elemezve a termésre a VT fenofázisban kaptuk a legszorosabb összefüggést ($R^2=0,762$). A függvényillesztés átlagos hibája $\pm 1,4 \text{ t ha}^{-1}$. Az illeszkedés jósága minimálisan kisebb a Vn fázisban.

A többszörös lineáris regresszióval alkotott modell megfelelő pontossággal becsüli a VT fázisban a várható termést. A becslő modell a VT fenofázisban (38. ábra):

$$\text{Termés (t ha}^{-1}\text{)} = -7,87 + 2,88 \cdot \text{LAI} + 0,24 \cdot \text{SPAD}$$



38. ábra. A kukorica termése a relatív klorofilltartalom (SPAD) és levélterület-index (LAI) függvényében a VT fenofázisban (Debrecen, 2021–2022)

Több szerzővel összhangban [Gitelson et al. 2003, Zhang et al. 2019, Cheng et al. 2022] megállapítottuk, hogy a relatív klorofilltartalom (SPAD) és a levélterületi index (LAI) fontos információkkal szolgálnak a növények tápláltsági állapotáról. Ezen mutatók monitorozása kulcsfontosságú a tápanyag-utánpótlás, a terméshozam és terméselőrejelzés tekintetében a precíziós mezőgazdaságban.

A SPAD érték minden N-műtrágyakezelésben, a két száraz év átlagát tekintve a korai vegetatív fejlődési szakaszban (V8-V10) volt a legnagyobb. A szárazságnak köszönhetően a klorofill lebomlása, a levelek öregedése megkezdődött [Anjum et al. 2011, Karimpour 2019, Monteoliva et al. 2021], majd fokozatosan csökkent, és az R6 fenofázisban elérte a legalacsonyabb értéket. A SPAD érték 2021-ben a fejtrágyázott kezeléseknek köszönhetően a

fenofázisok előrehaladtával fokozatosan emelkedett és a korai reprodukzív szakaszban (R1-R3) érte el a maximális értéket, majd ezt követően csökkent (35,9–39,2). A súlyosan aszályos 2022. évben az A₆₀ kezelés kivételével minden tápanyagszinten a V8 fejlődési fázisban volt a SPAD érték a legnagyobb, majd fokozatosan csökkent, és az R6 fenofázisra minimális értéket (10,0–11,8) mutatott. Ebben a két száraz évben két kivételtől eltekintve (2021: V₆₁₅₀ és V₁₂₁₈₀ kezelés) a relatív klorofilltartalom (SPAD) nem érte el a Piekielek et al. [1995] által ajánlott maximális 52–56 SPAD érték tartományt.

Az évenként elvégzett elemzés kimutatta, hogy mindkét évben az A₀ kezelésben volt a legalacsonyabb a SPAD érték, hasonlóan Berzsenyi [1988] és Dóka et al. [2024] megállapításához. Az eredményeinkkel igazoltuk He és Dijkstra [2014] és Bista et al. [2018] megállapítását, hogy a szárazság csökkenti a kukoricalevélben a klorofillkoncentrációt ezáltal a nitrogén-koncentrációt. A két száraz év közül abban, ahol kissé több csapadék hullott és annak eloszlása jobbnak tekinthető (2021) a fejtrágyázásnak (V₆₁₅₀), míg a súlyos aszályos (2022) évben a legkisebb adagú alapkezelésnek (A₆₀) volt SPAD érték növelő hatása.

A levélterületi index (LAI) alakulását a víz (csapadék) és a N-műtrágya a vizsgált száraz és extrém száraz évben eltérően befolyásolta. A vízhiányra adott LAI válasz 2022-ben kisebb volt, mint 2021-ben. A vízhiány különböző mértékben csökkentette a LAI értékét, hasonlóan Guo et al. [2022] eredményéhez. A vízhiánynak köszönhetően N-műtrágyázás hatására sem lehetett elérni egyik évben sem a kukorica optimális maximális levélfelület-indexet, amely Magyarországon 4,1–5,9 [Menyhért et al. 1980, Berzsenyi 1989]. A fejtrágyázás nem növelte a LAI-t, az alap 120 kg N ha⁻¹ kezelés (A₁₂₀) biztosította a maximális LAI értéket. Eredményeink megerősítették Tong et al. [2009] megállapítását, hogy az alacsony LAI alacsony napenergia-hasznosítási hatékonyságra utal, függ a nitrogén elérhetőségétől [Cheng et al. 2022], illetve alacsony szemtermés várható [Liu et al. 2017].

A kritikus fenofázisokban, illetve a teljes tenyészidőszakot tekintve jelentős volt a vízhiány mindkét évben. A 120 kg N ha⁻¹ (A₁₂₀) az alaptrágya biztosította a legnagyobb szemtermésmennyiséget, a szárazságstressz gátolta a további fejtrágyaként kijuttatott N felvételt hasonlóan Bista et al. [2018] eredményéhez, amely szemterméscsökkenéséhez vezetett. A vízhiány 2022-ben még jelentősebb volt, mint 2021-ben, ami a nem műtrágyázott és a fejtrágyakezelésekben 30%-ot meghaladó termésűcsökkenést okozott, egyezően Ocwa et al. [2023]. eredményeivel. Ez az eredmény megerősíti Wang et al. [2020] korábbi kutatásait, miszerint a nitrogénműtrágya további növelése nem enyhítette a szárazságstresszt.

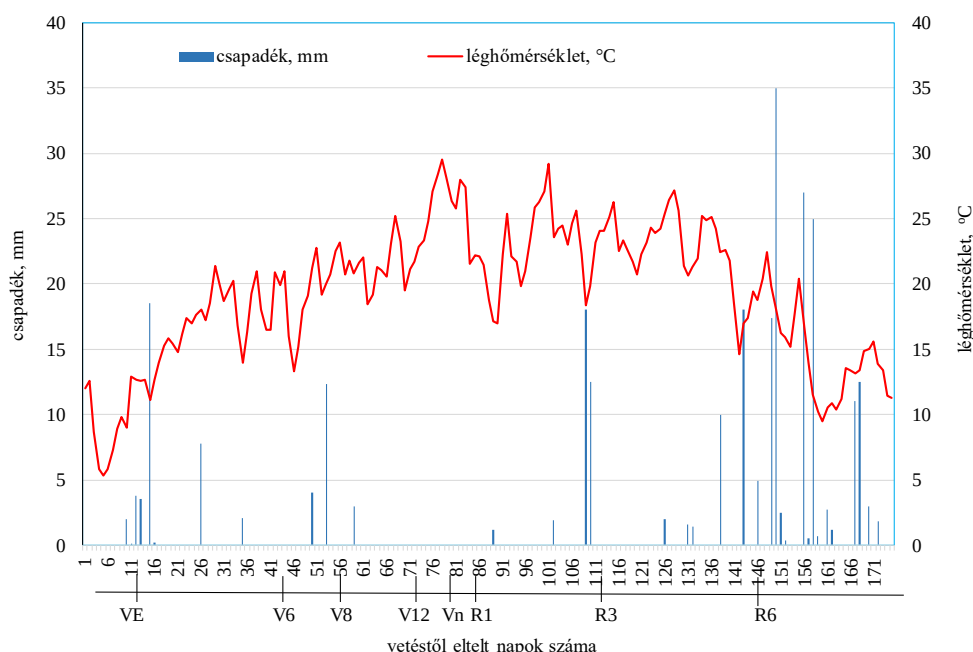
A SPAD és LAI értékek időben történő becslése nagy jelentőséggel bír a PrM technológiában. Az általunk alkalmazott Soil and Plant Analysis Development (SPAD) és SunScan lombkorona-elemző rendszert alkalmasnak találtuk a termés előrejelzésére, hasonlóan több kutatóval [Martínez és Guimet 2004, Padilla et al. 2018, Illés et al. 2021, Kira et al. 2016, Liang et al. 2020]. Egyetértve több kutató megállapításával [Oguntunde et al. 2012, Wilhelm et al. 2000, Li et al. 2017, Zhang et al. 2019], miszerint a mérések időigényesek, nagy a munkaterhelés és nem alkalmasak nagy területű mérésekre. A jövőt a pilóta nélküli légi járművel (UAV) történő távérzékelés jelenti a kézi szenzorokkal szemben. Az UAV technológia több előnnyel rendelkezik, például gyors adatgyűjtés, kevésbé befolyásolja az időjárás, nagy a térbeli és időbeli felbontás [Croft et al. 2017, Xie és Yang 2020]. Hátránya, hogy magas a beruházási költsége, professzionális felhasználása szakértelmet igényel (képzés, szakértő felkérése), mely költséges, és kevés repülési idővel rendelkezik [Hunt et al. 2010, Tsouros et al. 2019, Bouguettaya et al. 2022].

4.5.2. A N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica SPAD értékére (2022)

A nitrogén magas költségű, de a kukorica (*Zea mays* L.) termésének javításához nélkülözhetetlen tápanyag. A nitrogén alap- és fejtrágya mennyiségének és hatékony kijuttatási időzítésének meghatározása az optimális szemtermés elérése érdekében kulcsfontosságú kutatási kérdés a szárazsággal terhelt környezeti feltételek mellett. Az utóbbi években közepes vagy súlyos aszályos időszakok voltak tapasztalhatók, ami jelentős hatással volt a kukorica termésére. A 2022-es aszályos év jól rámutat arra, hogy az aszály jelentős hatással lehet a mezőgazdaságra és befolyásolhatja a termés alakulását. Ebben az összefüggésben tanulmányunk célja volt megvizsgálni a precíziós mezőgazdasági (PrM) technológia, különösen a SPAD és a pilóta nélküli légi jármű (UAV-NDVI) mérések felhasználását a kukorica szemtermések nyomon követésére súlyos aszályos (2022) körülmények között öntözött és nem öntözött (természetes csapadékelátottság) kísérleti elrendezésekben, eltérő N-műtrágyakezelésekkel. Konkrétan a különböző nitrogén alap- és fejtrágyázás, az öntözés és a relatív klorofilltartalom közötti korrelációt elemeztük spektrális értékek (SPAD, UAV-alapú NDVI) segítségével. A vizsgálatokat a „Nitrogén alap- és fejtrágyázás” tartamkísérletben végeztük az „Anyag és módszer” fejezetben leírtak alapján. A kutatásban a Merida (FAO 390), a Fornad (FAO 420) és az Armagnac (FAO 490) hibrideket vontuk be.

A 2022. évben Magyarországon extrém száraz és meleg időjárás uralkodott, az utóbbi 40 évben nem tapasztalt súlyosságú aszály alakult ki. A 39. ábra. a vegetációs időszak (vetéstől a

betakarításig) csapadékmennyiségének időbeli alakulását és a napi középhőmérséklet alakulását mutatja. A 35 csapadékos napból 23 nap 10 mm alatti, 9 nap pedig 10 mm feletti volt. A 20 mm-t meghaladó csapadékmennyiséget 3 napon regisztráltunk. A szélsőséges időjárási viszonyokat tükrözi – a kukorica vízigénye a virágzási szakaszban (R1) 4,5–5,5 mm/ha/nap –, hogy a V8 és R1 fenofázisok közötti 31 nap alatt mindössze 3 mm csapadék hullott, és az átlaghőmérséklet is jelentősen megemelkedett (23,7 °C). Az R1-R3 fenofázisok között 21 mm csapadék hullott, az átlaghőmérséklet 22,8 °C volt. Az R6 fenofázis után jelentős volt a csapadék (146 mm), ez az átlagnak több mint háromszorosa, ami sajnos a kukorica szemtermés mennyiségének alakulásában már nem segített. Összességében a vegetációs időszakot magas átlaghőmérséklet – 1 °C-kal volt magasabb a sokéves átlagnál (17,5 °C) – és alacsony csapadékelátottság és annak nem megfelelő időbeni eloszlása jellemezte.



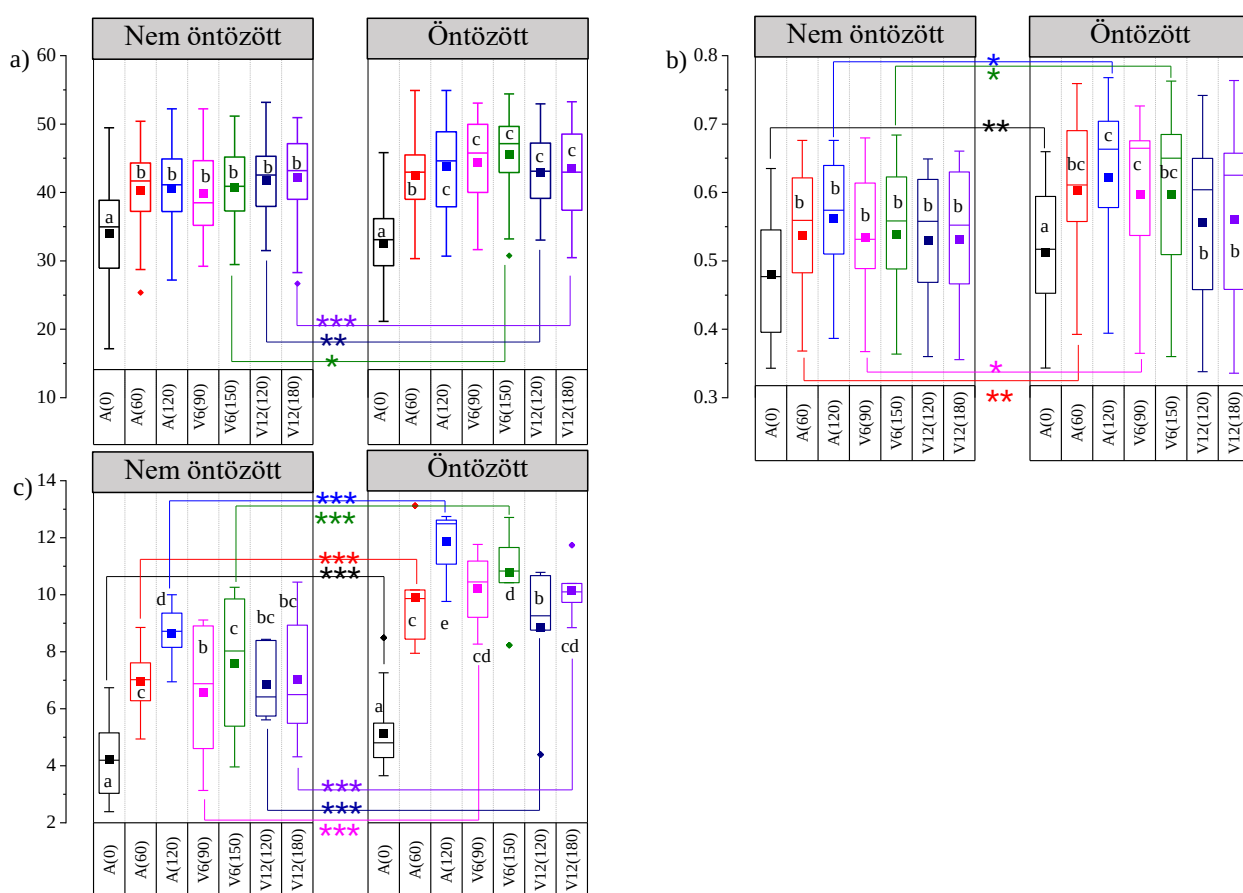
39. ábra. A csapadék eloszlása és a napi középhőmérséklet alakulása a vetéstől a betakarításig (Debrecen, 2022)

Ezért a vegetációs időszakban a kevesebb csapadék és az uralkodó aszályos körülmények miatt, valamint a különleges éghajlati körülmények által támasztott egyedi kihívások miatt egyéves kísérleti időtartamot tartottunk megfelelőnek ahhoz, hogy átfogóan meg lehessen ragadni a különböző nitrogénkezelések hatását nem öntözött és öntözött körülmények között.

A kukorica hibridek SPAD értékben kifejezett klorofilltartalmának a varianciaanalízis eredménye kimutatta nem öntözött és öntözött változatban, hogy a fő tényezők (fenofázis, N-műtrágyázás, öntözés) szoros ($p < 0,001$) összefüggést mutatnak a SPAD érték alakulásával. A fenofázis hatása volt a legjelentősebb ($p < 0,001$) az MS érték alapján. Mindhárom vizsgált

kölcsönhatás szignifikánsan befolyásolta a SPAD értéket ($p<0,001$), vagyis a kukorica fejlődése eltérően alakult a N-műtrágyázás és az öntözés hatására.

A vegetációs időszakban a N-műtrágyakezelésekben mért értékek nem öntözött kezelésben 23,0–48,4, öntözött kezelésben 24,4–51,8 SPAD érték között változtak. Természetes csapadékelátottság mellett az átlagos SPAD érték 39,7, míg öntözött körülmények között 42,3 volt. A teljes vegetációs időszakban a statisztikailag igazolt legnagyobb SPAD érték természetes csapadékelátottság mellett az A₆₀ (40,2; $p<0,05$), öntözött körülmények között a V6₁₅₀ (45,5; $p<0,05$) kezelés hatására alakult ki, amelyek az A₀ kezeléshez képest 19,6% és 39,6%-os növekedést eredményezett (40. ábra, 21. táblázat).



40. ábra. A SPAD (a), az UAV-alapú NDVI (b) és a szemtermés (c) boxplot diagramjai N-műtrágyázás és öntözés mellett (Debrecen, 2022)

Megjegyzés: A különböző kisbetűvel jelölt értékek N-műtrágyakezelései a Duncan-teszt alapján $p<0,05$ valószínűségi szinten szignifikánsan különböznek egymástól. Öntözés hatása: * $p<0,5$; ** $p<0,1$; *** $p<0,001$).

21. táblázat. A N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica spektrális értékeire (SPAD és UAV-alapú NDVI) és szemtermésére (Debrecen, 2022)

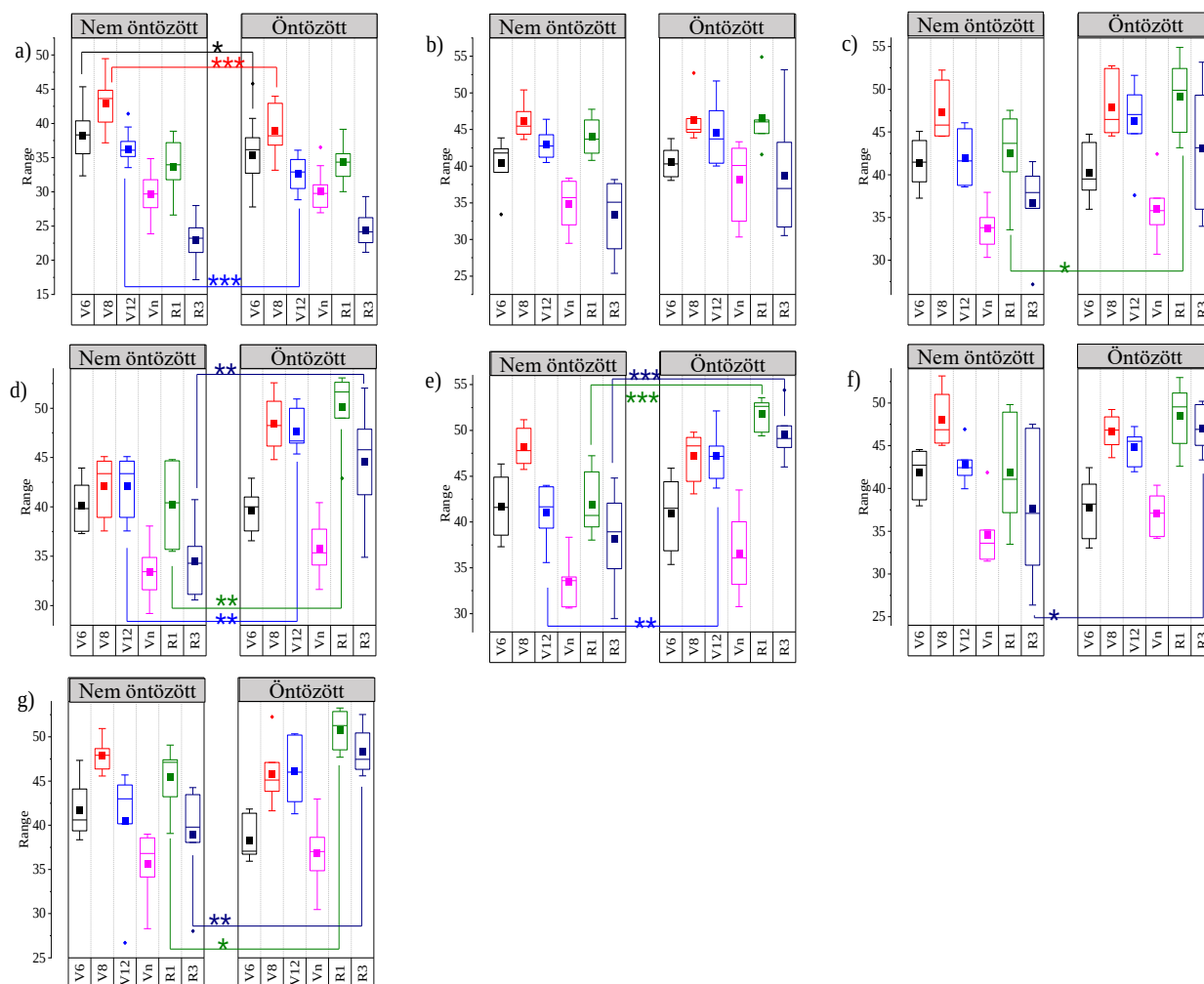
N-műtrágyakezelés	SPAD érték	UAV-alapú NDVI	Termés t ha ⁻¹
Nem öntözött			
A ₀	33,6a	0,47a	4,2a
A ₆₀	40,2b	0,53b	6,9bc
A ₁₂₀	40,6b	0,56b	8,6d
V ₆₉₀	39,8b	0,53b	6,5b
V ₆₁₅₀	40,7b	0,53b	7,5c
V ₁₂₁₂₀	41,1b	0,52b	6,8bc
V ₁₂₁₈₀	41,6b	0,52b	7,0bc
Átlag	39,7	0,52	6,8
Öntözött			
A ₀	32,6a	0,51a	5,1a
A ₆₀	42,4b	0,60bc	9,9c
A ₁₂₀	43,7bc	0,62c	11,8e
V ₆₉₀	44,3bc	0,59bc	10,2cd
V ₆₁₅₀	45,5c	0,59bc	10,7d
V ₁₂₁₂₀	43,6bc	0,56b	8,8b
V ₁₂₁₈₀	44,3bc	0,56b	10,1cd
Átlag	42,3	0,57	9,5
Öntözéshatás			
A ₀	ns	**	***
A ₆₀	ns	**	***
A ₁₂₀	*	*	***
V ₆₉₀	**	*	***
V ₆₁₅₀	***	*	***
V ₁₂₁₂₀	ns	ns	***
V ₁₂₁₈₀	ns	ns	***
Átlag	**	***	***

Megjegyzés: az oszlopokon belül különböző kisbetűvel jelölt értékek N-műtrágyakezelései a Duncan-teszt alapján $p < 0,05$ valószínűségi szinten szignifikánsan különböznek egymástól. Öntözés hatása: ns = nem szignifikáns, * $p < 0,5$; ** $p < 0,1$; *** $p < 0,001$.

A V6-V8 fenofázis közötti időszakban nem öntözött kezelésében növekedett a SPAD érték mind a hét kezelésben, mértéke azonban tápanyagszintenként eltérően alakult (41a-g. ábra, 22. táblázat). Legjelentős nevededés a 60 kg N ha⁻¹ alapkezelést (A₆₀) további 30 kg N ha⁻¹ dózissal növelt (V₆₉₀) kezelésben (20,7%; $p < 0,05$) volt. A V8 fenológiai szakaszt követően csökkenést mutattak a levelek SPAD értékei ($p < 0,05$), mértéke 16,7% (R1) és 28,7% (R3) (41d. ábra). Ez a csökkenés egyben a N-műtrágyával kezelték közül a legnagyobb mértékű csökkenés volt.

Öntözött kezelésben a V8 fenofázisig növekedett a SPAD érték az alapkezelésekben (A₀, A₆₀ és A₁₂₀) ($p < 0,05$), míg a fejtrágyakezelések hatására (V₆₉₀, V₆₁₅₀, V₁₂₁₂₀ és V₁₂₁₈₀) az R1 fenofázisig ($p < 0,05$) (41a-g. ábra, 22. táblázat). A legnagyobb növekedést a V8-as fenofázisig az alapkezelések közül az A₁₂₀ (18,9%), a fejtrágyakezelések közül a V₁₂₁₈₀ (32,6%) biztosította (41c. és 41g. ábra). A Duncan-teszt továbbá kimutatta, hogy a V8 és V12 fenofázisban az A₀ kezelésben (41a. ábra), és az R1 és R3 fenofázisban a V₆₁₅₀ N-

műtrágyakezelésben (41e. ábra) volt erős szignifikáns ($p < 0,001$) különbség a nem öntözött és az öntözött kezelés SPAD értékei között.



41. ábra. A SPAD értékek boxplot diagramjai, N-műtrágyázás és öntözés mellett (Debrecen, 2022)
Megjegyzés: a) A₀, b) A₆₀, c) A₁₂₀, d) V₆₉₀, e) V₆₁₅₀, f) V₁₂₁₂₀, g) V₁₂₁₈₀ (öntözési hatás: * $p < 0,5$; ** $p < 0,1$; *** $p < 0,001$)

A legalacsonyabb SPAD érték minden fenofázisban az A₀ kezelésben volt kimutatható mind nem öntözött, mind öntözött kezelésben. A nitrogén alap- és fejtrágyakezelések hatékonyságának fenofázisonkénti értékelése kimutatta, hogy V6 fenofázisban 41,8 volt a legnagyobb érték (V₁₂₁₂₀), azonban a Duncan-teszt nem tett különbséget a különböző N-műtrágyakezelések hatására kialakult SPAD értékek között. A V8 növekedési szakaszokban a legnagyobb SPAD érték az A₁₂₀ kezelésben volt mérhető (47,3), amely az A₀ kezeléshez viszonyítva 10,0%-os ($p < 0,05$) növekedés. A V12 fenofázist követően az R3 fenofázisig a legkisebb tavaszi 60 kg N ha⁻¹ alapműtrágyázás (A₆₀) bizonyult eredményesnek ($p < 0,05$). Az R3 fenofázisban lehetett a legnagyobb mértékű N-műtrágyahatást kimutatni az A₀ kezeléshez képest (44,8%). Öntözött kezelésben, a vegetatív fázisban (V6-Vn) statisztikailag igazolt

növekedést az A₆₀ kezelés (p<0,05), míg a reprodukzív szakaszban (R1-R3) az A₁₂₀ kezelést+30 kg N ha⁻¹ mennyiséggel növelt (V6₁₅₀) kezelés eredményezte. A vegetatív szakaszban a V12 fenofázisban (36,5%), a reprodukzív szakaszban az R3 fenofázisban (102,9%) volt a legnagyobb N-műtrágyahatás a nem műtrágyázott (A₀) kezeléshez viszonyítva (22. táblázat).

22. táblázat. N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica SPAD értékeire a fenológiai szakaszokban (Debrecen, 2022)

N-műtrágya- kezelés	Fenológiai fázisok					
	V6	V8	V12	Vn	R1	R3
	Nem öntözött					
A ₀	38,3a; D	43,0a; E	36,2a; D	29,7a; B	33,6a; C	23,0a; A
A ₆₀	40,4a; B	46,1a; C	43,0b; BC	34,9b; A	44,0b; BC	33,3b; A
A ₁₂₀	41,4a; B	47,3b; C	42,0b; B	33,8b; A	42,6b; B	36,7b; A
V6 ₉₀	40,1a; B	48,4b; C	42,2b; B	33,4b; A	40,3b; B	34,5b; A
V6 ₁₅₀	41,7a; B	48,2b; C	41,0b; B	33,5b; A	41,9b; B	38,2b; B
V12 ₁₂₀	41,8a; BC	48,0b; C	42,8b; BC	34,6b; A	41,9b; BC	37,7b; AB
V12 ₁₈₀	41,7a; BC	47,9b; D	40,5b; ABC	35,6b; A	45,5b; CD	38,9b; AB
Öntözött						
A ₀	35,4a; D	39,0a; E	32,6a; C	30,1a; B	34,4a; CD	24,4a; A
A ₆₀	40,5b; AB	46,3b; B	44,5b; AB	38,1b; A	46,6b; B	38,8b; A
A ₁₂₀	40,3b; AB	47,9b; C	46,2b; BC	36,0b; A	49,2bc; C	43,1bc; BC
V6 ₉₀	39,7ab; A	48,5b; BC	47,7b; BC	35,8b; A	50,2bc; C	44,6cd; B
V6 ₁₅₀	40,9b; B	47,2b; C	47,2b; C	36,6b; A	51,8c; D	49,5d; CD
V12 ₁₂₀	37,7ab; A	46,7b; B	44,8b; B	37,0b; A	48,5bc; C	47,0cd; B
V12 ₁₈₀	38,3ab; A	45,8b; B	46,1b; B	36,8b; A	50,8c; C	48,3cd; BC
Öntözéshatás						
A ₀	*	***	***	nsz	nsz	nsz
A ₆₀	nsz	nsz	nsz	nsz	nsz	nsz
A ₁₂₀	nsz	nsz	nsz	nsz	*	nsz
V6 ₉₀	nsz	nsz	**	nsz	**	**
V6 ₁₅₀	nsz	nsz	**	nsz	***	***
V12 ₁₂₀	nsz	nsz	nsz	nsz	nsz	*
V12 ₁₈₀	nsz	nsz	nsz	nsz	*	**
Átlag	**	*	*	nsz	***	***

Megjegyzés: az oszlopokon belül különböző kisbetűvel jelölt SPAD értékek N-műtrágyakezelései a Duncan-teszt alapján p<0,05 valószínűségi szinten szignifikánsan különböznek egymástól. A soron belül különböző nagybetűvel jelölt SPAD értékek fenofázisai a Duncan-teszt alapján p<0,05 valószínűségi szinten szignifikánsan különböznek egymástól. Öntözés hatása: nsz=nem szignifikáns, *p<0,5; **p<0,1; ***p<0,001.

Másrészt az öntözés alkalmazása jelentősen növelte a SPAD értékeket a kezelések többségében (22. táblázat). A kontrollkezelés esetében (A₀) az öntözésnek csak a V6 (p<0,5), V8 (p<0,001) és V12 (p<0,001) korai szakaszokra volt szignifikáns hatása, míg a többi stádiumban nem észleltünk szignifikáns hatást. Az első nitrogénszint (60 kg N ha⁻¹ vetés előtt)

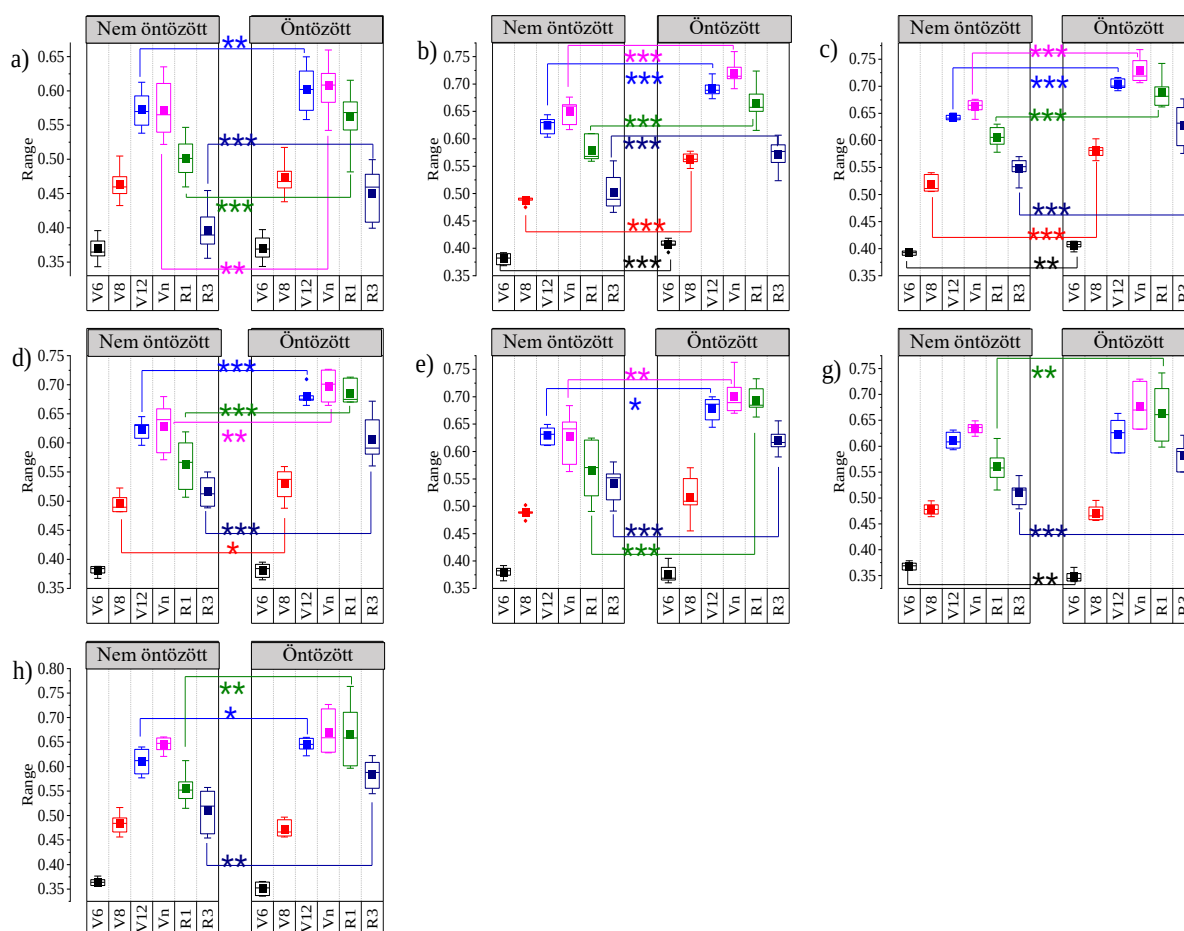
esetében az öntözésnek nem volt hatása a SPAD értékekre, míg az A₁₂₀ kezelésben ($p < 0,05$) az R1 fenofázisban ez a hatás kimutatható volt. A fejtrágyakezelések közül a V6₉₀ és V6₁₅₀ kezelések, a V12, R1 és R3 fenofázisaiban volt jelentős az öntözés hatása. A V6₉₀ kezelésben mindhárom fenofázisban 1%-os, a V6₁₅₀ kezelésben a V12 szakaszban 1%-os, az R1 és R3 fenofázisokban 0,1%-os szinten volt igazolt az öntözés SPAD érték növelő hatása. A V12₁₂₀ (R3, $p < 0,05$) és a V12₁₈₀ (R1, $p < 0,05$; R3, $p < 0,01$) kezelésekben is a reprodukív szakaszban volt kimutatható az öntözés hatása. A megfigyelt értékek alapján azonban a Vn szakaszban egyik N-műtrágyakezelésben sem lehetett az öntözés hatását kimutatni. Összességében az öntözésnek jelentős hatása volt a SPAD értékekre, különös tekintettel a fejtrágyakezelésekre (22. táblázat).

4.5.3. A N-műtrágyázás és az öntözés hatása az UAV-alapú NDVI értékre (2022)

Mindkét fő tényező (N-műtrágyázás, öntözés) 0,1%-os szinten befolyásolta az UAV-alapú NDVI értékeket. Az értékek nem öntözött kezelésben 0,36 és 0,66, öntözött kezelésben 0,34 és 0,72 között változott. A mérési adatok azt mutatták, hogy a kezelések átlagában a legmagasabb érték nem öntözött kezelésben az A₆₀ (0,53; $p < 0,05$), öntözött kezelésben az A₁₂₀ (0,62; $p < 0,05$) kezelés hatására alakult ki, amely 12,3% és 21,9%-os növekedés az A₀ kezeléshez viszonyítva (21. táblázat).

Nem öntözött kezelésben a tápanyagkezelések átlagában magas UAV-alapú NDVI érték alakult ki a V12 és a Vn növekedési fázisban, a növekedés 61,9% és 64,8% volt (42a-g. ábra, 23. táblázat). Majd csökkent az R1 és R3 fenofázisokban, a csökkenés mértéke V12 fenofázishoz képest 9,7% és 20,9%, a Vn szakaszhoz viszonyítva 11,3% és 22,3%. A mérési adatok azt mutatták, hogy a V12 fenofázisban a szignifikánsan igazolt ($p < 0,05$) legnagyobb értékek az A₀, A₆₀, V6₉₀ és a V6₁₅₀, míg a Vn fenofázisban az A₁₂₀, a V12₁₂₀ és a V12₁₈₀ kezelések hatására alakultak ki. Öntözött körülmények között szintén a V12 és Vn fenofázisra érték el a magasabb UAV-alapú NDVI értéket, amely a V12 fenofázisig 72,1%-kal, a Vn fenofázisra 77,7%-kal növekedett. Az R1 és R3 növekedési szakaszban már csökkentek az értékek, Vn-R1 között 4,3%-kal, a Vn-R3 között 17,8%-kal. A N-műtrágyakezelések ebben az esetben is befolyásoló hatással voltak. A V12 fenofázisban A₀, V6₉₀, V6₁₅₀ és a V12₁₈₀ kezelések voltak szignifikáns hatásúak ($p < 0,05$) (42a, d, e és g ábra), míg a többi kezelés hatására a Vn fenofázisban alakult ki a legmagasabb érték (42b,c és f ábra, 23. táblázat). Összességében a Duncan-teszt erősen szignifikáns ($p < 0,001$) különbséget mutatott a nem öntözött és öntözött magas NDVI értékek között a V12 és Vn fenofázisban, az A₆₀, A₁₂₀, és V6₉₀ N-műtrágyakezelésekben (42b, c, és d ábra).

Fejlődési fázisonként vizsgálva a nitrogén alap- és fejtrágyázás hatását, az volt kimutatható, hogy természetes csapadékelátottság mellett a teljes vegetációs időszakban igazoltan az A₁₂₀ kezelés biztosította ($p<0,05$) az UAV-alapú magasabb NDVI értéket, a V_n fenofázis kivételével, ahol az A₆₀ kezelés. Ezen kezelések közül az A₀ kezeléshez képest az R3 fenofázisban mértük a legnagyobb, 38,4%-os (A₁₂₀) növekedést. Öntözött körülmények között – az R3 fenofázis kivételével (A₁₂₀) – az A₆₀ kezelés eredménye mutatta a legnagyobb UAV-alapú NDVI értéket. Statisztikailag igazolt legnagyobb százalékos növekedés az R3 fenofázis A₁₂₀ kezelésében (39,6%) volt (23. táblázat).



42. ábra. Az UAV-alapú NDVI értékek boxplot diagramjai N-műtrágyázás és öntözés mellett (Debrecen, 2022)

Megjegyzés: a) A₀, b) A₆₀, c) A₁₂₀, d) V₆₉₀, e) V₆₁₅₀, f) V₁₂₁₂₀, g) V₁₂₁₈₀ (öntözési hatás: * $p<0,5$; ** $p<0,1$; *** $p<0,001$).

A SPAD-hoz hasonlóan az UAV-alapú NDVI értéket is pozitívan befolyásolta az öntözés. Az öntözés 8,9%-kal ($p<0,001$) növelte az UAV-alapú NDVI értéket a kezelések átlagában. A a fenofázisok tekintetében a legnagyobb hatás az R1 fenofázisban volt (16,6%; $p<0,001$). Kimutatható volt az A₆₀ és az A₁₂₀ kezelésekben az öntözésnek minden fenológiai fázisban

határozott ($p < 0,001$) és jelentős hatása az UAV-alapú NDVI értékre. A fejtrágyakezelésekben az öntözés a Vn (V12₁₂₀ és V12₁₈₀ kivételével), az R1 és R3 fenofázisokban hatást gyakoroltak az UAV-alapú NDVI-ra. A V6, a V8 és V12 szakaszokban a hatás nem volt következetes, bizonyos fenológiai szakaszokban az öntözéshatás kimutatható volt, míg másokban nem. Az átlagérték azonban azt mutatta, hogy az öntözésnek jelentős szignifikáns ($p < 0,001$) hatása van az UAV-alapú NDVI-re minden fenológiai fázisban, a V6 fenofázis kivételével (23. táblázat).

23. táblázat. N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica UAV-alapú NDVI-ra fenológiai szakaszokban (Debrecen, 2022)

N-műtrágya- kezelés	Fenológiai fázisok					
	V6	V8	V12	Vn	R1	R3
	Nem öntözött					
A ₀	0,370ab; A	0,463a; C	0,574a; E	0,572a; E	0,502a; D	0,396a; B
A ₆₀	0,381bc; A	0,488b; B	0,625b; D	0,650b; D	0,579bc; C	0,502b; B
A ₁₂₀	0,392c; A	0,519c; B	0,642c; E	0,662b; F	0,606c; D	0,548d; C
V6 ₉₀	0,381bc; A	0,495b; B	0,624bc; D	0,629b; D	0,563b; C	0,516bcd; B
V6 ₁₅₀	0,380bc; A	0,488b; B	0,630bc; D	0,627b; D	0,566b; C	0,541cd; C
V12 ₁₂₀	0,368ab; A	0,478ab; B	0,611b; E	0,635b; F	0,561b; D	0,510bc; C
V12 ₁₈₀	0,364a; A	0,484b; B	0,610b; D	0,645b; E	0,556b; C	0,510bc; B
	Öntözött					
A ₀	0,370b; A	0,474a; C	0,602a; E	0,608a; E	0,563a; D	0,450a; B
A ₆₀	0,407c; A	0,563c; B	0,692c; D	0,720c; E	0,664b; C	0,572b; B
A ₁₂₀	0,407c; A	0,581c; B	0,703c; DE	0,728c; E	0,688b; D	0,628d; C
V6 ₉₀	0,381b; A	0,530b; B	0,680c; D	0,698bc; D	0,686b; D	0,606bcd; C
V6 ₁₅₀	0,376b; A	0,516b; B	0,678c; D	0,701bc; D	0,693b; D	0,620cd; C
V12 ₁₂₀	0,348a; A	0,470a; B	0,623ab; CD	0,677b; E	0,664b; DE	0,583bc; C
V12 ₁₈₀	0,351a; A	0,473a; B	0,644b; D	0,670b; D	0,665b; D	0,585bc; C
	Öntözéshatás					
A ₀	nsz	nsz	**	**	***	***
A ₆₀	***	***	***	***	***	**
A ₁₂₀	**	***	***	***	***	***
V6 ₉₀	nsz	*	***	**	***	***
V6 ₁₅₀	nsz	nsz	**	*	***	***
V12 ₁₂₀	**	nsz	nsz	nsz	**	***
V12 ₁₈₀	nsz	nsz	*	nsz	**	**
Átlag	nsz	***	***	***	***	***

Megjegyzés: az UAV-alapú NDVI értékek az oszlopokon belül különböző kisbetűvel jelölt N-műtrágyakezelések esetében a Duncan-teszt alapján $p < 0,05$ valószínűségi szinten szignifikánsan különböznek egymástól. A soron belül különböző nagybetűvel jelölt UAV-alapú NDVI értékek fenofázisai a Duncan-teszt alapján $p < 0,05$ valószínűségi szinten szignifikánsan különböznek egymástól. Öntözés hatása: nsz=nem szignifikáns, * $p < 0,5$; ** $p < 0,1$; *** $p < 0,001$.

4.5.4. A N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica szemtermésére (2022)

Természetes csapadékelátottság mellett a N-műtrágyakezelések hatását vizsgálva megállapítható, hogy a kontrollkezelés (A_0) eredményezte a legalacsonyabb termést ($4,2 \text{ t ha}^{-1}$), ami a Duncan-teszt alapján is jól elkülönült a többi kezeléstől (21. táblázat). Az alaptrágyaként kijuttatott 60 kg N ha^{-1} (A_{60}) műtrágya statisztikailag igazoltan 64,3%-os termésnövekedést eredményezett ($p < 0,05$). A 6 leveles állapotban ezt a kezelést további 30 kg N ha^{-1} műtrágyaadaggal emelve (V_{690}) nem növelte a termést, majd a 12 leveles állapotban további 30 kg N ha^{-1} műtrágyaadagot kijuttatva (V_{12120}) sem mértünk szignifikáns növekedést. A legnagyobb termésnövelő hatást az A_{120} kezelés biztosította ($8,6 \text{ t ha}^{-1}$), amely több mint duplája volt az A_0 kezelés termésének ($p < 0,05$). Az alap 120 kg N ha^{-1} feletti fejtrágyakezelések azonban szignifikáns terméseszkökenést okoztak ($p < 0,05$). Öntözött körülmények között a N-műtrágyázást tekintve a legalacsonyabb termést ($5,1 \text{ t ha}^{-1}$) az A_0 kezelésben mértük. Az alaptrágyaként kijuttatott 60 kg N ha^{-1} (A_{60}) műtrágya $4,8 \text{ t ha}^{-1}$ -os (94,1%; $p < 0,05$), a 120 kg N ha^{-1} alapkezelés (A_{120}) $6,7 \text{ t ha}^{-1}$ -os (131,4%; $p < 0,05$) termésnövekedést eredményezett az A_0 kezeléshez képest. Az A_{60} kezelést V6 fenofázisban $+30 \text{ kg N ha}^{-1}$ műtrágyaadaggal növelve (V_{690}) a termésnövekedés mértéke mindössze 3,3% volt, majd 12 leveles állapotban további 30 kg N ha^{-1} kijuttatás (V_{12120}) csökkentette a termést ($-1,4 \text{ t ha}^{-1}$; $p < 0,05$). Az A_{120} kezeléshez képest a fejtrágya kijuttatásának hatására (V_{6150}) minimális volt a terméseszkökenés. További 30 kg N ha^{-1} műtrágyaadag (V_{12180}) további terméseszkökenést okozott ($-0,6 \text{ t ha}^{-1}$; $p < 0,05$). Megbízható termésnövelő hatásának a 120 kg N ha^{-1} alapkezelés bizonyult ($11,8 \text{ t ha}^{-1}$) (21. táblázat).

Az öntözött változatban a kezelések átlagában magasabb volt a termés ($9,5 \text{ t ha}^{-1}$) ($p < 0,05$), ami 39,7%-kal haladta meg a nem öntözött ($6,8 \text{ t ha}^{-1}$) változat terméseredményét. A N-műtrágyakezelések mindegyikében az öntözött változat magasabb termést biztosított. Az eltérés minden esetben 0,1%-os szinten igazolt. Az öntözés termésnövelő hatása a kezelések közül a V_{690} kezelésben volt a legnagyobb ($3,6 \text{ t ha}^{-1}$), azonban az A_{120} , V_{6150} és V_{12180} kezelésekben is 3 t ha^{-1} feletti terméstöbblet alakult ki az öntözés hatására.

4.5.5. A kukorica szemtermése és a különböző kísérleti változók közötti kölcsönhatás (2022)

A GLM-elemzésből származó faktoriális ANOVA alapján (24. táblázat) különböző, a szemtermésre jelentős hatást gyakorló tényezőket azonosítottunk. A 24. táblázat azt mutatja, hogy a N-műtrágyakezelések, az öntözés és a hibrid szignifikáns hatással volt ($p < 0,05$),

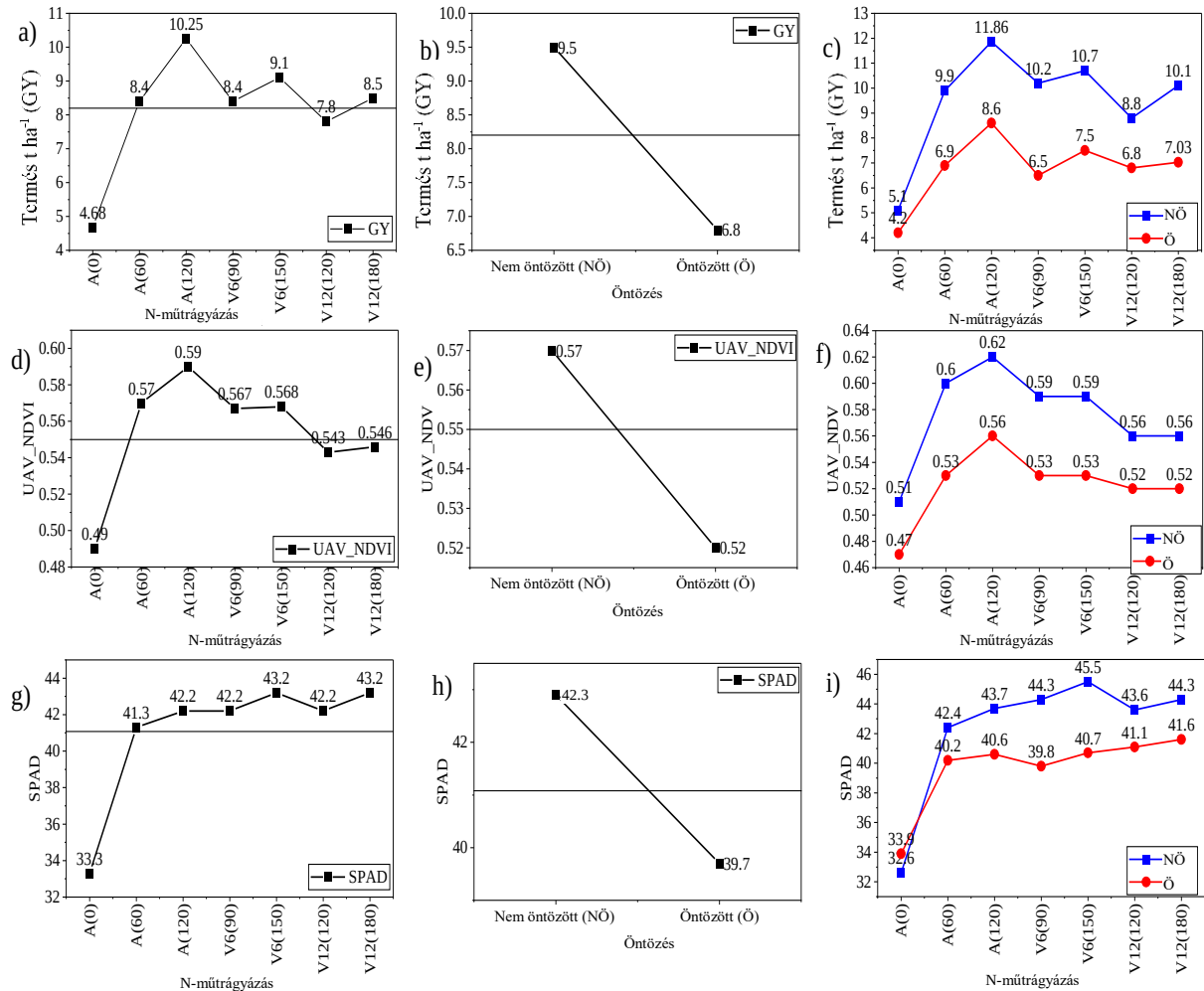
azonban a fenológiai fázisok nem mutattak megbízható hatást a szemtermésre. A kukorica hibridek SPAD értékben kifejezett klorofilltartalmának varianciaelemzési eredményei a nem öntözött és öntözött kezelésekben igazolták a fő tényezők (N-műtrágyakezelések és öntözés) szoros ($p < 0,001$) korrelációját a SPAD értékekkel (24. táblázat). A 43. ábrán bemutatott valamennyi változó közötti kölcsönhatás azt mutatta, hogy a legmagasabb szemtermés és a legmagasabb UAV-alapú NDVI érték mind a nem öntözött kezelésben ($8,6 \text{ t ha}^{-1}$; 0,56), mind az öntözött kezelésben ($11,8 \text{ t ha}^{-1}$; 0,62) az A₁₂₀ N-műtrágyakezeléssel volt elérhető (43c. és 43f. ábra). A legmagasabb, statisztikailag igazolt SPAD értéket nem öntözött kezelésben az A₆₀ N-műtrágyakezelés (40,2), míg az öntözött kezelésben V₆₁₅₀ N-műtrágyakezelés (45,5) biztosította (42i. ábra). A SPAD érték az öntözött kezelésben magasabb volt (42,3), mint a nem öntözött kezelésben (39,7) (43h. ábra). A szemtermés tekintetében is elmondható, hogy az öntözött kezelések átlaga meghaladta a nem öntözött kezelések termésmennyiségét, az A₁₂₀ kezelések eredményezték a legmagasabb termést.

24. táblázat. A szemtermés és a különböző kísérleti változók közötti kölcsönhatás a faktoriális ANOVA-GLM alapján

Tényező	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Model	251	4234,30	16,87	7,31	0,000
Linear	14	3916,26	279,73	121,15	0,000
N-műtrágyázás (N)	6	2673,86	445,64	193,00	0,000
Öntözés (Ö)	1	1032,89	1032,89	447,33	0,000
Hibrid (H)	2	209,51	104,76	45,37	0,000
Fenológiai fázis (F)	5	0,00	0,00	0,00	1,000
2-interakció	65	462,11	7,11	3,08	0,000
N × Ö	6	184,41	30,73	13,31	0,000
N × H	12	247,60	20,63	8,94	0,000
N × F	30	0,00	0,00	0,00	1,000
Ö × H	2	30,11	15,05	6,52	0,002
Ö × F	5	0,00	0,00	0,00	1,000
H × F	10	0,00	0,00	0,00	1,000
3-interakció	112	111,12	0,99	0,43	1,000
N × Ö × H	12	111,12	9,26	4,01	0,000
N × Ö × F	30	0,00	0,00	0,00	1,000
N × H × F	60	0,00	0,00	0,00	1,000
Ö × H × F	10	0,00	0,00	0,00	1,000
4-interakció	60	0,00	0,00	0,00	1,000
N × Ö × H × F	60	0,00	0,00	0,00	1,000
Hiba	396	914,37	2,31		
Össz	647	5148,67			

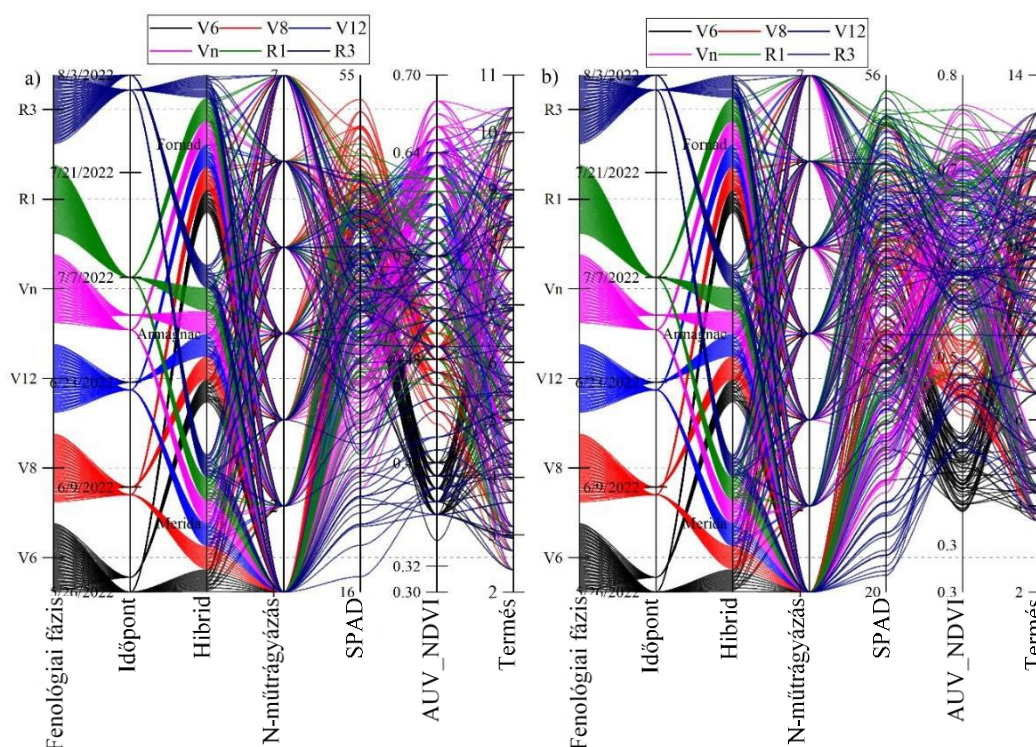
A N-műtrágyakezelés × öntözés, a N-műtrágyakezelés × hibrid és az öntözés × hibrid közötti kölcsönhatás egyértelműen befolyásolta a szemtermés alakulását. Érdekes módon a N-műtrágyakezelés × öntözés × hibrid kölcsönhatás szignifikáns hatást mutatott, míg a N-

műtrágyakezelés × öntözés × hibrid × fenológiai fázisok közötti kölcsönhatás nem mutatott szignifikáns hatást. Összességében a N-műtrágya × öntözés kölcsönhatás 0,1%-os szinten megerősítést nyert. A varianciaanalízis eredményei azt igazolták, hogy a nitrogén kijuttatása erősen korrelált ($p < 0,001$) a szemtermés alakulásával mind a nem öntözött, mind az öntözött kezeléseknél.



43. ábra. A különböző vizsgált változók közötti kölcsönhatás a kísérleti adatok alapján (Debrecen, 2022)

A rendszert a megfigyelt adatok alapján térképeztük fel, amint azt a 44. ábra szemlélteti. Az eredmények azt mutatták, hogy – függetlenül a hibridtől, a nitrogénszinttől vagy az öntözéstől –, a V6 korai szakaszában végzett mérések mind az öntözött, mind a nem öntözött kukorica esetében alacsony UAV-NDVI értékeket eredményeztek. Ezek az értékek a 44. ábrán a fekete vonalakból jól elkülöníthetők voltak.

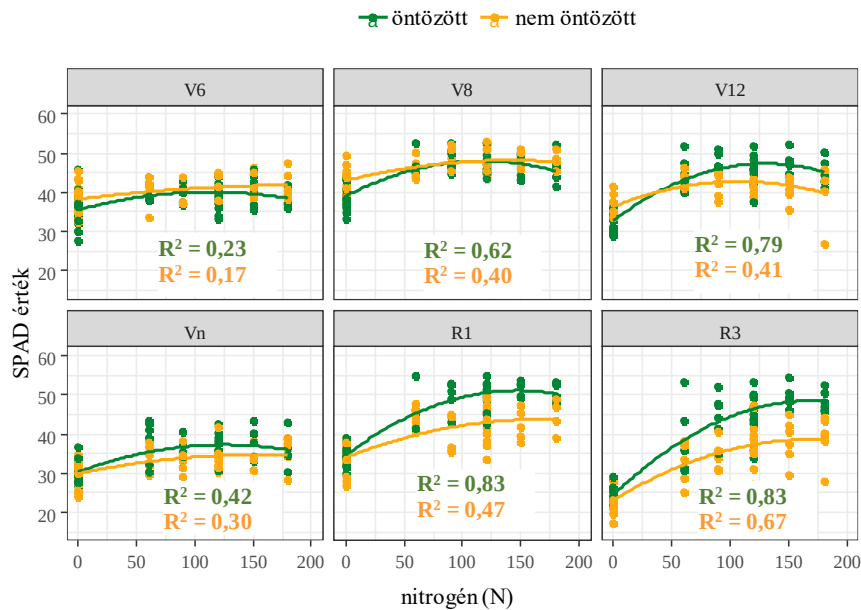


44. ábra. Rendszertérkép, amely a vizsgált paraméterek különböző megfigyelt értékei közötti kölcsönhatást mutatja

Megjegyzés: a) nem öntözött, b) öntözött rendszerben.

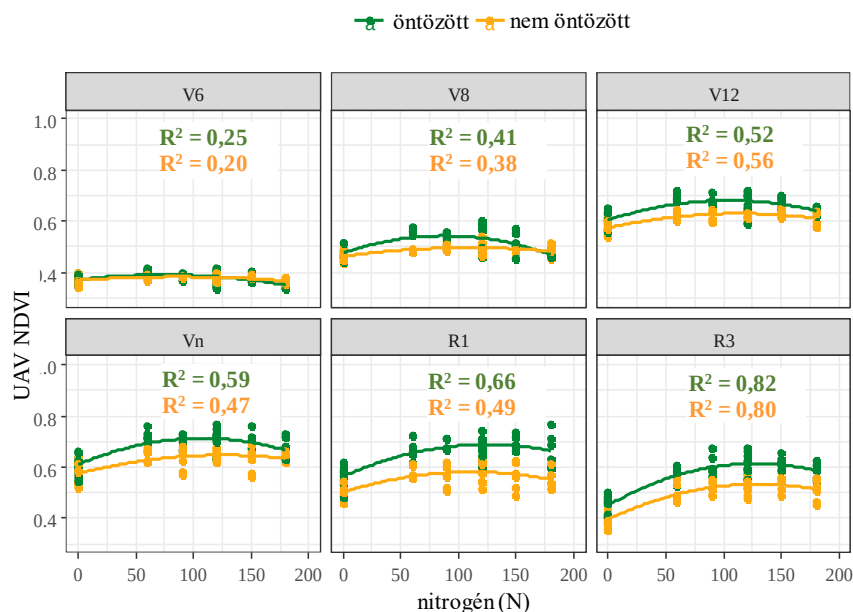
4.5.6. A spektrális indexek és N-műtrágyázás kapcsolata (2022)

A fenofázisokban rögzített SPAD és az UAV-alapú NDVI értékeket összevetettük a nitrogén alap- és fejtrágyakezelésekkel, parabolikus regresszió-analízist alkalmazva (45. és 46. ábra). A SPAD érték és a nitrogén kijuttatási mennyisége közötti másodfokú összefüggés kimutatta, hogy a vegetációs időszakban a nem öntözött és öntözött kezelésekben a N-műtrágyázás pozitívan befolyásolta a SPAD értéket. Természetes csapadékelátottság mellett gyenge pozitív volt az összefüggés a V6 fenofázisban ($R^2=0,17^{**}$) és a N-műtrágyázás 17,0%-ban befolyásolta a SPAD érték alakulását. A két változó közötti összefüggés a V8 fenofázisra szorosabb ($R^2=0,4^{***}$) lett, majd az R1 fenofázisra tovább erősödött ($R^2=0,47^{***}$). Közepesen erős összefüggést ($R^2=0,67^{***}$) mutatott az R3 fenofázisban, a N-műtrágyázás befolyásoló hatása 67% volt. Öntözött körülmények között – hasonlóan a nem öntözött kezeléshez – a V6 fenofázisban gyenge volt az összefüggés ($R^2=0,23^{**}$). A V8 és az R3 fenofázis között – kivétel a Vn fenofázis –, szoros volt az összefüggés. Az R1 és R3 fejlődési fázisokban a N-műtrágyázás befolyásoló hatása volt a legjelentősebb (83% és 83%) (45. ábra). Az öntözés hatására szorosabb volt az összefüggés és a N-műtrágyázás nagyobb mértékű befolyással bírt.



45. ábra. A N-műtrágyázás és a SPAD érték közötti parabolikus összefüggés, nem öntözött és öntözött körülmények között (Debrecen, 2022)

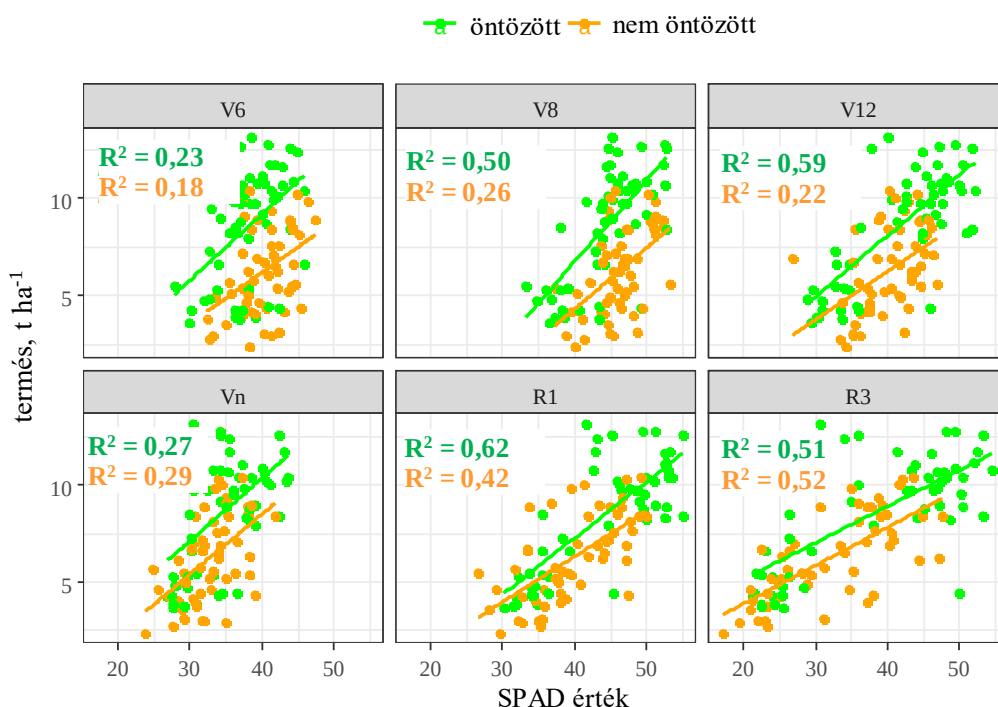
Az UAV-alapú NDVI értékek és a N-műtrágyázás közötti kapcsolat természetes csapadékelátottságnál közepesen szoros, illetve szoros összefüggést mutatott a V12, R1 és az R3 fenofázisokban. Az R3 fejlődési fázisban lehetett a legszorosabb összefüggést kimutatni ($R^2=0,8^{***}$). Öntözött kezelésben a két változó közötti másodfokú összefüggés a V6 fenofázisban gyenge volt, majd egyre szorosabbá vált. Az R3 fenofázisra érte el a maximumot ($R^2=0,82^{***}$). Az öntözött és nem öntözött kezelések között itt kisebb különbségeket kaptunk, mint a SPAD esetében (46. ábra).



46. ábra. A N-műtrágyázás és az UAV-alapú NDVI közötti parabolikus összefüggés, nem öntözött és öntözött körülmények között (Debrecen, 2022)

4.5.7. A spektrális indexek és a szemtermés kapcsolata (2022)

A szemtermés és a SPAD érték közötti szignifikáns kapcsolat természetes csapadékelátottság mellett a nővirágzás (R1) fenofázisáig gyenge vagy közepes mértékűnek bizonyult, továbbá az R3 fenofázisra javult az összefüggés ($r=0,723^{***}$). Öntözött körülmények között az R1 szakaszban érte el a legszorosabb szignifikáns kapcsolatot ($r=0,787^{***}$) (47. ábra).

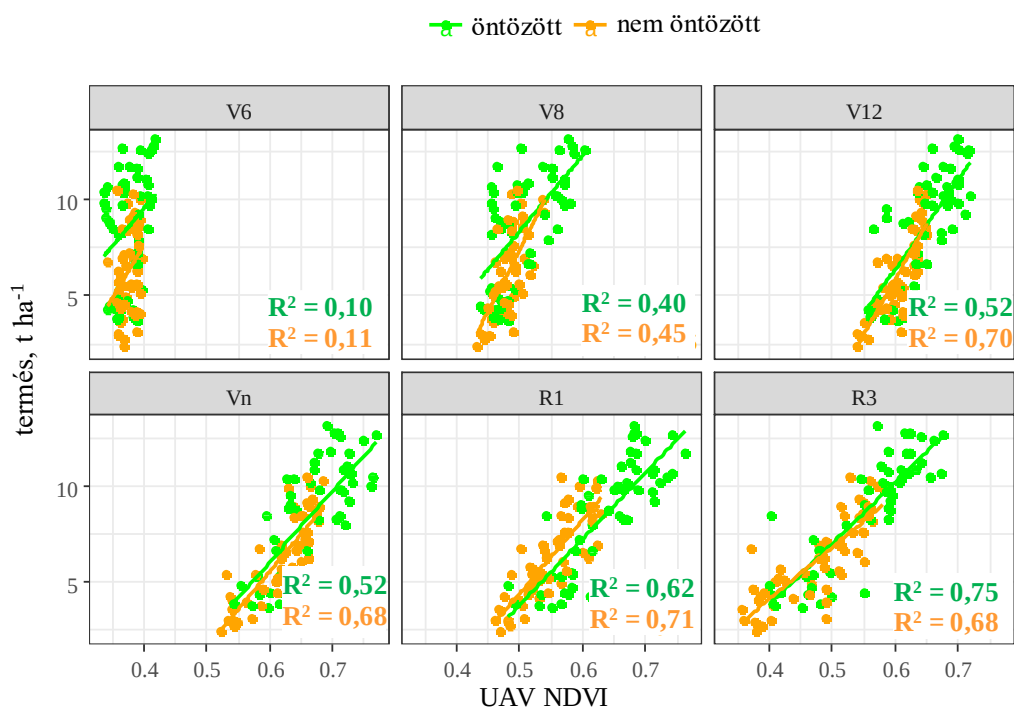


47. ábra. A SPAD érték és a szemtermés közötti korreláció, nem öntözött és öntözött körülmények között (Debrecen, 2022)

Megjegyzés: minden korreláció $p < 0,01$ szignifikáns.

Az UAV-alapú NDVI és a szemtermés közötti kapcsolat statisztikailag szignifikáns kapcsolatot mutatott ($r=0,838^{***}$; $r=0,824^{***}$) nem öntözött körülmények között a V12, illetve az R3 fenofázisban. Öntözött körülmények között a két tényező közötti korreláció V12 fenofázistól közepesen szoros ($r=0,724^{***}$) volt, és az R1 és R3 szakaszban erősebb lett ($r=0,790$ – $0,864^{***}$) (48. ábra).

Szélsőséges időjárási körülmények között a vizsgálat főbb eredményei azt mutatták, hogy a SPAD értékek alakulását nagymértékben befolyásolja a N-műtrágyázás mind nem öntözött, mind öntözött körülmények között. Szignifikánsan igazolt legnagyobb SPAD értéket nem öntözött körülmények között az A₆₀ kezeléssel (40,3; $p < 0,05$), öntözött körülmények között a V6₁₅₀ kezeléssel (45,5; $p < 0,05$) lehetett kimutatni. Kutatási eredményeink arra mutatnak rá, hogy a 115 mm öntözővíz kijuttatásával (öntözött kezelés) sem volt elérhető átlagosan a Piekielek et al. [1995] által ajánlott maximális 52–56 SPAD érték tartomány.



48. ábra. UAV-alapú NDVI és a szemtermés közötti korreláció, nem öntözött és öntözött körülmények között (Debrecen, 2022)

Megjegyzés: minden korreláció $p < 0,01$ szignifikáns.

Természetes csapadékelátottság mellett a Jaynes [2013] által javasolt korai fejtrágyázás (V6) kifejtette hatását és a V8 fenofázisra minden tápanyagszinten ($p < 0,05$) jelentős volt a növekedés. A V8 fenofázist követően a vízhiány, egyezően Schepers et al. [1996], Brevedan és Egli [2003], valamint Wang et al. [2022] eredményeivel, csökkentette a SPAD értéket ($p < 0,05$), amely nem segítette az R1 előtti szárazanyag nagyobb felhalmozódását. Emellett a V12 és R3 fenofázisokban volt a legnagyobb hatása a műtrágyának az (A_0) kezeléshez képest. A teljes vegetációs időszakot tekintve az A_{60} kezelés volt statisztikailag igazolt, amely jóval a kritikus érték alatt volt (40,3).

Öntözött körülmények között a V12 fenofázistól a kukoricalevelek nagyobb SPAD értékkel rendelkeztek, mint a nem öntözött kezelésben. Az öntözésnek és a V6 és V12 fenofázisban kijuttatott fejtrágyakezelésnek köszönhetően a nővirágzásra (R1) kialakult a legmagasabb SPAD érték, amely fokozatosan csökkent, amely összhangban van Abendroth et al. [2011] eredményeivel. A legnagyobb növekedést a $V6_{150}$ kezeléssel (45,5) lehetett kimutatni.

A SPAD értékhez hasonlóan az UAV-alapú NDVI értékek átlaga alacsonyabb (0,518) nem öntözött kezelésben, míg magasabb (0,564) öntözött kezelésben, a két kezelés közötti eltérés igazolt ($p < 0,001$), ahogyan arról Zhang et al. [2019] is beszámolt. Szignifikánsan ($p < 0,05$) a legmagasabb UAV-alapú NDVI értékeket a teljes vegetációs időszak alatt a nem öntözött és az öntözött kezeléseken a V12 és a Vn fenofázisban érték el az A_{120} kezeléssel, és ez bizonyult a leghatékonyabbnak a magas szemtermés elérése szempontjából. A szemtermés és az UAV-

alapú NDVI spektrális értékek korrelációjának elemzése összhangban van Yang et al. [2022] eredményeivel, amely azt mutatta, hogy a korai növekedési szakaszok (V6 és V8) gyengébb korrelációban állnak a szemterméssel, míg a V12 és Vn erős korrelációt mutattak a szemterméssel.

Eredményeink azt mutatták, hogy a 2022. évi szélsőséges időjárási anomáliák miatt a fejtrágyázás nem növelte a szemtermést, ami tükrözi Venterea és Coulter [2015] megállapításait, mivel a vízstressz csökkentette a növények transzspirációját, ami a levelek N-felvételének csökkenését okozta [Ványiné Széles et al. 2012, Bista et al. 2018]. Például Harsányi et al. [2023] arról is beszámolt, hogy számos csapadékjellemző, köztük a csapadék kezdetének és végének időpontja, valamint az esős napok gyakorisága hajlamos befolyásolni a kukorica termését különböző éghajlati forgatókönyvek esetén Magyarországon. Egy másik nemrégiben készült tanulmány alapján Rawat et al. [2023] az éghajlat jelentős szerepét (a nagy meleg és a kevesebb csapadék tekintetében) hangsúlyozta a kukoricatermés előrejelzésében. Ezen túlmenően a magas hőmérséklet negatív hatásáról számolt be Liu et al. [2022], csökkentve a klorofillindexet és a nettó fotoszintetikus rátát, lerövidítve a szemtelítődés időtartamát. Az EU közelmúltbeli éghajlati viszonyai jelentősen befolyásolták a kukorica termését természetes csapadékelátottság és öntözött körülmények között, különböző N-műtrágyázási kezelések mellett [Lopes 2022]. A mi eredményeink azt mutatták, hogy a legmagasabb szemtermést a extrém száraz időjárási körülmények között a tavaszi alaptrágyázás (A_{120}) alkalmazásával érték el, ami összhangban van Drury et al. [2012] eredményeivel mind nem öntözött, mind az öntözött kezeléseknél. Ezenkívül minden tápanyagszintnél szignifikáns ($p < 0,001$) öntözési hatást mutattunk ki, a legjelentősebb hatást pedig az A_{120} kezelésnél tapasztaltuk az A_0 kezeléshez képest.

Összességében a N-műtrágyakezelés és a SPAD, valamint az UAV-alapú NDVI R^2 együtthatója szignifikánsan ($p < 0,001$) pozitív összefüggést mutatott, és ez az összefüggés öntözött körülmények között erősebb a természetes csapadékelátottsághoz képest, kivéve a V6 fenofázist, ahol a korreláció gyenge. Ezen eredmények alapján a SPAD és a kukorica-szemtermés korrelációjának sorrendje az R^2 alapján öntözött körülmények között a következő: $R1 (0,62) > V12 (0,59) > R3 (0,51) > V8 (0,5) > Vn (0,27) > V6 (0,23)$ és az NDVI és a kukorica szemtermés közötti korreláció sorrendje a következő: $R3 > (0,75) > R1 (0,62) > Vn, V12 (0,52) > V8 (0,4) > V6 (0,1)$. Összességében a SPAD és az UAV-alapú NDVI spektrumértékek és a szemtermés közötti összefüggés eredményei összhangban vannak más kutatási eredményekkel [Fieuzal et al. 2017, Zhang et al. 2019]. Ebből arra következtethetünk, hogy a reprodukív fenofázisban ($R1$ és $R3$) a változók közötti összefüggés a legszorosabb, ami azt jelzi, hogy ebben az időben mért értékek a legalkalmasabbak a termésbecslésre, egyezően Spitkó et al. [2016] és Yang et al. [2022] eredményeivel.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kukorica a legnagyobb mennyiségben termesztett gabonanövény a világon és Magyarországon is. A szemtermés mennyiségére, termésstabilitására és minőségére számos tényező hatással van, elsősorban a talaj-klíma viszonyok. A klímaváltozás befolyásoló hatása a jövőben is megmutatkozik, pozitívan vagy negatívan, térségtől függően, és az egyes területek eltérő mértékben lesznek érintettek. Az éghajlatváltozás pontos hatását a növénytermesztésre, illetve a kukoricatermesztésre nehéz felmérni. A szántóföldi tartamkísérletek hasznos információkat nyújthatnak, mivel jól megtervezettek, eltérő és ellenőrzött műtrágyakezeléseket tartalmaznak, és részletes időjárási megfigyeléseket végeznek a kísérlet helyszínén. A hibridválasztás, vetésidő, a műtrágyázás és az öntözés olyan eszközök lehetnek a termesztés során, amelyek segíthetnek a kiszámíthatatlan és gyorsan változó időjárási viszonyok hatásait kiegyensúlyozni, a stresszhatásokat mérsékelni.

A „Nitrogén alap- és fejtrágyázás” tartamkísérlet alapításától 13 éven keresztül (2011–2023) nyomon követtük és értékeltük az időjárás változékonyságának, a nitrogén (N) alap- és fejtrágyázásnak a kukorica relatív klorofilltartalmára (SPAD érték), szemtermésére és minőségére (keményítő- és fehérjetartalom) gyakorolt hatását. A 13 év mérési adatainak elemzése rávilágított arra, hogy a környezeti tényezők eltérő módon befolyásolják az általunk vizsgált tényezőket, ezért a kukoricatermesztés számára eltérő, extrém éveket is kiválasztottuk a további elemzés céljából, és alkalmaztuk a PrM technológia döntéshozatali eszközöket (automatikus meteorológiai állomás, SPAD 502 klorofillmérő, SunScan lombkorona-elemző, drónok (UAV-NDVI), FOSS-Infratec gabonaminőség elemző). Vizsgáltuk azt is, hogy ezek az eszközök a száraz és súlyos aszályos években is alkalmazhatóak-e a termés-előrejelzésre. Vizsgáltuk továbbá eltérő évjáratokban az automata meteorológiai állomás által gyűjtött adatok alapján, hogy a fenológiai fázisok kialakulásához mennyi hőre van szüksége a kukoricának, illetve melyek azok az hőmérsékletalapú agrometeorológiai indexek (GDD, PTU, HTU, HYTU), amelyek alapján a kukorica hibridek vegetációs időszakának hossza jól jellemezhető.

A „Vetésidő” kísérlet eredményeit felhasználva elemeztük a vetésidő – mint az egyetlen ráfordítást nem igénylő termesztéstechnológiai elem – hatását a szemtermésre, a hőfelhasználási hatékonyságra, a fehérje- és olajtartalomra, valamint modellezés segítségével előrejeleztük a kukorica kelésének és nővirágzásának időpontját, illetve meghatároztuk az optimális vetésidőt, hangsúlyozva a hibridválasztás jelentőségét.

A mérésekkel, az adatok értékelésével a legfőbb cél volt, hogy minél pontosabb információt kapjunk a kulcsfontosságú kérdésekre és feltárjuk a legjobb megoldásokat a termelékenység javítására.

Az időjárás 13 évi vizsgált időszakában a téli hónapok (október-március) csapadékmennyisége az átlagtól (1981–2010) +29 mm-rel tért el, és a középhőmérséklet +1,1 °C-kal volt magasabb. A tenyészidőszakot tekintve (április-szeptember) a középhőmérséklet 1,0 °C-kal nőtt, az átlagos csapadékmennyiség pedig 14 mm-rel csökkent az átlaghoz képest.

A teljes tenyészidőszakban lehullott csapadék mennyiség alapján öt olyan száraz év volt, amikor 300 mm-nél kevesebb csapadék hullott (2012, 2013, 2015, 2021, 2022), és három olyan év volt (2011, 2018, 2023), amikor a csapadék mennyisége 300–340 mm között alakult. Átlag feletti (340 mm felett) csapadékos év öt év volt (2014, 2016, 2017, 2019, 2020), ezen évek közül is a csapadékösszeg lényegesen meghaladta a sokévi átlagot 2016-ban (453 mm) és 2020-ban (483 mm).

A tenyészidőszak április-május időszakának hőmérsékleti viszonyai 2011–2018 között átlagosan, vagy annál melegebben alakult. Az utóbbi öt év mindegyikében (2019–2023) azonban jelentős, negatív hőmérsékleti anomália jellemezte ezt a kéthónapos időszakot. A nyári hónapokat tekintve melegebb volt 2011, 2013, 2016, 2018, 2020 és 2023, illetve lényegesen melegebb volt 2012, 2015, 2017, 2019, 2021 és 2022 években az átlagoshoz képest. Csupán egyetlen évben (2014) maradt ezen évszak középhőmérséklete (20,1 °C) a sokévi átlag alatt. A szeptember az átlaghoz képest 1,4 °C-kal volt melegebb, különösen a 2011. és 2012. év, ahol az eltérés 3,1–3,1 °C volt.

A trendvizsgálat eredménye megerősítette előzetes várakozásainkat. Részben a viszonylag rövid adatsor (13 év) és az adatok (különösen a csapadék) nagy szórása miatt, az adatsorok többségénél nem mutatható ki szignifikáns trend. Kivételt képez az áprilisi középhőmérséklet csökkenő trend: -0,31 °C/év ($p < 0,05$), és a májusi csapadék csökkenő trend: -2,35 mm/év, alacsony P-érték mellett ($p < 0,10$).

A hőmérsékleten alapuló agrometeorológiai indexek, mint a növekedési foknap (GDD), a heliotermikus egység (HTU), a fototermikus egység (PTU) és a hidrotermikus egység (HYTU) kifejezésére a precíziós mezőgazdasági (PrM) technológia modern eszközének, az automatikus meteorológiai állomás által gyűjtött és rögzített adatokat használtuk fel a fenofázisok hosszának értékelésére. A vizsgálatokat 2018. és 2019. években végeztük a Sushi (FAO 340) és a Fornad (FAO 420) hibridek bevonásával.

A tenyésztidőszak egészére (VE-R6) vizsgálva a hőösszeg értékeket (GDD) megállapítható, hogy az egyes évek között a Sushi hibridnél (2018: 1373 °C, 2019: 1424 °C) az eltérés nem volt jelentős, a Fornad hibrid (2018: 1446 °C, 2019: 1444 °C) esetében pedig lényegében azonosság volt tapasztalható. A két hibrid hőösszegében való legnagyobb eltérés mindkét évben VE-V12 fázisban volt. A PTU, HTU és a HYTU a tenyésztidőszakban (VE-R6) mindkét évben a Fornad hibridnél magasabb volt, kivétel a 2019. év két szakasza a VE-VT és az R1-R6 szakasz.

A hibridek közötti tenyésztidő-különbség megmutatkozott a hőösszegben, bár a kedvezőbb 2019. évi körülmények között ez kisebb volt, mint 2018-ban. A hosszabb tenésztidejű Fornad kukorica hibridnek 2019-ben a virágzás eléréséhez ugyan magasabb hőösszegre volt szüksége, mint a rövidebb tenésztidejű Sushi hibridnek, de a reprodukív fázisban nem volt különbség a hőösszeg igényben. 2018-ban mindkét részfázisban megmutatkozott a nagyobb tenésztidejű Fornad hibrid magasabb hőösszeg igénye. A vizsgálatunk igazolta, hogy az egyes fenológiai szakaszokhoz minden évben közel azonos GDD szükséges.

A kísérletünk vizsgált két évben a PTU tenésztidőszakra vonatkozó értékei szintén közel azonosak voltak, az eltérések (Sushi hibrid 2,6%, Fornad hibrid 0,9%) lényegesen kisebbek, mint a tenésztidő napok számának relatív eltérései. A PTU korlátozott érvényessége, alkalmazhatósága fent áll, mivel nem veszi figyelembe a fotoperiódus-érzékenység időbeli változását, a kritikus nappalhosszt, illetve a genotípusok közötti akár jelentős eltéréseket az érzékenységben. A fotoperiódus és hőmérséklet együttes hatásának leírására a PTU-nál összetettebb, jól parametrizálható formulák alkalmazhatók. A HTU és HYTU egységek nagy eltérései (7–12%) a két tenésztidőszak között arra utalnak, hogy nem alkalmasak a fenológiai fázisok hosszának becsléséhez.

A hőfelhasználás hatékonyságot (HUE, PTUE, HTUE, HYTUE) az eltérő időjárási viszonyok és a tápanyagszintek befolyásolták. A HUE az időjárási tényezőktől függetlenül mindkét hibridnél az A₀ kezelésben volt a legkisebb. Csapadékos évben mindkét hibrid HUE értéke magasabb volt, a Sushi hibridé 42,3%-kal, a Fornad hibridé 29,0%-kal.

A magasabb HUE, illetve a többi agrometeorológiai mutató (PTUE, HTUE, HYTUE) magasabb értéket a szignifikánsan ($p < 0,05$) legmagasabb termésnél érte el, amely hibridenként eltérő N-műtrágyakezeléseknél alakult. Kedvezőtlenebb környezeti feltételek mellett (2018) a N-műtrágyázás az A₀ kezeléshez viszonyítva jelentősen növelte a hőfelhasználási hatékonyságot, amely a Sushi hibridnél jelentősebb volt (V₆₁₅₀; 118%), mint a Fornad hibridnél (A₁₂₀; 79%). Kedvezőbb évjáratban (2019) alacsonyabb volt a százalékos növekedés, amely mindkét hibridnél közel azonos volt (Sushi A₁₂₀, 51%; Fornad V₆₁₅₀, 53%).

A kukorica klorofilltartalmának (SPAD érték), – két éréscsoportba (FAO 300 és FAO 400) tartozó 18 hibrid –, 13 éves (2011–2023) adatsor elemzése alapján megállapítottuk, hogy a legnagyobb SPAD érték – a kezelések átlagában – 2014-ben volt (50,8; $p < 0,05$), és a három fenofázis közül a V12 fenofázis SPAD értékei voltak kevésbé változékonyak ($CV=7,7\%$), a legváltozékonyabb a V6 fenofázis volt ($CV=10,6\%$).

Az évek és a fenológiai szakaszok átlagában a V12₁₈₀ kezelés biztosította a legnagyobb SPAD értéket ($p < 0,05$). Az éréscsoportoknál a szignifikánsan igazolt nagyobb SPAD érték eltérő N-műtrágyakezelés hatására alakult ki, a FAO 300 éréscsoportnál V6₁₅₀, míg a FAO 400 éréscsoportnál a V12₁₈₀ kezelés hatására. A százalékos növekedés az A₀ kezeléshez viszonyítva a FAO 300 éréscsoportnál alacsonyabb (14,4%) volt, mint a FAO 400 éréscsoportnál (17,3%).

A FAO csoportok 13 éves N-műtrágyakezeléseinek elemzése azt mutatta, hogy a V6 fenofázisban a N-műtrágyakezelések között nem volt szignifikáns különbség, míg a V12 és R1 fenofázisban a V12₁₈₀ kezelés biztosította a legnagyobb SPAD értéket. A FAO 300-as éréscsoportnál a V6 fenofázisban a N-műtrágyakezeléseknek nem volt megbízható SPAD érték növelő hatása, a V12 (V12₁₈₀) és az R1 (A₁₂₀) fenofázisban a legnagyobb SPAD érték eltérő kezelés hatására alakult ki. A FAO 400-as éréscsoport esetében mindhárom fenofázisban a V12₁₈₀ műtrágyakezelés volt szignifikánsan eredményes.

Mindkét FAO csoportnál a nem műtrágyázott (A₀) kezelésben volt a legnagyobb szórás a SPAD értékekben. A FAO 400 éréscsoport nagyobb változékonyságot ($CV=10,4\%$) mutatott, mint a FAO 300 éréscsoport ($CV=8,3\%$). A $CV\%$ alapján a legkiegyenlítettebb a V6₉₀ (FAO 300) és a V6₁₅₀ (FAO 400) kezelés SPAD értéke volt, az SD a FAO 300-as éréscsoportnál volt kisebb.

A SPAD dinamikáját a N-műtrágyázás nagymértékben befolyásolta, amely évjáratonként és éréscsoportonként is eltérést mutatott. A FAO 300 éréscsoportnál a V6-tól a V12-ig terjedő időszakban egy év (2017) volt, amikor minden N-műtrágyakezelés ($p < 0,05$) szignifikánsan növelte a SPAD értéket. A növekedés mértéke 30,9% (V6₉₀) és 43,5% (V12₁₈₀) között változott. A V12₁₈₀ kezelés az évek többségében, hét évben biztosította a legnagyobb növekedést ($p < 0,05$) ezen fenofázis között, átlagosan 31,5%-kal, a 2021. évi növekedés volt a legnagyobb, 56,5%. Összességében az eredmények azt mutatták, hogy a V6-V12 fenofázisok között minden évben a SPAD érték növekedés a fejtrágyakezelésekben jelentősebb volt, mint az alapkezelésekben (A₆₀, A₁₂₀). A V12-től R1-ig a két legszárazabb évben (2021, 2022) egyik N-műtrágyakezelésben sem volt statisztikailag igazolt növekedés. E két fázis között a V12₁₈₀ kezelés fejtette ki hatását ($p < 0,05$) a legtöbb évben (8 év; 2011–2013, 2015–2018, 2023), bár az átlagos 17,1% növekedés alacsonyabb volt a többi N-műtrágyakezeléshez képest. Minden

alkalmazott N-műtrágyakezelésben a legnagyobb SPAD érték növekedés 2011-ben volt, ahol a növekedés 31,0% és 40,7% között változott.

A FAO 400 csoportnál a V6 fenofázistól a V12 fenofázisig a vizsgált évek közül a 2017. és a 2023. évben minden tápanyagszinten szignifikáns ($p < 0,05$) SPAD érték növekedés volt. A vizsgált évek közül a legtöbb évben, azaz kilenc évben (2012–2019, 2023) a V6₁₅₀ N-műtrágyakezelés hatása igazolódott ($p < 0,05$), 22,3%-os átlagos növekedéssel. A legalacsonyabb szignifikáns növekedést az A₆₀ kezelés (2013. év 5,8%), míg a legnagyobbat a V12₁₈₀ kezelés (2018. év 59,5%) mutatta. Az alapkezelések (A₆₀, A₁₂₀) 20,0% alatti, a fejtrágyakezelések 20,0% feletti növekedést ($p < 0,05$) értek el. A V12 szakasztól az R1 szakaszig négy évben (2011, 2012, 2015, 2020) minden tápanyagszint szignifikáns SPAD érték növekedést ért el ($p < 0,05$). A V12₁₈₀ műtrágyakezelés SPAD érték növelő pozitív hatása 10 évben (2011–2017, 2020–2023) bizonyult eredményesnek, az átlagos növekedés mértéke 17,8%. A legalacsonyabb SPAD érték növekedés az A₆₀ (2016 év, 7,0%), a legnagyobb növekedés a V6₁₅₀ műtrágyakezelésben (2011. év 44,6%) volt.

Összességében a V6 és a V12 fenofázisok között az évek jelentős részében (7 év) a rövidebb tenészsídejű hibrid csoportnál a V12₁₈₀ műtrágyakezelés, a hosszabb tenészsídejű hibrid csoportnál (9 év) a V6₁₅₀ kezelés volt eredményes a SPAD értékre. Az R1 fenofázisra a FAO 300-as éréscsoportnál az évek többségében (8 év) a V12₁₅₀, míg a FAO 400-as éréscsoportnál (10 év) a V12₁₈₀ műtrágyakezelés hatását lehetett kimutatni.

A kukorica szemtermésének – két éréscsoportba (FAO 300 és FAO 400) tartozó 18 hibrid –, 13 éves (2011–2023) adatsor elemzése kimutatta, hogy a kukorica átlagos, minimális és maximális termése évenként jelentősen változott mindkét FAO csoportban. A kukorica szemtermésének a rendkívül csapadékos 2016. év vegetációs időszaka kedvezett a legnagyobb mértékben (14,569 t ha⁻¹), ahol a csapadék mennyisége jelentősen meghaladta az átlagot (453 mm), míg a legkedvezőtlenebb évjárat a súlyosan aszályos (átlag alatti csapadékmennyiség és annak rendkívül egyenetlen eloszlása) 2022. év volt, ahol mindössze 6,354 t ha⁻¹ volt a termésátlag.

A két éréscsoport termése közötti különbség 13 év átlagában statisztikailag nem igazolt, azonban a FAO 300-as éréscsoport szemtermése a CV értéket figyelembe véve az évek között kevésbé volt változékonny (17,6%), mint a FAO 400 éréscsoport termése (21,1%).

Az összevont varianciaanalízis (ANOVA) kimutatta, hogy a N-műtrágyázás felülmúlta az évjárat hatását. A nitrogén alap- és fejtrágyakezelések hatásának elemzése igazolta, hogy a legkisebb variabilitást az A₁₂₀ kezelés mutatott a 13 év alatt (CV=12%), de a magasabb termést biztosító fejtrágyakezeléseknél is a Pepó [2006] által közölt megengedett 10–20% között volt

(CV=17%). A két csoportot külön-külön elemzése azt mutatta, hogy szintén az A_{120} kezelés variabilitása volt a legkisebb, azonban a FAO 400 éréscsoport CV% értéke 12,4% volt, ami meghaladta a FAO 300 éréscsoport 11,9%-os CV% értékét, továbbá a fejtrágyakezelések esetében ugyan hatértéken belül volt mindkét csoportnál a variabilitás, azonban a FAO 400-as csoportnál kismértékben magasabb volt.

A 13 év közül hét évben az alaptrágya (két évben az A_{60} és hat évben A_{120}) és öt évben a V6 fenofázisban kijuttatott fejtrágyakezelések biztosították a legnagyobb termést ($p < 0,05$). Összességében 13 év átlagában megbízható termésnövelő hatásúnak a V_{6150} kezelés bizonyult, mindkét éréscsoportnál, ezzel a műtrágyakezeléssel a FAO 300-as éréscsoport 12,496 t ha⁻¹-t, a FAO 400-as éréscsoport 13,036 t ha⁻¹-t ért el.

Az eredmények azt mutatták, hogy sem évente, sem a 13 év átlagában a V12 fenofázisban kijuttatott fejtrágyának nem volt megbízható termésnövelő hatása.

Az előrejelzések szerint, ha aszályos évjáratra lehet számítani, akkor a fejtrágyaként alkalmazni kívánt nitrogénműtrágya hatékonysága korlátozott, ekkor a tavaszi, egy menetben történő alaptrágyázás lehet a célszerű megoldás.

A kukoricamag keményítőtartalom vizsgálatakor, a két éréscsoportba (FAO 300 és FAO 400) tartozó 18 hibrid, 13 éves (2011–2023) adatsor statisztikai elemzése (ANOVA) kimutatta, hogy az évek hatása jelentősebb mértékben volt befolyásoló hatású, mint a N-műtrágyázás. A N-műtrágyázás hét évben nem mutatott szignifikáns hatást a kukoricamag keményítőtartalmára, az éréscsoport szignifikáns hatása nyolc évben érvényesült.

A keményítőtartalom a vizsgált évek közül mindkét éréscsoportnál a 2020. évben volt a legmagasabb (78,2 és 79 g 100 g⁻¹szs.), ahol a tenyészidőszak csapadékmennyisége (489 mm) jelentősen meghaladta az átlagot és a hőmérséklet (17,6 °C) az átlagnak megfelelő alakult. A két csoport összehasonlításában azt láttuk, hogy mindkét éréscsoport keményítőtartalmának alakulását a környezeti tényezők befolyásolták. Az évek közötti keményítőtartalom-ingadozás a variációs koefficiens (CV %) érték alapján a FAO 400 éréscsoportnál nagyobb (CV=5,5%), mint a FAO 300 éréscsoportnál (CV=5,2%).

Az egyes években a legnagyobb keményítőtartalom eltérő kezelésekben alakult ki, 13 év átlagában a nagyobb keményítőtartalom mind a FAO 300, mind a FAO 400 éréscsoportnál a nem műtrágyázott (A_0) kezelésben volt, azonban szignifikáns különbséget nem mutatva a többi kezelés keményítőtartalmától. Az A_0 kezelésen belül a FAO 400 éréscsoportban a keményítőtartalom változékonysága minimálisan ugyan, de nagyobb volt (CV=5,6%), mint a FAO 300 éréscsoportnál (CV=5,2%). Az egyes N-műtrágyakezelésekben FAO csoportok

közötti különbség nem következetes, mindössze néhány N-műtrágyakezelésben volt szignifikáns eltérés.

Összességében a 13 év átlagában a nem műtrágyázott (A_0) kezelésben volt nagyobb a keményítőtartalom (73,3 g 100 g⁻¹sza.), az SD 3,8 és a CV%=5,3. A keményítőtartalom a N-műtrágyázás hatására csökkent, azonban a csökkenés mértéke szignifikánsan nem igazolt.

A fehérjetartalom – a kukoricamag másik minőségi mutatója – két éréscsoportba (FAO 300 és FAO 400) tartozó 18 hibrid, 13 éves (2011–2023) adatsorának statisztikai elemzése (ANOVA) kimutatta a környezeti tényezők (évek) elsődlegességét a N-műtrágyázással és az éréscsoporttal szemben.

Mind a FAO 300, mind a FAO 400 éréscsoportnál a 13 év és a N-műtrágyakezelések átlagában a kukorica magfehérje tartalma 8,4 g 100 g⁻¹sza. volt. Négy évben (2011, 2012, 2015, 2021) alakult ki magas fehérjetartalom (9,3–9,6 g 100 g⁻¹sza, $p<0,05$), amely a Duncan-teszt alapján egy csoportot képezett. A legnagyobb fehérjetartalom mindkét éréscsoportnál 2021-ben évben (9,6 g 100 g⁻¹sza.), a legkisebb 2023-ban alakult ki (6,5 g 100 g⁻¹sza.). Az éréscsoportok fehérjetartalma azonosnak tekinthető. A N-műtrágyázás tíz, az éréscsoportok öt évben mutattak jelentős, szignifikáns ($p<0,001$) befolyásoló hatást a magfehérje tartalomra.

A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatásának évenkénti és a 13 év átlagának eredménye, mindkét éréscsoportnál kimutatta, hogy a nem műtrágyázott (A_0) kezelésekben volt a legalacsonyabb (7,9–7,9 g 100 g⁻¹sza.) a fehérjetartalom, és egyben ebben a kezelésben volt az évek közötti változékonyság a legnagyobb (CV%=13,4%). A legkisebb változékonyságot a V6₉₀ kezelés mutatta (CV=11,7%).

Külön-külön értékelve az éréscsoportokat a statisztikai elemzés azt mutatta, hogy a FAO 300 éréscsoportnál négy évben az alaptrágyázás és hat évben a fejtrágyázás, a FAO 400 éréscsoportnál hat évben az alaptrágyázás és öt évben a fejtrágyázás volt szignifikáns hatással a fehérjetartalom alakulására.

Az évek közötti változékonyság a fehérjetartalom tekintetében legnagyobb a FAO 300 éréscsoportnál az A_0 kezelésben (CV=13,5%), míg a legkisebb a V6₁₅₀ kezelésben (CV=11,7%) volt. A FAO 400 éréscsoport esetében a V6₉₀ fejtrágyakezelésben volt a legkisebb (CV=12,6%), és a legnagyobb az A_{60} alapkezelésben (CV=16,3%).

Összességében a 13 év átlagában az alap 120 kg N ha⁻¹ (A_{120}) kezelés hatására növekedett ($p<0,05$) a fehérjetartalom, a további N kijuttatásának nem volt szignifikáns hatása. Az A_{120} kezelés a FAO 300 éréscsoportnál nagyobb mértékű százalékos növekedést mutatott (11,4%), mint a FAO 400 éréscsoportnál (8,9%) a nem műtrágyázott (A_0) kezeléshez képest.

A N-műtrágya alkalmazása és a klorofilltartalom (SPAD érték) közötti kapcsolatot 13 év és a FAO csoportok átlagában különböző fenofázisokban elemeztük. Az eredmények alapján a kezelések átlagában a V6 fenofázisban gyenge, de statisztikailag szignifikáns ($r=0,146^{***}$) korrelációt találtunk. A V12 fenofázisban és a növirágzás (R1) időszakában a korrelációs együttható magasabb értéket mutatott és közepes erősségű kapcsolatot igazolt ($r=0,496^{***}$; $r=0,594^{***}$). Az éréscsoportok külön-külön értékelése azt mutatta, hogy a FAO 300 éréscsoport esetében a két tényező összefüggése gyengébb volt (V6: $r=0,126^{**}$, V12: $0,475^{***}$), mint a FAO 400 éréscsoportnál (V6: $r=0,168^{***}$, V12: $0,515^{***}$). Az R1 szakaszban az összefüggés mindkét csoportnál erősödött, és a FAO 300 éréscsoport esetében minimálisan ugyan, de erősebb volt ($r=0,601^{***}$), mint a FAO 400 éréscsoportnál ($r=0,594^{***}$). A N-műtrágyázás befolyásoló hatása 35,2% (FAO 400) és 36,1% (FAO 300) között volt.

Az évenkénti elemzéssel – a FAO csoportok átlagában – V6 fenofázisban öt évben (2012, 2013, 2016, 2020, 2022), a V12 fenofázisban egy év kivételével (2019) minden évben és az R1 fenofázisban minden évben igazoltuk a pozitív összefüggést. A legszorosabb korreláció a V6 és a V12 fenofázisban 2016-ban volt, közepes erősségű a V6 ($r=0,598^{***}$), és szoros a V12 szakaszban ($r=0,862^{***}$), valamint az R1 fenofázisban 2023-ban, ahol az összefüggés igen szoros ($r=0,912^{***}$) volt. Az összefüggések erőssége és a N-műtrágyázás hatása a SPAD érték alakulására évenként jelentősen különböző volt mindhárom fenofázisban.

A klorofilltartalom (SPAD érték) és a kukorica termése között, a V6 fenofázisban gyenge ($r=0,410^{**}$) korrelációt mutattunk ki a kezelések (év, FAO csoport, N-műtrágya) átlagában. Azonban a fenológiai szakaszok előrehaladtával a V12 és R1 fázisokra jellemzően erősebb összefüggés mutatkozott: a V12-ben közepes szorosságú ($r=0,555^{***}$), míg az R1 fázisban még erősebb korrelációt ($r=0,683^{***}$) figyeltünk meg.

A FAO 400 éréscsoportnál a SPAD érték és a termés közötti összefüggés mindhárom fenofázisban erősebb volt, mint a FAO 300 éréscsoportnál. A V6 szakaszban mind a FAO 300 ($r=0,377^{***}$), mind a FAO 400 éréscsoportnál ($r=0,434^{***}$) gyenge volt az összefüggés. A V12 fenofázisban a két csoport között nagyobb eltérést lehetett kimutatni. A FAO 300 éréscsoport esetében a két tényező közötti kapcsolat ugyan erősödött a V6 szakaszhoz viszonyítva, de még mindig gyenge ($r=0,425^{***}$) volt, míg a FAO 400 éréscsoportnál közepes erősségűvé vált ($r=0,685^{***}$). A FAO 400 éréscsoport esetében jelentős, 43,3%, míg a FAO 300 hibridnél 18,1% volt a SPAD érték befolyásoló hatása. Az R1 fenofázisra a két tényező kölcsönhatása az „r” érték alapján kiegyenlítettebb volt. A FAO 300 éréscsoportnál a kapcsolat

a V12 fenofázishoz képest jelentősen erősödött, közepes erősségűvé vált ($r=0,656^{***}$), míg a FAO 400 éréscsoportnál kismértékben változott ($r=0,699^{***}$).

Az évenként és fenológiai fázisonként elvégzett elemzéssel az éréscsoportok átlagában pozitív szignifikáns korrelációt mutattunk ki a V6 fenofázisban hét évben (2012, 2013, 2015, 2016, 2020, 2022, 2023), a V12 fenofázisban 2019. év és az R1 szakaszban 2011. év kivételével minden évben. A determinációs együttható értékei alapján a SPAD érték hatása a termésmennyiségre a legnagyobb mértékben a V6 fenofázisban 2016-ban (21,6%) a V12 (69,9%) és az R1 növekedési fázisban (70,2%) a 2017-es évben volt megfigyelhető. Összességében kimutatható volt, hogy az összefüggések erőssége és a SPAD érték hatás a szemtermés alakulására évenként jelentősen különböző mindhárom fenofázisban.

A *N-műtrágya és a kukorica termése* között közepes szorosságú ($r=0,513^{***}$) korrelációt igazoltunk a kezelések átlagában. Mind a FAO 300 ($r=0,501^{***}$), mind pedig a FAO 400 éréscsoport ($r=0,528^{***}$) esetében a változók közötti összefüggés közepes volt, és a N-műtrágyázás 25,1% és 27,9%-ban gyakorolt hatást a szemtermés alakulására.

A FAO csoportok átlagában, illetve a FAO 300 és a FAO 400 éréscsoportnál a 2011. év kivételével minden évben igazolódott a N-műtrágya és a kukorica termése közötti pozitív összefüggés. Az éréscsoportok átlagában a determinációs koefficiens értékéből kiindulva a N-műtrágya 2012-ben a legkisebb (19,5%) és 2020-ban a legnagyobb (74,1%) mértékben határozta meg a kukorica szemtermésének alakulását.

A FAO 300 éréscsoport esetében gyenge összefüggés egy évben (2012: $r=0,404^{***}$) volt, míg a FAO 400 éréscsoport esetében nem volt gyenge összefüggés a változók között, továbbá közepes erősségű korrelációt lehetett kimutatni a FAO 300 éréscsoportban három évben (2014, 2015, 2019) és a FAO éréscsoportnál négy évben (2012, 2014, 2019, 2022). Szoros összefüggés volt nyolc évben mindkét csoportnál, kis eltéréssel azonos években. A legszorosabb korrelációt a FAO 300 éréscsoportnál 2018-ban ($r=0,912^{***}$) és a FAO 400 csoportnál 2020-ban ($r=0,877^{***}$) igazoltuk. A determinációs koefficiens érték alapján a különböző években a N-műtrágyázás eltérő mértékben, 16,3%–83,1% (FAO 300) és 22,6%–76,9% (FAO 400) között befolyásolta a szemtermés nagyságát.

A *keményítőtartalom és a N-műtrágya* közötti kapcsolatot vizsgálva a kezelések átlagában nagyon gyenge negatív ($r=-0,111^{***}$) előjelű összefüggést lehetett kimutatni, ami a FAO 300 éréscsoport esetében kisebb mértékben erősebb ($r=-0,143^{***}$) volt, mint a FAO 400 éréscsoportnál ($r=-0,089^{***}$).

Évenként, a FAO csoportok átlagában vizsgálva a két tényező közötti összefüggést, három évben (2011, 2013, 2022) nem volt kimutatható szignifikáns kapcsolat. A többi évben az összefüggések $p < 0,001$ szinten igazoltak, kivétel a 2023. év ($p < 0,01$). Gyenge negatív összefüggést hat évben (2012, 2014, 2015, 2018, 2021, 2023), és közepes negatív kapcsolatot három évben (2016: $r = -0,669^{***}$; 2017: $r = -0,647^{***}$ és 2019: $r = -0,659^{***}$) állapítottunk meg. A 2020. év mutatott gyenge pozitív ($r = 0,307^{***}$) összefüggést.

FAO 300 éréscsoportnál két évben (2011, 2013), a FAO 400 éréscsoportnál öt évben (2011, 2013, 2021, 2022, 2023) nem volt szignifikáns összefüggés kimutatható. Az évek jelentős részében a korreláció negatív volt mind a FAO 300 éréscsoportnál (9 év), mind a FAO 400 éréscsoportnál (7 év).

A keményítőtartalom és szemtermés között a kezelések átlagában nem lehetett szignifikánsan igazolni az összefüggést. Évenként vizsgálva a két tényező közötti kapcsolatot – a FAO csoportok átlagában – két évben (2011, 2015) nem volt korreláció a változók között. Az összefüggés negatív volt hét évben és pozitív négy évben (2012, 2013, 2020, 2022).

A FAO 300 éréscsoportnál mindössze két évben (2011, 2019), míg a FAO 400 éréscsoportnál öt évben (2011, 2013, 2015, 2021, 2023) nem volt kimutatható a keményítőtartalom és a termés közötti összefüggés. Pozitív összefüggés volt a FAO 300 éréscsoportnál 4 évben, amelyből három év gyenge (2012, 2013, 2022) és egy év közepes (2020.) összefüggést mutatott. A FAO 400 éréscsoportnál három év (2012, 2020, 2022) összefüggése volt gyenge pozitív előjelű.

A fehérjetartalom és a N-műtrágya között a kezelések átlagában gyenge korrelációt ($r = 0,373^{***}$) határoztunk meg, a determinációs koefficiens érték 13,9%. Az összefüggés-vizsgálattal mindkét éréscsoportnál gyenge korrelációt igazoltunk, azonban FAO 300 éréscsoportnál erősebb ($r = 0,418^{***}$) volt, mint a FAO 400 csoport esetében ($r = 0,345^{***}$). A N-műtrágyázás 17,5%-ban (FAO 300) és 11,9%-ban (FAO 400) határozta meg a kukoricamag fehérjetartalmát.

FAO csoportok átlagában minden évben igazolódott a szignifikáns kapcsolat $p < 0,001$ szinten, kivétel a 2011. év ($p < 0,05$). A legszorosabb összefüggés 2019-ben volt ($r = 0,846^{***}$). A FAO 300 éréscsoportnál két évben (2011, 2012) és a FAO 400 éréscsoportnál egy évben (2013) nem volt megbízható összefüggés. Gyenge korreláció volt egy (2013: $r = 0,320^{***}$) és közepes két évben (2014: $r = 0,657^{***}$; 2023: $r = 0,645^{***}$) a FAO 300 éréscsoportnál. A FAO 400 éréscsoport esetében három évben (2011, 2014, 2015) gyenge, öt évben közepes (2012, 2020, 2021, 2022, 2023) korrelációt igazoltunk. Szoros összefüggést a két változó között a FAO

300 éréscsoportnál nyolc évben, míg a FAO éréscsoportnál négy évben mutattunk ki. Az „r” érték alapján az összefüggés a FAO 300 éréscsoport nyolc évében erősebb volt (0,829–0,949), mint a FAO 400 éréscsoport négy évében (0,728–0,801).

A *fehérjetartalom és termés* között a kezelések átlagában gyenge korrelációt ($r=0,359^{***}$) határoztunk meg, a determinációs koefficiens érték 12,9%. Gyenge összefüggést lehetett kimutatni mindkét éréscsoportnál, a FAO 300 éréscsoport esetében minimális ugyan, de erősebb volt az összefüggés ($r=0,376^{***}$), mint a FAO 400 éréscsoportnál ($r=0,340^{***}$).

A FAO csoportok átlagában évenként elvégzett összefüggésvizsgálat eredménye minden évben $p<0,001$ szinten igazolt, kivéve a 2022. évet ($p<0,05$). A leggyengébb összefüggés 2011-ben ($r=0,264^{***}$) és a legerősebb 2017-ben ($r=0,725^{***}$) volt.

A FAO 300 éréscsoport esetében egy évben (2013), a FAO 400 éréscsoport esetében két évben (2011, 2022) nem mutatott az összefüggés szignifikáns kapcsolatot, míg a többi években mindkét éréscsoportnál a korreláció $p<0,001$ szinten igazolt, kivéve a FAO 400 éréscsoport 2013. és 2014. éve, ahol $p<0,01$. A legszorosabb összefüggés a FAO 300 éréscsoportnál 2021-ben ($r=0,884^{***}$), míg a leggyengébb 2011-ben ($r=0,309^{***}$) volt. A FAO 400 éréscsoportnál gyenge összefüggés jelentősen több évben fordult elő, mint a FAO 300 éréscsoportnál (2011, 2023), azaz öt évben (2012, 2013, 2014, 2015, 2016). Közepes korreláció mindkét csoportnál négy–négy évben volt, de nem ugyanazon években. Szoros összefüggés azonban jelentősen kevesebb évben alakult ki (2017, 2019). A leggyengébb volt az összefüggés 2013-ban ($r=0,281^{***}$) és a legszorosabb 2017-ben ($r=0,733^{***}$).

A *vetésidő* (VD1, VD2 és VD3) *hatását a kukorica hibridek* (Mv 255, Mv 350 és Mv Koppány) *termésére* három éves (2011–2013) adatsor alapján értékeltük. A vetésidő termésre gyakorolt hatásának varianciaanalízis (ANOVA) elemzése kimutatta három év átlagában (2011–2013), hogy a környezeti tényezők a vizsgálatba vont mindhárom hibrid (Mv 255, Mv 350 és Mv Koppány) szemtermését a vetésidő elsődlegesen befolyásolta. A genotípus főhatás is szignifikáns volt.

A megkésett kelés negatív hatása nem volt kimutatható a szemtermés nagyságának alakulásában. Az igen korai (Mv 255 FAO 290) hibrid termése volt átlagban a legkisebb ($11,534 \text{ t ha}^{-1}$), érzékenyen reagált a vetésidőre és csak a késői vetésekben adott nagy termést (VD3 $12,778 \text{ t ha}^{-1}$). A termésingadozása is nagyobb volt, mint a korai (Mv 350 FAO 350) és középérésű (Mv Koppány FAO 420) hibrideknek.

A megváltozott klimatikus körülmények között a középérésű Mv Koppány hibrid adta a legnagyobb termést (VD1 $13,299 \text{ t ha}^{-1}$; VD2 $13,889 \text{ t ha}^{-1}$; VD3 $13,296 \text{ t ha}^{-1}$), legkisebb volt

a termésingadozása és nem volt érzékeny a vetésidőre. Összességében a martonvásári nemesítésű Mv Koppány középérésű hibrid kiváló adaptációs képességekkel rendelkezik, termesztésekor nem kell egy adott vetésidőhöz ragaszkodni, április 4.-től május 10.-ig bármikor vethető. Ez a termesztés során nagyon előnyös, van idő a kedvező talajnedvesség kiváráására és a gyors, egyenletes kelés biztosítására. Magas terméspotenciállal rendelkeznek.

A vetésidő (VD1, VD2 és VD3) hatását a kukorica hibridek (Mv 255, Mv 350 és Mv Koppány) hőhasznosításának hatékonyságára három éves (2011–2013) adatsor alapján értékeltük. Az eredmény kimutatta, hogy a legalacsonyabb HUE – az évek és a hibridek átlagában – a VD1 vetésidőben ($8,35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$) halmozódott fel ($p < 0,05$), és a vetésidő kitolódásával magasabb lett (VD3; $9,82 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$). Évenként vizsgálva a hőhasznosítást a hibridek átlagában, igazolható volt, hogy a VD1 és a VD3 vetés között 2011-ben volt a különbség a legnagyobb ($2,33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$; $p < 0,05$), 2013-ban a növekedés $2,01 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$ volt, míg 2012-ben eltérést nem lehetett kimutatni. A VD2 és VD3 között szintén 2013-ban volt jelentősebb eltérés ($1,72 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$).

Alacsony hőfelhasználási hatékonysággal az Mv 255 hibrid, és magas HUE-val az Mv Koppány hibrid rendelkezett az évek átlagában mindhárom vetésidőben. A vetésidő kitolódásával a legnagyobb mértékű hőfelhasználás-növekedést az Mv 255 hibridnél lehetett kimutatni a VD1 ($7,21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$) vetéstől a VD3 vetésre ($9,63 \text{ kg ha}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ nap}^{-1}$). A rendelkezésre álló hőenergiát az Mv 255 és az Mv 350 a három évben eltérően, az Mv Koppány hibrid azonban mindhárom évben és mindhárom vetésidőben jól hasznosította.

A fehérje- és olajtartalom összevont varianciaanalízis eredménye kimutatta (2011–2013) hogy mindhárom fő tényező (vetésidő, genotípus, év) szignifikáns ($p < 0,001$) hatással volt. A tényezők közül a Mean Squares (MS) érték alapján mind a fehérje-, mind pedig az olajtartalomra a vetésidő hatása volt a legjelentősebb. A legerősebb szignifikáns interakció a fehérjetartalom tekintetében az év és a kukorica genotípus között volt, ami arra utal, hogy a hibridek közötti különbségek nem ugyanazok a különböző években. Az olajtartalom esetében az év és a vetésidő kölcsönhatás volt a legmarkánsabb.

A hibridek fehérjetartalma az évek átlagában – az Mv 350 kivételével (VD2) – a VD3 vetésben volt igazoltan ($p < 0,05$) a legnagyobb, és a VD3 vetés eredményezte mindhárom hibridnél a legnagyobb ($p < 0,05$) olajtartalmat is. A környezeti tényezők mindhárom hibridnél a fehérjetartalmat a VD2 ($p < 0,05$), az olajtartalmat a VD3 vetésidőben befolyásolták ($p < 0,05$). A hibridek között a fehérjetartalom tekintetében legnagyobb százalékos eltérés a VD3 vetésidőben (2011), míg az olajtartalomban a VD3 (2013) vetésidőben volt kimutatható.

A hároméves eredmény azt mutatta, hogy a VD1 és VD2 vetés tenyészidőszakában ugyan magasabb a kumulatív hőösszeg (GDD), azonban egyértelműen tudtuk igazolni, hogy a növény fejlődésének korai stádiumában fellépő alacsony hőmérséklet csökkenti a kukoricamag fehérje- és olajtartalmát. Ezt a hatást a korai vetésidőkben egyértelműen tudtuk igazolni. A vetés kitolódásával (VD3) ugyanis, ahol a napi hőmérséklet már magasabb, azonban alacsonyabb a tenyészidőszak kumulatív GDD értéke, a kukoricamag fehérjetartalma 12,5%-kal ($p < 0,05$), az olajtartalma 12,8%-kal ($p < 0,05$) emelkedett.

A kukorica kelésének, virágzásának meghatározására (2011–2013) három vetésidőben (VD1, VD2, VD3) 5 cm mélységben mért talajhőmérsékletére szinuszos modellt illesztettünk valódi nemlineáris regresszió-analízissel. A szinuszos modell pontosan modellezte a talajhőmérsékletet, a maradékok szórása 1,067 volt. Ezzel a modellel előállítható a Ceres Maize kelési algoritmus számára a talajhőmérséklet, illetve a hasznos hőmérséklet akkor is, ha nem állnak rendelkezésünkre mért hőmérsékleti adatok. Algoritmusunk a $\pm 23,45$ és $\pm 65,5$ szélességi fok között alkalmazható. Az a , b , c paramétereket az adott hely értékeit figyelembe véve kell meghatározni.

Az eredeti modell a talajfelszín feletti 2 m-es léghőmérsékletet használja bemenő adatként, és bázishőmérsékletnek $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot. Mivel a kelést a talajhőmérséklet sokkal jobban meghatározza, ezért az 5 cm-es mélységben mért értéket használtuk a szimuláció során. A hasznos talajhőmérséklet számításakor $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os bázishőmérsékletet kaptunk. Ez a hőmérséklet felelt meg a léghőmérséklet $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os bázishőmérsékletének. Ez eredményezte a legpontosabb becslést a kelés időpontjára. A szimuláció jószágát a Percentage of Predicted Deviation (%) (PD) mutatóval, jellemeztük a PD érték alapján, ha $\text{PD} < 10\%$ kiváló, $10\text{--}20\%$ jó, $20\text{--}30\%$ közepes, $> 30\%$ gyenge a szimuláció eredménye.

A mért és szimulált kelési napok a korai vetés (VD1) esetén közel voltak egymáshoz. A későbbi vetés (VD2, VD3) esetén viszont 2012–2013-ban jelentős volt az eltérés, amit a csírázás okozott. A CERES Maize modellben a keléshez szükséges hőidő egyedül a vetés mélységétől függ, hogy mennyi hőösszeg szükséges ahhoz, hogy a csíra megjelenjen a talaj felszínén. Kísérleti adataink ezt az elképzelést megerősítették, hibridtől függetlenül a kelések azonosak voltak. A szimulációs modell rossz becslését, amikor a PD értéke 50% körülire nőtt, a csírázás elhúzódása okozta.

A R1 idejének meghatározásához a CERES Maize modell genetikai paramétereket is használ a hőmérséklet és a nappalhosszúság mellett. A R1 idejét a modell kiválóan jelezte előre. A PD értékek, néhány esettől eltekintve, 10% alattiak voltak. Az alá- és felülbecslések száma

nagyjából megegyezett. 2012-ben a VD2 és VD3 késői kelése a virágzási időben nem jelent meg. Hasonlót tapasztaltunk 2013-ban VD2 vetésidő esetén, bár itt közel 10%-kal később virágzott a kukorica, mint amit a modell előre jelzett. A hibridek tenyészidőbeli különbsége a virágzási időben jól megfigyelhető. A korai vetésben (VD1) a különbség kifejezett, a későbbi vetésekben (VD2, VD3) mérséklődik a különbség. Ennek oka a foknapokban számolt hőidő, amely a későbbi vetésekben gyorsabban kumulálódik a magasabb hőmérséklet miatt. A tenyészidőbeli különbségek alacsony hőmérsékletek esetén észlelhetők.

A N-műtrágyázás hatása a kukorica SPAD és LAI értékeire különböző fenofázisokban: Integrált előrejelzési modell fejlesztése – a Merida FAO 390 és az Armagnac FAO 490 bevonásával – kimutatta, a száraz (2021) és az aszályos (2022) évek átlagát tekintve, hogy a SPAD érték a korai vegetatív fejlődési szakaszban (V8-V10) volt a legnagyobb. A szárazságnak köszönhetően a klorofill lebomlása, a levelek öregedése megkezdődött, majd fokozatosan csökkent, tovább gátolta a fejtrágyaként kijuttatott N-felvételt. 2021-ben a fejtrágyázott kezeléseknek köszönhetően a fenofázisok előrehaladtával fokozatosan emelkedett és a korai reprodukzív szakaszban (R1-R3) érte el a maximális értéket, ezt követően csökkent (35,9–39,2). A súlyosan aszályos 2022. évben az A₆₀ kezelés kivételével minden tápanyagszinten a V8 fejlődési fázisban volt a SPAD érték a legnagyobb, majd fokozatosan csökkent, és az R6 fenofázisra minimális értéket (10,0–11,8) mutatott. Ebben a két száraz évben két kivételtől eltekintve (2021: V6₁₅₀ és V12₁₈₀ kezelés) a relatív klorofilltartalom (SPAD) nem érte el a Piekielek et al. [1995] által ajánlott maximális 52–56 SPAD érték tartományt.

A két száraz év közül (2021), ahol kissé több csapadék hullott és annak eloszlása jobbnak tekinthető a fejtrágyázásnak (V6₁₅₀), míg a súlyos aszályos (2022) évben a legkisebb adagú alapkezelésnek (A₆₀) volt SPAD érték növelő hatása.

A levélterületi index (LAI) alakulását a víz (csapadék) és a N-műtrágya a vizsgált száraz és extrém száraz évben eltérően befolyásolta. A vízhiányra adott LAI válasz 2022-ben kisebb volt, mint 2021-ben. A vízhiány különböző mértékben csökkentette a LAI értékét. A vízhiánynak köszönhetően műtrágyázás hatására sem lehetett elérni egyik évben sem a kukorica optimálisnak tekinthető 4,1–5,9 [Menyhért et al. 1980, Berzsenyi 1989] maximális levélfelület-indexet. A fejtrágyázás nem növelte a LAI-t, az alap 120 kg N ha⁻¹ kezelés (A₁₂₀) biztosította a maximális LAI értéket. Az alacsony LAI értékek alacsony napenergia-hasznosítási hatékonyságra utaltak, amely a nitrogén elérhetőségétől függ, illetve arra, hogy alacsony szemtermés várható.

A kritikus fenofázisokban, illetve a teljes tenyészidőszakot tekintve jelentős volt a vízhiány mindkét évben. A 120 kg N ha⁻¹ (A₁₂₀) alaptrágya biztosította a legnagyobb szemtermésmennyiséget. A nitrogénműtrágya további növelése nem enyhítette a szárazságstresszt, ellenkezőleg gátolta a további fejtrágyaként kijuttatott N-felvételt, amely szemterméscsökkenéséhez vezetett. A vízhiány 2022-ben még jelentősebb volt, mint 2021-ben ami a nem műtrágyázott és a fejtrágyakezelésekben 30%-ot meghaladó termés-csökkenést okozott.

A SPAD és LAI értékek időben történő becslése nagy jelentőséggel bír a PrM technológiában. A kukorica termésének legpontosabb előrejelzése a SPAD érték alapján az R3 (R²=0,716), a LAI alapján a VT (R²=0,627) fenofázisra tehető. A SPAD és a LAI együttes modellbe foglalása biztosította a legpontosabb termés-előrejelzést (VT, R²=0,762), roncsolásmentesen és költséghatékonyan még száraz és extrém száraz években is. A szenzorok együttes alkalmazása levetővé teszi a gazdálkodók számára, hogy a gazdálkodást ellenőrzött módon tervezhetik, illetve az észlelt problémákra időben reagáljanak.

Az általunk kidolgozott becselő modell

$$\hat{y} = b_0 + b_1 \times \text{LAI} + b_2 \times \text{SPAD}$$

ahol, $\hat{y}$ = a becsült termés, a b_0 = tengely metszet, b_1 = LAI meredeksége, b_2 = SPAD meredeksége.

A modell egyszerűségének köszönhetően jól használható a gyakorlatban, mivel csak SPAD és LAI értékekre van szükség, és már a VT fázisban pontos becslés adható az adott év termésére. A modell korlátja lehet, hogy rendelkezni kell a megfelelő pontosságú mérőműszerekkel, folyamatosan figyelni kell a kukorica fejlettségi állapotát, és a VT fázisban elegendő méréssel kell rendelkezni a megbízható előrejelzéshez.

A N-műtrágyázás és az öntözés a kukorica SPAD és az UAV alapú NDVI értékére, valamint a szemtermésére gyakorolt hatásának értékelése – Merida FAO 390, Fornad FAO 420 és Armagnac FAO 490 hibridek bevonásával – igazolta, hogy súlyos aszályos (2022) körülmények között SPAD értékek nagyon alacsonyak, nem öntözött kezelésben 23,0–48,4 és az öntözött kezelésben 24,4–51,8 között változtak. Szignifikánsan igazolt legnagyobb SPAD értéket nem öntözött körülmények között az A₆₀ kezeléssel (40,3; p<0,05), öntözött körülmények között a V6₁₅₀ kezeléssel (45,5; p<0,05) lehetett kimutatni. Kutatási eredményeink arra mutatnak rá, hogy a 115 mm öntözővíz kijuttatása (öntözött kezelés) nem volt elegendő a Piekielek et al. [1995] által ajánlott 52–56 SPAD érték tartomány eléréséhez.

Természetes csapadékelátottság mellett a korai fejtrágyázás (V6) kifejtette hatását és a V8 fenofázisra minden tápanyagszinten ($p < 0,05$) jelentős volt a növekedés. A V8 fenofázist követően a vízhiány csökkentette a SPAD értéket ($p < 0,05$), amely nem segítette az R1 előtti szárazanyag nagyobb felhalmozódását. Emellett a V12 és R3 fenofázisokban volt a legnagyobb hatása a N-műtrágyának az A_0 kezeléshez képest. A teljes vegetációs időszakot tekintve az A_{60} kezelés volt statisztikailag igazolt, amely jóval a kritikus érték alatt volt (40,3).

Öntözött körülmények között a V12 fenofázistól a kukoricalevelek nagyobb SPAD értékkel rendelkeztek, mint a nem öntözött kezelésben. Az öntözésnek és a V6 és V12 fenofázisban kijuttatott fejtrágyakezelésnek köszönhetően a nővirágzásra (R1) kialakult a legmagasabb SPAD érték, amely fokozatosan csökkent. A legnagyobb növekedést a $V_{6_{150}}$ kezeléssel (45,5) lehetett kimutatni.

A SPAD értékhez hasonlóan az UAV alapú NDVI értékek átlaga alacsonyabb (0,518) volt nem öntözött kezelésben, és magasabb (0,564) öntözött kezelésben, a két kezelés közötti eltérés igazolt ($p < 0,001$). Szignifikánsan ($p < 0,05$) a legmagasabb UAV-alapú NDVI értékeket a teljes vegetációs időszak alatt a nem öntözött és az öntözött kezeléseknél a V12 és a V_n fenofázisban érték el az A_{120} kezeléssel, és ez bizonyult a leghatékonyabbnak a magas szemtermés elérése szempontjából. A szemtermés és az UAV alapú NDVI spektrális értékek korrelációjának elemzése azt mutatta, hogy a korai növekedési szakaszok (V6 és V8) gyengébb korrelációban állnak a szemterméssel, míg a V12 és V_n erős korrelációt mutattak a szemterméssel.

Eredményeink azt mutatták, hogy a 2022. évi szélsőséges időjárási anomáliák miatt a fejtrágyázás nem növelte a szemtermést, mivel a vízstressz csökkentette a növények transzspirációját, ami a levelek N-felvételének csökkenését okozta. A legmagasabb szemtermést a tavaszi alaptrágyázás (A_{120}) alkalmazásával érték el mind a nem öntözött, mind az öntözött kezeléseknél. Ezenkívül minden tápanyagszintnél szignifikáns ($p < 0,001$) öntözési hatást mutattunk ki, a legjelentősebb hatást pedig az A_{120} kezelésnél tapasztaltuk az A_0 kezeléshez képest.

Összességében a N-műtrágyakezelés és a SPAD, valamint az UAV alapú NDVI R^2 együtthatója szignifikánsan ($p < 0,001$) pozitív összefüggést mutatott, és ez az összefüggés öntözött körülmények között erősebb a nem öntözött kezeléshez képest, kivéve a V6 fenofázist, ahol a korreláció gyenge. Ezen eredmények alapján a SPAD és a kukoricaszemtermés korrelációjának sorrendje az R^2 alapján öntözött körülmények között a következő: $R1 (0,62) > V12 (0,59) > R3 (0,51) > V8 (0,5) > V_n (0,27) > V6 (0,23)$, és az NDVI és a kukorica szemtermés közötti korreláció sorrendje a következő: $R3 > (0,75) > R1 (0,62) > V_n, V12 (0,52) > V8 (0,4) > V6 (0,1)$. Összességében a SPAD és az UAV alapú NDVI spektrumértékek és a

szemtermés közötti összefüggés eredményeiből arra következtethetünk, hogy a változók közötti összefüggés a reprodukív fenofázisban (R1 és R3) a legszorosabb, ami azt jelzi, hogy ebben az időben mért értékek a legalkalmasabbak a termésbecslése.

Összefoglalva, a PrM technológia támogatni fogja a gazdákat abban, hogy megalapozott döntéseket hozzanak a hibridválasztás, az optimális vetésidő, a N-műtrágyázási stratégiák és az időzítés tekintetében, ami maximalizálja a termést és minimalizálja a kockázatot.

6. LEGFONTOSABB EREDMÉNYEK

Megállapítottam, a 13 éves tartamkísérlet eredményeinek értékelése alapján, hogy

- a kukorica szemtermését, keményítő- és fehérjetartalmát a N-műtrágyázás nagyobb mértékben határozta meg, mint az évjárat;
- a FAO 400 éréscsoport évek közötti szemtermés és keményítőtartalom ingadozása a variációs koefficiens (CV %) érték alapján nagyobb, mint a FAO 300 éréscsoportnál;
- a keményítőtartalom a nem műtrágyázott (A_0) kezelésben volt a legnagyobb mindkét éréscsoportnál, amely a N-műtrágyázás hatására csökkent, a csökkenés mértéke szignifikánsan nem igazolt;
- a fehérjetartalom az alap 120 kg N ha^{-1} (A_{120}) kezelésben ($p < 0,05$) volt a legnagyobb, a FAO 300 éréscsoportban nagyobb mértékű százalékos növekedést mutatott, mint a FAO 400 éréscsoportban, a nem műtrágyázott (A_0) kezeléshez képest;
- a 120 kg N ha^{-1} alap + a V6 fenofázisban további 30 kg N ha^{-1} kijuttatása (V_{6150}) bizonyult a leghatékonyabb szemtermésnövelő kezelésnek mindkét éréscsoportnál;
- száraz években optimális N-műtrágyamennyiségnek az alaptrágyaként kijuttatott 120 kg N ha^{-1} (A_{120}) bizonyult a maximális termés eléréséhez;
- sem évente, sem a 13 év átlagában a V12 fenofázisban kijuttatott fejtrágyának nem volt megbízható termésnövelő hatása.

Bizonyítottam, hogy

- az egyes fenológiai szakaszokhoz minden évben közel azonos növekedési foknap (GDD) szükséges. A növekedési foknap (GDD) és a fototermikus egység (PTU) agrometeorológiai indexek alapján a kukorica hibridek vegetációs időszakának hossza jól előrejelezhető. A heliotermikus egység (HTU) és hidrotermikus egység (HYTU) nagy eltérései (7–12%) azt bizonyítják, hogy nem alkalmasak a fenológiai fázisok hosszának becsléséhez;
- a hőfelhasználás hatékonyság (HUE) függ a genetikai adottságoktól, a vetésidőtől, ezért célszerű olyan hibrid választása (Mv Koppány), melynek fotoszintetikus teljesítménye és az energiafelhasználása kiváló, jó adaptációs képességekkel és magas termésponenciával rendelkezik, továbbá széles a vetésidő-intervalluma (április 4.–május 10.);
- a N-műtrágyázás a HUE-t hatékonyan javítja, kedvezőbb környezeti tényezők mellett nagyobb mértékben;

- a későbbi vetésidőben a kukorica fehérjetartalma 12,5%-kal és olajtartalma 12,8%-kal növekedett;
- a kukorica kelés és nővirágzás (R1) időpontjának szimulációs modellezésére az 5 cm-es talajréteg hőmérséklete kiválóan alkalmazható;
- a legnagyobb SPAD értéket a FAO 300 éréscsoportnál a 120 kg N ha⁻¹ alap + a V6 fenofázisban további 30 kg N ha⁻¹ (V6₁₅₀), míg a FAO 400 éréscsoportnál a 120 kg N ha⁻¹ alap- + 30 +30 kg N ha⁻¹ (V12₁₈₀) kezelés biztosította a 13 éves adatsor elemzése alapján;
- a kidolgozott kombinált SPAD-LAI modell $\hat{y} = b_0 + b_1 \times \text{LAI} + b_2 \times \text{SPAD}$, ahol, $\hat{y}$ = a becsült termés, b_0 = tengely metszet, b_1 = LAI meredeksége, b_2 = SPAD meredeksége, alkalmas a termés-előrejelzésre, az összefüggés a VT szakaszban a legszorosabb ($R^2=0,762$), roncsolásmentesen és költséghatékonyan, még száraz és extrém száraz években is;
- az öntözés alkalmazása növelte a SPAD értékeket, az UAV-alapú NDVI értékeket és minden kezelésnél jelentősen növelte a kukorica szemtermését;
- a nem öntözött és öntözött körülmények között is az UAV-alapú NDVI érték a V12 (A₁₂₀; 0,703, 0,642) és az utolsó levél (V_n) fenofázisban (A₁₂₀; 0,728, 0,662) volt a legmagasabb, ezért ezekben a szakaszokban ajánlott az UAV-alapú NDVI használata;
- öntözött körülmények között az UAV alapú NDVI spektrumértékek és a N-műtrágyázás, illetve UAV alapú NDVI spektrumértékek és a termés között szorosabb az összefüggés, mint nem öntözött körülmények között.

IRODALOMJEGYZÉK

- Abaza, A.S.D.; Elshamly, A.M.S.; Alwahibi, M.S.; Elshikh, M.S.; Ditta, A. Impact of different sowing dates and irrigation levels on NPK absorption, yield and water use efficiency of maize. *Sci. Rep.* **2023**, *13*, 12956.
- Abdala, L.J.; Gambin, B.L.; Borrás, L. Sowing date and maize grain quality for dry milling. *Eur. J. Agron.* **2018**, *92*, 1–8.
- Abendroth, L.J.; Elmore, R.W.; Boyer, M.J.; Marlay, S.K. Corn growth and development PMR 1009. Iowa State Univ. Ext. Ames: **2011**.
- Aboelghar, M.; Arafat, S.; Abo Yousef, M.; El-Shirbeny, M.; Naeem, S.; Massoud, A.; Saleh, N. Using SPOT Data and Leaf Area Index for Rice Yield Estimation in Egyptian Nile Delta. *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.* **2011**, *14*, 81–89.
- Adamo, N.; Al-Ansari, N.; Sissakian, V.; Fahmi, K.J.; Abed, S.A. Climate Change: Droughts and Increasing Desertification in the Middle East, with Special Reference to Iraq. *Engineering.* **2022**, *14*, 235–273.
- Afuakwa, J.J.; Crookston, R.K.; Jones, R.J. Effect of temperature and sucrose availability on kernel black layer development in maize. *Crop Science.* **1984**, *24*, 285–288.
- Aguirrezábal, L.; Martre, P.; Pereyra-Irujo, G.; Echarte, M.M.; Izquierdo, N. Chapter 17 – Improving grain quality: ecophysiological and modeling tools to develop management and breeding strategies. [In: Sadras, V.O.; Calderini, D.F. (eds.) *Crop Physiology* (Second Edition).] Academic Press, **2015**, 423–465.
- Ahmad, N.; Malagoli, M.; Wirtz, M.; Hell, R. Drought stress in maize causes differential acclimation responses of glutathione and sulfur metabolism in leaves and roots. *BMC Plant Biology.* **2016**, *16*, 247, 1–15.
- Ahmad, S.; Wang, G.Y.; Muhammad, I.; Chi, Y.X.; Zeeshan, M.; Nasar, J.; Zhou, X.B. Interactive Effects of Melatonin and Nitrogen Improve Drought Tolerance of Maize Seedlings by Regulating Growth and Physiochemical Attributes. *Antioxidants (Basel).* **2022**, *11*, 2, 359.
- Ahmed, P.; Saikia, M. Influence of sowing dates for higher productivity of Rabi maize – A Review. *Int. J. Recent Sci. Res.* **2020**, *11*, 4, 38267–38271.
- Akman, Z. Comparison of high temperature tolerance in maize, rice and sorghum seeds, by plant growth regulators. *J. Anim. Vet. Adv.* **2009**, *8*, 358–361.
- Ali, Q.; Ashraf, M.; Anwar, F. Seed Composition and Seed Oil Antioxidant Activity of Maize Under Water Stress. *J. Am. Oil Chem. Soc.* **2010**, *87*, 1179–1187.
- Allen, D.J.; Ort, D.R. Impact of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. *Trends Plant Sci.* **2001**, *6*, 36–42.
- Alley, M.M.; Martz, Jr.; Marvin, E.; Davis Paul, H.; Hammons, J.L. Nitrogen and Phosphorous Fertilization of Corn. Virginia Cooperative Extension – Virginia Tech and Virginia State University. **2009**.
- Almeida, G.D.; Nair, S.; Borém, A.; Cairns, J.; Trachsel, S.; Ribaut, J.M.; Bänziger, M.; Prasanna, B.M.; Crossa, J.; Babu, R. Molecular mapping across three populations reveals a QTL hotspot region on chromosome 3 for secondary traits associated with drought tolerance in tropical maize. *Molecular Breeding.* **2014**, *34*, 2, 701–715.
- Amgain, L.P. Accumulated heat unit and phenology of diverse maize varieties as affected by planting dates under Rampur condition, Nepal. *Agronomy Journal of Nepal.* **2011**, *2*, 111–120.
- Anas, M.; Liao, F.; Verma, K.K.; Sarwar, M.A.; Mahmood, A.; Chen, Z.L.; Li, Q.; Zeng, X.P.; Liu, Y.; Li, Y.R. Fate of nitrogen in agriculture and environment: agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency. *Biological Research.* **2020**, *53*, 1, 47.
- Anda A. A kukorica néhány sugárzás, hő- és vízháztartási komponensének alakulása a N-ellátottság függvényében. *Növénytermelés.* **1987**, *36*, 3, 161–170.
- Andrade, M.A.F.; Ramos-Cairo, P.A.; Santos, J.L. Water relations and photosynthesis of young coffee plants under two water regimes and different N and K doses. *Agrociencia.* **2015**, *49*, 2, 153–161.
- Andresen, J.A.; Alagarswamy, G.; Ritchie, J.T.; Rotz C.A.; LeBaron, A.W. Assessment of the impact of weather on maize, soybean, and alfalfa production in the Upper Great Lakes Region of the United States, 1895–1996. *Agron. J.* **2001**, *93*, 1059–1070.
- Anjum, S.A.; Ashraf, U.; Tanveer, M.; Khan, I.; Hussain, S.; Shahzad, B.; Zohaib, A.; Abbas, F.; Saleem, M.F.; Ali, I.; Wang, L.C. Drought Induced Changes in Growth, Osmolyte Accumulation and Antioxidant Metabolism of Three Maize Hybrids. *Front. Plant Sci.* **2017**, *8*, 69.
- Anjum, S.A.; Xie, X.Y.; Wang, L.C.; Saleem, M.F.; Man, C.; Lei, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *Afr. J. Agric. Res.* **2011**, *6*, 9, 2026–2032.
- Árendás T. A kukoricatermesztés korlátairól és lehetőségeiről. *Magyar Mezőgazdaság.* Száron szárítva. **2000**, 6–7.
- Árendás, T.; Bónis, P.; Micskei, Gy.; Sugár, E.; Szőke, Cs.; Marton, L.Cs.; Berzsenyi, Z. A kukorica termésreakciója és termésstabilitása N-trágyázási tartamkísérletekben (Yield reaction and yield stability of maize in N-fertilization duration experiments). [In: Pepó, P.; Csajbók, J. (eds.) XIIIth congress of the European Society for Agronomy (ESA): Book of abstracts.] University of Debrecen, Debrecen, **2014**, 23–28.
- Asghari, M.; Hanson, R.G. Climate, management and N effect on corn leaf N, yield and grain N. *Agronomy J.* **1984**, *76*, 911–916.

- Avramova, V.; AbdElgawad, H.; Zhang, Z.F.; Fotschki, B.; Casadevall, R.; Vergauwen, L.; Knapen, D.; Taleisnik, E.; Guisez, Y.; Asard, H.; Beemster, G.T.S. Drought induces distinct growth response, protection, and recovery mechanisms in the maize leaf growth zone. *Plant Physiology*. **2015**, 169, 1382–1396.
- Babnik, D.; Sušin, J.; Verbič, J.; The effect of nitrogen fertilization of maize on protein concentration and *in vitro* fermentability of grain. *J. Cent. Eur. Agric.* **2002**, 3, 3, 159–168.
- Badu-Apraku, B.; Fakorede, M.A B.; Menkir, A.; Kamara, A.Y.–Dapaah, S. Screening maize for drought tolerance in the Guinea savanna of West and Central Africa. *Cereal Res. Commun.* **2005**, 33, 533–540.
- Baenziger, P.S.; Shelton, D.R.; Shipman, M.J.; Graybosch, R.A. Breeding for end-use quality: reflections on the Nebraska experience. *Euphytica*. **2001**, 119, 95–100.
- Bai, H.; Purcell, L.C. Evaluation of Soybean Greenness from Ground and Aerial Platforms and the Association with Leaf Nitrogen Concentration in Response to Drought. *Crop Sci.* **2019**, 59, 6, 2763–73.
- Barlow, E.W.R.; Boersma, L.; Young, J.L. Photosynthesis, transpiration, and leaf elongation in corn seedlings at suboptimal soil temperatures. *Agron. J.* **1977**, 69, 95–100.
- Barnabás, B.; Jäger, K.; Fehér, A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ.* **2008**, 31, 11–38.
- Barrera-Arellano, D.; Badan-Ribeiro, A.P.; Serna-Saldivar, S.O. Corn oil: composition, processing, and utilization. [In: Serna-Saldivar, S.O. (ed.) Corn.] AACC International Press, Amsterdam, **2019**, 593–613.
- Barron, J.; Rockstrom, J.; Gichuki, F.; Hatibu, N. Dry Spell Analysis and Maize Yields for Two Semiarid Locations in East Africa. *Agric. For. Meteorol.* **2003**, 117, 23–37.
- Bartels, D.; Sunkar, R. Drought and salt tolerance in plants. *Plant Science*. **2005**, 24, 23–58.
- Bartholy, R. Mészáros, I. Geresdi, I. Matyasovszky, R. Pongrácz, T. Weidinger, Meteorológiai alapismeretek. ELTE. https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0073_meteorologia_alapismeretek/adatok.html **2013**.
- Barutçular, C.; Dizlek, H.; El-Sabagh, A.; Sahin, T.; Elsabagh, M.; Islam, M.S. Nutritional quality of maize in response to drought stress during grain-filling stages in mediterranean climate condition. *J. Exp. Biol. Agric. Sci.* **2016**, 4, 644–652.
- Bavec, F.; Bavec, M. Effects of plant population on leaf area index, cob characteristics and grain yield of early maturing maize cultivars (FAO 100–400). *Eur. J. Agron.* **2002**, 16, 151–159.
- Bencze, G.; Futó, Z. Examination of relative chlorophyll content, leaf area and yield in monoculture long-term experiment of maize in 2016. *Research Journal of Agricultural Science*. **2018**, 50, 3, 50–57.
- Berdjour, A.; Dugje, I.Y.; Rahman, N.A.; Odoom, D.A.; Kamara, A.Y.; Ajala, S. Direct Estimation of Maize Leaf Area Index as Influenced by Organic and Inorganic Fertilizer Rates in Guinea Savanna. *J Agric Sci.* **2020**, 12, 6. 66–76.
- Berzsenyi Z. A műtrágyázás hatása a kukorica (*Zea mays* L.) növekedésének és növekedési jellemzőinek dinamikájára. *Növénytermelés*. **1988**, 37, 6, 527–540.
- Berzsenyi Z. A növényszám hatása a kukorica (*Zea mays* L.) növekedésének és növekedési jellemzőinek dinamikájára I. (Levélterület-index (LAI), levélterület tartóssága (LAD) és levélterület arány (LAR)). *Növénytermelés*. **1989**, 38, 5, 395–407.
- Berzsenyi Z. A N-műtrágyázás és az évjárat hatása a kukoricahibridek (*Zea mays* L.) szemtermésére és N-műtrágyareakciójára tartamkísérletekben az 1970–1991. években. *Növénytermelés*. **1993**, 42, 1, 49–63.
- Berzsenyi Z. A N-műtrágyázás hatásának vizsgálata a kukorica (*Zea mays* L.) növekedésére Hunt-Parsons modellel. *Növénytermelés*. **1996**, 45, 1, 35–52.
- Berzsenyi Z. Kukorica. [In: Radics L. (szerk.) Fenntartható szemléletű szántóföldi növénytermesztéstan 2.] Agroinform Kiadó, Budapest, **2012**, 11–101.
- Berzsenyi Z. Fenntartható növénytermesztés: Környezeti és termésreakciók, precíziós alkalmazások. Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Gödöllő, **2024**, 533.
- Berzsenyi, Z.; Árendás, T.; Bónis, P.; Micskei, G.; Sugár, E. Long-term effect of crop production factors on the yield and yield stability of maize (*Zea mays* L.) in different years. *Acta Agr. Hung.* **2011**, 59, 3, 191–200.
- Berzsenyi Z.; Györfly B. Különböző növénytermesztési tényezők hatása a kukorica termésére és termésstabilitására. *Növénytermelés*. **1995**, 44, 5–6, 507–517.
- Berzsenyi Z.; Lap D.Q. A kukorica N-ellátottságának monitoringja SPAD-502 típusú klorofillmérővel. *Martonvásár*. **2001a**, 13, 1, 7.
- Berzsenyi Z.; Lap, D. Q. A vetésidő és a N- műtrágyázás hatása a kukorica (*Zea mays* L.) hibridek termésére és termésstabilitására 1991–2000 között. *Növénytermelés*. **2001b**, 50, 2–3, 309–331.
- Berzsenyi Z.; Lap, D. Q. Kukorica (*Zea mays* L.) hibridek vetésidő-, N-műtrágya- és növényszám reakciója eltérő évjáratokban. [In: Nagy J. (szerk.) Kukorica hibridek adaptációs képessége és termésbiztonsága.] Debrecen, **2005a**, 74–90.
- Berzsenyi, Z.; Lap, D. Q. Responses of maize (*Zea mays* L.) hybrids to sowing date, N fertiliser and plant density in different years. *Acta Agr. Hung.* **2005b**, 53, 2, 119–131.
- Berzsenyi, Z.; Lap, D.Q. Effect of sowing date and N fertilisation on the yield and yield stability of maize (*Zea mays* L.) hybrids in a long-term experiment. *Acta Agr. Hung.* **2008**, 56, 3, 247–264.

- Berzsenyi, Z.; Ragab, A.Y.; Dang, Q.L. A vetésidő hatása a kukorica hibridek növekedésének dinamikájára 1995-ben és 1996-ban. *Növénytermelés*. **1998**, 47, 2, 165–180.
- Bharati, V.; Nandan, R.; Kumar, V.; Kumar, S.B. Effect of irrigation on yield, water-use efficiency and water requirement of winter maize (*Zea mays* L.)-based intercropping systems. *Environment and Ecology*. **2007**, 25, 888–892.
- Bhat, M.A.; Kumar, V.; Bhat, M.A.; Wani, I.A.; Dar, F.L.; Farooq, I.; Bhatti, F.; Koser, R.; Rahman, S.; Jan, A.T. Mechanistic Insights of the Interaction of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) With Plant Roots Toward Enhancing Plant Productivity by Alleviating Salinity Stress. *Front Microbiol.* **2020**, 11, 1952.
- Bihari, Z.; Babolcsai, Gy.; Bartholy, J.; Ferenczi, Z.; Gerhátné, Kerényi J.; Haszpra, L.; Homokiné, Ujváry K.; Kovács, T.; Lakatos, M.; Németh, Á.; Pongrácz, R.; Putsay, M.; Szabó, P.; Szépszó, G. Éghajlat.[In: Kocsis, K. (chief editor.); Horváth, G.; Keresztesi, Z.; Nemerkenyi, Zs. (eds.) Magyarország nemzeti atlasza.] 2. kötet. Természeti környezet, Budapest, Magyarország, MTA CSFK Földrajztudományi Intézet, **2018**, 58–69.
- Binder, D.L.; Sander, D.H.; Walters, D.T. Maize response to time of N application as affected by level of N deficiency. *Agron. J.* **2000**, 92, 1228–1236.
- Birch, C.J.; Hammer, G.L.; Rickert, K.G. Temperature and photoperiod sensitivity of development in five cultivars of maize (*Zea mays* L.) from emergence to tassel initiation. *Field Crops Res.* **1998**, 55, 1–2, 93–107.
- Bista, D.R.; Heckathorn, S.A.; Jayawardena, D.M.; Mishra, S.; Boldt, J.K. Effects of Drought on Nutrient Uptake and the Levels of Nutrient-Uptake Proteins in Roots of Drought-Sensitive and -Tolerant Grasses. *Plants (Basel)*. **2018**, 7, 2, 28.
- Blackmer T. M.; Schepers J. S. Aerial Photography to Detect Nitrogen Stress in Corn. *J. Plant Physiol.* **1996**, 148, 440–444.
- Blackmer, T.M.; Schepers, J.S. Use of a Chlorophyll Meter to Monitor Nitrogen Status and Schedule Fertigation for Corn. *Journal of Production Agriculture*. **1995**, 8, 1, 56–60.
- Bocz E. Trágyázási útmutató. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, **1976**.
- Bocz E. Szántóföldi növénytermesztés. Mezőgazda Kiadó, Budapest. **1981**, 887.
- Bocz E.; Kovács A.; Ruzsányi L.; Szabó M. Kukorica. [In: Bocz E. et al. (szerk.) Szántóföldi Növénytermesztés.] Mezőgazda Kiadó, Budapest, **1992**, 361–413.
- Bocz E.; Nagy J. A kukorica víz- és tápanyagellátásának optimalizálása és hatása a termés tömegére. *Növénytermelés*. **1981**, 30, 6, 539–549.
- Bojtor, C.; Illés, Á.; Nasir Mousavi, S.M.; Széles, A.; Tóth, B.; Nagy, J.; Marton, C.L. Evaluation of the Nutrient Composition of Maize in Different NPK Fertilizer Levels Based on Multivariate Method Analysis. *International Journal of Agronomy*. **2021**, 5537549.
- Bonhomme, R. Bases and limits to using 'degree.day' units. *Eur. J. Agron.* **2000**, 13, 1–10.
- Bouguettaya, A.; Zarzour, H.; Kechida, A.; Taberkit, A.M. Deep learning techniques to classify agricultural crops through UAV imagery: a review. *Neural Comput Appl.* **2022**, 34, 12, 9511–9536.
- Boursianis, A.D.; Papadopoulou, M.S.; Diamantoulakis, P.; Liopa-Tsakalidi, A.; Barouchas, P.; Salahas, G.; Karagiannidis, G.; Wan, S.; Goudos, S.K. Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. *Internet of Things*. **2022**, 18, 100187.
- Bouzo, C.A.; Favaro, J.C. Comparison of heat-unit methods to predict tomato anthesis. *International Journal of Experimental Botany*. **2014**, 83, 167–170.
- Boyer, C.; Larson, J.; Roberts, R.; McClure, A.; Tyler, D. The impact of field size and energy cost on the profitability of supplemental corn irrigation. *Agricultural Systems*. **2014**, 127, 61–69.
- Bradford, K.J.; Hsiao, T.C. Stomatal behavior and water relations of waterlogged tomato plants. *Plant Physiol.* **1982**, 70, 1508–1513.
- Bragagnolo, J.; Amado, T.J.C.; Nicoloso, R.S.; Jasper, J.; Kunz, J.; Teixeira, T. G. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: I. Plant nutrition and dry matter production. *R. Bras. Ci. Solo*. **2013**, 37, 1288–1298.
- Breteler, H. Nitrogen fertilisation, yield and protein quality of a normal and high-lysine maize variety. *J. Sci. Food Agr.* **1976**, 27, 978–982.
- Brevedan, R.E.; Egli, D.B. Short period of water stress during seed filling, leaf senescence, and yield of soybean. *Crop Sci.* **2003**, 43, 2083–2088.
- Brisco, B.; Brown, R.; Hirose, T.; McNairn, H.; Staenz, K. Precision agriculture and the role of remote sensing: a review. *Can. J. Remote Sens.* **1998**, 24, 315–327.
- Bruce, B.W.; Gregory, O.E.; Barker, T.C. Molecular and physiological approaches to maize improvement for drought tolerance. *J. Exp. Bot.* **2002**, 53, 13–25.
- Bruns, H.A. Controlling aflatoxin and fumonisin in maize by crop management. *Journal of Toxicology: Toxin Reviews*. **2003**, 22, 2–3, 153–173.
- Butts-Wilmsmeyer, C.J.; Seebauer, J.R.; Singleton, L.; Below, F.E. Weather during key growth stages explains grain quality and yield of maize. *Agronomy*. **2019**, 9, 1, 1–16.

- Cairns, J.E.; Crossa, J.; Zaidi, P.H.; Grudloyma, P.; Sanchez, C.; Araus, J.L.; Thaitad, S.; Makumbi, D.; Magorokosho, C.; Bänziger, M.; Menkir, A.; Hearne, S.; Atlin, G.N. Identification of drought, heat, and combined drought and heat tolerant donors in maize (*Zea mays* L.) *Crop Sci.* **2013**, *53*, 1335–1346.
- Çakir, R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops Res.* **2004**, *89*, 1, 1–16.
- Cameron, K.; Di, H.J.; Moir, J. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. *Ann. Appl. Biol.* **2013**, *162*, 145–173.
- Campos-Taberner, M.; García-Haro, F.J.; Camps-Valls, G.; Grau-Muedra, G.; Nutini, F.; Crema, A.; Boschetti, M. Multitemporal and multiresolution leaf area index retrieval for operational local rice crop monitoring. *Remote Sens Environ.* **2016**, *187*, 102–118.
- Cassman, K.G.; Dobermann, A.; Walters, D.T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: J. Hum. Env.* **2002**, *31*, 132–140.
- Cassman, K.G.; Dobermann, A.; Walters, D.T.; Yang, H. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2003**, *28*, 315–358.
- Cassman, K. G.; Dobermann, A. Nitrogen and the future of agriculture: 20 Years on. *Ambio.* **2022**, *51*, 1, 17–24.
- Caubel, J.; de Cortazar-Atauri, I.G.; Vivant, A.; Launay, M.; de Noblet-Ducoudré, N. Assessing future meteorological stresses for grain maize in France. *Agric. Syst.* **2018**, *159*, 237–247.
- Caviglia, O.P.; Melchiori, R.J.M.; Sadras, V.O. Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late-sown crops. *Field Crops Res.* **2014**, *168*, 27–37.
- Charalampopoulos, I. Agrometeorological conditions and agroclimatic trends for the maize and wheat crops in the balkan region. *Atmosphere.* **2021**, *12*, 6, 1–24.
- Chen, J.; Wang, G.; Hamani, A.K.M.; Amin, A.S.; Sun, W.; Zhang, Y.; Liu, Z.; Gao, Y. Optimization of Nitrogen Fertilizer Application with Climate-Smart Agriculture in the North China Plain. *Water.* **2021**, *13*, 3415.
- Chen, J.; Xu, W.; Velten, J.; Xin, Z.; Stout, J. Characterization of maize inbred lines for drought and heat tolerance. *J. Soil Water Conserv.* **2012**, *67*, 354–364.
- Cheng, Q.; Xu, H.; Fei, S.; Li, Z.; Chen, Z. Estimation of Maize LAI Using Ensemble Learning and UAV Multispectral Imagery under Different Water and Fertilizer Treatments. *Agriculture.* **2022**, *12*, 1267.
- Chlorophyll Meter SPAD-502 Instruction Manual. Konica Minolta Sensing, Inc. Plainfield, IL, USA, **1989**.
- Chukwudi, U.P.; Kutu, F.R.; Mavengahama, S. Maize response to combined heat and water stresses under varying growth conditions. *Agronomy J.* **2021**, *113*, 6, 4672–4689.
- Cirilo, A.; Actis, M.; Andrade, F.; Valentinuz, O. Crop management affects dry-milling quality of flint maize kernels. *Field Crop. Res.* **2011**, *122*, 140–150.
- Cirilo, A.G.; Andrade, F.H. Sowing Date and Maize Productivity. I. Crop Growth and Dry Matter Partitioning. *Crop Sci.* **1994**, *34*, 1039–1043.
- Connelly, X.M. The Use of a chlorophyll meter (SPAD-502) for field determinations of red mangrove (*Rhizophora mangle* L.) leaf chlorophyll amount. NASA University Research Centers Technical Advances in Education. Aeronautics, Space, Autonomy, Earth and Environment 1. URC97032. **1997**.
- Cooper, M.; Gho, C.; Leafgren, R.; Tang, T.; Messina, C. Breeding drought tolerant maize hybrids for the US corn-belt: Discovery to product. *J. Exp. Bot.* **2014**, *65*, 21, 6191–6204.
- Correndo, A.A.; Fernandez, J.A.; Vara Prasad, P.V.; Ciampitti, I.A. Do water and nitrogen management practices impact grain quality in maize? *Agronomy.* **2021**, *11*, 9, 1851.
- Coskun, D.; Britto, D.T.; Shi, W.; Kronzucker, H.J. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nature Plants.* **2017**, *3*, 17074.
- Costa, C.; Dwyer, L.M.; Dutilleul, P.; Stewart, D.W.; Ma, B.L.; Smith, D.L.; Inter-Relationships of Applied Nitrogen, Spad, And Yield of Leafy And Non-Leafy Maize Genotypes. *J. Plant Nutr.* **2001**, *24*, 8, 1173–1194.
- Cregger, M.A.; Mcdowell, N.G.; Pangle, R.E.; Pockman, W.T.; Classen, A.T. Impact of precipitation change on nitrogen cycling in a semi-arid ecosystem. *Funct. Ecol.* **2015**, *28*, 1534–1544.
- Croft, H.; Chen, J.M.; Luo, X.Z.; Bartlett, P.; Chen, B.; Staebler, R.M. Leaf chlorophyll content as a proxy for leaf photosynthetic capacity. *Glob Chang Biol.* **2017**, *23*, 3513–3524.
- Cutforth, H.W.; Shaykewich, C.F. Relationship of development rates of corn from planting to silking to air and soil temperature and to accumulated thermal units in a prairie environment. *Can. J. Plant Sci.* **1989**, *69*, 121–132.
- Cutforth, H.W.; Shaykewich, C.F. A temperature response function for corn development. *Agr. Forest Meteorol.* **1990**, *50*, 159–171.
- Csajbók, J.; Buday-Bódi, E.; Nagy, A.; Fehér, Z.Z.; Tamás, A.; Virág, I.C.; Bojtör, C.; Forgács, F.; Vad, A.M.; Kutasy, E. Multispectral Analysis of Small Plots Based on Field and Remote Sensing Surveys-A Comparative Evaluation. *Sustainability.* **2022**, *14*, 6, 3339.
- Csajbók, J.; Kutasy, E.; Hunyadi, Borbélyné É.; Futó, Z.; Jakab, P. Effects of nutrient supply on the photosynthesis of maize hybrids. *Cereal Res. Commun.* **2005**, *33*, 1, 169172.
- Csajbók J.; Virág I.Cs.; Kutasy E. Kukorica genotípusok tesztelési eredményei a Hajdúsági löszháton. [In Csajbók J. (szerk.) A fenntartható növénytermesztés a klímaváltozás tükrében.] Debrecen, 55–62. **2024**.

- Csathó P. Kukorica N-hatásokat befolyásoló tényezők vizsgálata az 1960–2000 között publikált hazai szabadföldi kísérletek adatbázisán. *Agrokémia és Talajtan*. **2003**, 52, 169–184.
- Csathó P.; Lásztity B.; Sarkadi J. Az „évjárat” hatása a kukorica termésére és terméselemeire P-műtrágyázási tartamkísérletben. *Növénytermelés*. **1991**, 40, 4, 339–351.
- Csepregi-Heilmann E.; Áldott-Sipos Á.; Kovács A.; Spitkó T.; Szőke Cs.; Pintér J.; Berzy T.; Kakuszi-Széles A.; Marton L. Cs. XXIX. Növénytermelési Tudományos Napok. [Karsai I.; Pauk J.; Veisz O.; Polgár Zs.; Bóna L. (szerk.). Összefoglaló kötet.] Agrártudományi Kutatóközpont, Mezőgazdasági Intézet, Martonvásár, **2023**, 117.
- Da Ge, T.; Sui, F.G.; Nie, S.; Sun, N.B.; Xiao, H.; Tong, C.L. Differential responses of yield and selected nutritional compositions to drought stress in summer maize grains. *J. Plant Nutr.* **2010**, 33, 1811–1818.
- Da Silva, E.E.; Rojo Baio, F.H.; Ribeiro Teodoro, L.P.; da Silva Junior C.A.; Borges, R.S.; Teodoro, P.E. UAV-multispectral and vegetation indices in soybean grain yield prediction based on *in situ* observation. *Remote Sens. Appl.* **2020**, 18, 100318.
- Da Silva, P.R.F.; Strieder, M.L.; Da Silva-Coser, R.P.; Rambo, L.; Sangoi, L.; Argenta, G.; Da Silva, A.A. Grain yield and kernel crude protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dressing. *Sci. Agric.* **2005**, 62, 5, 487–492.
- Davidson, H.R.; Campbell, C.A. The effect of temperature, moisture and nitrogen on the rate of development of spring wheat as measured by degree days. *Can. J. Plant Sci.* **1983**, 63, 4, 833–846.
- Davies, B.; Coulter, J.A.; Pagliari, P.H. Timing and rate of nitrogen fertilization influence maize yield and nitrogen use efficiency. *PLoS One*. **2020**, 15, 5:e0233674.
- Daynard, T.B. Relationships among black layer formation, grain moisture percentage, and heat unit accumulation in corn. *Agron. J.* **1972**, 64, 716–719.
- Deng, L.; Mao, Z.; Li, X.; Hu, Z.; Duan, F.; Yan, Y. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2018**, 146, 124–136.
- Di Paolo, E.; Rinaldi, M. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* **2008**, 105, 3, 202–210.
- Djurović, D.S.; Madić, M.R.; Bokan, N.R.; Stevović, V.I.; Tomić, D.D.; Tanasković, S.T. Stability parameters for grain yield and its component traits in maize hybrids of different FAO maturity groups. *J. Cent. Eur. Agric.* **2014**, 15, 199–212.
- Dobor, L.; Bareza, Z.; Hlásny, T.; Árendás, T.; Spitkó, T.; Fodor N. Crop planting date matters: estimation methods and effect on future yields *Agric. For. Meteorol.* **2016**, 223, 103–115.
- Dobos A.; Nagy J. Az évjárat és a műtrágyázás hatása (*Zea mays* L.) szárazanyag-termelésére. *Növénytermelés*. **1998**, 47, 5, 513–524.
- Dóka L.F.; Szabó É.; Vad A.; Szabó A. Az öntözés, tápanyagellátás és a vetésváltás kukoricatermés beltartalmára gyakorolt hatásának vizsgálata. [Csajbók J. (szerk.) A fenntartható növénytermesztés a klímaváltozás tükrében.] Debrecen, 63–68. **2024**.
- Dou, X.; Wang, R.; Zhou, X.; Gao, F.; Yu, Y.; Li, C.; Zheng, C. Soil water, nutrient distribution and use efficiencies under different water and fertilizer coupling in an apple–maize alley cropping system in the Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Res.* **2022**, 218, 105308, ISSN 0167-1987.
- Drury, C.F.; Reynolds, W.D.; Yang, X.M.; McLaughlin, N.B.; Welacky, T.W.; Calder, W.; Grant, C.A. Nitrogen Source, Application Time, and Tillage Effects on Soil Nitrous Oxide Emissions and Corn Grain Yields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2012**, 76, 4, 1268–1279.
- Dubey, A.; Kumar, A.; Malla, M.A.; Chowdhary, K.; Singh, G.; Ravikanth, G.; Harish, Sharma, S.; Saati-Santamaria, Z.; Menéndez, E.; Dames, J.F. Approaches for the amelioration of adverse effects of drought stress on crop plants. *Front. Biosci. (Landmark Ed)*. **2021**, 26, 10, 928–947.
- Duvick, D.N.; Cassman, K.G. Post-Green Revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* **1999**, 39, 1622–1630.
- Dwyer, L.M.; Anderson, A.M.; Ma, B.L.; Stewart, D.W.; Tollenaar, M.; Gregorich E. Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration. *Can J Plant Sci.* **1995**, 75, 1, 179–182.
- Earl, H.J.; Tollenaar M. Maize leaf absorptance of photosynthetically active radiation and its estimation using a chlorophyll meter. *Crop Sci.* **1997**, 37, 436–440.
- Edreira, J.R.; Carpici, E.B.; Sammarro, D.; Otegui, M. Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *Field Crops Res.* **2011**, 123, 62–73.
- El-Hallob, N.; Sárvári, M. Effect of sowing time on the yield and the seed moisture content at harvest of maize. [In: Hidvégi, Sz.; Gyuricza Cs. (Eds.), Proceedings of the III. Alps-Adria Scientific Workshop.] Dubrovnik, Croatia, **2004**, 427–431.
- Erenstein, O.; Jaleta, M.; Sonder, K.; Mottaleb, K.; Prasanna, B.M. Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Sec.* **2022**, 14, 1295–1319.
- Evans, L.T.; Fischer, R.A. Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Sci.* **1999**, 39, 1544–1551.
- Fageria, N.K.; Baligar, V.C.; Jones, Ch.A. Growth and mineral nutrition of field crops. Marcel Dekker Inc., New York – Basel – Hong Kong, **1991**, 205.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nation). The future of food and agriculture – Drivers and triggers for transformation. The Future of Food and Agriculture, 3. Rome. **2022**, <https://doi.org/10.4060/cc0959en>
- FAO. (Food and Agriculture Organization of the United Nation). Cereal markets to remain well supplied in 2020/21. **2020**, <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csd/en/>
- FAOStat. FAO, Rome. **2018, 2021, 2024**. <http://www.fao.org/faostat>
- Fard, S.K.; Soleymani, A.; Javanmard, H. Plant growth regulators affecting maize leaf senescence and area index impact yield under drought. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* **2023**, *51*, 102749.
- Fernandez, J.A.; DeBruin, J.; Messina, C.D.; Ciampitti, I.A. Late-season nitrogen fertilization on maize yield: A meta-analysis. *Field Crops Res.* **2020**, *247*, 107586.
- Feroz, F.; Riaz, H.; Amjid, M.; Ahmad, A.; Majeed, M.D.; Rehman, A.U.; Iqbal, J.; Alharbi, S.A.; Ansari, M.J.; Qayyum, A. Ameliorating the response of slow-releasing nitrogen fertilizer on sustainable maize growth. *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca.* **2024**, *52*, 3, 13645.
- Fieuzal, R.; Marais Sicre, C.; Baup, F. Estimation of corn yield using multi-temporal optical and radar satellite data and artificial neural networks. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2017**, *57*, 14–23.
- Flint-Garcia, S.A.; Bodnar, A.; Scott, M.P. Wide variability in kernel composition, seed characteristics, and zein profiles among diverse maize inbreds, landraces, and teosinte. *Theor. Appl. Genet.* **2009**, *119*, 1129–114.
- Fodor, N. 4Mx Soil-Plant Model: Applications, opportunities and challenges. *Agricultural Informatics.* **2012**, *3*, 2, 50–60.
- Foss NIRSystems. Vision® Manual: Theory, Part No. NR-2194. **2000**, 3–14.
- Frank O. A talaj tápanyagellátásának hatása a vízhasznosulásra. *Agrártudományi Közl.* **1969**, *28*, 109–122.
- Futó Z. Különböző kukoricahibridek szárazság- és sötétürése a klímaváltozás tükrében. [In: Csajbók J. (szerk.) A fenntartható növénytermesztés a klímaváltozás tükrében.] Debrecen, 75–82. **2024**.
- Futó Z.; Ollai I.; Bencze G. Különböző kukoricahibridek vízfelhasználásának tesztelése eltérő években. [In: Jakab G.; Tóth A.né; Csengeri E. (szerk.) Alkalmazkodó Vízgazdálkodás: Lehetőségek és kockázatok.] Víz tudományi Nemzetközi Konferencia, Szarvas, Szent István Egyetem Agrár- és Gazdaságtudományi Kar. **2018**, 44–50.
- Futó, Z.; Sárvári, M. Effect of sowing date on the yield of maize (*Zea mays* L.) in different years. *Crop Production.* **2003**, *52*, 5, 543–558.
- Gabriel, J.L.; Quemada, M.; Alonso-Ayuso, M.; Lizaso, J.I.; Martín-Lammerding, D. Predicting N status in maize with clip sensors: Choosing sensor, leaf sampling point, and timing. *Sensors (Basel).* **2019**, *19*, 18, 3881.
- Gaj, R.; Szulc, P.; Siatkowski, I.; Waligóra, H. Assessment of the Effect of the Mineral Fertilization System on the Nutritional Status of Maize Plants and Grain Yield Prediction. *Agriculture.* **2020**, *10*, 9.
- Gajdos É.; Végh A.; Ványiné Széles A.; Víg R. A vetésidő és az évjárat hatása a kukorica termésére és a betakarításkori szemnedvességre. [In: Marton L.Cs.; Spitkó T. (szerk.) 60 éves a magyar hibridkukorica.] Martonvásár, **2013**, 53–56.
- Gallagher, J.N. Field studies of cereal leaf growth: I. Initiation and expansion in relation to temperature and ontogeny. *J. Exp. Bot.* **1979**, *30*, 117, 625–636.
- Gammans, M.; Mérel, P.; Ortiz-Bobea, A. Negative impacts of climate change on cereal yields: statistical evidence from France. *Environ. Res. Lett.* **2017**, *12*, 054007.
- Gastal F.; Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *J. Exp. Bot.* **2002**, *53*, 370, 789–799.
- Gastal, F.; Lemaire, G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective, *J. Exp. Bot.* **2002**, *53*, 370, 789–799.
- Georgakakos, A.; Fleming, P.; Dettinger, M.; Peters-Lidard, C.; Richmond, Terese (T.C.); Reckhow, K.; White, K.; Yates, D. Ch. 3: Water Resources. Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment. J. M. Melillo, Terese (T.C.), Richmond, G. W. Yohe (eds.), U.S. Global Change Research Program. **2014**, 69–112.
- Ghimire, B.; Timsina, D.; Nepal, J. Analysis of chlorophyll content and its correlation with yield attributing traits on early varieties of maize (*Zea mays* L.) *Journal of Maize Research and Development.* **2015**, *1*, 1, 134–145.
- Gilmore, E.C.; Rogers, J.S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agronomy J.* **1958**, *50*, 10, 611–615.
- Girijesh, G.K.; Kumara, A.S.; Sridhara, S.; Dinesh Kumar, M.; Vageesh, T.S.; Nataraju, S.P. Heat use efficiency and helio-thermal units for maize genotypes as influenced by dates of sowing under southern transitional zone of Karnataka state. *Int. J. Sci. Nat.* **2011**, *2*, 3, 529–533.
- Gitelson, A. A.; Andrés, V.; Arkebauer, T. J.; Rundquist, D. C.; Galina, K.; Bryan, L. Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies. *Geophys Res Lett.* **2003**, *30*, 335–343.
- Gombos B.; Nagy J. Az időjárás értékelése kukorica (*Zea mays* L.) tartamkísérletek eredményei alapján. *Növénytermelés.* **2019**, *69*, 2, 5–23.
- Gong, F.; Yang, L.; Tai, F.; Hu, X.; Wang, W. “Omics” of maize stress response for sustainable food production: opportunities and challenges. *Omics J. Integr. Biol.* **2014**, *18*, 714–732.
- Gonzalez-Dugo, V. Durand, J.L.; Gastal, F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **2010**, *30*, 3, 529–544.

- Gower, S.T.; Kucharik, C.J.; Norman, J.M. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sens. Environ.* **1999**, *70*, 29–51.
- Grant, R.F.; Jackson, B.S.; Kiniry, J.R.; Arkin, G.F. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agron. J.* **1989**, *81*, 1, 61–65.
- Grassini, P.; Thorburn, J.; Burr, C.; Cassman, K.G. High-yield irrigated maize in the Western US Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. *Field Crops Res.* **2011**, *120*, 142–150.
- Grote, U.; Fasse, A.; Nguyen, T.T.; Erenstein, O. Food Security and the Dynamics of Wheat and Maize Value Chains in Africa and Asia. *Front Sustain. Food Syst.* **2021**, *4*, 617009.
- Guna, A.; Zhang, J.; Tong, S.; Bao, Y.; Han, A.; Li, K. Effect of Climate Change on Maize Yield in the Growing Season: A Case Study of the Songliao Plain Maize Belt. *Water.* **2019**, *11*, 10, 2108.
- Guo, J.; Fan, J.; Xiang, Y.; Zhang, F.; Yan, S.; Zhang, X.; Zheng, J.; Li, Y.; Tang, Z.; Li, Z. Coupling effects of irrigation amount and nitrogen fertilizer type on grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of drip-irrigated maize. *Agric. Water Manag.* **2022**, *261*, 107389.
- Guo, J.; Fan, J.; Xiang, Y.; Zhang, F.; Yan, S.; Zhang, X.; Zheng, J.; Hou, X.; Tang, Z.; Li, Z. Maize leaf functional responses to blending urea and slow-release nitrogen fertilizer under various drip irrigation regimes, *Agric. Water Manag.* **2022**, *262*, 107396.
- Györfy B. A kukorica termésére ható növénytermesztési tényezők értékelése. *Agrártudományi Közl.* **1976**, *35*, 1–3, 239–266.
- Györfy B.; I'só I.; Bölöni I. Kukoricatermesztés. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, **1965**.
- Györi Z. Az évjárat, a műtrágyázás és az öntözés hatása főbb szántóföldi növényeink tápelemtartalmára és minőségére. Kandidátusi értekezés, Debrecen, **1987**.
- Györi Z.; Sipos P. Kukoricahibridek minőségének változása agrotechnikai kísérletben. [In: Nagy, J (szerk.) Kukorica hibridek adaptációs képessége és termésbiztonsága: A kukoricakutatás és fejlesztés 30 éve.] Debrecen, Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum. **2005**, 101–115.
- Habibzadeh, F.; Sorooshzadeh, A.; Pirdashti, H.; Modarres-Sanavy, S.A.M. Alleviation of waterlogging damage by foliar application of nitrogen compounds and tricyclazole in canola. *Aust. J. Crop Sci.* **2013**, *7*, 401.
- Haider, S.A.; Alam, M.Z.; Alam, F.M.; Paul, N.K. Influence of different sowing dates on the phenology and accumulated heat units in wheat. *J Biol Sci.* **2003**, *3*, 932–939.
- Halford, N.G.; Curtis, T.Y.; Chen, Z.W.; Huang, J. H. Effects of abiotic stress and crop management on cereal grain composition: implications for food quality and safety. *J. Exp. Bot.* **2015**, *66*, 1145–1156.
- Hall, D.O.; Scurlock, J.M.O.; Bolhar-Nordenkamp, H.R.; Leegood, R.C.; Long, S.P. Photosynthesis and production in a changing environment. Chapman & Hall, London, **1994**.
- Hammad, H.M.; Ahmad, A.; Khaliq, T.; Farhad, W.; Mubeen, M. Optimizing rate of nitrogen application for higher yield and quality in maize under semiarid environment. *Crop and Environment.* **2011**, *2*, 1, 38–41.
- Hammad, H.M.; Abbas, F.; Ahmad, A.; Farhad, W.; Wilkerson, C.J.; Hoogenboom, G. Water and nitrogen management influence on oil and protein concentration in maize. *Agronomy J.* **2023**, *2*, 557–568.
- Hanway, J.J.; Russel, W.A. Dry-matter accumulations in corn (*Zea mays* L.) plants: Comparisons among singlecross hybrids. *Agronomy J.* **1969**, *61*, 947–951.
- Hao, B.; Xue, Q.; Marek, T.H.; Jessup, K.E.; Hou, X.; Xu, W.; Bynum, E.D.; Bean, B.W. Radiation-use efficiency, biomass production, and grain yield in two maize hybrids differing in drought tolerance. *J. Agron. Crop Sci.* **2016**, *202*, 269–280.
- Harmati I. Tápanyagellátás. [In: Barabás Z. (szerk.) A búzatermesztés kézikönyve.] Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, **1987**, 351–365.
- Harnos, Zs. Climate change and some impact on the environment and agriculture modelling case study, „Klíma-21” Brochures. **2008**, *55*, 5–23.
- Harsányi, E.; Bashir, B.; Alsilibe, F.; Alsafadi, K.; Alsalman, A.; Széles, A.; Rahman, M.; Bacskai, I.; Juhász, C.; Rátonyi, T.; Mohammed, S. Impact of Agricultural Drought on Sunflower Production across Hungary. *Atmosphere.* **2021**, *12*, 10, 1–18.
- Harsányi, E.; Bashir, B.; Arshad, S.; Ocwa, A.; Vad, A.; Alsalman, A.; Bacskai, I.; Rátonyi, T.; Hijazi, O.; Széles, A.; Mohammed, S. Data Mining and Machine Learning Algorithms for Optimizing Maize Yield Forecasting in Central Europe. *Agronomy.* **2023**, *13*, 1297.
- Hasaneen, M.N.A.; Younis, M.E.; Toyrky, S.M.N. Plant growth, metabolism and adaptation in relation to stress conditions xxiv. Salinity-biofertility interactive effects on growth, carbohydrates and photosynthetic efficiency of *Lactuca sativa*. *Plant Omics.* **2009**, *2*, 60–69.
- Hatfield, J.L.; Boote, K.J.; Kimball, B.A.; Ziska, L.H.; Izaurralde, R.C.; Ort, D.; Thomson, A.M.; Wolfe, D.W. Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agron. J.* **2011**, *103*, 351–370.
- Hatfield, J.L.; Prueger, J.H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes.* **2015**, *10*, PartA, 4–10.
- Hayashi, T. Varietal difference in the effects of low temperature on tassel development in hybrid maize. *Plant Prod. Sci.* **2016**, *19*, 230–237.

- Hayhoe, H.N.; Dwyer, L.M. Relationship between percentage emergence and growing degree days for corn. *Can. J. Soil Sci.* **1990**, *70*, 493–497.
- Hayhoe, H.N.; Dwyer, L.M.; Stewart, D.W.; White, R.P.; Culley, J.L.B. Tillage, hybrid and thermal factors in corn establishment in cool soils. *Soil Tillage Res.* **1996**, *40*, 39–54.
- He, H.; Hu, Q.; Li, R.; Pan, X.; Huang, B.; He, Q. Regional gap in maize production, climate and resource utilization in China. *Field Crops Res.* **2020**, *254*, 107830.
- He, M.; Dijkstra, F.A. Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: A meta-analysis. *New Phytol.* **2014**, *204*, 924–931.
- Hegyi, Z.; Árendás, T.; Pintér, J.; Marton, L. C. Evaluation of the grain yield and quality potential of maize hybrids under low and optimum levels. *Cereal Res. Commun.* **2008**, *36*, 1263–1266.
- Hegyi, Z.; Berzy, T. Effect of abiotic stress factors on the yield quantity and quality of maize hybrids. *Cereal Res. Commun.* **2009**, *37*, 233–236.
- Hegyi, Z.; Pok, I.; Pinter, J. Chemical quality parameters of maize hybrids in various FAO maturity groups as correlated with yield and yield components. *Acta Agr. Hung.* **2007**, *55*, 217–225.
- Hejazi, L.; Soleymani, A. Effect of different amounts of nitrogen fertilizer on grain yield of forage corn cultivars in Isfahan. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research.* **2014**, *2*, 3, 608–614.
- Hemathilake, D.M.K.S.; Gunathilake, D.M.C.C. Chapter 32 - High-productive agricultural technologies to fulfill future food demands: Hydroponics, aquaponics, and precision/smart agriculture. [In: Bhat, R. (ed.) *Future Foods*. Academic Press. **2022**, 555–567.
- Hoffmann, S.; Berecz, K.; Lepossa, A.; Tóth, Z. Yield ability of maize genotypes under extreme high water deficiency. *Növénytermelés.* **2012**, *61*, 141–144.
- Holou, R.A.Y.; Kindomihou, V. Impact of nitrogen fertilization on the oil, protein, starch, and ethanol yield of corn (*Zea mays* L.) grown for biofuel production. *Journal of Life Sciences.* **2011**, *5*, 1013–1021.
- Hörtensteiner, S.; Kräutler, B. Chlorophyll breakdown in higher plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics.* **2011**, *1807*, 8, 977–988.
- Hu, Q.; Buyanovsky, G. Climate effects on corn yield in Missouri. *J. Appl. Meteorol.* **2003**, *42*, 1626–1635.
- Hu, T.; Kang, S.; Yuan, L.; Zhang, F.; Li, Z. Effects of partial root-zone irrigation on growth and development of maize root system. *Acta. Ecolo. Sinica.* **2008**, *28*, 6180–6188.
- Huang, C.S.W. Duiker, L. Deng, C.F., Zeng, W. Influence of Precipitation on Maize Yield in the Eastern United States. *Sustainability.* **2015**, *7*, 5, 5996–6010.
- Hund, A.; Richner, W.; Soldati, A.; Fracheboud, Y.; Stamp, P. Root morphology and photosynthetic performance of maize inbred lines at low temperature. *Eur. J. Agron.* **2007**, *27*, 52–61.
- Hunt, E.R., Jr.; Hively, W.D.; Fujikawa, S.; Linden, D.; Daughtry, C.S.; McCarty, G. Acquisition of NIR-Green-Blue Digital Photographs from Unmanned Aircraft for Crop Monitoring. *Remote Sens.* **2010**, *2*, 290–305.
- Hunt, R.; Parsons, I.T. A computer program for driving growth-functions in plant growth analysis. *Journal of Applied Biology.* **1974**, *11*, 297–307.
- Huzsvai L. Az öntözés hatása a növényre és talajra. *Őstermelő: Gazdálkodók Lapja*, **2002**, *2*, 82–86.
- Huzsvai L.; Rajkai K.; Szász G. Az agroökológia modellezéstechnikája. Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum, Debrecen, **2004**.
- Huzsvai, L.; Rajkai, K. Modeling of plant adaptation to climatic drought induced water deficit. *Biologia.* **2009**, *64*, 536–540.
- Huzsvai L.; Vincze Sz. (Huzsvai L. Ed.) SPSS-Books, Debrecen, Magyarország, **2013**, 325.
- Huzsvai, L.; Szőke, Sz. Modeling Soil Heat Flux in R. *J. Agricul. Inform.* **2014**, *5*, 37–45.
- Hütsch, B.W.; Jung, S.; Schubert, S. Comparison of salt and drought-stress effects on maize growth and yield formation with regard to acid invertase activity in the kernels. *J. Agron. Crop Sci.* **2015**, *201*, 5, 353–367.
- Idikut, L.; Atalay, A.I.; Kara, S.N.; Kamalak, A. Effect of hybrid on starch, protein and yields of maize grain. *J. Anim. Vet. Adv.* **2009**, *8*, 1945–1947.
- Illés, A.; Bojtor, C.; Széles, A.; Mousavi, S.M.N.; Tóth, B.; Nagy, J. Analyzing the Effect of Intensive and Low-Input Agrotechnical Support for the Physiological, Phenometric, and Yield Parameters of Different Maize Hybrids Using Multivariate Statistical Methods. *International Journal of Agronomy.* **2021**, 1–11.
- Illés, Á.; Mousavi, S.N.; Bojtor, C.; Nagy, J. The Plant Nutrition Impact on the Quality and Quantity Parameters of Maize Hybrids Grain Yield based on Different Statistical Methods. *Cereal Res. Commun.* **2020**, *48*, 565–573.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T.F. Stocker, D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, **2013**, 1535.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 °C approved by governments. **2018**, <https://www.ipcc.ch/2018/10/08/summary-for-policymakers-of-ipcc-special-report-on-global-warming-of-1-5c-approved-by-overnments/>

- Irmak, S.; Sandhu, R.; Kukal, M.S. Multi-model projections of trade-offs between irrigated and rainfed maize yields under changing climate and future emission scenarios. *Agri. Water Manag.* **2022**, *261*, 107344.
- Iversen, C.; Norby, R. Terrestrial plant productivity and carbon allocation in a changing climate. *Glob. Environ. Change*. **2014**, *1*, 297–316.
- Izsáki, Z. Quality of maize (*Zea mays* L.) Kernels as affected by the np supplies of the soil. *Acta Agr. Hung.* **2007**, *55*, 1, 99–114.
- Izsáki, Z. Effect of nitrogen supply on nutritional of maize. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **2009**, *40*, 960–973.
- Jahangirlou, M.R.; Akbari, G.A.; Alahdadi, I.; Soufizadeh, S.; Ludemann, C.I.; Parsons, D. Phenotypic predictors of dent maize grain quality based on different genetics and management practices. *J. Cereal Sci.* **2022**, *103*, 103388.
- Jahangirlou, M.R.; Akbari, G.A.; Alahdadi, I.; Soufizadeh, S.; Parsons, D. Grain Quality of Maize Cultivars as a Function of Planting Dates, Irrigation and Nitrogen Stress: A Case Study from Semiarid Conditions of Iran. *Agriculture*. **2021**, *11*, 1, 11.
- Jamieson, P.D.; Porter, J.R.; Wilson, D.R. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res.* **1991**, *27*, 1991, 337–350.
- Jaynes, D.B. Nitrate loss in subsurface drainage and corn yield as affected by timing of sidedress nitrogen. *Agric. Water Manage.* **2013**, *130*, 52–60.
- Jaynes, D.B.; Colvin, T.S. Corn yield and nitrate loss in subsurface drainage from midseason nitrogen fertilizer application. *Agron. J.* **2006**, *98*, 1479–1487.
- Jellum, M.D.; Widstrom, N.W. Inheritance of stearic acid composition of maize oil. *J. Agric. Food Chem.* **1970**, *18*, 365–370.
- Jiang, J.; Johansen, K.; Stanschewski, C.S.; Wellman, G.; Mousa, M.A.A.; Fiene, G.M.; Asiry, K.A.; Tester, M.; McCabe, M.F. Phenotyping a diversity panel of quinoa using UAV-retrieved leaf area index, SPAD-based chlorophyll and a random forest approach. *Precision Agriculture*. **2022**, *23*, 3, 961.
- Johnson, R.R.; Mulvaney, D.L. Development of a model for use maize replant decisions. *Agronomy J.* **1980**, *72*, 3, 459–464.
- Jolánkai M. A klímaváltozás hatása a növénytermesztésre. *Agro-21 Füzetek*. **2005**, *41*, 47–58.
- Jolánkai M. Éghajlatváltozás és növénytermesztés. *Agrofórum online*. **2014**, 2014/12.
- Jolánkai, M.; Balla, I.; Pósa, B.; Tarnawa, Á.; Birkás, M. Annual precipitation impacts on the quantity and quality manifestation of wheat and maize yield. *Acta Hydrol. Slov.* **2013**, *14*, 2, 446–450.
- Jolánkai M.; Kassai M.K.; Kende Z.; Tarnawa Á. Aszály és növénytermesztés – a szélsőséges időjárási hatások áttekintése. *Növénytermelés*. **2022**, *71*, 3–4, 87–96.
- Jongman, B.; Ward P.J.; Aerts, J.C.J.H. Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Glob. Environ. Chang.* **2012**, *22*, 823–835.
- Jordan, D.R.; Hunt, C.H.; Cruickshank, A.W.; Borrell, A.K.; Henzell, R.G. The relationship between the stay-green trait and grain yield in elite sorghum hybrids grown in a range of environments. *Crop Science*. **2012**, *52*, 3, 1153–1161.
- Josipović, M.; Plavšić, H.; Brkić, I.; Sudar, R.; Marković, M. Irrigation, nitrogen fertilization and genotype impacts on yield and quality of maize grain. *Növénytermelés*. **2010**, Suppl. 1, 59.
- Jung, S.; Hütsch, B.W.; Schubert, S. Salt stress reduces kernel number of corn by inhibiting plasma membrane H⁺-ATPase activity. *Plant Physiol. Biochem.* **2017**, *113*, 198–207.
- Kabir, T.; De Laporte, A.; Nasielski, J.; Weersink, A. Adjusting Nitrogen Rates with Split Applications: Modelled Effects on N Losses and Profits Across Weather Scenarios. *Eur. J. Agron.* **2021**, *129*, 126328.
- Kalaji, H.M.; Dabrowski, P.; Cetner, M.D.; Samborska, I.A.; Lukasik, I.; Brestic, M.; Zivcak, M.; Tomasz, H.; Mojski, J.; Kociel, H.; et al. A comparison between different chlorophyll content meters under nutrient deficiency conditions. *J. Plant Nutr.* **2017**, *40*, 1024–1034.
- Kaler, A.S.; Abdel-Haleem, H.; Fritsch, F.B.; Gillman, J.D.; Ray, J.D.; Smith, J.R.; Purcell, L.C. Genome-wide association mapping of dark green color index using a diverse panel of soybean accessions. *Sci Rep.* **2020**, *10*, 1, 5166.
- Kalocsai R.; Schmidt R.; Szakál P. Lehetőségek a trágyázás hatékonyságának növelésére környezetbarát módon a főbb szántóföldi kultúráknál. *Agro Napló*. **2004**, *8*, 6.
- Kaplan, M.; Kale, H.; Karaman, K.; Unlukara, A. Influence of different irrigation and nitrogen levels on crude oil and fatty acid composition of maize (*Zea mays* L.). *Grasas y aceites*. **2017**, *68*, 3, e207.
- Kaplan, M.; Karaman, K.; Kardes, Y.M.; Kale, H.; Phytic acid content and starch properties of maize (*Zea mays* L.): Effects of irrigation process and nitrogen fertilizer. *Food Chemistry*. **2019**, *283*, 375–380.
- Karancsi, L.G. Effectiveness of nutrient supply in corn on chernozem soil: *Növénytermelés*. **2013**, *62*, 253–256.
- Karimpour, M. Effect of Drought Stress on RWC and Chlorophyll Content on Wheat (*Triticum durum* L.) Genotypes. *World Ess J.* **2019**, *7*, 52–56.
- Kaspar, T.C.; Erbach, D.C.; Cruse, R.M. Corn response to seed-row residue removal. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1990**, *54*, 1112–1117.
- Katral, A.; Hossain, F.; Zunjare, R.U.; Ragi, S.; Kasana, R.K.; Duo, H.; Gopinath, I.; Mehta, B.K.; Guleria, S.K.; Thimmegowda, V.; Vasudev, S.; Kumar, B.; Karjagi, C.G.; Pandey, S.; Neeraja, C.N.; Yadava, D.K.;

- Muthusamy, V. Maize genotypes with favourable *dgat1-2* and *fatb* alleles possess stable high kernel oil and better fatty acid health and nutritive indices. *International Journal of Biological Macromolecules*. **2024**, 278, 3, 134848.
- Khacim, H.; Kende, Z.; Jolánkai, M.; Kovács, G.P.; Gyuricza, C.; Tarnawa, Á. Impact of Temperature and Water on Seed Germination and Seedling Growth of Maize (*Zea mays* L.). *Agronomy*. **2022**, 12, 397.
- Khalili, K.; Tahoudi, M.N.; Mirabbasi, R.; Ahmadi, F. Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. **2016**, 30, 1205–1221.
- Khan, F.; Khan, S.; Fahad, S.; Faisal, S.; Hussain, S.; Ali, S.; Ali, A. Effect of Different Levels of Nitrogen and Phosphorus on the Phenology and Yield. *Am. J. Plant Sci.* **2014**, 5, 2582–2590.
- Khan, M.B.; Hussain, M.; Raza, A.; Farooq, S.; Jabran, K. Seed priming with CaCl₂ and ridge planting for improved drought resistance in maize. *Turk. J. Agric. For.* **2015**, 39, 193203.
- Khoddamzadeh, A.A.; Dunn, B.L. Application of Optical Sensors for Nitrogen Management in Chrysanthemum. *Hort. Science*. **2016**, 51, 7, 915–920.
- Kimmelshue, C.L.; Goggi, S.; Moore, K.J. Seed Size, Planting Depth, and a Perennial Groundcover System Effect on Corn Emergence and Grain Yield. *Agronomy*. **2022**, 12, 437.
- Kira, O.; Nguy-Robertson, A.L.; Arkebauer, T.J.; Linker, R.; Gitelson, A.A. Informative spectral bands for remote green LAI estimation in C3 and C4 crops. *Agric For Meteorol.* **2016**, 218–219, 243–249.
- Kismányoky T. Jó úton haladunk? Műtrágyaszintek. *Agro Napló*. **2014**, 04, 85–91.
- Kiss E. Kukoricahibridek teljesítménye a tenyésztők és az évjáratok tükrében. [In: Csajbók J. (szerk.) A fenntartható növénytermesztés a klímaváltozás tükrében.] Debrecen, 107–119. **2024**.
- Kizilgeci, F.; Yildirim, M.; Islam, M.S.; Ratnasekera, D.; Iqbal, M.A.; Sabagh, A.E. Normalized Difference Vegetation Index and Chlorophyll Content for Precision Nitrogen Management in Durum Wheat Cultivars under Semi-Arid Conditions. *Sustainability*. **2021**, 13, 3725.
- Koca, O.Y.; Canavar, Ö. The effect of sowing date on yield and yield components and seed quality of corn (*Zea mays* L.). Scientific Papers. Series A. *Agronomy*. **2014**, 57, 227–231.
- Kogo, B.K.; Kumar, L.; Koech, R.; Langat, P. Modelling Impacts of Climate Change on Maize (*Zea mays* L.) Growth and Productivity: A Review of Models. *Outputs and Limitations. J Geosci Environ Prot.* **2019**, 7, 76–95.
- Kovács B. A kukorica minősége. [In: Nagy J. (szerk.) KUKORICA A nemzet aranya – Élelmiszer, takarmány, bioenergia.] Szaktudás Kiadó Ház Zrt., Budapest, **2021**, 418–435.
- Krebs, G.; Camhy, D.; Muschalla, D. Hydro-Meteorological Trends in an Austrian Low-Mountain Catchment. *Climate*. **2021**, 9, 8, 122.
- Krell, N.T.; Morgan, B.E.; Gower, D.; Caylor, K.K. Consequences of dryland maize planting decisions under increased seasonal rainfall variability. *Water Resources Res.* **2021**, 57, e2020WR029362.
- Kresović, B.; Gajić, B.; Tapanarova, A.; Dugalić, G. How Irrigation Water Affects the Yield and Nutritional Quality of Maize (*Zea mays* L.) in a Temperate Climate. *Pol. J. Environ. Stud.* **2018**, 27, 3, 1123–1131.
- Kronzucker, H.J.; Glass, A.D.M.; Siddiqi, M.Y.; Kirk, G.J.D. Comparative kinetic analysis of ammonium and nitrate acquisition by tropical lowland rice: implications for rice cultivation and yield potential. *New Phytologist*. **2000**, 145, 471–476.
- KSH (Központi Statisztikai Hivatal). **2022, 2023**, <https://www.ksh.hu/stadat?lang=hu&theme=mez>
- Kubiak-Wójcicka, K.; Nagy, P.; Pilarska, A.; Zelenáková, M. Trend Analysis of Selected Hydroclimatic Variables for the Hornád Catchment (Slovakia). *Water*, **2023**, 15, 3, 471.
- Kucharik, C.J. Contribution of planting date trends to increased maize yields in the central United States. *Agronomy J.* **2008**, 100, 2, 328–336.
- Kumar, A. Growth, yield and water use efficiency of different maize (*Zea mays* L.)-based cropping systems under varying planting methods and irrigation levels. Indian Council of Agricultural Research, New Delhi, India, *Indian Journal of Agricultural Sciences*. **2008**, 78, 244–247.
- Kumar, N.; Kumar, N.; Shukla, A.; Shankhdhar, S.C.; Shankhdhar, D. Impact of terminal heat stress on pollen viability and yield attributes of rice (*Oryza sativa* L.). *Cereal Res. Commun.* **2015**, 43, 4, 616–626.
- Lakatos, M.; Szentimrey, T.; Bihari, Z. Application of gridded daily data series for calculation of extreme temperature and precipitation indices in Hungary. *Időjárás*. **2011**, 115, 99–109.
- Lamichhane, J.R.; Soltani, E. Sowing and seedbed management methods to improve establishment and yield of maize, rice and wheat across drought-prone regions: A review. *Journal of Agriculture and Food Research*. **2020**, 2, 100089.
- Láng I.; Cséte L.; Harnos Zs. A magyar mezőgazdaság agroökológiai potenciálja az ezredfordulón. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, **1983**.
- Láng I.; Cséte L.; Jolánkai M. (szerk.) A globális klímaváltozás: hazai hatások és válaszok – a VAHAVA jelentés. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, **2007**, 225.
- Laskari, M.; Meneses, G.; Kalfas, I.; Gatzolis, I.; Dordas, C. Water Stress Effects on the Morphological, Physiological Characteristics of Maize (*Zea mays* L.), and on Environmental Cost. *Agronomy*. **2022**, 12, 2386.

- Latella, M.; Sola, F.; Camporeale, C. A. Density-Based Algorithm for the Detection of Individual Trees from LiDAR Data. *Remote Sensing*. **2021**, *13*, 2, 322.
- Le Bail, M.; Jeuffroy, M.H.; Bouchard, C.; Barbottin, A. Is it possible to forecast the grain quality and yield of different varieties of winter wheat from Minolta SPAD meter measurements? *Eur. J. Agron.* **2005**, *23*, 4, 379–391.
- Leelarani, P.; Sreenivas, G.; Rajireddy, D. Evaluating contribution of weather to growth and yield of khrif maize under irrigated conditions. *Journal of Agrometeorology*. **2013**, *15*, 2, 156–158.
- Leghari, S.J.; Wahocho, N.A.; Laghari, G.M.; Hafeez Laghari, A.; Mustafa Bhabhan, G.; Hussain Talpur, K.; Bhutto, T.A.; Wahocho, S.A.; Lashari, A.A. Role of nitrogen for plant growth and development: a review. *Adv. Environ. Biol.* **2016**, *10*, 209.
- Lehner, B.; Döll, P.; Alcamo, J.; Henrichs, T.; Kaspar, F. Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: A continental, integrated analysis. *Climatic Change*. **2006**, *75*, 273–299.
- Li, G.; Zhao, B.; Dong, S.; Zhang, J.; Liu, P.; Lu, W. Controlled-release urea combining with optimal irrigation improved grain yield, nitrogen uptake, and growth of maize. *Agric. Water Manag.* **2020**, *227*, 105834.
- Li, J.; Feng, Y.; Mou, J.; Xu, G.; Luo, Q.; Luo, K.; Huang, S.; Shi, X.; Guan, Z.; Ye, Y.; Huang, Y. Construction and Application Effect of the Leaf Value Model Based on SPAD Value in Rice. *Sci. Agric. Sin.* **2017**, *50*, 4714–4724.
- Li, L.; Lin, D.; Wang, J.; Yang, L.; Wang, Y. Multivariate Analysis Models Based on Full Spectra Range and Effective Wavelengths Using Different Transformation Techniques for Rapid Estimation of Leaf Nitrogen Concentration in Winter Wheat. *Front Plant Sci.* **2020**, *11*, 755.
- Li, S.X.; Wang, Z.H.; Li, S.Q.; Gao, Y.J. Effect of nitrogen fertilization under plastic and non-plastic mulched conditions on water use by maize plants in dryland areas of China. *Agric Water Manag.* **2015**, *162*, 15–32.
- Li, Y.; He, N.; Hou, J.; Xu, L.; Liu, C.; Zhang, J.; Wang, Q.; Zhang, X.; Wu, X. Factors Influencing Leaf Chlorophyll Content in Natural Forests at the Biome Scale. *Front. Ecol. Evol.* **2018**, *6*, 64.
- Li, Y.; Tao, H.; Zhang, B.; Huang, S.; Wang, P. Timing of Water Deficit Limits Maize Kernel Setting in Association With Changes in the Source-Flow-Sink Relationship. *Front Plant Sci.* **2018**, *9*, 1326.
- Liang, H.Y.; Shen, P.F.; Kong, X.Z.; Liao, Y.C.; Liu, Y.; Wen, X.X. Optimal nitrogen practice in winter wheat-summer maize rotation affecting the fates of 15 N-labeled fertilizer. *Agronomy*. **2020**, *10*, 4, 521.
- Liu, G.Z.; Hou, P.; Xie, R.Z.; Ming, B.; Wang, K.R.; Xu, W.J.; Liu, W.M.; Yang, Y.S.; Li, S.K. Canopy characteristics of high-yield maize with yield potential of 22.5 Mg ha⁻¹. *Field Crop. Res.* **2017**, *213*, 221–230.
- Liu, K.; Wiatrak, P. Corn production and plant characteristics response to N fertilization management in dry-land conventional tillage system. *Int J Plant Prod.* **2012**, *5*, 4, 405–416.
- Liu, K.; Zhou, Q.B.; Wu, W.B.; Xia, T.; Tang, H.J. Estimating the crop leaf area index using hyperspectral remote sensing. *Journal of Integrative Agriculture*. **2016**, *15*, 2, 475–491.
- Liu, S.; Cui, S.; Ying, F.; Nasar, J.; Wang, Y.; Gao, Q. Simultaneous improvement of protein concentration and amino acid balance in maize grains by coordination application of nitrogen and sulfur. *J. Cereal Sci.* **2021**, *99*, 103189.
- Liu, S.; Hu, Z.; Han, J.; Li, Y.; Zhou, T. Predicting grain yield and protein content of winter wheat at different growth stages by hyperspectral data integrated with growth monitor index. *Comput. Electron. Agric.* **2022**, *200*, 107235.
- Liu, X.; Yu, Y.; Huang, S.; Xu, C.; Wang, X.; Gao, J.; Meng, Q.; Wang, P. The impact of drought and heat stress at flowering on maize kernel filling: Insights from the field and laboratory. *Agric. For. Meteorol.* **2022**, *312*, 108733.
- Liu, Y.; Wang, E.L.; Yang, X.G.; Wang, J. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s. *Global Change Biol.* **2010**, *16*, 2287–2299.
- Lizaso, J.I.; Ruiz-Ramos, M.; Rodríguez, L.; Gabaldon-Leal, C.; Oliveira, J.A.; Lorite, I.J.; Sánchez, D.; García, E.; Rodríguez, A. Impact of high temperatures in maize: Phenology and yield components. *Field Crops Res.* **2018**, *216*, 129–140.
- Lobell, D.B.; Cassman, K.G.; Field, C.B. Crop yield gaps: their importance, magnitude, and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2009**, *34*, 1–26.
- Lobell, D.B.; Field, C.B. Global scale climate – crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ. Res. Lett.* **2007**, *2*, 014002.
- Lobell, D.B.; Hammer, G.L.; Chenu, K.; Zheng, B.; McLean, G.; Chapman, S.C. The shifting influence of drought and heat stress for crops in northeast Australia. *Global Change Biology*. **2015**, *21*, 11, 4115–4127.
- Lobell, D.B.; Roberts, M.J.; Schlenker, W.; Braun, N.; Little, B.B.; Rejesus, R.M.; Hammer, G.L. Greater sensitivity to drought accompanies maize yield increase in the US Midwest. *Science*. **2014**, *344*, 6183, 516–519.
- Lobell, D.B.; Schlenker, W.; Costa-Roberts, J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*. **2011**, *333*, 616–620.
- Long, N.V.; Assefa, Y.; Schwalbert, R.; Ciampitti, I.A. Maize yield and planting date relationship: A synthesis-analysis for US high-yielding contest-winner and field research data. *Frontiers in Plant Science*. **2017**, *8*, 2106.
- Lopes, M.S. Will temperature and rainfall changes prevent yield progress in Europe? *Food Energy Secur.* **2022**, *11*, 2, e372.

- Lu, D.; Cai, X.; Yan, F.; Sun, X.; Wang, X.; Lu, W. Effects of high temperature after pollination on physicochemical properties of waxy maize flour during grain development. *J. Sci. Food Agric.* **2014**, *94*, 1416–1421.
- Lu, T.Q.; Zhang, H.; Shui, H.X.; Jiang, X.F.; He, D.; Pang, Q.H.; Wang, X.Q. Effect of sowing date on yield and quality of maize under rain-fed conditions in hilly area of Sichuan Province. *Bull. Agri. Sci. Tech.* **2019**, *12*, 87–93.
- Ma, S.Q.; Wang, Q.; Lu, H.Q.; Xu, L.P.; Yu, H.; Zhang, T.L. Impact of water and temperature on spring maize emergence speed and emergence rate. *Acta Ecol. Sin.* **2012**, *32*, 3378–3385.
- Mahama, S.; Dóka, L.F. Effects of drought on the yield and yield components of maize (*Zea mays* L.). *Analele Universității Din Oradea Fascicula Protectia Mediului.* **2017**, *28*, 65–70.
- Malo, M.; Ghosh, A. Studies on different agrometeorological indices and thermal use efficiencies of rice in New Alluvial Zone of West Bengal. *Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences.* **2018**, *7*, 6, 72–78.
- Mänd, P.; Hallik, L.; Peñuelas, J.; Nilsson, T.; Duce, P.; Emmett, B.A.; Beier, C.; Estiarte, M.; Garadnai, J.; Kalapos, T.; Schmidt, I.K.; Kovács-Láng, E.; Prieto, P.; Tietema, A.; Westerveld, J.W.; Kull, O. Responses of the reflectance indices PRI and NDVI to experimental warming and drought in European shrublands along a north–south climatic gradient. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*, 3, 626–636.
- Mansouri-Far, C.; Modarres-Sanavy, S.A.M.; Saberali, S.F. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions. *Agric. Water Manag.* **2010**, *97*, 1, 12–22.
- Maresma, A.; Ballesta, A.; Santiveri, F.; Lloveras, J. Sowing Date Affects Maize Development and Yield in Irrigated Mediterranean Environments. *Agriculture.* **2019**, *9*, 3, 67.
- Martínez, D.E.; Guimet, J.J. Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Agronomie.* **2004**, *24*, 1, 41–46.
- Marton L.Cs.; Árendás T.; Pintér J.; Bónis P.; Szieberth D. A kukorica tenyésztésének meghatározása FAO számmal. *Agrofórum Extra.* **2020**, *87*, 24.
- Marton L.Cs.; Hadi G.; Pintér J.; Hegyi Zs.; Nagy E.; Spitzkó T. Szőke Cs Kukorica: a jövő növénye - Sokhasznú kukorica hibridek. *Martonvásár.* **2008**, *20*, 1, 3–6.
- Marton L. Cs.; Pintér J.; Hadi G.; Árendás T.; Bónis P. Szemesnek korait, silónak későbbi hibridet válasszunk. *Agrofórum Extra.* **2011**, *42*, 84–88.
- Marton L. Cs.; Szundy T.; Nagy E. A kukorica (*Zea mays* L.) fiatalkori hidegtűrésének értékelése hőmérsékleti gradiens kamrában. *Növénytermelés.* **1997**, *46*, 6, 549–557.
- Marton, L.Cs.; Szundy, T.; Pók, I. Effect of the year on the vegetative and generative phases in the growing period of maize. *Acta Agr. Hung.* **2005**, *53*, 2, 133–141.
- Márton Á. Különböző nitrogén műtrágyák hatásvizsgálata a Nyírség homoktalajain. Kandidátusi értekezés. **1969**.
- Márton, L. Effect of mineral fertilization and rainfall on the yield of maize (*Zea mays* L.). *Agrokémi és Talajtan.* Akadémia Kiadó, Budapest, **2005**, *54*, 309–324.
- Márton, L.; Pilar, P.M.; Grewal, M.S. Long-term studies of crop yields with changing rainfall and fertilization. *Agrartech. Forsc. Hung.* **2007**, *13*, 2, 37–47.
- Máté A. A kukorica termesztéséről. *Agrárágazat.* **2002**, *2*, 4, 6–7.
- Mayer, L.I.; Savin, R.; Maddonni, G.A. Heat stress during grain filling modifies kernel protein composition in field-grown maize. *Crop Science.* **2016**, *56*, 1890–1903.
- Mbaye, M.L.; Sylla, M.B.; Tall, M. Impacts of 1.5 and 2.0 °C Global Warming on Water Balance Components over Senegal in West Africa. *Atmosphere.* **2019**, *10*, 712.
- McMaster, G.S.; Smika, D.E. Estimation and evaluation of winter wheat phenology in the central Great Plains. *Agric. For. Meteorol.* **1988**, *43*, 1, 1–18.
- McMaster, G.S.; Wilhelm, W.W. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agric. For. Meteorol.* **1997**, *87*, 4, 291–300.
- Meena, S.K.; Dwivedi, B.S.; Meena, M.C.; Datta, S.P.; Singh, V.K.; Mishra, R.P.; Chakraborty, D.; Dey, A.; Meena, V.S. Effect of Nutrient Management on Soil Carbon Quantities, Qualities, and Stock under Rice-Wheat Production System. *Agriculture.* **2022**, *12*, 11 1822.
- Megyes A.; Rátonyi T.; Huzsvai L.; Szabó Gy.; Dobos A.; Sum O. A műtrágyázás hatása a Dekalb 471 SC kukorica hibrid (*Zea mays* L.) termésére öntözés nélküli és öntözéssel kezelve. *Növénytermelés.* **2000**, *49*, 3, 307–316.
- Menyhért Z. A kukoricatermesztés kézikönyve. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, **1985**, pp. 560.
- Menyhért Z.; Ángyán J.; Radics L. A levélfelület-index (LAI), a fényviszonyok és a termés kapcsolata eltérő vetésidőjű és tenyésztési területű kukorica állományokban. *Növénytermelés.* **1980**, *29*, 4, 357–367.
- Miao, Y.; Mulla, D.J.; Robert, P.C.; Hernandez, J.A. Within-field Variation in Corn Yield and Grain Quality Responses to Nitrogen Fertilization and Hybrid Selection. *Agronomy J.* **2006**, *98*, 129–140.
- Micskei, Gy.; Árendás, T.; Berzsényi, Z. Relationships between maize yield and growth parameters in a long-term fertilization experiment. *Acta Agr. Hung.* **2012**, *60*, 3, 209–219.
- Micskei, Gy.; Jósák, I.; Berzsényi, Z. Az állótrágya és a műtrágya hatása a kukorica növekedésére és növekedési mutatóinak dinamikájára, eltérő években. *Növénytermelés,* **2009**, *58*, 4, 45–56.

- Miedema, P. The effects of low temperature on *Zea mays*. *Advances in Agronomy*. **1982**, 35, 93–128.
- Mimić, G.; Brdar, S.; Brkić, M.; Panić, M.; Marko, O.; Crnojević, V. Engineering Meteorological Features to Select Stress Tolerant Hybrids in Maize. *Sci. Rep.* **2020**, 10, 3421.
- Miroslavljević, M.; Momcilovic, V.; Przulj, N.; Maksimović, L.; Putnik-Delic, M. Dry matter accumulation of winter wheat and barley at different sowing dates. *Ratarstvo i Povrtarstvo*. **2018**, 55, 2, 87–94.
- Moberly, J.G.; Bernards, M.T.; Waynant, K.V. Key features and updates for origin 2018. *Journal of Cheminformatics*. **2018**, 10, 1–2.
- Modi, A.T.; Asanzi, N.M. Seed performance of maize in response to phosphorus application and growth temperature is related to phytate-phosphorus occurrence. *Crop Science*, **2008**, 48, 286–297.
- Monjardino, P.; Smith, A.G.; Jones, R.J. Heat stress effects on protein accumulation of maize endosperm. *Crop Science*. **2005**, 45, 4, 1203–1210.
- Monteith, J. L. Climatic variations and growth of crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. **1981**, 107, 749–774.
- Monteith, J. L. Weather and water in the Sudano-Sahelian zone. [In: Sivakumar M. V. K., J.S. Wallace, C. Rénard, C. Giroux (eds.) Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone]. Proceedings of the International Workshop, Niamey, Niger, February. **1991**. IAHS Publication 199, IAHS Press, Institute of Hydrology, Wallingford, UK, 11–30.
- Monteoliva, M.I.; Guzzo, M.C.; Posada, G.A. Breeding for Drought Tolerance by Monitoring Chlorophyll Content. *Gene Technol.* **2021**, 10, 3, 165.
- Moriondo, M.; Giannakopoulos, C.; Bindi, M. Climate change impact assessment: the role of climate extremes in crop yield simulation. *Climatic Change*. **2011**, 104, 679–701.
- Móroczné Salamon K. Nemesítés speciális beltartalmi értékekre. [In: Sági F. (szerk.) A nyolcadik évtizedben.] Gabonatermesztési Kutató Kht., Szeged, **2004**, 180–181.
- Mozafar, A.; Schreiber, P.; Oertli, J.J. Photoperiod and root-zone temperature: interacting effects on growth and mineral nutrients of maize. *Plant and Soil*. **1993**, 153, 71–78.
- Mubeen, M.; Ahmad, A.; Hammad, H.M.; Awais, M.; Farid, H.U.; Saleem, M.; ul Din, M.S.; Amin, A.; Ali, A.; Fahad, S.; Nasim, W. Evaluating the climate change impact on water use efficiency of cotton-wheat in semi-arid conditions using DSSAT model. *J. Water Clim. Change*. **2020**, 11, 4, 1661–1675.
- Muratore, C.; Espen, L.; Prinsi, B. Nitrogen Uptake in Plants: The Plasma Membrane Root Transport Systems from a Physiological and Proteomic Perspective. *Plants (Basel)*. **2021**, 10, 4, 681.
- Muschietti-Piana, M.P.; Cipriotti, P.A.; Urricariet, S.; Peralta, N.R.; Niborski, M. Using site-specific nitrogen management in rainfed corn to reduce the risk of nitrate leaching. *Agric. Water Manag.* **2018**, 199, 61–70.
- Muthukumar, V.B.; Velayudham, K.; Thavaprakash, N. Plant growth regulators and split application of nitrogen improves the quality parameters and green cob yield of baby corn (*Zea mays* L.). *Agron. J.* **2007**, 6, 1, 208–211.
- Nafziger, E.D. Maize agronomy. [In: Reference module in food science.] *Elsevier*. **2016**.
- Nagy J. Az optimális víz- és tápanyagellátás hatása a borsó és kukorica növények növekedésére, fejlődésére és termésmennyiségére. Egyetemi doktori értekezés. Debrecen, **1978**.
- Nagy J. A műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica hibridek termésére I. *Növénytermelés*. **1988**, 37, 4, 327–336.
- Nagy J. A kukorica hibridek műtrágya és öntözővíz reakciója. *Agrofórum*. **1995**, 5, 56–62.
- Nagy J. A műtrágyázás hatása a kukorica (*Zea mays* L.) termésére öntözés nélküli és öntözéssel termesztésben. *Agrokémia és Talajtan*. **1997**, 46, 1–4, 275–288.
- Nagy J. Kukoricatermesztés. Élelmiszer – bioenergia – takarmány. Akadémiai Kiadó, Budapest, **2007**, 393.
- Nagy, J. Evaluating the effect of year and fertilisation on the yield of mid ripening (FAO 400–499) maize hybrids. *Cereal Res. Commun.* **2007**, 35, 1497–1507.
- Nagy, J. Maize production: Food, bioenergy, forage. Akadémiai Kiadó, Budapest. **2008**, 391.
- Nagy J. A vetésidő hatása a kukorica- (*Zea mays* L.) hibridek terméshozamára és minőségére. *Növénytermelés*. **2009**, 58, 2, 85–105.
- Nagy, J. Impact of Fertilization and Irrigation on the Correlation between the Soil Plant Analysis Development Value and Yield of Maize. *Commun Soil Sci Plant Anal.* **2010**, 41, 11, 1293–1305.
- Nagy, J. The effect of fertilization and precipitation on the yield of maize (*Zea mays* L.) in a long-term experiment. *Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*. **2012**, 116, 1, 39–52.
- Nagy J. Klímaváltozás és a műtrágyázás hatása a kukorica termésére debreceni tartamkísérletben. *Növénytermelés*. **2017**, 66, 3, 11–32.
- Nagy, J. (szerk.) Kukorica: A nemzet aránya: élelmiszer, takarmány, bioenergia. Budapest, Szaktudás Kiadó, **2021**, 516.
- Nagy J.; Huzsvai L. Az évjárat hatás értékelése a kukorica termésére. *Növénytermelés*. **1995**, 44, 4, 385–393.
- Nandini, K.M.; Sridhara, S. Heat use efficiency, Helio thermal use efficiency and photo thermal use efficiency of foxtail millet (*Setaria italica* L.) genotypes as influenced by sowing dates under southern transition zone of Karnataka. *J. Pharmacog. Phytochem.* **2019**, 8, 2S, 284–290.
- Nasielski, J.; Deen, B. Nitrogen applications made close to silking: Implications for yield formation in maize. *Field Crops Res.* **2019**, 243, 107621.

- Nasielski, J.; Grant, B.; Smith, W.; Niemeyer, C.; Janovicek, K.; Deen, B. Effect of nitrogen source, placement and timing on the environmental performance of economically optimum nitrogen rates in maize. *Field Crops Res.* **2020**, *246*, 107686.
- Nazir, M.; Pandey, R.; Siddiqi, T.O.; Ibrahim, M.M.; Qureshi, M.I.; Abraham, G.; Vengavasi, K.; Ahmad, A. Nitrogen-Deficiency Stress Induces Protein Expression Differentially in Low-N Tolerant and Low-N Sensitive Maize Genotypes. *Frontiers in Plant Science.* **2016**, *7*.
- Neiff, N.; Trachsel, S.; Valentinuz, O.R.; Balbi, C.N.; Andrade, F.H. High temperatures around flowering in maize: Effects on photosynthesis and grain yield in three genotypes. *Crop Sci.* **2016**, *56*, 2702–2712.
- Neilsen, D.C.; Halvorson, A.D.; Vigil, M.F. Critical precipitation period for dryland maize production. *Field Crops Res.* **2010**, *118*, 259–263.
- Neményi M. Gondolatok „A regeneratív mezőgazdaság Európában” stratégiáról és a célkitűzések megvalósíthatóságának feltételrendszeréről: Digitalizációs paradigmaváltás az agráriumban. *Magyar Tudomány.* **2022**, *183*, 10, 1298 p.
- Neményi, M.; Milics, G. Precision agriculture technology and diversity. *Cereal Res. Commun.* **2007**, *35*, 2, 829–832.
- Németh T.; Neményi M.; Harnos Zs. A precíziós mezőgazdaság módszertana. JATE Press-MTA TAKI, **2007**, 239.
- Nevavuori, P.; Narra, N.; Linna, P.; Lipping, T. Crop Yield Prediction Using Multitemporal UAV Data and Spatio-Temporal Deep Learning Models. *Remote Sensing.* **2020**, *12*, 23, 4000.
- Newmann, J. E. Tips on timing corn planting. *Farmer's Digest.* Milwaukee. **1982**, *45*, 8, 5–8.
- Nie, S.; Wang, C.; Dong, P.; Xi, X. Estimating leaf area index of maize using airborne full-waveform lidar data. *Remote Sens. Lett.* **2016**, *7*, 111–120.
- Nosheen, S.; Ajmal, I.; Song, Y. Microbes as Biofertilizers, a Potential Approach for Sustainable Crop Production. *Sustainability.* **2021**, *13*, 1868.
- Nyéki, A.; Neményi, M. Crop Yield Prediction in Precision Agriculture. *Agronomy (Basel).* **2022**, *12*, 10, 2460.
- Ocwa, A.; Harsanyi, E.; Széles, A.; Holb, I.J.; Szabó, Sz.; Rátonyi, T.; Mohammed, S. A bibliographic review of climate change and fertilization as the main drivers of maize yield: implications for food security. *Agric Food Secur.* **2023**, *12*, 14.
- Oguntunde, P.G.; Fasimirin, J.T.; Abiolu, O.A. Performance of the SunScan canopy analysis system in estimating leaf area index of maize. *Agric Eng Int. CIGR J.* **2012**, *14*, 1–7.
- Oláh J.; Popp J. 2018. A kukoricatermelés kilátásai. *Magyar Mezőgazdaság*, **2018**. október 29.
- OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat). **2020**, **2022**, https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_adatsorok/Debrecen/adatok/napi_adatok/index.php
- Ortez, O.A.; Lindsey, A.J.; Thomison, P.R.; Coulter, J.A.; Singh, M.P.; Carrijo, D.R.; Quinn, D.J.; Licht, M.A.; Bastos, L. Corn response to long-term seasonal weather stressors: A review. *Crop Science.* **2023**, *63*, 3210–3235.
- Padilla, F.M.; de Souza, R.; Peña-Fleitas, M.T.; Gallardo, M.; Giménez, C.; Thompson, R.B. Different Responses of Various Chlorophyll Meters to Increasing Nitrogen Supply in Sweet Pepper. *Front Plant Sci.* **2018**, *9*, 1752.
- Pandey, R.K.; Maranville, J.W.; Admou, A. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment: I. Grain yield and yield components. *Agric. Water Manag.* **2000**, *46*, 1, 1–13.
- Pásztor K. Újabb kísérleti adatok a kukorica vetésidejéhez. [In: I'só I. (szerk.) Kukoricatermesztési kísérletek 1958–1960.] Akadémia Kiadó, Budapest, **1962**, 143–152.
- Peichl, M.; Thober, S.; Samaniego, L.; Hansjürgens, B.; Marx, A. Climate impacts on long-term silage maize yield in Germany. *Sci Rep.* **2019**, *9*, 7674.
- Peña-Rosas, J. P.; Garcia-Casal, M. N.; Pachón, H.; McLean, M. S.; Arabi, M. Technical considerations for maize flour and corn meal fortification in public health: consultation rationale and summary. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **2014**, *1312*, 1–7.
- Pépó P. Fejlesztési alternatívák a magyar kukoricatermesztésben. *Gyakorlati Agrofórum Extra.* **2006**, *13*, 7–11.
- Pépó, P. Effect of cropyear and some agrotechnical factors in rainfed and irrigated maize (*Zea mays* L.) production. *Crop Production.* **2012**, *61*, 77–80.
- Pépó P. A kukorica öntözéses termesztése. *Agrárium.* **2014**, *24*, 3, 30–32.
- Pépó P. A 40 éves debreceni tartamkísérletek néhány fontosabb eredménye. *Növénytermelés.* **2022**, *71*, 3–4, 159–182.
- Pépó, P.; Csajbók, J. The role of agrotechnical factors in maize (*Zea mays* L.) production. *Crop Production.* **2014**, *63*, 2, 45–68.
- Pépó, P.; Karancsi, L.G. Effect of Fertilization on the NPK Uptake of Different Maize (*Zea mays* L.) Genotypes. *Cereal Res. Commun.* **2017**, *45*, 4, 699–710.
- Pépó P.; Karancsi L.G.; Novák A. Kukorica genotípusok tápanyag-reakciója és vízhasznosítása eltérő évjáratokban. *Növénytermelés.* **2016**, *65*, 4, 71–84.
- Pépó P.; Vad A.; Ábrahám É.B.; Szabó É. Lépések a precíziós technológia elemeinek bevezetésére. *Mezőhír.* **2019**, *23*, 4, 36–41.
- Pépó, P.; Vad, A.; Berényi, S. Effect of some agrotechnical elements on the yield of maize on chernozem soil. *Cereal Res. Commun.* **2006**, *34*, 621–624.

- Piekielek, W.P.; Fox, R.H.; Toth, J.D.; Macneal, K.E. Use of chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agron J.* **1995**, *87*, 3, 403–408.
- Pierre, W.H.; Dumenil, L.; Jolley, V.D.; Webb, J.R.; Shrader, W.D. Relationship of corn yield, expressed as a percentage of maximum and the N percentage in grain: I. Various N-rate experiments. *Agron. J.* **1977**, *69*, 215–220.
- Plett, D.C.; Ranathunge, K.; Melino, V.J.; Kuya, N.; Uga, Y.; Kronzucker, H.J. The intersection of nitrogen nutrition and water use in plants: new paths toward improved crop productivity. *J. Exp. Bot.* **2020**, *71*, 15, 4452–4468.
- Poorebrahimi, M.; Sirousmehr, A.; Eshghizadeh, H.; Asgharipour, M.; Khamari, I. Effect of different levels of nitrogen fertilizer on yield and agronomic characteristics of different corn (*Zea mays* L.) hybrids. *Journal of Crop Production and Processing*. **2018**, *8*, 3, 37–49.
- Popp, J.; Erdei, E.; Oláh, J. Outlook of Precision Farming in Hungary. *International Journal of Engineering and Management Sciences*. **2018**, *3*, 1, 133–147.
- Potter, E.; Wood, J.; Nicholl, C. SunScan canopy analysis system user manual SS1-UM-1.05, Delta-T devices, Cambridge, UK. **1996**.
- Qian, B.; Gregorich, E.G.; Gameda, S.; Hopkins, D.W.; Wang, X.L. Observed soil temperature trends associated with climate change in Canada. *J. Geophys. Res.* **2011**, *116*, 1–16.
- Qiao, B.; He, X.; Liu, Y.; Zhang, H.; Zhang, L.; Liu, L.; Reineke, A.J.; Liu, W.; Müller, J. Maize Characteristics Estimation and Classification by Spectral Data under Two Soil Phosphorus Levels. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 493.
- Quattar, S.; Jones, R.J.; Crookston, R.K.; Kajelou, M. Effects of water deficit during grain filling on the pattern of maize kernel growth and development. *Crop Science*. **1987**, *27*, 730–735.
- R Core Team, R: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org> **2018**.
- Rácz F.; Marton L. Cs.; Hidvégi Sz. Vetésidő – avagy az eredményesség fokozása költségek nélkül. *Gyakorlati Agroforum Extra*. **2005**, *16*, 9, 37–38.
- Rácz, Cs.; Nagy, J. A víz- és tápanyagellátottság, illetve -hasznosulás megítélésének kérdései kukorica terméseredmények vonatkozásában. *Növénytermelés* **2011**, *60*, 1, 97–114.
- Radulov, I.; Sala, F.; Alexa, E.; Berbecea, A.; Crista, F. Foliar fertilization influence on maize grain protein content and amino acid compos. *Res. J. Agric. Sci.* **2010**, *42*, 3, 275–279.
- Rahman, H.U. Genetic analysis of stomatal conductance in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) under contrasting temperature regimes. *Journal of Agriculture Science*. **2005**, *143*, 2–3, 161–168.
- Rajput, R.P.; Deshmukh, M.R.; Paradkar, V.K. Accumulated heats unit and phenology relationships in wheat (*Triticum aestivum* L.) as influenced by planting dates under late-sown condition. *J. Agron. Crop Sci.* **1987**, *159*, 5, 345–348.
- Ramsey, S.; Williams, B.; Jarrell, P.; Hubbs, T. Global Demand for Fuel Ethanol Through 2030. Economic Research Service. U.S. Department of Agriculture, Special Outlook Report Number BIO-05, **2023**.
- Randall, G.W.; Vetsch, J.A.; Huffman, J.R. Corn production on a subsurface-drained mollisol as affected by time of nitrogen application and nitrapyrin. *Agron. J.* **2003**, *95*, 1213–1219.
- Randjelovic, V.; Prodanovic, S.; Tomic, Z.; Bijelic, Z.; Simic, A. Genotype and year effect on grain yield and nutritive values of maize (*Zea mays* L.). *J. J. Anim. Vet Adv.* **2011**, *10*: 835–840
- Ranum, P.; Pena-Rosas, J.P.; Garcia-Casal, M.N. Global maize production, utilization, and consumption. *Ann. NY Acad. Sci.* **2014**, *1312*, 105–112.
- Rao, V.U.M.; Singh, D.; Singh, R. Heat use efficiency of winter crops in Haryana. *Journal of Agrometeorology*. **1999**, *1*, 2, 143–148.
- Rawat, M.; Sharda, V.; Lin, X.; Roozeboom K. Climate Change Impacts on Rainfed Maize Yields in Kansas: Statistical vs. Process-Based Models. *Agronomy*. **2023**, *13*, 10, 2571.
- Ray, K.; Banerjee, H.; Dutta, S.; Hazra, A.K.; Majumdar, K. Macronutrients influence yield and oil quality of hybrid maize (*Zea mays* L.). *PLoS ONE*. **2019**
- Ren, Y.; Li, Q.; Du, X.; Zhang, Y.; Wang, H.; Shi, G.; Wei, M. Analysis of Corn Yield Prediction Potential at Various Growth Phases Using a Process-Based Model and Deep Learning. *Plants*. **2023**, *12*, 446.
- Renewable Fuels Association (RFA). Ethanol Industry Outlook Zeroes in on New Opportunities; Renewable Fuels Association: Washington, DC, USA, **2022**, https://afdc.energy.gov/files/u/publication/2022_ethanol_industry_outlook.pdf
- Revilla, P.; Hotchkiss, J.; Tracy, W. Cold tolerance evaluation in a diallel among open-pollinated sweet corn cultivars. *Hortscience*. **2003**, *38*, 88–91.
- Rhezali, A.; Aissaoui, A. E. Feasibility Study of Using Absolute SPAD Values for Standardized Evaluation of Corn Nitrogen Status. *Nitrogen 2*. **2021**, *3*, 298–307.
- Ristic, Z.; Momčilović, I.; Bukovnik, U.; Prasad, P.V.; Fu, J.; DeRidder, B.P.; Elton, T.E.; Mladenov, N. Rubisco activase and wheat productivity under heat-stress conditions. *J. Exp. Bot.* **2009**, *60*, 14, 4003–4014.
- Ritchie, J.T.; Singh, U.; Godwin, D.C.; Humpries, J. Ceres Cereal Generic Model Fortran source code. Michigan State University, East-Lansing, MI, **1994**.

- Rizhsky, L.; Liang, H.; Mittler, R. The combined effect of drought stress and heat shock on gene expression in tobacco. *Plant Physiology*. **2002**, 130, 3, 1143–1151.
- Romano, G.; Zia, S.; Spreer, W.; Sanchez, C.; Cairns, J.; Araus, J.L.; Müller, J. Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. *Comput. Electron. Agric.* **2011**, 79, 1, 67–74.
- Rorie, R.L.; Purcell, L.C.; Mozaffari, M.; Karcher, D.E.; King, C.A.; Marsh, M.C.; Longer, D.E. Association of “greenness” in corn with yield and leaf nitrogen concentration. *Agronomy J.* **2011**, 103, 2, 529–535.
- Roy, S.; Meena, R.L.; Sharma, K.C.; Kumar, V.; Chattopadhyay, C.; Khan, S.A.; Chakravarthy, N.V.K. Thermal requirement of oilseed *Brassica* cultivars at different phenological stages under varying environmental conditions. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. **2005**, 75, 11, 17–21.
- Rubin, J.C.; Struffert, A.M.; Fernández, F.G.; Lamb, J.A. Maize yield and nitrogen use efficiency in upper Midwest irrigated sandy soils. *Agron. J.* **2015**, 108, 1681–1691.
- Rudnick, D.; Irmak, S.; Ray, C.; Schneekloth, J.; Schipanski, M.; Kisekka, I.; Porter, D. Deficit irrigation management of corn in the high plains: A review. [In: Proceedings of the 29th Annual Central Plains Irrigation Conference, Central Plains Irrigation Association.] **2017**, 21–22.
- Ruiz Diaz, D.A.; Hawkins, J.A.; Sawyer, J.E.; Lundvall, J.P. Evaluation of in-season nitrogen management strategies for corn production. *Agron. J.* **2008**, 100, 1711–1719.
- Russelle, M.P.; Olson, R.A.; Hauck, R.D. Planting date and nitrogen management interactions in irrigated maize. *Field Crops Res.* **1987**, 16, 4, 349–362.
- Rutkowska, A. Productivity, nitrogen use efficiency and water use efficiency of maize for grain in long term field experiments. *Polish Journal of Agronomy*. **2019**, 37, 11–15.
- Ruzsányi L. Főbb növénytermesztési tényezők és a vízellátás kölcsönhatásai. Akadémiai doktori értekezés tézisei, Debrecen, **1992**.
- Ruzsányi L.; Pető K. A vetésváltás és a trágyázás hatása a talajnedvességre. *Növénytermelés*. **1993**, 42, 1, 85–94.
- Sadok, W.; Lopez, J.R.; Smith K.P. Transpiration increases under high-temperature stress: Potential mechanisms, trade-offs and prospects for crop resilience in a warming world. *Plant Cell Environ.* **2021**, 44, 2102–2116.
- Sadras, V.O. A quantitative top-down view of interactions between stresses: Theory and analysis of nitrogen - water co-limitation in Mediterranean agro-ecosystems. *Aust. J. Agric. Res.* **2005**, 56, 1151–1157.
- Sah, R.P.; Chakraborty, M.; Prasad, K.; Pandit, M.; Tudu, V.K.; Chakravarty, M.K.; Narayan, S.C.; Rana M.; Moharana, D. Impact of water deficit stress in maize: phenology and yield components. *Sci. Rep.* **2020**, 10, 1–5.
- Salgado-Aguilar, M.; Molnar, T.; Pons-Hernández, J.L.; Covarrubias-Prieto, J.; Ramírez-Pimentel, J.G.; Raya-Pérez, J.C.; Iturriaga, G. Physiological and biochemical analyses of novel drought-tolerant maize lines reveal osmoprotectant accumulation at silking stage. *Chilean J. Agric. Res.* **2020**, 80, 2, 241–252.
- Salmi, T.; Maatta, A.; Anttila, P.; Ruoho-Airola, T.; Amnell, T. Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann–Kendall test and Sen’s slope estimates—the Excel template application MAKESENS. Finnish Meteorological Institute, Helsinki, **2002**.
- Sánchez, B.; Rasmussen, A.; Porter, J.R. Temperatures and the growth and development of maize and rice: A review. *Glob. Chang. Biol.* **2014**, 20, 408–417.
- Sandhu, O.S.; Gupta, R.K.; Thind, H.S.; Jat, M.L.; Sidhu, H.S.; Yadvinder, S. Drip irrigation and nitrogen management for improving crop yields, nitrogen use efficiency and water productivity of maize-wheat system on permanent beds in north-west India. *Agric. Water Manage.* **2019**, 219, 19–26.
- Santos, H.O.; Vasconcellos, R.C.C.; Pauli, B.; Pires, R.M.O.; Pereira, E.M.; Tirelli, G.V.; Pinho, É.V.R.V. Effect of soil temperature in the emergence of maize seeds. *J. Agr. Sci.* **2019**, 11, 479–484.
- Sárdi K.; Tóth Z.; Horváth D.E. A SPAD klorofill értékek és a nitrogén tartalom kapcsolata kukorica állományban. [In: Nagy Z.B. (szerk.) LVII. Georgikon napok.] Keszthely, Pannon Egyetem Georgikon Kar. **2015**, 96–96.
- Sárvári M. Fajtaspecifikus kukoricatermesztési technológiák fejlesztése. *Agrofórum*. **2000**, 11, 3, 53–55.
- Sárvári, M. The effect of nutrient supply, sowing time and plant density on maize yield. *Acta Agr. Hung.* **2005**, 53, 1, 59–70.
- Sárvári, M. The effect of sowing time on the yield of maize. [In: Pepó, P.; Csajbók, J. (eds.) XIIIth Congress of the European Society for Agronomy (ESA): Book of Abstracts.] Debrecen, **2014**, 119–120.
- Sárvári, M.; Pepó, P. Effect Of production factors on maize yield and yield stability. *Cereal Res. Commun.* **2014**, 42, 4, 710–720.
- Sattar, A.; Nanda, G.; Singh, G.; Jha, R.K.; Bal, S.K. Responses of phenology, yield attributes, and yield of wheat varieties under different sowing times in Indo-Gangetic Plains. *Front. Plant Sci.* **2023**, 14, 1224334.
- Scharf, P.C.; Wiebold, W.J.; Lory, J.A. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. *Agron. J.* **2002**, 94, 435–441.
- Schepers, J.S.; Blackmer, T.M.; Wilhelm, W.W.; Resende, M. Transmittance and Reflectance Measurements of Corn Leaves from Plants with Different Nitrogen and Water Supply. *J Plant Physiol.* **1996**, 148, 523–529.
- Schepers, J.S.; Francis, D.D.; Vigil, M.; Below, F.E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **1992**, 23, 17–20, 2173–2187.

- Sebetha, E.T.; Modi, A.T.; Owioye, L.G. Maize Seed Quality in Response to Different Management Practices and Sites. *J. Agr. Sci.* **2015**, *7*, 1, 215–223.
- Seleiman, M.F.; Al-Suhaibani, N.; Ali, N.; Akmal, M.; Alotaibi, M.; Refay, Y.; Dindaroglu, T.; Abdul-Wajid, H.H.; Battaglia, M.L. Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. *Plants (Basel)*. **2021**, *10*, 2, 259.
- Sheldon, K.; Shekoofa, A.; McClure, A.; Smith, A.; Martinez, C.; Bellaloui, N. Effective irrigation scheduling to improve corn yield, net returns, and water use. *Agrosyst. Geosci. Environ.* **2023**, *6*, e20449.
- Sheoran, S.; Kaur, Y.; Kumar, S.; Shukla, S.; Rakshit, S.; Kumar, R. Recent Advances for Drought Stress Tolerance in Maize (*Zea mays* L.): Present Status and Future Prospects. *Front Plant Sci.* **2022**, *13*, 872566.
- Shim, D.; Lee, K.J.; Lee, B.W. Response of phenology-and yield-related traits of maize to elevated temperature in a temperate region. *Crop J.* **2017**, *5*, 305–316.
- Shimono, H.; Miyazaki, H.; Shinjo, H.; Kanno, H.; Sakurai, T. Effect of sowing date on maize productivity in southern Zambia in the 2008/2009 growing season. Vulnerability and Resilience of Social-Ecological Systems FY2009 FR3 Project Report. **2010**, 61–66.
- Shrestha, J.; Kandel, M.; Chaudhary, A. Effects of planting time on growth, development and productivity of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agriculture and Natural Resources*. **2018**, *1*, 1, 43–50.
- Shrestha, U.; Amgain, L.P.; Karki, T.; Shrestha, J. Effect of sowing dates and maize cultivars in growth and yield of maize along with their agro-climatic indices in Nawalparasi, Nepal. *Journal AgriSearch*. **2016**, *3*, 1, 57–62.
- Siebers, M.H.; Slaterry, R.A.; Yendrek, C.R.; Locke, A.M.; Drag, D.; Ainsworth, E.A.; Bernacchi, C.J.; Ort, D.R. Simulated heat waves during maize reproductive stages alter reproductive growth but have no lasting effect when applied during vegetative stages. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2017**, *240*, 162–170.
- Siebert, S.; Ewert, F.; Rezaei, E.E.; Kage, H.; Graß, R. Impact of heat stress on crop yield – on the importance of considering canopy temperature. *Environ. Res. Lett.* **2014**, *9*, 044012.
- Silva-Neta, I.C.; Pinho, E.V.; Veiga, A.D.; Pinho, R.G.; Guimarães, R.M.; Caixeta, F.; Marques, T.L. Expression of genes related to tolerance to low temperature for maize seed germination. *Genet. Mol. Res.* **2015**, *14*, 2674–2690.
- Şimon, A.; Moraru, P.I.; Ceclan, A.; Russu, F.; Cheţan, F.; Bărdaş, M.; Popa, A.; Rusu, T.; Pop, A.I.; Bogdan, I. The Impact of Climatic Factors on the Development Stages of Maize Crop in the Transylvanian Plain. *Agronomy*. **2023**, *13*, 1612.
- Sittaphanit, S.; Limpinuntana, V.; Toomsan, B.; Panchaban, S.W.; Bell, R. Growth and yield responses in maize to split and delayed fertilizer applications on sandy soils under high rainfall regimes. *Kasetsart Journal (Natural Science)*. **2010**, *44*, 991–1003.
- Siyal, A.A.; Bristow, K.L.; Šimůnek, J. A barázdák öntözéséből származó nitrogénkimosódás minimalizálása új műtrágyaelhelyezési és talajfelszín-kezelési stratégiák révén. *Agric. Vízgazdálkodás*. **2012**, *115*, 242–251.
- Smith, W.C.; Betrán, J.; Runge, E.C.A. (eds.) Corn. Origin, History, Technology, and Production. Hoboken, NJ: John Wiley, **2004**, p. 949.
- Song, H.; Li, Y.; Zhou, L.; Xu, Z.; Zhou, G. Maize leaf functional responses to drought episode and rewatering. *Agric. For. Meteorol.* **2018**, *249*, 57–70.
- Song, Y.; Chen, Q.; Ci, D.; Shao, X.; Zhang, D. Effects of high temperature on photosynthesis and related gene expression in poplar, *BMC Plant Biol.* **2014**, *111*.
- Sorensen, I.; Stone, P.; Rogers, B. Effect of sowing time on yield of a short and a long season maize hybrid. *Proc. Agron. Soc. N. Z.* **2000**, *30*, 63–66.
- Spitkó, T.; Nagy, Z.; Zsubori, Z.T.; Szőke, C.; Berzy, T.; Pintér, J.; Marton, C.L. Connection between normalized difference vegetation index and yield in maize. *Plant Soil Environ.* **2016**, *62*, 7, 293–298.
- Spitkó T.; Szőke Cs.; Sipos Á.; Kovács A.; Csepregi-Heilmann E.; Pintér J.; Berzy T.; Marton L. Cs. A kukorica eltérő fenofázisában mért NDVI értékei és terméskomponensei közötti összefüggés vizsgálata. *Növénytermelés*. **2022**, *71*, 3–4, 211–223.
- Steffens, D.; Hutsch, B.; Eschholz, T.; Losak, T.; Schubert, S. Water logging may inhibit plant growth primarily by nutrient deficiency rather than nutrient toxicity. *Plant Soil Environ.* **2005**, *51*, 545.
- Steward, P.R.; Dougill, A.J.; Thierfelder, C.; Pittelkow, C.M.; Stringer, L.C.; Kudzala, M.; Shackelford, G.E. The adaptive capacity of maize-based conservation agriculture systems to climate stress in tropical and subtropical environments: A meta-regression of yields. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2018**, *251*, 194–202.
- Stoll, A.; Kutzbach, H.D. Guidance of a Forage Harvester with GPS. *Precision Agriculture*. **2000**, *2*, 3, 281–291.
- Stone, P.J.; Sorensen, I.B.; Jamieson, P.D. Effect of soil temperature on phenology, canopy development, biomass and yield of maize in a cool-temperate climate. *Field Crops Res.* **1999**, *63*, 169–178.
- Subedi, K.D.; Ma, B.L. Seed priming does not improve corn yield in a humid temperate environment. *Agron. J.* **2005**, *97*, 211–218.
- Sucunza, F. A.; Gutierrez Boem, F.H.; Garcia, F.O.; Boxler, M.; Rubio, G. Long-term phosphorus fertilization of wheat, soybean and maize on Mollisols: Soil test trends, critical levels and balances. *Eur. J. Agron.* **2018**, *96*, 87–95.
- Sun, J.; Gao, J.; Wang, Z.; Hu, S.; Zhang, F.; Bao, H.; Fan, Y. Maize Canopy Photosynthetic Efficiency, Plant Growth, and Yield Responses to Tillage Depth. *Agronomy*. **2019**, *9*, 3.

- Sun, X.; Yang, Z.; Su, P.; Wei, K.; Wang, Z.; Yang, C.; Wang, C.; Qin, M.; Xiao, L.; Yang, W.; Zhang, M.; Song, X.; Feng, M. Non-destructive monitoring of maize LAI by fusing UAV spectral and textural features. *Front. Plant Sci.* **2023**, *14*, 1158837.
- Swift, J.; Adame, M.; Tranchina, D.; Henry, A.; Coruzzi, G.M. Water impacts nutrient dose responses genome-wide to affect crop production. *Nat. Commun.* **2019**, *10*, 1374.
- Szabó, A.; Széles, A.; Illés, Á.; Bojtor, C.; Mousavi, S.M.N.; Radócz, L.; Nagy, J. Effect of different nitrogen supply on maize emergence dynamics, evaluation of yield parameters of different hybrids in long-term field experiments. *Agronomy*. **2022**, *12*, 2, 284.
- Szalóki, S. A növények vízigénye, vízhasznosítása és öntözővíz-szüksége. [In: Szalai, Gy. (szerk.) Az öntözés gyakorlati kézikönyve.] Mezőgazdasági Kiadó, Budapest. **1989**, 100–154.
- Szász G. A talajfelszín közelében képződő csapadékmennyiség meghatározása. *Időjárás*. **1972**, *76*, 208–222.
- Szász G. Agrometeorológia. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, **1988**.
- Szász G. A termesztett növények természetes vízhasznosulásának trendje Magyarországon a XX. században. [In: Nagy J.; Pepó P. (szerk.) Talaj, növény és környezet kölcsönhatásai.] IV. Nemzetközi Tudományos Szeminárium DE ATC, Debrecen, **2000**, 176–186.
- Széles, A.; Horváth, É.; Vad, A.; Harsányi, E. The impact of environmental factors on the protein content and yield of maize grain at different nutrient supply levels. *Emir. J. Food Agric.* **2018**, *30*, 9, 764–777.
- Széles, A.; Huzsvai, L. Modelling the effect of sowing date on the emergence, silking and yield of maize (*Zea mays* L.) in a moderately warm and dry production area. *Agronomy Research*. **2020**, *18*, 2, 579–594.
- Széles, A.; Kovács, K.; Ferencsik, S. The effect of crop years and nitrogen basal and top dressing on the yield of different maize genotypes and marginal revenue. *Quarterly Journal of The Hungarian Meteorological Service*. **2019**, *123*, 3, 265–278.
- Széles, A.; Nagy, J.; Rátonyi, T.; Harsányi, E. Effect of differential fertilisation treatments on maize hybrid quality and performance under environmental stress condition in Hungary. *Maydica*. **2019**, *64*, 2, 1–14.
- Széles, A.; Ragán, P.; Nagy, J. A szárazság mint az egyik legerőteljesebb stressztényező hatása a kukorica (*Zea mays* L.) termésére. [In: Marton, L Cs; Spitkó, T (szerk.) 60 éves a magyar hibridkukorica.] Budapest, Pannon Növény-Biotechnológiai Egyesület. **2013**, 72–77.
- Széles, A.; Ragán, P.; Nagy, J. Effect of the sowing date on the yield of three maize cultivars in Hungary. [In: Pepó, P.; Csajbók, J. (eds.) XIIIth Congress of the European Society for Agronomy (ESA): Book of Abstracts.] Debrecen, **2014**, 45–47.
- Széll, E.; Szél, S.; Kalmán, L. New maize hybrids from Szeged and their specific production technology. *Acta Agr. Hung.* **2005**, *53*, 143–151.
- Szemerits B.; Kukorelli G.; Molnár Z. A szárazság hatása a szemes kukorica és cirok vegetatív és generatív fejlődésére. *Acta Agronomica Óváriensis*. **2023**, *64*, 2.
- Szieberth D.; Széll E. (szerk.) Amit a kukoricatermesztésről a gyakorlatban tudni kell. Agroinform Kiadó, Budapest. **1998**, 163.
- Szlovák, S. The effect of nitrogen doses and different water supply upon nitrogen utilization of maize. *Acta Agr. Hung.* **1986**, *35*, 239–255.
- Szulc, P.; Bocianowski, J.; Kruczek, A.; Szymańska, G.; Roszkiewicz, R. Response of two cultivar types of maize (*Zea mays* L.) expressed in protein content and its yield to varied soil resources of N and Mg and a form of nitrogen fertilizer. *Polish Journal of Environmental Studies*. **2013**, *22*, 6, 1845–1853.
- Tajul, M.I.; Alam, M.M.; Hossain, S.M.; Naher, K.; Rafii, M.Y.; Latif, M.A. Influence of plant population and nitrogen-fertilizer at various levels on growth and growth efficiency of maize. *Scientific World Journal*. **2013**, 193018.
- Tallarida, R.J.; Murray, R.B.; Duncan Multiple Range Test. [In: Tallarida, R.J.; Murray, R.B. (eds.) Manual of Pharmacologic Calculations: With Computer Programs.] Springer New York: New York, NY. **1987**, 125–127.
- Tamás J. Precíziós mezőgazdaság – Elmélete és gyakorlata. Szaktudás Kiadó Ház Rt., **2001**, 144 p.
- Tao, F.; Zhang, Z. Adaptation of maize production to climate change in North China Plain: quantify the relative contributions of adaptation options. *Eur. J. Agron.* **2010**, *33*, 103–116.
- Taylor, R.G.; Scanlon, B.; Döll, P.; Rodell, M.; van Beek, R.; Wada, Y.; Longuevergne, L.; Leblanc, M.; Famiglietti, J. S.; Edmunds, M.; Konikow, L.; Green, T.R.; Chen, J.; Taniguchi, M.; Bierkens, M.F.P.; MacDonald, A.; Fan, Y.; Maxwell, R.M.; Yechieli, Y.; Gurdak, J.J.; Allen, D.M.; Shamsudduha, M.; Hiscock, K.; Yeh, P. J.F.; Holman, I.; Treidel, H. Ground water and climate change. *Nat. Clim. Chang.* **2013**, *3*, 4, 322–329.
- Tei, F.; Nicola, S.; Benincasa, P. Advances in research on fertilization management of vegetable crops. 1. Springer. **2017**.
- Terazawa, K.; Maruyama, Y.; Morikawa, Y. Photosynthetic and stomatal responses of *larix kaempferi* seedlings to short-term waterlogging. *Ecol. Res.* **1992**, *7*, 193–197.
- Thiagarajah, M.R.; Hunt, L.A. Effects of temperature on leaf growth in corn (*Zea mays* L.). *Can. J. Bot.* **1982**, *60*, 1647–1652.
- Tian, B.; Zhu, J.; Nie, Y.; Xu, C.; Meng, Q.; Wang, P. Mitigating heat and chilling stress by adjusting the sowing date of maize in the North China Plain. *J. Agron. Crop Sci.* **2019**, *205*, 77–87

- Tilman, D.; Cassman, K.G.; Matson, P.A.; Naylor R.; Polasky, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. **2002**, 418, 6898, 671–677.
- Timmons, D.R.; Cruse, R.M. Effect of fertilization method and tillage on nitrogen – 15 recovery by corn. *Agron. J.* **1990**, 82, 4, 777–784.
- Tollenaar, M.; Lee, E.A. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Res.* **2002**, 75, 161–169.
- Tollenaar, M.; Wu, J. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. *Crop Sci.* **1999**, 39, 1597–1604.
- Tong, S.Y.; Song, F.B.; Xu, H.W. Differences of Morphological Senescence of Leaves in Various Maize Varieties during Mature Period of Seed. *Acta Agric. Boreali Sin.* **2009**, 24, 11–15.
- Torbert, H.A.; Potter, K.N.; Morrison, J.E. Tillage system, fertilizer nitrogen rate and timing effect on corn yields in the Texas Blackland prairie. *Agronomy J.* **2001**, 93, 1119–1124.
- Tóth Z. 2002. A fejtrágyázás jelentősége. *Agro Napló*. **2002**, 6. 3, 55–56.
- Tóth, V.R.; Mészáros, I.; Veres, Sz.; Nagy, J. Effects of the available nitrogen on the photosynthetic activity and xanthophyll cycle pool of maize in field. *Journal of Plant Physiology*. **2002**, 159, 6, 627–634.
- Trnka, M.; Rötter, R.P.; Ruiz-Ramos, M.; Kersebaum, K.C.; Olesen, J.E.; Žalud, Z.; Semenov, M.A.; Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nat. Clim. Change*. **2014**, 4, 637–643.
- Tsai, C.Y.; Dweikat, I.; Huber, D.M.; Warren, H.L. Interrelationship of nitrogen nutrition with maize (*Zea mays* L.) grain yield, nitrogen use efficiency and grain quality. *J. Sci. Food Agric.* **1992**, 58, 1–8.
- Tsimba, R.; Edmeades, G.O.; Millner, J.P.; Kemp, P.D. The effect of planting date on maize: Phenology, thermal time durations and growth rates in a cool temperate climate. *Field Crops Res.* **2013**, 150, 145–155.
- Tsouros, D.C.; Bibi, S.; Sarigiannidis, P.G. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*. **2019**, 10, 11, 349.
- Turgut, İ.; Balcı, A. The Effects of Plant Density and Different Sowing Dates on Fresh Ear Weight and some Agricultural Characters of Sweet Corn (*Zea mays saccharata* Sturt.) Grown Under Isparta Conditions. *Journal of Agricultural Faculty of Uludağ University*. **2002**, 16, 2, 79–91.
- Uddling, J.; Gelang-Alfredsson, J.; Piikki, H.; Pleijel, K. Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynth. Res.* **2007**, 91, 1, 37–46.
- Ullah, M.I.; Khakwani, A.A.; Sadiq, M.; Awan, I.; Ghazanfarullah, M.M. Effects of nitrogen fertilization rates on rowth, quality and economic return of fodder maize (*Zea mays* L.). *Sarhad Journal of Agriculture*. **2015**, 31, 1, 45–52.
- Uribealarea, M.; Below, F.E.; Moose, S.P.; Grain composition and productivity of maize hybrids derived from the Illinois protein strains in response to variable nitrogen supply. *Crop Sci.* **2004**, 44, 1593–1600 .
- USDA/FAS. USDA's Foreign Agricultural Service (FAS) Corn-Production. **2024**, <https://fas.usda.gov/data/production/commodity/0440000>
- Vacca, G. WEB Open Drone Map (WebODM) a Software Open Source to Photogrammetry Process. [In: Fig. Working Week 2020. Smart surveyors for land and water management.] **2020**.
- Van Dijk, M.; Morley, T.; Rau, M.L.; Saghai, Y.A. Meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nat. Food*. **2021**, 2, 494–501.
- Ványiné Széles A.; Megyes A.; Nagy J. Vetésidő és az évjárat hatása a kukoricahibridek terméshozamára és minőségére. *Növénytermelés*. **2010**, 59, 4, 63–88.
- Ványiné Széles, A.; Megyes, A.; Nagy, J. Irrigation and nitrogen effects on the leaf chlorophyll content and grain yield of maize in different crop years. *Agric. Water Manag.* **2012**, 107, 133–144.
- Ványiné Széles, A.; Nagy, J. Effect of nutrition and water supply on the yield and grain protein content of maize hybrids. *Aust. J. Crop Sci.* **2012**, 6, 3, 381–290.
- Venterea, R.T.; Coulter, J.A. Split application of urea does not decrease and may increase nitrous oxide emissions in rainfed corn. *Agron. J.* **2015**, 107, 1, 337–348.
- Veres, Sz.; Zsombik, L.; Juhász, Cs. Regulation Effect of Different Water Supply to the Nitrogen and Carbon Metabolism. [In: Bosco de, O. A. (ed.) Abiotic and Biotic Stress in Plants.] Intech Open, Rijeka. p. Ch. **2019**, 9.
- Vetsch, J.A.; Randall, G.W. Corn production as affected by nitrogen application timing and tillage. *Agron. J.* **2004**, 96, 502–509.
- Videnović, Ž.; Dumanović, Z.; Simić, M.; Srdić, J.; Babić, M.; Dragičević, V. Genetic potential and maize production in Serbia. *Genetika*. **2013**, 45, 667–677.
- Videnović, Ž.; Simić, M.; Srdić, J.; Dumanović, Z.; Pavlov, M. Effect of sowing time on yield of ZP maize hybrids. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. **2011**, 15, 1, 23–26.
- Viets, F. Water deficits and nutrient availability. Water deficits and plant growth. Academic Press, New York, **1972**, 217–239.
- Vulchinkov, S.; Ilchovska, D.; Pavlovska, B.; Ivanova, K. Trends in productive abilities of maize hybrids from different fao groups. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. **2013**, 19, 744–749.

- Waha, K.; van Bussel, L.G.J.; Müller, C.; Bondeau A. Climate-driven simulation of global crop sowing dates *Global Ecol. Biogeogr.* **2012**, *21*, 247–259.
- Walling, E.; Vaneekhaute, C. Greenhouse gas emissions from inorganic and organic fertilizer production and use: a review of emission factors and their variability. *Journal of Environmental Management.* **2020**, 276.
- Walsh, O.; Raun, W.; Klatt, A.; Solie, J. Effect of delayed nitrogen fertilization on maize (*Zea mays* L.) grain yields and nitrogen use efficiency. *J. Plant Nutr.* **2012**, *35*, 538–555.
- Wang, F.; Xie, R.; Ming, B.; Wang, K.; Hou, P.; Chen, J.; Liu, G.; Zhang, G.; Xue, J.; Li, S. Dry matter accumulation after silking and kernel weight are the key factors for increasing maize yield and water use efficiency. *Agric. Water Manag.* **2021**, 254, Article 106938.
- Wang, L.; Ren, B.; Zhao, B.; Liu, P.; Zhang, J. Comparative Yield and Photosynthetic Characteristics of Two Corn (*Zea mays* L.) Hybrids Differing in Maturity under Different Irrigation Treatments. *Agriculture.* **2022**, *12*, 365.
- Wang, N.; Siegmund, B.; Rascher, U.; Clevers, J.G.P.W.; Muller, O.; Bartholomeus, H.; Bendig, J.; Masiliūnas, D.; Pude, R.; Kooistra, L. Comparison of a UAV- and an airborne-based system to acquire far-red sun-induced chlorophyll fluorescence measurements over structurally different crops. *Agric. For. Meteorol.* **2022**, *323*, 109081.
- Wang, N.; Wang, E.; Wang, J.; Zhang, J.; Zheng, B.; Huang, Y.; Tan, M. Modelling maize phenology, biomass growth and yield under contrasting temperature conditions. *Agr. Forest Meteorol.* **2018**, 250–251, 319–329.
- Wang, N.; Zhang, T.H.; Cong, A.Q.; Lian, J. Integrated application of fertilization and reduced irrigation improved maize (*Zea mays* L.) yield, crop water productivity and nitrogen use efficiency in a semi-arid region. *Agric. Water Manag.* **2023**, 289, 108566.
- Wang, R.; Min, J.; Kronzucker, H.J.; Li, Y.; Shi, W. N and P runoff losses in China's vegetable production systems: loss characteristics, impact, and management practices. *Sci. Total Environ.* **2019**, 663, 971–979.
- Wang, Y.; Huang, Y.; Fu, W.; Guo, W.; Ren, N.; Zhao, Y.; Ye, Y. Efficient Physiological and Nutrient Use Efficiency Responses of Maize Leaves to Drought Stress under Different Field Nitrogen Conditions. *Agronomy.* **2020**, *10*, 523.
- Wang, Y.P.; Chang, Y.C.; Shen, Y. Estimation of nitrogen status of paddy rice at vegetative phase using unmanned aerial vehicle based multispectral imagery. *Precision Agriculture.* **2022**, *23*, 1, 1–17.
- Wang, Z.H.; Li, S.X.; Malhi, S. Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. *J. Sci. Food Agric.* **2008**, *88*, 7–23.
- Wang, Zh.; Chen, J.; Li, Y.; Li, C.; Zhang, L.; Chen, F. Effects of climate change and cultivar on summer maize phenology. *Int. J. Plant. Prod.* **2016**, *10*, 509–522.
- Waqas, M.A.; Khan, I.; Akhter, M.J.; Noor, M.A.; Ashraf, U. Exogenous application of plant growth regulators (PGRs) induces chilling tolerance in short-duration hybrid maize. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2017**, *24*, 11459–11471.
- Waqas, M.A.; Wang, X.; Zafar, S.A.; Noor, M.A.; Hussain, H.A.; Azher Nawaz, M.; Farooq, M. Thermal Stresses in Maize: Effects and Management Strategies. *Plants (Basel).* **2021**, *10*, 2, 293.
- Wasson, A.P.; Richards, R.A.; Chatrath, R.; Misra, S.C.; Prasad, S.V.; Rebetzke, G.J.; Kirkegaard, J.A.; Christopher, J.; Watt, M. Traits and selection strategies to improve root systems and water uptake in water-limited wheat crops. *J. Exp. Bot.* **2012**, *63*, 3485–3498.
- Wienhold, B.J.; Troien, T.P.; Reichman, G.A. Yield and nitrogen use efficiency of irrigated corn in the Northern Great Plains. *Agronomy J.* **1995**, *87*, 5, 842–847.
- Wilhelm, W.; Ruwe, K.; Schlemmer, M.R. Comparison of three leaf area index meters in a corn canopy. *Crop Sci.* **2000**, *40*, 1179–1183.
- Wilhelm, W.W.; Wortmann, C.S. Tillage and rotation interactions for corn and soybean grain yield as affected by precipitation and air temperature. *Agron. J.* **2004**, *96*, 425–432.
- Wilkens, P.; Singh, U. A CODE-Level Analysis for Temperature Effects in the CERES Models. Resource Development Division, International Fertilizer Development Center (IFDC), Muscle Shoals, Alabama, USA, **2001**.
- Wrigley, C.; Corke, H.; Seetharaman, K.; Faubion, J. Encyclopedia of food grains. The world of food grains. Elsevier Ltd., Oxford, **2016**.
- Wu, Y.; Messing, J. Proteome balancing of the maize seed for higher nutritional value. *Front. Plant Sci.* **2014**, *5*, 240.
- Wurr, D.C.E.; Fellows, J.R.; Phelps, K. Crop scheduling and prediction – Principles and opportunities with field vegetables. *Advances in Agronomy.* **2002**, *76*, 201–34.
- Xie, C.; Yang C. A review on plant high-throughput phenotyping traits using UAV-based sensors. *Comput Electron Agric.* **2020**, 178, 105731.
- Xu, Z.; Zhou, G.; Han, G.; Li, Y. Photosynthetic Potential and its Association with Lipid Peroxidation in Response to High Temperature at Different Leaf Ages in Maize. *J. Plant Growth Regul.* **2011**, *30*, 41–50.
- Xu, Z.Z.; Zhou, G.S.; Wang, Y.L.; Han, G.X.; Li, Y.J. Changes in chlorophyll fluorescence in maize plants with imposed rapid dehydration at different leaf ages. *J. Plant Growth Regul.* **2008**, *27*, 1, 83–92.
- Yan, F.; Zhang, F.; Fan, X.; Fan, J.; Wang, Y.; Zou, H.; Wang, H.; Li, G. Determining irrigation amount and fertilization rate to simultaneously optimize grain yield, grain nitrogen accumulation and economic benefit of drip-fertilized spring maize in northwest China. *Agric. Water Manag.* **2021**, 243, 106440.

- Yan, G.U.; Cao, M.K.; Zhang, Y.Q.; Sun, Y.; Wen-He, H.U.; Chun-Sheng, W.U. Effects of low temperature on photosynthetic fluorescence and enzyme activity of carbon metabolism of maize at booting stage. *J. Plant Physiol.* **2015**, *51*, 941–948.
- Yan, W.; Wallace, D.H. Simulation and Prediction of Plant Phenology for Five Crops Based on Photoperiod x Temperature Interaction. *Annals of Botany.* **1998**, *81*, 2, 705–716.
- Yang, B.; Zhu, W.; Rezaei, E.E.; Li, J.; Sun, Z.; Zhang, J. The Optimal Phenological Phase of Maize for Yield Prediction with High-Frequency UAV Remote Sensing. *Remote Sensing.* **2022**, *14*, 7 1559.
- Yang, H.; Huang, T.; Ding, M.; Lu, D.; Lu, W. High temperature during grain filling impacts on leaf senescence in waxy maize. *Agron. J.* **2017**, *109*, 906–916.
- Yang, H.; Yang, J.P.; Li, F.H.; Liu, N. Replacing the Nitrogen Nutrition Index by SPAD Values and Analysis of Effect Factors for Estimating Rice Nitrogen Status. *Agronomy J.* **2018**, *110*, 2, 545–554.
- Yang, P.; Wu, L.; Cheng, M.; Fan, J.; Li, S.; Wang, H.; Qian, L. Review on Drip Irrigation: Impact on Crop Yield, Quality, and Water Productivity in China. *Water.* **2023**, *15*, 1733.
- Yeşilirmak, E. Soil temperature trends in Büyük Menderes Basin, Turkey. *Meteorol. Appl.* **2014**, *21*, 859 – 866.
- Yordanov, I.; Velikova, V.; Tsonev, T. Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance. *Photosynthetica.* **2000**, *38*, 2, 171–186.
- Zagyi P.; Horváth É.; Széles A. Kukorica: vetés és kelésdinamika. *Mezőhír*, Országos Agrárinformációs Szaklap **2024**, *28*, 4, 18–21.
- Zarco-Tejada, P.J.; González-Dugo, M.V.; Fereres, E. Seasonal stability of chlorophyll fluorescence quantified from airborne hyperspectral imagery as an indicator of net photosynthesis in the context of precision agriculture. *Remote Sens. Environ.* **2016**, *179*, 89–103.
- Żarski, J.; Kuśmierk-Tomaszewska, R. Effects of Drip Irrigation and Top Dressing Nitrogen Fertilization on Maize Grain Yield in Central Poland. *Agronomy.* **2023**, *13*, 360.
- Zhang, F.; Zhou, G. Estimation of vegetation water content using hyperspectral vegetation indices: A comparison of crop water indicators in response to water stress treatments for summer maize. *BMC Ecol.* **2019**, *19*, 18.
- Zhang, J.; Lu, X.Q.; Song, X.F.; Yan, J.B.; Song, T.M.; Dai, J.R.; Rocheford, T.; Li, J.S. Mapping quantitative trait loci for oil, starch, and protein concentrations in grain with high-oil maize by SSR markers. *Euphytica.* **2008**, *162*, 335–334.
- Zhang, L.; Niu, Y.; Zhang, H.; Han, W.; Li, G.; Tang, J.; Peng, X. Maize canopy temperature extracted from UAV thermal and RGB imagery and its application in water stress monitoring. *Frontiers in Plant Science.* **2019**, *10*, 1270.
- Zhang, N.; Wang, M.; Wang, N. Precision agriculture – a worldwide overview. *Comput. Electron. Agric.* **2002**, *36*, 2, 113–132.
- Zhang, S.; Zhao, G.; Lang, K.; Su, B.; Chen, X.; Xi, X.; Zhang, H. Integrated Satellite, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Ground Inversion of the SPAD of Winter Wheat in the Reviving Stage. *Sensors.* **2019**, *19*, 1485.
- Zhang, T.; Barry, R.G.; Gilichinsky, D.; Bykhovets, S.S.; Sorokovikov, V.A.; Ye, J. An amplified signal of climatic change in soil temperatures during the last century at Irkutsk, Russia. *Clim. Change.* **2001**, *49*, 41–76.
- Zhang, Y.Q.; Wang, J.; Gong, S.; Xu, D.; Mo, Y. Straw mulching enhanced the photosynthetic capacity of field maize by increasing the leaf N use efficiency. *Agric. Water Manag.* **2019**, *218*, 60–67.
- Zhao, B.; Ata-Ul-Karim, S.T.; Duan, A.; Liu, Z.; Wang, X.; Xiao, J.; Liu, Z.; Qin, A.; Ning, D.; Zhang, W.; et al. Determination of critical nitrogen concentration and dilution curve based on leaf area index for summer maize. *Field Crops Res.* **2018**, *228*, 195–203.
- Zheng, H.L.; Liu, Y.C.; Qin, Y.L.; Chen, Y.; Fan, M.S. Establishing dynamic thresholds for potato nitrogen status diagnosis with the SPAD chlorophyll meter. *J. Integr. Agric.* **2015**, *14*, 1, 190–195.
- Zhu, P.; Jin, Z.N.; Zhuang, Q.L.; Ciais, P.; Bernacchi, C.; Wang, X.H.; Makowski, D.; Lobell, D. The important but weakening maize yield benefit of grain filling prolongation in the US Midwest. *Glob. Change Biol.* **2018**, *24*, 4718–4730.
- Zwart, S.J.; Bastiaanssen, W.G.M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. *Agric. Water Manag.* **2004**, *69*, 2, 115–133.

ÁBRA-ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK

2. **ábra.** Vetésidő kísérlet elrendezése (Alapítás: Széles A., 2007)
2. **ábra.** A nitrogén alap- és fejtrágyázás tartamkísérlet elrendezése (Alapítás: Széles A., 2011)
3. **ábra.** A csapadék mennyiségének alakulása a tenyészidőszakban (Debrecen, 2011–2023)
4. **ábra.** A középhőmérséklet alakulása a tenyészidőszakban (Debrecen, 2011–2023)
5. **ábra.** A növekedési foknap (GDD) havi eloszlása a tenyészidőszakban (Debrecen, 2011–2023)
6. **ábra.** A GDD és a termés alakulása a kukorica hibridek átlagában (Debrecen, 2018–2019)
7. **ábra.** Az évjárat hatása a kukorica hibridek V6, V12 és R1 fenológiai szakaszának SPAD értékére (Debrecen, 2011–2023)
8. **ábra.** A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport SPAD értékére (Debrecen, 2011–2023)
9. **ábra.** A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és a FAO 400 éréscsoport SPAD érték dinamikájára (Debrecen, 2011–2023)
10. **ábra.** Az évjárat hatása a kukorica termésére (Debrecen, 2011–2023)
11. **ábra.** Rendszertérkép, amely a kukorica termése és a tenyészidőszak időjárásának kapcsolatát mutatja (Debrecen, 2011–2023)
12. **ábra.** Az évjárat hatása különböző éréscsoportú kukorica hibridek termésére (Debrecen, 2011–2023)
13. **ábra.** A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport termésére (Debrecen, 2011–2023.)
14. **ábra.** Az évjárat hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport mag-keményítőtartalmára (Debrecen, 2011–2023)
15. **ábra.** A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport keményítőtartalmára (Debrecen, 2011–2023)
16. **ábra.** Az évjárat hatása a FAO 300 és a FAO 400 éréscsoport mag-fehérjetartalmára (Debrecen, 2011–2023)
17. **ábra.** A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a FAO 300 és FAO 400 éréscsoport mag-fehérjetartalmára (Debrecen, 2011–2023)
18. **ábra.** A N-műtrágyázás és SPAD közötti összefüggés, logaritmus regressziós eredménye, V6, V12 és R1 fenofázisban (Debrecen, 2011–2023)
19. **ábra.** A SPAD érték és a termés közötti összefüggés, lineáris regressziós eredménye, V6, V12 és R1 fenofázisban (Debrecen, 2011–2023)
20. **ábra.** A N-műtrágyázás és a termés közötti összefüggés, logaritmus regressziós eredménye (Debrecen, 2011–2023)
21. **ábra.** A N-műtrágyázás és a mag-keményítőtartalom közötti összefüggés, logaritmus regressziós eredménye (Debrecen, 2011–2023)
22. **ábra.** A N-műtrágyázás és a mag-fehérjetartalom közötti összefüggés, logaritmus regressziós eredménye (Debrecen, 2011–2023)
23. **ábra.** A mag-fehérjetartalom és a termés közötti összefüggés, lineáris regressziós eredménye (Debrecen, 2011–2023)
24. **ábra.** A kísérleti terület csapadékellátottsága és a növekedési foknap (GDD) alakulása a VD1, a VD2 és a VD3 vetés tenyészidőszakában (Debrecen, 2011–2023)
25. **ábra.** A vetésidő és az évjárat hatása az eltérő genotípusú kukorica hibridek termésére (Debrecen, 2011–2023)

- 26. ábra.** Az évjárat és a vetésidő hatása a kukorica hőfelhasználási hatékonyságára (Debrecen, 2011–2013)
- 27. ábra.** A kukorica hibridek hőfelhasználási hatékonysága (HUE) eltérő vetésidőben (Debrecen, 2011–2013)
- 28. ábra.** Az évjárat és vetésidő hatása a kukoricamag fehérjetartalmára (Debrecen, 2011–2013)
- 29. ábra.** Az évjárat és vetésidő hatása a kukoricamag olajtartalmára (Debrecen 2011–2013)
- 30. ábra.** A kukoricamag fehérje- és olajtartalom összefüggés, telítődési függvénnyel, három év átlagában (Debrecen, 2011–2013)
- 31. ábra.** A napi átlagos talajhőmérséklet (TH) és a napi átlagos léghőmérséklet (LH) 3 éves adatsora a kísérleti területen (Debrecen, 2011–2013)
- 32. ábra.** A napi átlagos talajhőmérséklet (TH) modellezett értékei 3 éves (2011–2013) adatok alapján
- 33. ábra.** A levél relatív klorofilltartalmának értéke (SPAD) és a levélfelület-index (LAI) változása (Debrecen, 2021 és 2022)
- 34. ábra.** Az alap- és fejtrágyázás hatása a kukorica termésére (Debrecen, 2021)
- 35. ábra.** Az alap- és fejtrágyázás hatása a kukorica termésére (Debrecen, 2022)
- 36. ábra.** A kukorica termése a relatív klorofilltartalom (SPAD) függvényében (Debrecen, 2021–2022)
- 37. ábra.** A kukorica termése a levélterület-index (LAI) függvényében (Debrecen, 2021–2022)
- 38. ábra.** A kukorica termése a relatív klorofilltartalom (SPAD) és levélterület-index (LAI) függvényében a VT fenofázisban (Debrecen, 2021–2022)
- 39. ábra.** A csapadék eloszlása és a napi középhőmérséklet alakulása a vetéstől a betakarításig (Debrecen, 2022)
- 40. ábra.** A SPAD (a), az UAV-alapú NDVI (b) és a szemtermés (c) boxplot diagramjai, N-műtrágyázás és öntözés mellett (Debrecen, 2022)
- 41. ábra.** A SPAD értékek boxplot diagramjai, N-műtrágyázás és öntözés mellett (Debrecen, 2022)
- 42. ábra.** Az UAV-alapú NDVI értékek boxplot diagramjai, N-műtrágyázás és öntözés mellett (Debrecen, 2022)
- 43. ábra.** A különböző vizsgált változók közötti kölcsönhatás a kísérleti adatok alapján (Debrecen, 2022)
- 44. ábra.** Rendszertérkép, amely a vizsgált paraméterek különböző megfigyelt értékei közötti kölcsönhatást mutatja
- 45. ábra.** A N-műtrágyázás és a SPAD érték közötti parabolikus összefüggés, nem öntözött és öntözött körülmények között (Debrecen, 2022)
- 46. ábra.** A N-műtrágyázás és az UAV-alapú NDVI közötti parabolikus összefüggés, nem öntözött és öntözött körülmények között (Debrecen, 2022)
- 47. ábra.** A SPAD érték és a szemtermés közötti korreláció, nem öntözött és öntözött körülmények között (Debrecen, 2022)
- 48. ábra.** UAV-alapú NDVI és a szemtermés közötti korreláció, nem öntözött és öntözött körülmények között (Debrecen, 2022)

- 1. táblázat.** A vegetációs időszak meteorológiai jellemzői (Debrecen 2011–2023)
- 2. táblázat.** Az alkalmazott N-műtrágyamennyiségek és kijuttatásának ideje
- 3. táblázat.** Az agrometeorológiai indexek alakulása a Sushi és a Fornad kukorica hibridek fenológiai szakaszaiban (Debrecen, 2018–2019)
- 4. táblázat.** A nitrogén alap- és fejtrágyázás hatása a Sushi és a Fornad kukorica hibridek szemtermésére (Debrecen, 2018–2019)
- 5. táblázat.** A Sushi és a Fornad kukorica hibridek hőfelhasználási hatékonysága (Debrecen, 2018–2019)
- 6. táblázat.** A kukorica SPAD értékének összevont varianciaanalízis eredménye (Debrecen, 2011–2023)
- 7. táblázat.** A kukorica SPAD értékének évenkénti varianciaanalízise (Debrecen, 2011–2023)
- 8. táblázat.** A kukorica termésének összevont varianciaanalízis eredménye (Debrecen, 2011–2023)
- 9. táblázat.** A N-műtrágyázás és különböző éréscsoportba tartozó hibridek és interakcióinak hatása a termésre. Közepes négyzetes eltérései (MS) és az F-érték szignifikanciája az évenkénti varianciaanalízis alapján (Debrecen, 2011–2023)
- 10. táblázat.** A kukoricamag keményítőtartalmának összevont varianciaanalízis eredménye (Debrecen, 2011–2023)
- 11. táblázat.** A N-műtrágyázás és különböző éréscsoportba tartozó hibridek és interakcióinak hatása a kukoricamag keményítőtartalmára. Közepes négyzetes eltérései (MS) és az F-érték szignifikanciája az évenkénti varianciaanalízis alapján (Debrecen, 2011–2023)
- 12. táblázat.** A kukoricamag fehérjetartalmának összevont varianciaanalízis eredménye (Debrecen, 2011–2023)
- 13. táblázat.** A N-műtrágyázás és különböző éréscsoportba tartozó hibridek és interakcióinak hatása a kukoricamag fehérjetartalmára. Közepes négyzetes eltérései (MS) és az F-érték szignifikanciája az évenkénti varianciaanalízis alapján (Debrecen, 2011–2023)
- 14. táblázat.** A kukorica vetésidő, a genotípus és az évjárat kezeléseinek varianciaanalízise (Debrecen, 2011–2013)
- 15. táblázat.** A vetésidő (VD) hatása a kukorica hibridek termésére (Debrecen, 2011–2013)
- 16. táblázat.** A különböző vetés időpontok hatása a kukorica hibridek mag-fehérjetartalmára (Debrecen 2011–2013)
- 17. táblázat.** A különböző vetés időpontok hatása a kukorica hibridek mag-olajtartalmára (Debrecen, 2011–2013)
- 18. táblázat.** A vetéstől (VD) kelésig eltelt napok számának megfigyelt és szimulált értékei eltérő vetésidőben, kísérleti terület (Debrecen, 2011–2013)
- 19. táblázat.** A vetéstől (VD) a virágzásig (R1) eltelt napok számának megfigyelt és szimulált értékei eltérő vetésidőben, kísérleti terület (Debrecen, 2011–2013)
- 20. táblázat.** Többszörös R-négyzet és maradék standard hiba (RMSE)
- 21. táblázat.** A N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica spektrális értékeire (SPAD és UAV-alapú NDVI) és szemtermésére (Debrecen, 2022)
- 22. táblázat.** N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica SPAD értékeire a fenológiai szakaszokban (Debrecen, 2022)
- 23. táblázat.** N-műtrágyázás és az öntözés hatása a kukorica UAV-alapú NDVI-ra fenológiai szakaszokban (Debrecen, 2022)
- 24. táblázat.** A szemtermés és a különböző kísérleti változók közötti kölcsönhatás a faktoriális ANOVA-GLM alapján

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Sokat köszönhetek Nagy János professzor úrnak, aki intézetvezetőként elindította pályafutásomat, biztosította a kutatómunkám folyamatos és gördülékeny előrehaladásához szükséges feltételeket. Szakmai támogatásával alapvetően hozzájárult a kutatásaim előrehaladásához és eredményességéhez.

Köszönetet mondok Huzsvai László egyetemi docens úrnak, aki már a Ph.D. disszertációm témavezetőjeként segítette, valamint azóta is segíti szakmai tanácsaival a kísérletből származó adataim értékelésének korszerű módszertani feldolgozását és elemzését.

Köszönetet szeretnék mondani Dr. Vad Attila Miklós igazgató úrnak és munkatársainak a szántóföldi kísérletek helyszínének biztosításáért, valamint a kísérletek beindításában és annak munkálataiban nyújtott személyes segítségükért. Külön köszönöm az elkötelezett hozzáállásukat, és az időben történő, rugalmas segítségnyújtást, melyek alapvetően hozzájárultak a kísérletek zavartalan lebonyolításához.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani PhD hallgatóimnak (Dr. Horváth Éva, Dr. Ragán Péter, Zagyi Péter) és közvetlen kollégáimnak a kutatómunkámhoz nyújtott áldozatos munkájukért, elkötelezettségükért és folyamatos segítségükért, melyek nélkülözhetetlenek voltak a dolgozat sikeres megvalósításában.

Szeretném kifejezni köszönetemet a Magyar Tudományos Akadémiának a Bolyai János Kutatói Ösztöndíj és Bolyai+ Felsőoktatási Fiatal Oktatói, Kutatói Ösztöndíj támogatásért.

A több mint 20 éves kutatói munka sikeres megvalósítását az NKFI, EFOP, TÁMOP, GINOP, Debreceni Egyetem Belső Kutatói Pályázat, FP-7 és a REGPOT pályázatok, valamint több céggel (KITE Zrt., Syngenta Seeds Kft., Monsanto Hungaria Kft., Isterra Magyarország Kft., Isterra Közép-Európa Kft.) kötött együttműködés támogatta.

Hálás vagyok férjemnek, Kakuszi Zoltánnak és fiamnak, Gergőnek, akik mindvégig mellettem álltak, és akiknek türelme, megértése és folyamatos támogatása nélkülözhetetlen volt kutatómunkám sikeres elvégzéséhez. Az ő hitük és szeretetük nélkül nem lettem volna képes befejezni ezt a munkát.

Köszönetet mondok szüleimnek, akik odaadó biztatásukkal, folyamatos támogatásukkal és végtelen türelmükkel segítettek a disszertációm elkészítésének minden nehéz pillanatában. Az ő segítségük és szeretetük minden egyes lépésnél erőt adott számomra.