



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

KALÁSZOS GABONÁK VÍZIGÉNYÉNEK ÉS
VÍZHASZNOSÍTÓ KÉPESSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA
KÜLÖNBÖZŐ KÍSÉRLETI RENDSZEREKBE

Farkas Zsuzsanna

Keszthely

2023

A doktori iskola

megnevezése: Festetics Doktori Iskola (FDI)

tudományága: Környezettudományok

vezetője: Dr. habil. Anda Angéla Rita
egyetemi tanár, DSc
MATE
Georgikon Campus, Agronómia Tanszék

Témavezető(k): Dr. Varga Balázs
tudományos főmunkatárs, PhD
ELKH, ATK MGI
Kalászos Gabona Nemesítési Osztály

Dr. habil. Anda Angéla Rita
egyetemi tanár, DSc
MATE
Georgikon Campus, Agronómia Tanszék



.....
Az iskolavezető jóváhagyása



.....
A témavezető jóváhagyása



.....
A témavezető jóváhagyása

A munka előzményei, célkitűzések

Az ipari forradalom vívmányai nem csak a gyorsütemű népességnövekedést tették lehetővé, hanem a fosszilis energiahordozók nagymértékű égetését is magukkal hozták, mellyel hozzájárultak a légköri szén-dioxid-koncentráció emelkedéséhez, a kezdeti 278 ppm-ről napjainkig mérhető, megközelítőleg 417 ppm szintre. Ha a CO₂-kibocsátás üteme nem változik, akkor harminc éven belül a légköri koncentrációja elérheti az 550 ppm szintet. A szén-dioxid természetes alkotóeleme légkörünknek és feltétlenül szükséges a növények asszimilációjához, az utóbbi pár évszázad során a majdnem kétszeresére növekedett szintje miatt az egyik legjelentősebb üvegházhatású gázzá vált. A megnövekedett CO₂-szint pozitívan befolyásolja a növények fotoszintézisét, csökkenti a vízfelvételt, javítja a növekedést és produkciót. A CO₂-szint emelkedése csökkentheti a sztómaellenállást, ezáltal javíthatja a vízhasznosító képességet. A C₃-as növényeknél az emelt CO₂-koncentráció stimulálhatja a nettó CO₂-asszimilációt, amely nagyobb biomassza-produkcióhoz és terméshez vezet. A szén-dioxid pozitív hatása a C₃-as növényeknél jól ismert jelenség, viszont ez a hatás nagyban függ a különböző környezeti hatásoktól, mint a léghőmérséklet vagy a talaj tápanyag- és víztartalma.

Előrejelzések szerint a következő évtizedekben várhatóan több és intenzívebb aszályos időszakra számíthatunk számos mezőgazdaságilag művelt területen. Az aszály az egyik legfontosabb abiotikus stressz, amely jelentősen csökkenti a növényi produkciót és akár a termőterületek 40-60%-át érintheti.

A vízhasznosító képesség (WUE – water-use efficiency) fontos mérőszám, hiszen a szén- és vízforgalom közötti kapcsolatra világít rá, ezáltal az aszálytűrő képesség indikátora. A vízhasznosító képesség meghatározása fontos a klímaváltozásra adott növényi válaszok vizsgálatában, mely mérőszám a fajták között jelentős különbséget mutat és számos környezeti tényező befolyásolja. Munkánk során különböző kísérleti rendszerben vizsgáltuk az őszi kalászos gabonák vízhasznosító képességét.

Az értekezés fő célkitűzései:

- Őszi vetésű kalászos gabonák (árpa, búza, zab) abiotikus stressztoleranciájának vizsgálata.
- Vízigényük és vízhasznosító képességük meghatározása különböző kísérleti rendszerekben.
- Az egyes módszerekkel számított vízhasznosítóképesség-értékek összehasonlítása.

Céljaink elérésének érdekében eltérő kísérleti rendszereket alkalmaztunk annak érdekében, hogy a rendelkezésünkre álló módszerek előnyeit kihasználva gyakorlatorientált eredményekkel szolgálhassunk a növénynevelőknek és gazdálkodóknak egyaránt. Az üvegházi modellkísérleti rendszer biztosította, hogy szabályozott klimatikus körülmények között, az esetleges kedvezőtlen meteorológiai és talajviszonyok hatásait kiküszöbölve, célirányos stresszkezelések vízforgalmi hatásait vizsgáljuk és a növények stresszválaszait a vízforgalom tükrében értékelhessük. A tudományos célú szabadföldi liziméterrendszer a szántóföldi körülmények szimulálására jelenleg a legprecízebb rendszer, mely a növények tenyészidőszaki vízfogyasztásának meghatározása mellett akár napon belüli vízforgalom dinamikájának meghatározására is alkalmas, azonban a környezeti viszonyokhoz történő alkalmazkodás ebben az esetben szükségszerű, és a beruházás magas költsége miatt nagy populációk vizsgálata ebben a rendszerben nem életszerű. Az előbb említett módszerek előnyei elsősorban alapkutatási szinten szolgálnak információkkal, viszont a gazdálkodók számára stratégiai kérdés, hogy a rendelkezésre álló vízkészlettel a növények milyen hatékonyan gazdálkodnak, a különböző termőhelyi adottságok mellett mekkora termőképességgel rendelkeznek. Ennek érdekében három termőhelyen, eltérő klimatikus és talajadottságok mellett két egymást követő tenyészidőszakban végeztünk kísérleteket.

Kutatásunk a három kísérleti rendszer kombinálásán alapult oly módon, hogy a kísérletek egymásra épülve, egymást kiegészítve a lehető legpontosabb információkkal szolgáljanak az őszi kalászosok vízforgalmáról és vízhasznosító képességéről. A legjelentősebb kenyérgabonánk, az őszi búza mellett őszi árpa és zabfajtát is bevontunk a kísérletekbe, mivel feltételeztük, hogy ezeknek a fajoknak a búzától eltérő fejlődési üteme és habitusa jelentősen befolyásolhatja a vízforgalmi tulajdonságaikat is.

Anyag és módszer

Üvegházi kísérleti rendszer

Kísérleti elrendezés

Klíma-kontrollált üvegházi modellkísérletben vizsgáltunk négy őszebúza-fajtát: Mv Ikva, Mv Nádor, Mv Nemere, Mv Kolompos; egy ősziárpa-fajtát: Mv Initium; és egy ősizab-fajtát: Mv Hópehely. Kísérleti elrendezésünk három kezelést, három szén-dioxid-szintet és hat genotípust foglalt magában. A kontroll (K) növényeket hetente háromszor öntöttük csapvízzel. Az optimális öntözési szint az alkalmazott talajkeverék maximális víztartókapacitásának 60%-a volt. Stresszkezelésként aszályt szimuláltunk a növények harmadánál szárbainduláskor (SZ) BBCH 21 növekedési állapotban, illetve a növények harmadánál kalászoláskor (KAL) BBCH 55 fázisban. A talaj víztartalmát monitoroztuk, a stresszkezelést akkor szüntettük meg, amikor a talaj víztartalma 5 v/v% szintre csökkent. A kezeléseket három különböző szén-dioxid-szinten: ~400 ppm, 700 ppm és 1000 ppm ismételtük meg.

Négy vernalizált növényt ültettünk műanyag vödrökbe majd a talaj felszínét fekete fóliával takartuk le, az evaporáció minimalizálása érdekében. Teljes érés után mértük a növények talajszint feletti biomasszatömegét (BM), a kalász-, illetve bugaszámot és a termésmennyiséget. A növények pontos vízfelvételét az öntözések alkalmával digitális mérleg segítségével határoztuk meg. A tenyészedőszak vízfogyasztást (WU) az öntözéseknél regisztrált vízadagok összesítésével kaptuk meg. A kísérletben nem szereplő, kontrollal azonos körülmények között felnevelt növények biomassza-tömege alapján az öntözési súlyokat kéthetente korrigáltuk. A kísérlet végén learatott biomasszát 48 órán át 70 °C-on szárítottuk szárítószekrényben, majd digitális mérleg segítségével megmértük a tömegüket.

A vízhasznosító képességet az 1. egyenlettel számítottuk ki,

$$WUE = \frac{GY}{WU} \quad (1),$$

ahol *WUE* (water-use efficiency) a vízhasznosító képességet ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), *GY* (grain yield) a terméshozamot (g) és *WU* (water use) a vízfelhasználás (L) jelöli.

A Harvest-indexet (HI) a 2. egyenlettel számítottuk ki,

$$HI = \frac{GY \cdot 100}{BM} \quad (2),$$

ahol *HI* a Harvest-indexet (%), *GY* (grain yield) a terméshozamot (g), *BM* pedig a földfelszín feletti szárított biomasszát (g) jelöli.

A különböző szén-dioxid-szintekre az általunk mért növényi paraméterek relatív változásait az 3. egyenlettel számítottuk ki,

$$\frac{Ex}{A} \text{ vagy } \frac{Ey}{A} \quad (3),$$

ahol A a különböző paraméterek értékei ~400 ppm CO₂-szinten, Ex a különböző paraméterek értékei 700 ppm CO₂-szinten, Ey a különböző paraméterek értékei 1000 ppm CO₂-szinten.

A kísérleti beállítás négy őszi búza-fajtát, egy őszi árpa-fajtát és egy őszi zab-fajtát, három vízellátási szintet és három szén-dioxid-szintet foglalt magába három ismétlésben. Több utas ANOVA-t használtunk a tesztelt faktorok (növényfajta, vízellátottság, szén-dioxid-szint) hatásainak meghatározására és Tukey post-hoc teszttel hasonlítottuk össze az átlagokat. SPSS 16.0 (IBM, Armonk, NY, USA) és Microsoft Excel programokat (Microsoft, Redmond, WA, USA) használtunk a statisztikai analízis elvégzéséhez és az adataink vizualizációjához. A szignifikanciaszintet $p \leq 0,05$ értéken határoztuk meg.

Szántóföldi kísérleti rendszer

Kísérleti elrendezés

Szántóföldi kísérleteinkben az üvegházi rendszernél bemutatott fajokat és fajtákat alkalmaztuk. Három termőhelyen állítottunk be kísérletet: az ATK Mezőgazdasági Intézetben Martonvásáron, az ATK Talajtani Intézetben Pusztáegresen, illetve Debreceni Egyetem Agrár Kutatóintézetek és Tangazdaság Nyíregyházi Kutatóintézetében. Martonvásáron és Pusztáegresen agyagos vályogtalajon, Nyíregyházán homoktalajon folytak a kísérletek. Két tenyészdőszakban (2019/2020-ban és 2020/2021-ben) állítottuk be kísérleteinket azonos elrendezésben. Kisméretű parcellákba 4,5 millió csíra/ha tőszámmal vetettünk el a növényeket. Martonvásáron és Pusztáegresen fajtánként hat-hat ismétlést, Nyíregyházán pedig három ismétlést tartalmazott a kísérlet. A növények feldolgozása után a növényi csapadékhasznosító képességet a 4. egyenlettel határoztuk meg,

$$PUE = \frac{GY}{P} \quad (4),$$

ahol PUE (precipitation-use efficiency) a csapadékhasznosító képességet ($\text{g} \cdot \text{mm}^{-1}$), GY (grain yield) a terméshozamot (g) és P (precipitation) a tenyészdőszaki csapadékmennyiséget (mm) jelöli. A meghatározás során nem vettük figyelembe a talajfelszín alatti vízmozgásokat.

A kísérleti beállítás négy őszi búza-fajtát, egy őszi árpa-fajtát és egy őszi zab-fajtát, három termőhelyet, két évet és hat, illetve három ismétlést foglalt magában. Több utas ANOVA-t használtunk a tesztelt faktorok (növényfajta, termőhely, év) hatásainak meghatározására és Tukey post hoc teszttel (növényfajta, termőhely) és t-próbával (év) hasonlítottuk össze az átlagokat. SPSS 16.0 (IBM, Armonk, NY, USA) és Microsoft Excel (Microsoft, Redmond, WA, USA) programokat

használtunk a statisztikai analízis elvégzéséhez és az adataink megjelenítéséhez. A szignifikanciaszintet $p \leq 0,05$ értéken határoztuk meg.

Liziméteres kísérleti rendszer

Kísérleti elrendezés

Az liziméteres kísérletünkben az üvegházi és a szántóföldi kísérlettel azonos fajtakört vizsgáltunk. A kísérlet helyszíne az ATK MGI, Martonvásár. A hengerek mélysége 2 m, a felszíne 1 m². A kísérlet végén a learatott kalászatokat és bugákat Wintersteiger Hege 16 laboratóriumi cséplőgéppel cséptük le és digitális mérleg segítségével határoztuk meg a szemtermés tömegét.

A vízhasznosító képességet az 5. és 6. egyenlettel számítottuk ki,

$$WUE_{Sz} = \frac{GY}{ET} \text{ és } WUE_{BM} = \frac{BM}{ET} \quad (5) \text{ és } (6),$$

ahol WUE_{Sz} (water-use efficiency) a szemtermés alapján számított vízhasznosító képességet ($g \cdot mm^{-1}$), GY (grain yield) a terméshozamot (g) és ET (evapotranspiration) az evapotranszspirációt (mm) jelöli és WUE_{BM} (water-use efficiency) a biomassza alapján számított vízhasznosító képességet ($g \cdot mm^{-1}$), BM (biomass) a talajfelszín feletti biomassza teljes tömegét (g) jelöli.

A csapadékhasznosító képességet az 7. egyenlettel számítottuk ki,

$$PUE = \frac{GY}{P} \quad (7),$$

ahol PUE (precipitation-use efficiency) a csapadékhasznosító képességet ($g \cdot mm^{-1}$), GY (grain yield) a terméshozamot (g) és P (precipitation) a tenyészedőszaki csapadékmennyiséget (mm) jelöli. A meghatározás során nem vettük figyelembe a hozzátáplált és az elszívott vízmennyiséget.

Az agronómiai konstanst (K_a) a 8. egyenlet szerint számoltuk ki,

$$K_a = \frac{ET_{akt}}{E_{akt}} \quad (8),$$

ahol K_a az agronómiai konstanst, ET_{akt} a növényállomány borított talajfelszín evapotranszspirációját (mm) és E_{akt} a talajfelszín evaporációját (mm) jelöli.

A liziméterekbe kézzel vetettünk 2019. 10. 10-én és 2020. 10. 26-án, 4,5 millió csíra/ha vetéssűrűséggel. A liziméterekbe történő vetés másnapján kézzel (szórva vetés technikájával) szegélyt (Mv Initium ősziárpa-fajta) vetettünk a hengerek környezetébe. A kísérlet aratása ollóval történt 2019.07.02-án és 2020.06.29-én. A kísérlet ideje alatt műtrágyázás és öntözés nem történt a területen.

A kísérleti beállítás négy őszi búza-fajtát, egy ősziárpa-fajtát és egy őszi zab-fajtát, két évet és évente egy-egy ismétlést foglalt magában. Adataink vizualizációjához Microsoft Excel programot (Microsoft, Redmond, WA, USA) használtunk.

Eredmények és azok megbeszélése

Kalászos gabonák termelésének és vízforgalmának vizsgálata üvegházi modellkísérletben

A CO₂-koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a növényfenológiai paraméterekre

Normál légköri szén-dioxid-szinten (~400 ppm) az Mv Kolompos őszi búza-fajta kivételével mindkét stresszkezelés (vízmegvonás BBCH 21 [„SZ”] vagy BBCH 55 [„KAL”] növekedési fázisban) minden vizsgált genotípusnál szignifikánsan csökkentette a biomasszát az optimális vízellátás mellett fejlődött növényekéhez képest. 700 ppm CO₂-szinten nevelt növények esetében az őszi árpa-fajtánál, az őszi zab-fajtánál és két őszi búza-fajtánál (Mv Ikva és Mv Kolompos) szignifikáns különbségeket figyeltünk meg a három kezelés között („K”, „SZ” és „KAL”). A szimulált vízhiány a BBCH 55 növekedési stádiumban minden vizsgált kalászos esetében csökkentette a növények biomasszáját az optimálisan öntözött növényekéhez képest. 1000 ppm CO₂-koncentráción a fejlődés korai szakaszában elszenvedett szárazságstressz csökkentette Mv Ikva (10%) és Mv Kolompos (9%) fajtáink biomasszáját az optimális vízellátáshoz képest, a kései fejlődési állapotban stresszelt növények biomassza-csökkenése az Mv Hópehely, Mv Nemere és Mv Kolompos fajtáink esetében 35%-os, 13%-os és 11%-os volt. A szén-dioxid-szint emelése pozitív hatást gyakorolt Mv Initium őszi árpa-fajta biomassza-termelésére, mely hatás csak a stresszelt növényeknél volt kimutatható.

Normál légköri szén-dioxid-koncentráción a szárbainduláskor indukált szárazságstressz szignifikánsan növelte a kalászszaámot az Mv Nemere (30%) és Mv Nádor (18%) őszi búza-fajtáknál, de Mv Initium őszi árpa-fajta esetében ez a kezelés 13%-os csökkenést okozott. A kalászoskori aszály szintén 13%-kal csökkentette a vizsgált árpa-fajta kalászszaámát, illetve az Mv Ikva őszi búza-fajta esetében is szignifikáns csökkenést (24%) figyelhettünk meg. 700 ppm CO₂-koncentráción nevelt növények esetében megfigyeltük, hogy a szárbainduláskor stresszelt növények kalászszaama az Mv Ikva fajtánál szignifikánsan csökkent (12%), az Mv Nemere és Mv Initium búza- és árpa-fajtánál szignifikánsan növekedett (23%, illetve 13%-kal). A kalászoskori szimulált aszály növelte az Mv Nádor őszi búza-fajta kalászszaámát (43%), de az Mv Ikva esetében ennél a kezelésnél is szignifikáns csökkenést (12%) figyelhettünk meg az optimálisan öntözött növények kalászszaamához képest. Az 1000 ppm CO₂-szinten nevelt növények esetében a szárbainduláskori vízhiány 30%-kal növelte az Mv Nemere búza-fajta kalászszaámát, a kalászoskori vízhiány viszont az Mv Ikva búza-fajtánál

szignifikánsan növelte (31%-kal) a kalászosok számát. A szén-dioxid-szint emelkedése pozitívan hatott a növények bokrosodására, illetve a kalászsámra. Egyedül az Mv Ikva búzafajta optimális öntözött, illetve a szárbainduláskor vízmegvonással stresszelt egyedein figyeltünk meg szignifikáns negatív CO₂-reakciót 1000 ppm szinten.

Normál légköri szén-dioxid-szinten a szárbainduláskor indukált szárazságstressz szignifikánsan, 20% és 16%-kal csökkentette az Mv Nádor és Mv Ikva őszi- és nyári-kezelésű fajta ezerszemtömegét, a kései aszály pedig az Mv Nádor (16%), Mv Hópehely (8%) és Mv Initium (7%) fajtaénál okozott, az optimálisan öntözött növények ezerszemtömegéhez képest, szignifikáns csökkenést. Az Mv Kolompos búzafajtaén kívül minden vizsgált fajtaénál szignifikáns különbségek adódtak a két stresszkezelés között; Mv Initium, Mv Hópehely és Mv Nemere fajtaén esetében a kései aszály hatásaként csökkent nagyobb mértékben a fajta ezerszemtömege. Az Mv Ikva és Mv Nádor fajtaénál viszont a korai aszály csökkentette nagyobb mértékben ezt a paramétert. 700 ppm szén-dioxid-szinten a BBCH 21 fejlettségi állapotban stresszelt növények ezerszemtömege az Mv Initium őszi-kezelésű fajtaén kívül minden vizsgált kalászosnál csökkent, legnagyobb mértékben az Mv Nádor búzafajta (16%) esetében. A kései aszály hatására magasabb ezerszemtömeg-értékeket határoztunk meg az Mv Initium (28%) és Mv Kolompos (21%) fajtaénál, de a kezelés szignifikánsan csökkentette Mv Hópehely (58%) és Mv Nádor (28%) fajta ezerszemtömegét. A vizsgált őszi-kezelésű fajta (Mv Initium) ezerszemtömegére negatívan hatott a szén-dioxid-szint mesterséges emelése. Az optimálisan öntözött, illetve korai szárazságstressz-kezelést kapott növények ezerszemtömege mindkét megemelt szén-dioxid-szinten (700 ppm és 1000 ppm) szignifikánsan alacsonyabb volt, mint a normál légköri szinten neveltéké, ez a csökkenés 700 ppm szinten még jelentősebb volt. Ezzel szemben a kalászosláskori stressz jelentősen megnövelte a növények ezerszemtömegét 700 ppm CO₂-koncentráción. Az Mv Hópehely őszi-kezelésű fajtaénál az 1000 ppm szén-dioxid-szint, a légkörihez képest, szignifikánsan csökkentette az ezerszemtömeget mindhárom kezelésben, illetve a kései aszály 700 ppm szinten is szignifikáns csökkenést okozott.

A CO₂-koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a szemtermésre

400 ppm szén-dioxid-szinten mindkét szárazságstressz-kezelés (szárbainduláskori és kalászosláskori aszály) csökkentette a növények szemtermését minden vizsgált fajtaénál, az Mv Kolompos őszi-kezelésű fajta kivételével. Az optimális öntözéshez képest a legjelentősebb változásokat az Mv Hópehely őszi-kezelésű fajtaénál figyeltünk meg, a szárbainduláskori vízmegvonás

24%-os, a bugázaskor szimulált aszály pedig 54%-os szemtermés-csökkenést eredményezett. Az Mv Initium, Mv Ikva és Mv Hópehely ősziárpa-, -búza-, és -zab-fajta esetében szignifikáns különbségek adódtak a két stresszkezelés között; a BBCH 55 fejlettségi állapotban szimulált aszály hatása statisztikailag igazolhatóan nagyobb mértékű szemtermés-csökkenéshez vezetett. Megemelt szén-dioxid-szinten (700 ppm) a BBCH 21 fejlődési állapotban elszenvedett szárazságstressz szignifikánsan csökkentette az Mv Hópehely (47%), Mv Ikva (20%), Mv Nádor (12%) és Mv Nemere (10%) fajták szemtermését. A kalászoláskori (BBCH 55) stressz csökkentette a vizsgált zab- és búzafajták szemtermését az optimális öntözéshez képest. A legnagyobb mértékű csökkenést (77%) Mv Hópehely zabfajta esetén figyeltünk meg. A kezelés szignifikánsan, 34%-kal, 26%-kal, 25%-kal és 23%-kal csökkentette Mv Nádor, Mv Kolompos, Mv Ikva és Mv Nemere fajták szemtermését is. Az Mv Kolompos, Mv Nádor, Mv Nemere és Mv Hópehely fajták esetében különbségek adódtak a két stresszkezelés között; szignifikánsan alacsonyabb termésszintet eredményezett a kalászás időszakában szimulált stresszkezelés. 1000 ppm szén-dioxid-szinten a szárbainduláskori stresszkezelés csak Mv Ikva búzafajtnál csökkentette (15%) szignifikánsan a szemtermést, de a kalászoláskori stressz az Mv Kolompos kivételével minden fajtánál szignifikáns termés-csökkenést eredményezett. A legnagyobb csökkenést (64%) ebben az esetben is a vizsgált zabfajta (Mv Hópehely) esetében figyeltünk meg. Szignifikáns különbség adódott továbbá a két stresszkezelés között a vizsgált árpa- és zabfajta esetében, mindkét fajtánál a kései aszály hatása drasztikusabb termés-csökkenéshez vezetett.

Mv Initium ősziárpa-fajta szignifikánsan pozitívan reagált a szén-dioxid-szint emelkedésére minden általunk alkalmazott kezelésben, de nagyobb szemtermés-növekedést figyelhettünk meg a stresszkezeltt növényeknél. Az Mv Hópehely ősziarpa-fajtnál ellentétes tendenciát figyeltünk meg; a szén-dioxid-trágyázás, jellemzően 1000 ppm szinten, szignifikánsan csökkentette a fajta szemtermését, azonban ez a tendencia optimális öntözés esetében nem volt kimutatható 700 ppm szinten. Az Mv Ikva ősziarpa-fajta esetében is negatív CO₂-reakciókat mutattunk ki, ami viszont csak az optimálisan öntözött növényeknél volt szignifikáns. A többi általunk vizsgált búzafajta többnyire pozitívan reagált a CO₂-szint emelésére. A légköri CO₂-koncentrációhoz képest a gáz 700 ppm szintje szemtermés-növekedést eredményezett az Mv Nemere és Mv Kolompos fajtáknál az optimális öntözési szinten és a BBCH 21 stádiumban stresszelt növényeknél. Az Mv Kolompos búzafajta esetében pozitív szén-dioxid-reakciókat figyeltünk meg a kontroll növényeknél és a kései szárazságstressz-kezelés esetében, amikor 1000 ppm CO₂-szintre emeltük a koncentrációt. Az Mv

Nádor búzafajta szemtermését csökkentette a kései aszály a normál légköri CO₂-szinthez képest mindkét emelt szén-dioxid-koncentráción, ez a szignifikáns csökkenés az Mv Nemere búzafajta esetében csak 1000 ppm CO₂-szinten volt kimutatható.

A CO₂-koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a Harvest-indexre

Légköri szén-dioxid-szinten a szárbainduláskori szárazságstressz 15%-kal csökkentette a vizsgált zabfajta (Mv Hópehely) Harvest-index-értékét (HI) és 8%-kal megnövelte Mv Kolompos búzafajtáját. A kalászoláskor indukált aszály 45%-kal csökkentette Mv Hópehely Harvest-indexét és 7%-kal növelte a vizsgált árpafajtáját (Mv Initium). Az Mv Hópehely zabfajtánál szignifikáns különbséget mutattunk ki továbbá a három kezelés között, a legalacsonyabb HI-értéket a kései stresszkezelés eredményezte, míg a legkedvezőbb értéket optimális öntözés mellett mértük. 700 ppm szén-dioxid-szinten a korai fejlődési fázisban a vízmegvonás szignifikánsan növelte a Harvest-indexet az Mv Ikva (9%), Mv Nemere (4%) és Mv Nádor (4%) ősibúza-fajta esetében és csökkentette az Mv Hópehely (31%) és Mv Initium (8%) fajtáknál. A kalászoláskori aszály minden vizsgált fajta esetében csökkentette a HI-t, legnagyobb mértékű csökkenést (62%) a vizsgált zabfajtánál mutattuk ki. A BBCH 55 fenofázisban indukált vízhiány, 19%-kal, 18%-kal, 16%-kal, 15%-kal és 8%-kal csökkentette az Mv Nádor, Mv Initium, Mv Kolompos, Mv Ikva és Mv Nemere fajták Harvest-indexét az optimális vízellátást kapott növényekhez képest. Szignifikáns különbségek adódtak mindhárom kezelés között 700 ppm szén-dioxid-szinten; a kései aszály nagyobb mértékben csökkentette a növények szemtermését, mint a biomassza tömegét, így a HI-értékekben látható csökkenés még intenzívebb volt. 1000 ppm CO₂-koncentráción a korai fejlődési fázisban indukált szárazságstressznek nem volt szignifikáns hatása a fajták Harvest-indexére, de a generatív fázisban alkalmazott vízmegvonás szignifikánsan csökkentette Mv Hópehely (43%), Mv Nádor (15%) és Mv Ikva (9%) fajták Harvest-indexét.

A növények szén-dioxid-szint emelkedésére adott válaszreakciói a Harvest-index-adatok tekintetében csak az Mv Hópehely ősizab-fajta esetében voltak konzekvensek. A légköri szinthez képest 1000 ppm CO₂-szinten minden kezelés szignifikáns csökkenéshez vezetett a HI-értékekben és 700 ppm szinten a normál légköri koncentrációhoz képest szintén szignifikánsan alacsonyabb értékeket határoztunk meg a stresszkezelésekben.

A CO₂-koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a növények vízfelvételére

A légköri szén-dioxid-szinten nevelt növényeknél a korai szárazságstressz nem okozott szignifikáns változást a vízfelvételben, viszont a kalászoláskori

aszály szignifikánsan csökkentette az Mv Ikva (24%) és Mv Nemere (12%) őszi búza-fajták vízfelvételét a kontroll körülmények között fejlődött növényekhez képest. Az Mv Nemere estében szignifikáns különbségek adódtak a két stresszkezelés között is, a kalászoláskor szimulált vízhiány nagyobb mértékben csökkentette a vízfelvételt. 700 ppm szén-dioxid-koncentráción a szárbainduláskori vízmegvonás csak az Mv Ikva esetében eredményezett szignifikáns változást, 18%-kal csökkentette a fajta vízfelvételét, viszont a kései stressz minden általunk vizsgált fajta vízfelvételét csökkentette, legnagyobb mértékben (20%) az Mv Ikva búzafajtáét. Az Mv Kolompos őszi búza-fajtánál szignifikáns különbségeket mutattunk ki a két stresszkezelés között, a BBCH 55 fejlettségi állapotban alkalmazott stressz hatására 6%-kal csökkent a növények vízfelvétele a korai stressz hatásához képest. 1000 ppm szén-dioxid-szinten mindkét szárazságstressz-kezelés szignifikánsan csökkentette Mv Ikva fajta vízfelvételét (15%-kal a szárbainduláskori és 12%-kal a kalászoláskori aszály). A WU-t a szén-dioxid-trágyázás csak abban az esetben befolyásolta szignifikánsan, ha 1000 ppm-re emeltük a kamrában a CO₂-szintet. A légkörihez képest a megemelt szén-dioxid-szinten (1000 ppm) minden fajta vízfelvételében, minden kezelés hatására szignifikáns csökkenést tapasztalunk; ez alól csak az optimális öntözést kapott Mv Hópehely zabfajta volt kivétel. Optimális öntözés mellett a növények vízigénye átlagosan 24%-kal csökkent, és szárbaindulás- vagy kalászoláskori vízmegvonás esetén 23%-kal és 20%-kal redukálódott a kezelésekre 1000 ppm szén-dioxid-szinten a kontroll (légköri szén-dioxid-szint) körülményekhez képest.

A CO₂-koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a növények vízhasznosító képességére

400 ppm szén-dioxid-szinten a szárbainduláskori (BBCH 21 fejlettségi állapot) szárazságstressz nem módosította a növények vízhasznosító képességét, ezzel szemben a kalászoláskori (BBCH 55 fejlettségi állapot) aszály szignifikánsan csökkentette ezt a paramétert a vizsgált az őszi zab-fajta (Mv Hópehely) esetében: 1,115 g·L⁻¹ értékről 1,040 g·L⁻¹ értékre. Emelt CO₂-koncentráción (700 ppm) a szárbainduláskor szimulált aszály szignifikánsan csökkentette Mv Hópehely és Mv Nádor fajták WUE-értékeit 48% és 6%-kal, a többi vizsgált fajta esetében nem volt szignifikáns változás. A kései aszálynak jelentős következményei voltak Mv Hópehely zabfajtánál; a vízhasznosító képesség 76%-kal csökkent az optimális öntözési szinthez képest. Az Mv Nádor, Mv Kolompos és Mv Nemere őszi búza-fajtáknál is szignifikáns csökkenést (25%, 15%, 10%) figyeltünk meg a vízhasznosítás tekintetében a kalászoláskor szimulált aszály hatásaként. Az Mv Hópehely, Mv Nádor, Mv Nemere és Mv

Kolompos fajtáknál szignifikáns különbségeket figyeltünk meg a két stresszkezelés között, a kalászoláskori vízmegvonás nagyobb mértékben csökkentette a növények vízhasznosító képességét, mint a korai aszály. 1000 ppm szén-dioxid-szinten a fiatalkori vízmegvonás nem indukált szignifikáns változásokat a vizsgált fajták vízhasznosító képességében, amely azt jelzi, hogy a szén-dioxid-trágyázás ellensúlyozhatja a vízhiányos környezet negatív hatásait. A kalászoláskori aszálykezelés csak két vizsgált fajta esetében csökkentette a növények WUE-értékeit (Mv Hópehelyt 60%-kal és Mv Nádort 17%-kal), jelezve, hogy a többi, általunk vizsgált fajta, kevésbé érzékeny az aszályra.

A szén-dioxid-trágyázás pozitívan hatott a szemtermésre és mérsékelte a vízfelvételt a vizsgált ősziárpa-fajtánál (Mv Initium), melynek következményeként 1000 ppm szén-dioxid-koncentráción nevelt növényeknél javult a fajta vízhasznosító képessége mindhárom általunk alkalmazott kezelésben (39%-kal az optimálisan öntözött növényeknél, 34%-kal a korai és 48%-kal a kései szárazságkezelésben). A vizsgált zabfajtánál (Mv Hópehely) optimális vízellátás mellett vagy a korai aszálykezelés hatására a megemelt szén-dioxid-szinteken csökkent terméshozamot tapasztaltunk, melyet a mérsékelt vízfelvétel ellensúlyozott, így a CO₂-szint emelkedése nem okozott szignifikáns különbséget a növények vízhasznosító képességében az említett kezelések hatására. A kalászoláskori szárazságstressz szignifikánsan csökkentette az Mv Hópehely termésmennyiségét, ennek következményeként jelentős csökkenést figyelhetünk meg a növények vízhasznosító képességében mindkét megemelt szén-dioxid-szinten. 1000 ppm CO₂-koncentráción mind a négy, általunk vizsgált ősziárpa-fajta esetében kedvezőbb vízhasznosítóképeség-értékeket számítottunk a légköri szén-dioxid-koncentráción nevelt növényekhez képest mindhárom kezelésben. A legnagyobb mértékű emelkedést az Mv Kolomposnál figyeltünk meg (63%, 38% és 56% a kontrollnál és a két stressz-kezelésnél).

Az üvegházi kísérleti rendszer eredményeinek megvitatása

Kísérletünkben a vegetatív (BBCH 21) és generatív (BBCH 55) növekedési fázisban alkalmazott szárazságstressz-kezelés csökkentette a biomasszát a vizsgált hat őszi kalászosgabona-fajtából öt fajta esetében, akkor, ha a növényeket normál légköri szén-dioxid-szinten neveltük. Hasonló tendenciát figyelhettünk meg az Mv Hópehely, Mv Ikva, Mv Nemere és Mv Nádor ősziárpa-, illetve búza-fajtáknál, amikor a szén-dioxid szintjét 700 ppm szintre emeltük. Továbbá az Mv Ikva és Mv Nádor fajtáink esetében biomassza-csökkenést találtunk mindkét stresszkezelés hatására 1000 ppm CO₂-szinten. A vizsgált árpafajta (Mv Initium) biomasszája a szén-dioxid-szint emelésére (700 ppm, 1000 ppm) és az alkalmazott aszálykezelés hatására nőtt. Eredményeink hasonlóak

Dong et al. (2017), Ding et al. (2018), Zhao et al. (2021) vizsgálataihoz; mely szerint az őszebúza- és zab-fajták biomasszája csökken limitált vízellátás hatására abban az esetben, ha légköri szén-dioxid-szinten nevelték a növényeket. Manderscheid és Weigel (2007), illetve Li et al. (2017) megfigyelték, hogy a szárbaindulás utáni vízhiány megemelt szén-dioxid-koncentráción (~700 ppm és 800 ppm) csökkenti a tavaszi búzák biomasszáját, mely tendenciát kísérleteink megerősítették őszi búzák esetén is. Kutatások szerint megemelt szén-dioxid-koncentráción (700 ppm) a vízhiány a növények vegetatív növekedési fázisában csökkenti a biomasszát durum búzában (Garmendia et al. 2017) és árpában (Bista et al. 2020), azonban az eredményeink alapján a vizsgált árpafajta biomassza-termelési szintje a kontrollhoz képest magasabb volt, melynek magyarázata a fajták eltérő CO₂-reakciója lehetett. Shokat et al. (2021) a kontrollhoz képest csökkent biomassza-termelést mutatott ki kései aszály kezelés hatására, ha 800 ppm szén-dioxid-szinten nevelték a növényeket. Eredményeinkkel ellentétben, Varga et al. (2017) egyik növekedési fázisnál sem talált szignifikáns különbséget a növényi biomassza termelésben emelt szén-dioxid-szinten (1000 ppm), az optimálisan öntözött és a szárazságstressz-kezelést kapott növények között, mely megerősítheti azt a feltevést, hogy a növényi reakciók a szén-dioxid-szint változására fajtajellegtől függően alakulnak. Magasabb biomassza-termelést figyeltünk meg mindkét megemelt CO₂-szinten (700 ppm, 1000 ppm) a stresszelt árpafajtánál. Különböző fejlődési állapotban (szárbaindulás, kalászás) indukált aszálykezelés növelte az Mv Nádor és Mv Kolompos őszebúza-fajták biomasszáját emelt szén-dioxid-szinten (700 ppm), a normál szén-dioxid-szinten nevelt növényekhez képest. A normál légköri szinthez képest szintén magasabb biomassza-termelést figyeltünk meg az optimálisan öntözött Mv Hópehely, Mv Nemere és Mv Kolompos fajtáknál 700 ppm CO₂-szinten, illetve az Mv Kolompos őszebúza-fajta esetében 1000 ppm szinten is. Ulfat et al. (2021) eredményei alapján, ha az őszi búzánál a virágzás időszakában jelentkezik aszály akár normál légköri vagy megemelt (800 ppm) szén-dioxid-koncentrációnál, akkor a biomassza-termelés az optimálisan öntözött, légköri CO₂-szinten nevelt növényeknél a legmagasabb, míg az érték megemelt CO₂-szinten, optimális vízellátás mellett alacsonyabbak lesznek. Ezzel ellentétben, kísérleteinkben magasabb biomassza-értékeket határoztunk meg emelt szén-dioxid-szinten (700 ppm) a normál légköri szinthez képest az optimálisan öntözött, illetve szárazságstresszel kezelt Mv Nádor, Mv Nemere és Mv Kolompos őszi búzák esetében. Shokat et al. (2021) kísérletében az emelt szén-dioxid-szinten (800 ppm) nevelt növények biomasszája magasabb volt a légköri CO₂-koncentráción

nőtt társaik értékeivel szemben, de csak abban az esetben, ha optimális öntözést alkalmaztak; míg kései vízmegvonás hatására viszont fordított eredményt találtak.

Megfigyeltük, hogy a szárbainduláskori vízhiány a jelenlegi légköri szén-dioxid-koncentráción növeli a kalászszaámot az Mv Nemere őszi búza-fajta, és Mv Ininitium őszi árpa-fajta esetében; a kalászoláskori aszály pedig csökkenti ezt a paramétert az árpafajtánál és az egyik vizsgált búzafajtánál (Mv Ikva). Eredményeink megegyeznek Samarah et al. (2009) következtetéseivel, miszerint a kései aszály csökkenti az árpa kalászszaámát. Khakwani et al. (2012) szerint is az őszi búzák reproductív állapotában a vízhiány csökkenti a növények kalászaainak számaát. A korai vagy a kései szárazságstressz csökkentette az őszi búza kalászszaámát (Ding et al. 2018), melyet Rollins et al. (2013) és saját eredményeink is megerősítettek, ugyanis szignifikáns kalászszaám-csökkenést figyeltek meg az árpa esetében, abban az esetben, ha a növényeket a generatív fázisuk során kaptak aszálykezelést. Kísérletünkben 700 ppm szén-dioxid-szinten a korai aszály növelte a kalászok számaát a vizsgált árpafajtában és az egyik búzafajtában (Mv Nemere), illetve csökkentette az Mv Ikva (őszi búza) estében. A kalászoláskori vízhiány növelte az Mv Nádor őszi búza-fajta kalászaainak számaát, viszont csökkentette azt az Mv Ikva búzafajta esetében. Garmendia et al. (2017) szerint a durum búza kalászszaama enyhe emelkedést mutat a kései aszály és a megemelt szén-dioxid-koncentráció (700 ppm) együttes hatására; melyhez hasonló eredményeket kaptunk egy vizsgált őszi búza-fajta (Mv Nádor) esetében. Shokat et al. (2021) viszont ellentétes változást figyeltek meg, kísérletükben a búza kalászszaama csökkent a kései aszály hatására, abban az esetben, amikor 800 ppm CO₂-koncentráción vizsgálták a növényeket. 1000 ppm szén-dioxid-szinten nevelt növényeknél a szárbainduláskori vagy kalászoláskori vízmegvonás megnövelte Mv Ikva őszi búza-fajta kalászaainak számaát. Sionit et al (1980) ennek éppen az ellenkezőjét találta: kísérletük eredményeként megállapították, hogy a kései aszály csökkenti ezt az értéket tavaszi búza esetében. Shokat et al. (2021) kései aszály hatására búzában szintén csökkenést figyelt meg ebben a paraméterben, de csak 800 ppm CO₂-koncentráción. Eredményeink szerint sem a szárazságstressz-kezelés, sem a szén-dioxid-szintek közötti különbség nem okozott szignifikáns változásokat ebben a paraméterben a vizsgált őszi búza-fajta (Mv Hópehely) esetében. Mv Nádor búzafajtánál a légköri szén-dioxid-szinten nevelt növényekhez képest minden kezelés hatására magasabb kalászszaám-értékeket figyeltünk meg, ha a növényeket 700 ppm CO₂-koncentráción neveltük. Ez megegyezik Thilakarathne et al. (2013) megfigyeléseivel; akik 700 ppm CO₂-szinten magasabb kalászszaámot találtak, mint a kontroll-körülmények között, normál légköri koncentráción nevelt tavaszi búzánaál.

Eredményeink alapján a korai szárazságstressz két ősibúza-fajtánál, az Mv Ikva és az Mv Nádor esetében, szignifikánsan csökkentette a fajták ezerszemtömegét, a kései aszály pedig az Mv Initium, Mv Hópehely, Mv Nádor és Mv Nemere fajtáknál fejtette ki ezt a hatást. Más szerzők szintén ezerszemtömeg-csökkenést figyeltek meg szemtelítődéskori aszály hatására árpában (Samarah et al. 2009) vagy kalászoláskori aszály hatására zabban (Zhao et al. 2021) és búzában (Shokat et al. 2021). Mindkét általunk alkalmazott stresszkezelés csökkentette a növények ezerszemtömegét az Mv Hópehely, Mv Nádor és Mv Kolompos fajtáknál 700 ppm szén-dioxid-szinten és Mv Ikva esetében 1000 ppm szinten. Csökkenést figyelhettünk meg továbbá a szárbainduláskori aszály hatására az Mv Initium árpafajta esetében 700 ppm CO₂-szinten és Mv Hópehely és Mv Nemere fajtáknál 1000 ppm CO₂-szinten. A kalászoláskori szárazságstressz az Mv Ikva búzafajta ezerszemtömegét csökkentette 700 ppm CO₂-szinten és Mv Nemere ezerszemtömegét 1000 ppm CO₂-koncentráción. Pozitív szén-dioxid reakciót figyeltünk meg az optimálisan öntözött Mv Ikva és Mv Nemere ősibúza-fajták ezerszemtömegének alakulásában, mely mindkét megemelt szén-dioxid-szinten (700 ppm, 1000 ppm) kimutatható volt. Az őszi zab esetén ezt a tendenciát csak 700 ppm szinten tudtuk igazolni. A szén-dioxid-szint emelése (700 ppm, 1000 ppm) negatívan hatott az optimálisan öntözött árpa (Mv Initium) ezerszemtömegére, illetve a vizsgált zabfajtára, 1000 ppm szinten. A két általunk alkalmazott stresszkezelés (vízmegvonás szárbainduláskor vagy kalászoláskor) hatására magasabb értékeket figyelhettünk meg 700 ppm szén-dioxid-szinten, mint légköri koncentráción az Mv Initium és Mv Kolompos fajtáknál. Az általunk vizsgált búzafajtákra is pozitívan hatott a CO₂-szint emelése (1000 ppm) abban az esetben, ha a stresszt a fejlődés generatív fázisában alkalmaztunk. A vizsgált zabfajtára a kalászoláskori aszály és a szén-dioxid-szint emelése (700 ppm és 1000 ppm) negatívan hatott. Ellentétben az eredményeinkkel Högy et al. (2009) szerint a szén-dioxid-szint emelése (~550 ppm) nem okozott változást tavaszi búza ezerszemtömegében, bár kísérletükben az alkalmazott CO₂-koncentráció jelentősen elmaradt az általunk tesztelt szinttől. Fangmeier et al. (2000) szerint tavaszi árpa ezerszemtömege enyhén csökkent a szén-dioxid-szint emelkedésének hatására (650 ppm), mi szignifikáns csökkenést tapasztaltunk ősziárpa-fajtánknál ebben a paraméterben mindkét általunk vizsgált CO₂-szinten. Wu et al. (2004) hasonlóan eredményeinkhez, magasabb ezerszemtömeg-értékeket talált megemelkedett szén-dioxid-szinten (700 ppm), mint légkörin, az optimális vízellátású és aszálykezelt búzáknak esetében. Ulfat et al. (2021) őszi búzáknál szintén megemelt szén-dioxid-szinten (800 ppm) nevelt, optimálisan öntözött növényeknél mért

magasabb ezerszemtömeget, illetve a paraméter tekintetében kimutatta, hogy a kései aszály kedvezőtlen hatásait is moderálta a szén-dioxid-tárgyázás hatása. Shokat et al. (2021) eredményei szerint a kései aszály jelentősen csökkentette a vizsgált búzák ezerszemtömeget 800 ppm szén-dioxid-koncentráción, sőt a gáz koncentrációjának mesterséges emelése negatívan hatott erre a paraméterre; a légköri szinten neveltekhez képest alacsonyabb ezerszemtömeget találtak mind az optimálisan öntözött, mind a stresszelt növényeknél (Shokat et al. 2021).

Kísérletünkben a vízhiány a BBCH 21 és BBCH 55 fejlődési stádiumokban (az optimálisan öntözött növényekhez képest) csökkentette az Mv Ikva őszibúza-fajta szemtermését mindhárom szén-dioxid-szinten (~400 ppm, 700 ppm, 1000 ppm). Mindkét stresszkezelés csökkentette a szemtermést az Mv Hópehely, Mv Nádor és Mv Nemere fajtáknál légköri és megemelt (700 ppm) szén-dioxid-szinten, illetve Mv Initium esetében 400 ppm szinten. 1000 ppm CO₂-koncentráción a kései vízmegvonás csökkentette az összes vizsgált kalászos szemtermését, kivéve Mv Kolompos őszi búzáét. Zhao et al. (2021) szintén alacsonyabb szemtermés-értékeket talált zab esetében a különböző fejlődési állapotban alkalmazott szárazságstressz hatására. Quaseem et al. (2019) hasonló eredményeket írt le búza esetében a virágzás előtt alkalmazott vízhiányos kezelés hatására. Eredményink egyeznek Manderscheid és Weigel (2007); Varga et al. (2017); Shokat et al. (2021) és Ulfat et al. (2021) eredményeivel; a szerzők csökkenést figyeltek meg búzafajták szemtermésében a korai vagy kései aszálykezelés következményeként emelt szén-dioxid-koncentráción (700 ppm, 800 ppm vagy 1000 ppm). Pozitív szén-dioxid-reakciót figyeltünk meg a vizsgált árpafajtánál és negatív a zabfajtánál a szemtermés tekintetében mindkét emelt CO₂-szinten (700 ppm és 1000 ppm) minden általunk alkalmazott öntözési szint esetében (optimális, aszály szárbainduláskor vagy kalászoláskor). Magas szemtermésszintet mutattunk ki az optimálisan öntözött és korai növekedési állapotban stresszelt Mv Nemere és Mv Kolompos őszibúza-fajtáknál emelt szén-dioxid-szinten (700 ppm) (a légköri szinthez képest). Thilakarathne et al. (2013) szintén magasabb szemtermés-értékeket mért tavaszi búzában emelt CO₂-szinten (700 ppm), optimális öntözés mellett. Shokat et al. (2021) viszont ellentétes tendenciát írt le; légköri koncentráción magasabb értékekről számolt be, mind az optimálisan öntözött búzák esetében, mind a kései aszálykezelés hatására, 800 ppm szén-dioxid szinten.

Adataink szerint a szárbainduláskori vízhiány növelte a növények Harvest-indexét Mv Kolompos búzafajta esetében légköri CO₂-szinten és Mv Ikva, Mv Nádor, Mv Nemere őszibúza-fajtáknál légköri és emelt CO₂-szinten (700 ppm), valamint csökkentette Mv Hópehely őszizab-fajtánál 400 és 700 ppm CO₂-

szinteken, az Mv Initium ősziárpa-fajtánál 700 ppm CO₂-szinten. A kalászoláskori vízhiány csökkentette a vizsgált zabfajta Harvest-indexét mindkét általunk vizsgált emelt CO₂-szinten (700 ppm, 1000 ppm). A kései aszály csökkentette minden általunk vizsgált kalászos HI-értékét 700 ppm CO₂-szinten, emellett Mv Hópehely és Mv Nádor fajtáknál 1000 ppm CO₂-koncentráción is szignifikáns csökkenést tapasztaltunk ebben a paraméterben. A jelenlegi légköri szinthez képest a szén-dioxid megemelt szintje (700 ppm vagy 1000 ppm) negatívan hatott a vizsgált ősziarab-fajta Harvest-index-értékeire. Ellentétben az eredményeinkkel Zhao et al. (2021) megfigyelte, hogy az általuk vizsgált zabfajta HI-ére pozitívan hatott az alkalmazott aszálykezelés normál légköri szén-dioxid-szinten. Samarah et al (2009) szerint a vizsgált árpa HI-értéke csökkent a kései aszály hatására, kísérletünkben ellentétes tendenciát tapasztaltunk. Ding et al. (2018) kutatása szerint a szárbainduláskori szárazságstressz normál légköri CO₂-koncentráción javítja az őszi búza Harvest-indexét, az eredményeink ezt az állítást csak az Mv Kolompos esetében támasztották alá. Wu et al. (2004) a kontrollhoz képest magasabb Harvest-index-értékeket publikált az aszálykezelés hatására tavaszi búzában emelt szén-dioxid-szinten (~700 ppm). A kontrollhoz képest Ulfat et al. (2021) csökkent Harvest-index-értéket állapított meg a növények virágzásakor alkalmazott aszálykezelés hatására 800 ppm CO₂-koncentráción. Kísérletünkben szintén HI csökkenést tapasztaltunk emelt CO₂-szinten (700 ppm) a kalászoláskori vízmegvonás hatására. Varga et al. (2017) szintén Harvest-index-csökkenést figyelt meg aszály hatásaként 700 ppm és 1000 ppm CO₂-szinteken.

Normál légköri szén-dioxid-szinten a szárbainduláskori szárazságstressz nem okozott szignifikáns változást a vízfelvételben, viszont a kalászoláskori aszály csökkentette ezt a paramétert az Mv Ikva és Mv Nemere ősziarab-fajták esetében. 700 ppm szén-dioxid-szinten minden általunk vizsgált kalászos gabonafajta esetében csökkent vízfelvételt figyeltünk meg a kései stressz hatására. Valamint a korai érésű Mv Ikva esetében az alkalmazott szárazságstressz (korai vagy kései aszály) csökkentette a fajta vízfelvételét 700 ppm és 1000 ppm szén-dioxid-koncentráció mellett. A légköri szinthez képest a szén-dioxid-koncentráció mesterséges megemlése 700 ppm szintre nem okozott szignifikáns változást a vízfelvételben, viszont a 1000 ppm szinten már pozitív hatású volt. A légköri szinthez képest 1000 ppm szén-dioxid-koncentráción az általunk vizsgált fajták vízfelvétele szignifikáns mértékben csökkent minden alkalmazott öntözési szinten (optimális, vízmegvonás szárbainduláskor vagy kalászoláskor). Varga et al. (2017) kutatása szerint az optimális öntözés és kései aszály csökkenti a növényi vízfelvételt megemelt szén-dioxid-szinten (1000 ppm).

Eredményeinkből kitűnik, hogy a korai (BBCH 21 fejlődési szinten alkalmazott) szárazságstressz csökkentette az Mv Hópehely és az Mv Nádor fajták vízhasznosító képességét, de csak megemelt szén-dioxid-szinten (700 ppm). A kései (BBCH 55 fejlődési stádiumban) indukált aszály szignifikánsan csökkentette a növények vízhasznosító képességét az Mv Hópehely ősziab-fajta esetében mindhárom szén-dioxid-szinten, Mv Nádor ősziab-fajtánál az emelt CO₂-szinteken (700 ppm és 1000 ppm), illetve az Mv Nemere és Mv Kolompos búzafajtáknál 700 ppm CO₂-koncentráción. Pozitív szén-dioxid-hatást figyeltünk meg a WUE tekintetében a vizsgált árpafajta és minden általunk vizsgált búzafajta esetében, minden vizsgált kezelésnél abban az esetben, ha a szén-dioxid szintjét 1000 ppm-re emeltük. Az Mv Kolompos és Mv Nemere búzafajták esetében is pozitív hatásokat figyeltünk meg 700 ppm szén-dioxid-szinten, az optimálisan öntözött és korai szárazságstresszel kezelt növények esetében. Liu et al. (2016) kedvezőbb WUE-értéket talált zab esetében emelt szén-dioxid-szinten (700 ppm), optimális öntözés mellett, viszont a mi kutatásunk alapján nem volt szignifikáns különbség az optimálisan öntözött növények vízhasznosító képességében a különböző szén-dioxid-szinteken. Li et al. (2017) szerint az őszi búzák vízhasznosító képessége enyhén növekedett (a kontrollhoz képest) kései aszálykezelés hatására emelt CO₂-koncentráción (800 ppm). Eredményeink alapján emelt szén-dioxid-szinten (700 ppm) csökkent a WUE a vizsgált búzafajtáknál, ha stresszkezelést alkalmaztunk. Robredo et al. (2007) megállapította, hogy a legmagasabb vízhasznosító képesség értékeket őszi és tavaszi búza, valamint árpa esetében aszályos környezetben, emelt CO₂-koncentráción (700 ppm) tapasztalta. Medeiros és Ward (2013) aszálykezelés hatására, emelt szén-dioxid-szinten (700 ppm) találták a leghatékonyabb vízhasznosító képességet.

Kalászos gabonák termelésének és vízfelvételeinek vizsgálata szántóföldi modellkísérletben

A két vizsgált tenyészedőszak (2019/2020 és 2020/2021) csapadékadatában jelentős különbségeket figyeltünk meg; Martonvásáron és Pusztáegresen az első vizsgált év volt csapadékos, míg Nyíregyházán a második évben hullott több csapadék. A csapadék havi eloszlásának adatai alapján megállapítottuk, hogy Martonvásáron és Pusztáegresen az első vizsgált tenyészedőszak novemberében és decemberében hullott számottevő mennyiségű csapadék, valamint júniusban Martonvásáron és Nyíregyházán. A második évben (2020/2021-es tenyészedőszak) májusban hullott, a többi hónapoz képest kiemelkedő mennyiségű csapadék mindhárom termőhelyen.

A vizsgált fajták szemtermése a különböző termőhelyeken

Kísérletünk első évében (2019/2020-as tenyészidőszak) a három termőhely közül Nyíregyházán voltak a legalacsonyabbak a termésátlagok. A pusztáegresi termőhelyhez képest a homokos talajon (Nyíregyháza) minden fajta esetében szignifikánsan alacsonyabb termésnyiséget mértünk, a legnagyobb különbséget (39%) az Mv Ikva búzafajta esetében figyelhetünk meg. Martonvásáron a termések az Mv Kolompos kivételével szignifikánsan magasabbak voltak, mint a nyíregyházi termőhelyen. A két termőhely között a legnagyobb különbség (44%) a vizsgált zabfajta (Mv Hópehely) esetén volt megfigyelhető. A pusztáegresi és a martonvásári terméseredmények között is szignifikáns különbségek adódtak. A vizsgált árpafajta (Mv Initium) és három búzafajta (Mv Nádor, Mv Nemere és Mv Kolompos) esetében a pusztáegresi termőhelyen volt magasabbak a termés, míg a vizsgált zabfajta (Mv Hópehely) esetében Martonvásáron. A második évben (2020/2021-es tenyészidőszak) az Mv Initium és Mv Hópehely fajtáknál nem volt szignifikáns különbség a fajták termésében a három termőhely között. A vizsgált búzafajtáknál szignifikáns különbségeket figyeltünk meg a termőképességben Pusztáegres és a másik két termőhely között. Az Mv Ikva termőképessége Pusztáegresen volt magasabb, viszont a három másik vizsgált búzafajta (Mv Kolompos, Mv Nádor és Mv Nemere) esetében Pusztáegresen szignifikánsan legalacsonyabb értékeket kaptunk. A két vizsgált tenyészidőszakban a martonvásári termőhelyen a vizsgált növények közül csak az Mv Hópehely és Mv Ikva fajtáknál volt szignifikáns a szemtermés, mindkét esetben az első, csapadékosabb évben volt magasabb a termés. A vizsgált zabfajta 19%-kal, míg az Mv Ikva 17%-kal termett kevesebbet a második vizsgált évben. Pusztáegresen az őszi zab kivételével minden fajtánál szignifikánsan különbözött a növények termésáhozama a két vizsgált év között, az első, csapadékosabb évben mértünk magasabb értékeket. A legnagyobb különbséget (34%) az Mv Nádor őszi búzafajta esetében figyeltünk meg, de több mint 30%-os különbség adódott az Mv Nemere (33%) és Mv Kolompos (31%) esetében is a két vizsgált év között, a pusztáegresi termőhelyen. A nyíregyházi homokos talajon fejlődött növények szintén magasabb termésáhozamot produkáltak a csapadékosabb évben (2020/2021-es tenyészidőszak), ez a különbség Mv Initium ősziárpa-fajta kivételével minden vizsgált fajtánál szignifikáns volt. Az Mv Nemere és Mv Ikva búzafajták esetében 50% volt a két év közti különbség, Mv Hópehely és Mv Nádor esetében pedig 43%-os és 33%-os különbség adódott.

A vizsgált fajták csapadékhasznosító képessége a különböző termőhelyeken

Kísérletünk első évében (2019/2020-as tenyészidőszak) a nyíregyházi homokos talajon volt a növények csapadékhasznosító képessége a legmagasabb, viszont az Mv Hópehely és Mv Ikva ősziab-, illetve –búzafajta esetében a csapadékhasznosító képesség nem mutatott szignifikáns különbségeket a vizsgált termőhelyek (Martonvásár, Pusztaegres és Nyíregyháza) között. Az Mv Initium és az Mv Kolompos, Mv Nádor és Mv Nemere búzafajták esetében szignifikánsan különböztek a PUE-értékek a különböző termőhelyek között. A legalacsonyabb csapadékhasznosítóképeség-értékeket Martonvásáron számítottuk, illetve Mv Initium és Mv Kolompos esetében Pusztaegresen a növények alacsonyabb PUE-vel rendelkeztek a homokos talajon (Nyíregyháza) fejlődött állományokkal szemben. A 2020/2021-es tenyészidőszakban a három vizsgált termőhely között szintén nem figyeltünk meg szignifikáns különbségeket a vizsgált zabfajta csapadékhasznosítóképeség-értékeiben. A második évben (2020/2021-es tenyészidőszak) a vizsgált árpafajta PUE-értékei a nyíregyházi termőhelyen szignifikánsan alacsonyabbak voltak, mint a másik két termőhelyen, de Pusztaegres és Martonvásár közt nem volt szignifikáns a különbség. Az Mv Ikva és Mv Kolompos búzafajták adatiból kitűnik, hogy Martonvásáron volt a növények csapadékhasznosító képessége a legmagasabb, de ezek az értékek a homokos talajon fejlődött növények értékeinél nem, csak a Pusztaegresiekhez képest különböztek szignifikánsan. Nyíregyháza és Pusztaegres közt sem találtunk számottevő különbséget e két búzafajta (Mv Ikva és Mv Kolompos) PUE-értékeiben. Az Mv Nádor PUE-értékei Martonvásáron magasabbak voltak a másik két termőhelyhez képest, illetve a nyíregyházi és a pusztaegresi értékek ennél a fajtánál sem különböznek szignifikánsan. Az Mv Nemere esetében szintén Martonvásáron határoztuk meg a legmagasabb csapadékhasznosító képességet, de ez a különbség csak Pusztaegresen nőtt növények PUE-értékéhez képest volt szignifikáns. Az évjáráthatás Martonvásáron volt a legkonzekvensebb. Minden általunk vizsgált fajta csapadékhasznosító képessége szignifikánsan magasabb volt a második évben. A fajták PUE-értékei Pusztaegresen szintén szignifikánsan különbözik a két vizsgált év között, de ezen a termőhelyen az Mv Ikva és Mv Nemere ősziab-fajták esetében az első évben, míg a többi vizsgált fajta esetében kísérletünk második évében figyelhetünk meg magasabb értékeket. A homokos talajon csak az Mv Initium, ősziárpa-fajta és Mv Nádor, valamint Mv Kolompos ősziab-fajták esetében különbözött a két év szignifikánsan, minden esetben a 2019/2020-as tenyészidőszak eredményezett magasabb PUE-értékeket.

A szántóföldi kísérleti rendszer eredményeinek megvitatása

Az aszály csökkentheti a kalászosok termését (Sadras et al. 2017; Schmidthoffer et al. 2018; Chowdhury et al. 2021), viszont a különböző növekedési fázisokban elszenvedett szárazságstressz különböző módon hat (Mehraban et al. 2019), illetve az elszenvedett aszály időbeli kitettsége és erőssége is fontos tényező (Zhang et al. 2017). Munkánk során, habár optimális vízellátású növénynevelést nem végeztünk, a két vizsgált év között jelentős volt a csapadék mennyiségének különbsége, illetve az első vizsgált tenyészidőszak áprilisában elhanyagolható mennyiségű csapadék hullott mindhárom termőhelyen (Martonvásár, Pusztaegres, Nyíregyháza), melyet korai aszályként értelmezhetünk. Mehraban et al. (2019) szerint a fiatalkori stressz jobban csökkenti a búzák terméshozamát, mint a későbbi fázisokban elszenvedett aszály. Mi ezt a hatást csak a nyíregyházi termőhelyen vizsgált növényeknél figyelhettük meg; a második, csapadékosabb évben mindhárom búzafajta termése magasabb volt. Pusztaegresen pont az ellenkezőjét tapasztaltuk, a fiatalkori szárazságstressz hatásait később ellensúlyozta a tenyészidőszakban hullott csapadék. Nem csak a csapadék mennyisége befolyásolhatja haszonnövényeink terméshozamát, hanem a talaj típusa is (Lipiec and Usowicz, 2018). Kísérletünk eredménye alátámasztja Lipiec és Usowicz (2018) megállapításait, tápanyagban gazdagabb talajban fejlődött árpa- és zabfajtánk esetében magasabb termést mértünk.

Xue et al. (2019) őszi búzák vizsgálatakor alacsonyabb csapadékhasznosító képességet határozott meg a csapadékosabb években, ha rosszabb minőségű talajban nőttek a növények. A jobb tápanyagellátottságú talajban viszont akkor realizáltak magasabb PUE-értékeket, ha jelentősen kevesebb csapadék hullott. A homoktalajon fejlődött növények esetében a két vizsgált év között csak Mv Initium, Mv Nádor és Mv Nemere fajták csapadékhasznosítóképeség-értékeiben találtunk szignifikáns különbséget, mindhárom fajta esetében a kevésbé csapadékos évben határoztunk meg magasabb értékeket, ellentétben Xue et al. (2019) eredményeivel. A martonvásári termőhelyen a vizsgált növények esetében eredményeink összhangban vannak Xue et al. (2019) eredményeivel, a kevésbé csapadékos évben magasabb PUE-értékeket mértünk. Peng et al. (2020) szintén alacsonyabb csapadékhasznosító képességet talált tavaszi búzák esetében a kevésbé csapadékosabb évben.

Kalászos gabonák produkciójának és vízfelvételének vizsgálata liziméteres modellkísérletben

A vizsgált fajták biomasszája-produkciója liziméteres kísérleti rendszerben

Magasabb talaj feletti biomassa-produkciót a második tenyészidőszakban (2020/2021) figyeltünk meg, mindegyik vizsgált fajta esetében. A 2019/2020-as tenyészidőszakban az Mv Nemere biomasszája volt a legmagasabb ($2618 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),

illetve ennél a fajtánál figyeltük meg a legkisebb különbséget a két vizsgált tenyészedőszak között ($94 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). Az első tenyészedőszakban a legalacsonyabb biomassa tömeget az Mv Ikva búzafajta ($1674 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) esetében mértük. A második vizsgált időszakban a legnagyobb biomasszát ($2798 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) a korai érésű Mv Ikva búzafajtánál figyeltünk meg, a legalacsonyabbat ($2144 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) pedig a kései érésű búzafajtnál (Mv Kolompos). A vizsgált fajtáink biomasszájának átlaga az első vizsgált időszakban $1998 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ volt, ehhez képest a legnagyobb eltérést az Mv Ikva búzafajta esetében figyelhetünk meg. A második időszakban az átlagérték $2473 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ volt és a legnagyobb eltérés ehhez képest az Mv Nemere őszibúza-fajta esetében adódott.

A vizsgált fajták szemtermése liziméteres kísérleti rendszerben

A liziméterhengerekben fejlődött növények szemtermés értékei alapján megállapítottuk, hogy a második tenyészedőszakban (2020/2021) több termést hoztak a vizsgált fajták, kivéve az Mv Nemere őszibúza-fajtát. A 2019/2020-as tenyészedőszakban az Mv Nemere szemtermése volt a legmagasabb ($816 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), illetve ennél a fajtánál figyeltük meg a legkisebb különbséget a két vizsgált tenyészedőszak között ($12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). A 2020-as évben a legkevesebb szemtermést az Mv Ikva búzafajta produkálta ($462 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), valamint a vizsgált késői érés csoportba tartozó fajtáknál (Mv Hópehely zabfajta és Mv Kolompos búzafajta) közel azonos mennyiségű volt a mért szemtermés (610 és $614 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). E két fajta között a második tenyészedőszakban is hasonlóan csekély különbségek adódtak (652 és $644 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), illetve a középérésű búzafajták (Mv Nádor és Mv Nemere) szemtermése szintén alig különbözött egymástól (808 és $804 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$). A 2021-es évben a legmagasabb termést (1000 és $808 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) a korai érésű fajtáknál (Mv Initium ősziárpa-fajta és Mv Ikva őszibúza-fajta) figyeltünk meg, illetve a két vizsgált évben a legnagyobb különbséget ($342 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ és $426 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) a szemtermés értékekben is ezeknél a fajtáknál figyeltünk meg.

A vizsgált fajták Harvest-indexének meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

Mv Hópehely zabfajta, Mv Nemere és Mv Kolompos búzafajtáknál az első vizsgált tenyészedőszakban (2019/2020), míg Mv Initium árpafajta és Mv Ikva és Mv Nádor búzafajták esetében a második vizsgált tenyészedőszakban (2020/2021) határozhattunk meg magasabb Harvest-indexet. Mindkét vizsgált időszakban a legmagasabb HI-értéket (36 és 39%) a vizsgált árpafajtánál figyeltük meg, illetve az átlagtól való legnagyobb eltérést is ez a fajta mutatta, mindkét vizsgált időszakban. A két év közötti legkisebb különbség ($<1\%$) az Mv

Kolompos kései érésű búzafajtánál, míg a legnagyobb különbség (4%) az Mv Ikva korai érésű búzafajtánál adódott.

Az evapotranszpiráció meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

A második vizsgált időszakban figyeltünk meg magasabb evapotranszpiráció-értékeket (ET). A 2019/2020-as időszakban a legmagasabb ET-t (369 mm) az Mv Nemere búzafajtával, a legalacsonyabbat (275 mm) pedig Mv Ikva fajtával bevetett hengerben mértük. A második vizsgált időszakban a legmagasabb érték (386 mm) Mv Kolompos búzafajta esetében adódott, míg a legalacsonyabbat (344 mm) a zabfajtánál állapítottunk meg. A vizsgált két tenyészedőszak között a legnagyobb különbséget az evapotranszpirációban (76 mm) az Mv Ikva búzafajtával bevetett hengerekben figyeltük meg, míg a legkisebb különbség (3 mm) Mv Nemere búzafajta esetében adódott. A zab (Mv Hópehely) esetében szintén nem volt számottevő a két év közti különbség (13 mm). Az első vizsgált időszakban az általunk meghatározott ET-értékek átlaga 326 mm volt, az átlagtól legnagyobb mértékben Mv Ikva és Mv Nemere búzafajták esetében mért értékek tértek el. A második vizsgált tenyészedőszakban az átlagos ET 363 mm volt, ebben az időszakban Mv Kolompos és Mv Hópehely esetében figyelhettük meg a legnagyobb eltéréseket az átlagértékekhez képest. Az ET havi összegei alapján megfigyeltük, hogy az első vizsgált évben áprilisban, a második évben pedig májusban volt a legmagasabb az ET havi összege, illetve márciusban és áprilisban az első, míg májusban és júniusban a második tenyészedőszakban párologtattak többet a növények. Ez alól kivételt képez az Mv Ikva és Mv Initium fajták, a búzafajta esetében 2021 májusában mérhettünk magasabb értéket, míg az árpafajtánál 2020 júniusában.

A vizsgált fajták agronómiai konstansának meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

Az ET-értékekkel ellentétben az agronómiai konstans (K_a) esetében a második vizsgált időszakban (2020/2021-es tenyészedőszak) volt alacsonyabb ez az érték, kivéve a vizsgált korai érésű búzafajta (Mv Ikva) esetében. Az első vizsgált időszakban (2019/2020-as tenyészedőszak) a legmagasabb értéket (3,24) Mv Nemere őszebúzánál határoztunk meg, míg a legalacsonyabbat (2,41) Mv Ikva esetében. Az második vizsgált időszakban a legmagasabb értéket (2,76) Mv Kolompos őszebúzánál számítottuk, míg a vizsgált zabfajta esetében a legalacsonyabbat (2,45). A vizsgált növények K_a átlagosan 2,86 volt az első évben és 2,60 pedig a másodikban. Az átlagtól való legnagyobb eltérést Mv Ikva és Mv Nemere esetében figyelhettünk meg az első vizsgált időszakban és Mv Kolompos és a vizsgált zabfajtánál a második időszakban. A vizsgált fajták agronómiai

konstansát havi szinten is meghatároztuk. Megfigyeltük, hogy az első vizsgált év márciusától májusáig emelkedtek a K_a -értékei, majd júniusban ez a paraméter jelentős csökkent; ami az éréssel párhuzamosan jelzi a növények vízfelhasználásának csökkenését. A második vizsgált évben is hasonló tendenciákat láthatunk, viszont Mv Hópehely őszizab-fajta esetében eltérést tapasztalunk. A fajta agronómiai konstansa márciustól májusig növekedett és júniusra ez az érték jelentős mértékben csökkent, de még így is magasabb maradt, mint a márciusi és az áprilisi érték. Az őszárpa-faja (Mv Initium) és a búzafajták (Mv Ikva, Mv Nádor, Mv Nemere és Mv Kolompos) K_a -értékében csökkenést figyeltünk meg 2021 áprilisában, az előző hónapra számított értékhez képest, ami a talaj alacsony nedvesség-tartalmával magyarázható.

A vizsgált fajták vízhasznosító képességének meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

A második vizsgált tenyészidőszakban (2020/2021) határoztunk meg magasabb biomassa alapján számított értékeket (WUE_{BM}) minden vizsgált fajtánál, kivételt csak az Mv Kolompos őszibúza-fajta képzett. Az első vizsgált időszakban (2019/2020-as tenyészidőszak) a fajták közül a legmagasabb értéket ($7,088 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$) az Mv Nemere búzafajtánál határoztunk meg, míg a legalacsonyabbat ($5,614 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$) Mv Hópehely zabfajtánál. A második időszakban a legmagasabb ($7,972 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$) WUE_{BM} -értéket a korai érésű búzafajtánál (Mv Ikva), a legalacsonyabb ($5,548 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$) pedig a kései érésű Mv Kolompos búzafajtánál számítottuk. A két vizsgált időszak WUE_{BM} -értéke az Mv Kolompos fajtánál különbözött a legkisebb, az Mv Ikva fajtánál a legnagyobb mértékben. Az első vizsgált időszakban a WUE_{BM} -értéke átlagosan $6,111 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$ volt, az átlagtól való legjelentősebb eltérést Mv Nemere búzafajtánál figyeltünk meg, míg a második évben $6,828 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$ volt az átlag és a legnagyobb eltérést Mv Kolompos mutatta. A szemtermésre vonatkoztatott vízhasznosító képesség (WUE_{Sz}) a második vizsgált időszakban volt magasabb, kivéve az Mv Nemere és Mv Kolompos őszibúza-fajtákat. Az első vizsgált időszakban a legnagyobb vízhasznosító képesség értéket ($2,21 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$) Mv Nemere búzafajtánál figyeltük meg és Mv Ikva búzafajtánál pedig a legalacsonyabbat ($1,68 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$). A második időszakban a legmagasabb WUE_{Sz} -értéket a vizsgált árpafajtánál ($2,87 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$) határoztunk meg és Mv Kolomposnál búzafajtánál a legalacsonyabbat ($1,67 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$). A két vizsgált év között a legkisebb különbségek az őszizab-fajtánál (Mv Hópehely) és Mv Nemere búzafajtánál adódtak ($0,06$ és $0,05 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$); a legnagyobb különbségeket a két korai érésű fajtánál (Mv Initium árpafajta és Mv Ikva búzafajta) figyeltük meg ($0,73$ és $0,85 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$). A vizsgált fajták átlagos WUE_{Sz} -értéke $1,93 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$ volt az első vizsgált időszakban és $2,21 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$ pedig

a másodikban. Az átlagtól való legnagyobb eltérést Mv Nemere és Mv Ikva búzafajták esetében figyeltük meg az első vizsgált időszakban és a vizsgált árpafajta és Mv Kolompos esetében a második időszakban.

A vizsgált fajták csapadékhasznosító képességének meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

A két vizsgált időszak közül a másodikban (2020/2021) figyelhattunk meg magasabb csapadékhasznosítóképesség-értékeket (PUE). Az első vizsgált tenyészidőszakban (2019/2020) a legmagasabb értéket ($2,46 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$) Mv Nemere búzafajta esetében, míg a legalacsonyabbat ($1,39 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$) Mv Ikva búzafajta esetében határuhattunk meg. A második vizsgált időszakban a legmagasabb PUE-értékeket ($4,62 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$) a vizsgált ősziárpa-fajtánál (Mv Initium), a legalacsonyabbat ($2,97 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$) a kései érésű búzafajtánál (Mv Kolompos) figyelhattunk meg. A vizsgált fajták átlagos PUE-értéke $1,91 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$ volt az első vizsgált időszakban és $3,69 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$ pedig a másodikban. Az átlagtól való legnagyobb eltérést Mv Kolompos búzafajta esetében figyeltük meg az első vizsgált időszakban és a vizsgált árpafajta (Mv Initium) esetében a második időszakban.

A liziméteres kísérleti rendszer eredményeinek megvitatása

Groh et al. (2020) liziméterrel végzett kutatásában a vizsgált ősziab- és -búzafajták biomassa-értékei közel azonos értéket mutattak a különböző csapadékkellátottságú területen, az általuk vizsgált ősziárpa-fajta biomasszája viszont a szárazabb területen volt magasabb. A vizsgálatunk eredményei alapján a liziméteres rendszerben nevelt fajták biomasszája a szárazabb tenyészidőszakban volt nagyobb, főleg a vizsgált árpafajta és a korai érésű búzafajta mutatta a legnagyobb eltérést; Mv Initium és Mv Ikva fajtáknál találtuk a legnagyobb különbséget a két vizsgált időszak között; abban az évben mértünk magasabb értékeket, amikor az áprilisban és májusban nagyobb mennyiségű csapadék hullott. Umair et al. (2019) őszi búzával végzett kutatása során az évjáratok közötti jelentős (több, mint másfélszeres) csapadékkellátottság különbség ellenére is csak elhanyagolható eltéréseket mértek a biomassa tekintetében. A korai termésű fajták (Mv Initium, Mv Ikva) eredményeinél tapasztalt tendenciákat megerősítik Groh et al. (2020) kutatásai, akik eredményei hasonlóak voltak; a szemtermés értéke magasabb volt a szárazabb területen őszi árpa, zab és búza esetében. A kései érésű fajták (Mv Hópehely zabfajta és Mv Kolompos búzafajta) termése csak kis mértékben különbözött a két év között, az Mv Nemere búzafajta szemtermése a csapadékosabb tenyészidőszakban volt magasabb. Umair et al. (2019) szignifikánsan magasabb szemtermés-értékeket

mért búzánál jelentős csapadék többlet hatására. Az Mv Hópehely zabfajta, Mv Nemere és Mv Kolompos búzafajtáknál a csapadékosabb tenyészidőszakban, míg Mv Initium árpafajta és Mv Ikva és Mv Nádor búzafajták esetében a szárazabb időszakban határozhattunk meg magasabb Harvest-indexet. A korai érésű fajták eredménye egybeesik Groh et al. (2020) eredményeivel, miszerint magasabb HI-értékek határozható meg szárazabb területen. Groh et al. (2020) és Umair et al. (2019) eredményeivel egybehangzóan kísérletünkben magasabb evapotranszpirációt abban a tenyészidőszakban határozhattunk meg, amikor áprilisban és májusban jelentősebb csapadékmennyiség volt megfigyelhető. Az evapotranszpiráció havi eloszlását vizsgálva a csapadékosabb évben április végéig növekedő tendenciát figyeltünk meg, ami a következő hónapokban jelentősen csökkent. Groh et al. (2020) és Tezera et al. (2019) is hasonló tendenciákat állapított meg árpa, búza és zab esetében. A szemtermés alapján számított vízhasznosítóképesség-értékek a szárazabb évben voltak magasabbak, kivéve az Mv Nemere és Mv Kolompos búzafajták esetében, Groh et al. (2020) eredményeihez hasonlóan. Kísérletünkben a szárazabb területen voltak magasabbak a vizsgált fajták WUE-értékei és ha biomassa alapján számították a vízhasznosító képességet, akkor is a szárazabb területen határoztak meg magasabb értékeket. Zhang et al. (2015) tavaszi búza és csupasz zab vizsgálatok megállapították, hogy a maximális WUE meleg és száraz időjárási körülményekkel esett egybe, a minimális értékeket pedig meleg és nedves klimatikus adottságok mellett számították. A kései érésű búzafajtán kívül minden vizsgált fajta esetében magasabb WUE-értékeket találtunk, ha a biomassa alapján számítottuk azt, Groh et al. (2020) munkájához hasonlóan.

Irodalmi források

BISTA, D.R., HECKATHORN, S.A., JAYAWARDENA, D.M., BOLDT, J.K. (2020): Effect of drought and carbon dioxide on nutrient uptake and levels of nutrient-uptake proteins in roots of barley. In: *American Journal of Botany*, 107 1401–1409. p.

CHOWDHURY, M.K., HASAN, M.A., BAHADUR, M.M., ISLAM, MD.R., HAKIM, MD.A., IQBAL, M.A., JAVED, T., RAZA, A., SHABBIR, R., SOROUR, S., ELSANAWAY, N.E.M., ANWAR, S., ALAMRI, S., EL SABAGH, A., ISLAM, M.S. (2021): Evaluation of drought tolerance of some wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes through phenology, growth, and physiological indices. In: *Anronomy*, 11 (9) 1792.

DING, J., HUANG, Z., ZHU, M., LI, C., ZHU, X., GUO, W. (2018): Does cyclic water stress damage wheat yield more than single stress? In: *PLoS ONE*, 13 e0195535.

DONG, B., ZHENG, X., LIU, H., ABLE, J.A., YANG, H., ZHAO, H., ZHANG, M., QIAO, Y., Wang, Y.; Liu, M. (2017): Effects of drought stress on pollen sterility, grain yield, abscisic acid and protective enzymes in two winter wheat cultivars. In: *Frontiers in Plant Science*, 8 1008.

- FANGMEIER, A., CHROST, B., HÖGY, P., KRUPINSKA, K. (2000): CO₂ enrichment enhances flag leaf senescence in barley due to greater grain nitrogen sink capacity. In: *Environmental and Experimental Botany*, 44 151-164. p.
- GARMENDIA, I.; GOGORCENA, Y.; ARANJUELO, I.; GOICOECHEA, N. (2017): Responsiveness of durum wheat to mycorrhizal inoculation under different environmental scenarios. In: *Journal of Plant Growth Regulation*, 36 855-867. p.
- GROH, J., VANDERBORGHT, J., PÜTZ, T., VOGER, H-J., GRÜNDLING, R., RUPP, H., RAHMATI, M., SOMMER, M., VERECKEN, H., GERKE, H.H. (2020): Responses of soil water storage and crop water use efficiency to changing climatic conditions: a lysimeter-based space-for-time approach. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, 24 1211-1225. p.
- HÖGY, P., WIESER, H., KÖHLER, P., SCHWADORF, K., BREUER, J., FRANZARING, J., FANGMEIER, A. (2009): Effects of elevated CO₂ on grain yield and quality of wheat: results from 3-year free-air CO₂ enrichment experiment. In: *Plant Biology*, 11 60-69. p.
- KHAKWANI, A.A.; DENNETT, M.D.; MINUR, M.; ABID, M. (2012): Growth and yield response of varieties to water stress at booting and anthesis stages of development. In: *Pakistan Journal of Botany*, 44 879-886. p.
- LI, Y.; LI, X.; YU, J.; LIU, F. (2017): Effect of the transgenerational exposure to elevated CO₂ on the drought response of winter wheat: Stomatal control and water use efficiency. In: *Environmental and Experimental Botany*, 136 78-84. p.
- LIPIEC, J., USOWICZ, B. (2018): Spatial relations among cereal yields and selected soil physical and chemical properties. In: *Science of The Total Environment*, 663 1579-1590, p.
- LIU, J.-C., TEMME, A.A., CORNWELL, W.K., VAN LOGTESTIJN, R.S.P., AERTS, R., CORNELISSEN, J.H.C. (2016): Does plant size affect growth responses to water availability at glacial, modern and future CO₂ concentration? In: *Ecological Research*, 31 213-227. p.
- MANDERSCHIED, R.; WEIGEL, J.-H. (2007): Drought stress effects on wheat are mitigated by atmospheric CO₂ enrichment. In: *Agronomy for Sustainable Development*, 27 79-87. p.
- MEDEIROS, J.S., WARD, J.K. (2013): Increasing atmospheric [CO₂] from glacial through future levels affects drought tolerance via impacts on leaves, xylem and their integrated function. In: *New Phytologist*, 199 738-748. p.
- MEHRABAN, A., TOBE, A., GHOLIPOURI, A., AMIRI, E., GHAFARI, A., ROSTAI, M. (2019): The effects of drought stress on yield, yield components, and yield stability at different growth stages in bread wheat cultivar (*Triticum aestivum* L.). In: *Polish Journal of Environmental Studies*, 28 (2) 739-746. p.
- PENG, Z., WANG, L., XIE, J., LI, L., COULTER, J.A., ZHANG, R., LUO, Z., CARBERRY, P., WHITBREAD, A. (2020): Conservation tillage increases yield and precipitation use efficiency of wheat on the semi-arid Loess Plateau of China. In: *Agricultural Water Management*, 231 106024.

- QUASEEM, M.F.; QURESHI, R.; SHAHEEN, H. (2019): Effects of pre-anthesis droughts, heat and their combination on the growth, yield and physiology of diverse wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes varying in sensitivity to heat and drought stress. In: *Scientific Reports*, 9 6955.
- ROBREDO, A.; PÉREZ-LÓPEZ, U.; SAINZ DE LA MANZA, H.; GONZÁLEZ-MORO, B.; LACUESTA, M.; MENA-PETITE, A.; MUÑOZ-RUEDA, A. (2007): Elevated CO₂ alleviates the impact of drought on barley improving water status by lowering stomatal conductance and delaying its effects on photosynthesis. In: *Environmental and Experimental Botany*, 59 252-263. p.
- ROLLINS, J.A.; HABTE, E.; TEMPLER, S.E.; COLBY, T.; SCHMIDT, J.; VON KORFF, M. (2013): Leaf proteome alterations in the context of physiological and morphological responses to drought and heat stress in barley (*Hordeum vulgare* L.). In: *Journal of Experimental Botany*, 64 3201-3212. p.
- SADRAS, V.O., MAHADEVAN, M., ZWER, P.K. (2017): Oat phenotypes for drought adaptation and yield potential. In: *Field Crops Research*, 212 135-144. p.
- SAMARAH, N.H.; ALQUDAH, A.M.; AMAYREH, J.A.; MCANDREWS, G.M. (2009): The effects of late-terminal drought stress on yield components of four barley cultivars. In: *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195 427-441. p.
- SCHMIDTHOFFER, I., SZILÁK, L., MOLNÁR, P., CSONTOS, P., SKRIBANEK, A. (2018): Drought tolerance of European barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. In: *Agriculture*, 64 137-142. p.
- SHOKAT, S., GROßKINSKY, D.K., LIU, F. (2021): Impact of elevated CO₂ on two contrasting wheat genotypes exposed to intermediate drought stress at anthesis. In: *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207 20-33. p.
- SIONIT, N.; HELLMERS, H.; STRAIN, B.R. (1980): Growth and yield of wheat under CO₂ enrichment and water stress. In: *Crop Science*, 20 677-690. p.
- TEZERA, K., DIRIRSA, G., HORDOFA, T. (2019): Determination of wheat (*Triticum aestivum* L) seasonal water demand and crop coefficient for effective irrigation water planting and management in semi-arid, central rift valley of Ethiopia. In: *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 21 1 556054.
- THILAKARATHNE, C.L.; TAUSZ-POSCH, S.; CANE, K.; NORTON, R.M.; TAUSZ, M.; SENEWEERA, S. (2013): Intraspecific variation in growth and yield response to elevated CO₂ in wheat depends on the differences of leaf mass per unit area. In: *Functional Plant Biology*, 40 189-194. p.
- ULFAT, A.; SHOKAT, S.; LI, X.; FANG, L.; GROßKINSKY, D.K.; MAJID, S.A.; ROITSCH, T.; LIU, F. (2021): Elevated carbon dioxide alleviates the negative impact of drought on wheat by modulating plant metabolism and physiology. In: *Agricultural Water Management*, 250 106804.
- UMAIR, M., HUSSAIN, T., JIANG, H., AHMAD, A., YAO, J., QI, Y., ZHANG, Y., MIN, L., SHEN, Y. (2019): Water-saving potential of subsurface drip irrigation for winter wheat. In: *Sustainability*, 11 10 2978.

VARGA, B.; VIDA, G.; VARGA-LÁSZLÓ, E.; HOFFMAN, B.; VEISZ, O. (2017): Combined effect of drought stress and elevated atmospheric CO₂ concentration on the yield parameters and water use properties of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. In: *Journal of Agronomy and Crop Science*, 203 192-205. p.

WU, D.-X.; WANG, G.-X.; BAI, Y.-F.; LIAO, J.-X. (2004): Effects of elevated CO₂ concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104 493-507. p.

XUE, L., KHAN, S., SUN, M., ANWAR, S., REN, A., GAO, Z., LIN, W., XUE, J., YANG, Z., DENG, Y. (2019): Effect of tillage practices on water consumption and rain yield of dryland winter wheat under different precipitation distribution in the loess plateau of China. In: *Soil & Tillage Research*, 191 66-74. p.

ZHANG, J., REN, W., AN, P., PAN, Z., WANG, L., DONG, Z., HE, D., YANG, J., PAN, S., TIAN, H. (2015): Responses of Crop Water Use Efficiency to Climate Change and Agronomic Measures in the Semiarid Area of Northern China. In: *PLOS ONE*, 10 e0137409

ZHANG, W., GU, J., WANG, Z., WEI, C., YANG, J., ZHANG, J. (2017): Comparison of structural and functional properties of wheat starch under different soil drought conditions. In: *Scientific Reports*, 7 12312.

ZHAO, B., MA, B.-L., HU, Y., LIU, J. (2021): Source-sink adjustment: A mechanistic understanding of timing and severity of drought stress on photosynthesis and grain yields of two contrasting oat (*Avena sativa* L.) genotypes. In: *Journal of Plant Growth Regulation*, 40 263-276. p.

Következtetések és javaslatok

Az üvegházi kamrákban beállított kísérleteinkben hat, martonvásári nemesítésű, őszi kalászos vizsgáltunk légköri és emelt (700 ppm és 1000 ppm) szén-dioxid-koncentráción, három öntözési szinten (optimális vízellátás, illetve szárbainduláskor vagy kalászoláskor alkalmazott vízmegvonásos aszálykezelés). Szabályozott klimatikus körülmények mellett két faktor hatását vizsgáltuk a kiválasztott fajtáink produktíobiológiai és vízforgalmi paramétereire. Ezek közül a szimulált vízhiányos állapot egy stressztényező, az emelt szén-dioxid-koncentráció pedig egy olyan faktor, melynek kapcsán számos kutatás rámutatott arra, hogy a fajok és fajták nagyon eltérően reagálnak a szén-dioxid szintjére. Így ez a faktor lehet stresszor, de produktó-növekedést is eredményezhet. Számos paraméter alapján megmutatkozott, hogy az általunk vizsgált Mv Initium árpafajta pozitívan reagált a CO₂-koncentráció emelésére, vagyis ennél a fajtánál ez a tényező nem stresszorként, hanem stimulátorként volt jelen. Az árpafajtánál megfigyeltük, hogy az emelt szén-dioxid-koncentrációk nemcsak az alkalmazott aszálykezelések negatív hatásait enyhítették, de szignifikánsan javították a termésparamétereket is. A vizsgált őszi zab-fajta (Mv Hópehely) esetében a szén-dioxid koncentráció emelése stresszorként hatott, negatív szén-dioxid-reakciót figyelhattunk meg. A vizsgált zabfajta jelentős érzékenységet mutatott mindkét alkalmazott stresszkezelésre, bár a kalászoláskori szárazságstresszre nagyobb mértékben, emellett a szén-dioxid-szint emelése az aszálykezelés hatásait nem enyhítette, hanem súlyosbította azokat, számos paraméter esetében. Négy őszi búza-fajtát vizsgálva eredményeink alapján a különböző fejlettségi állapotban alkalmazott szárazságstressz hatásai, a CO₂-reakciók és a terméscsoportok között összefüggést találtunk. Tapasztalataink szerint a korai fajtákat érintette legsúlyosabban az alkalmazott aszálykezelés, melyet a szén-dioxid-szint emelése sem tudott enyhíteni. A korai érésű fajták esetében a CO₂-szint emelése stresszorként hatott. A középérésű fajtáknál (Mv Nádor és Mv Nemere) az aszály kevésbé csökkentette a vizsgált paramétereket, illetve ezeknél a fajtáknál pozitív CO₂-reakciót észleltünk, főként az Mv Nemerénél. A legjobb szárazságtűrést a kései érésű búzafajtánál (Mv Kolompos) figyeltünk meg, ez a fajta mutatta továbbá a legkedvezőbb CO₂-reakciókat is, 700 ppm és 1000 ppm szinteken. A 700 ppm szén-dioxid-koncentráció nem okozott szignifikáns különbségeket a légköri szinten megfigyelthez képest egyik vizsgált fajok, illetve fajták vízfelvételében sem, függetlenül a vízellátás szintjétől. Ellenben a gáz 1000 ppm-es szintje szignifikánsan csökkentette a vízfelvételt a normál légköri szinthez képest, a vízmegvonás alkalmazásának ideje sem befolyásolta ezt a tendenciát. A szén-dioxid-szint pozitív hatását már 700 ppm szinten kimutattuk a vizsgált

növények vízhasznosító képességére, de ez a hatás 1000 ppm szinten még markánsabb volt.

A klímaváltozásának köszönhetően hazánkban egyre gyakrabban fordulnak elő extrém események – többek között az intenzív és hosszan tartó aszályok – melyek veszélyeztetik termesztett növényeink termésbiztonságát. Az aszálytűrő képesség fontos indikátora a növények vízhasznosító képessége. A szén- és vízforgalom vizsgálata fontos a szárazságtűrő fajták nemesítésében, így munkánk során igyekeztünk olyan kísérleteket, illetve kísérleti rendszereket beállítani, melyekben ezt a mérőszámot minél pontosabban tudjuk meghatározni. Üvegházi modellkísérletben, szántóföldi, illetve liziméterhengeres kísérletben határoztuk meg különböző martonvásári nemesítésű kalászos gabonák vízhasznosító képességét. Az általunk vizsgált fajták közül a zabfajta (Mv Hópehely) értékei voltak a legalacsonyabbak, mindhárom kísérleti rendszerben. A kései érésű Mv Kolompos őszibúza-fajta a zabfajtához hasonlóan alacsony WUE- és PUE-értékeket mutatott az üvegházi és a liziméteres kísérleti rendszerben, alacsonyabbat a többi vizsgált búzafajtához képest, de szántóföldi rendszerben az Mv Kolompos fajta PUE-értékei is magasak voltak. A korai (Mv Ikva) és középkorai érésű búzafajták (Mv Nádor, Mv Nemere) vízhasznosító és csapadékhasznosító képessége nagyon hasonló trendet mutat, mindhárom általunk vizsgált kísérleti rendszerben. A vizsgált árpafajta (Mv Initium) hasonlóan magas PUE-értékekkel rendelkezett, mint a másik vizsgált korai fajta (Mv Ikva), viszont az üvegházi rendszerben a vizsgált árpafajta WUE-értéke alulmaradt az Mv Ikvához képest, a liziméteres rendszerben viszont meghaladta azt. Eredményeink alapján megállapítottuk, hogy a liziméterhengerekben fejlődött fajták vízhasznosító képességét és a szántóföldön fejlődöttek csapadékhasznosító képességét tekintve a fajták variabilitása azonos volt, illetve az üvegházi rendszer eredményei is követik a másik rendszerekben meghatározott trendeket.

Megfigyeltük, hogy a különböző rendszerekben nevelt növények vízhasznosító vagy csapadékhasznosító képessége, ha abszolút értékben nem is egyezik meg, de hasonló tendenciákat mutattak. A legalacsonyabb értékeket az üvegházi kísérleti rendszerben nevelt növények esetében határoztunk meg, melynél magasabb vízhasznosítóképeség-értékeket kaptunk a liziméterekben fejlődött növényeknél. A liziméteres rendszerben meghatározott csapadékhasznosítóképeség-értékek magasabbak voltak a rendszerben meghatározható vízhasznosítóképeség-értékeknél. A legmagasabb értékeket a szántóföldi kísérleti rendszerben határozhattunk meg. A liziméteres kísérleti rendszer az evapotranszpiráció legpontosabb meghatározását teszi lehetővé,

viszont a nagy beruházás igénye és a bonyolult működtetés miatt nemesítési céllal széles genotípuskör vízforgalmának tesztelésére nem jelenthet perspektívát. Az általunk kidolgozott üvegházi modellkísérleti rendszer hatékonyan használható széles fajtakörben végzett vizsgálatokhoz is.

Az őszi kalászosok fejlődésének kezdeti szakaszában ősszel a bokrosodásig, tavasszal a vegetatív fejlődés időszakában jellemzően nem a vízhiány a fő limitáló környezeti tényező, annak ellenére, hogy egyre gyakrabban a tél végén tavasz elején csapadékhiányos időszakok léphetnek fel. A vízfelhasználást elsősorban az befolyásolja, hogy ha bekövetkezik, akkor a generatív fejlődés mely fázisában következik be a vízhiányos állapot és az befolyásolja-e a termésmennyiséget. Ezek alapján, ha a talajban rendelkezésre áll a víz, akkor a vegetatív fejlődés során a növények a termésmennyiségtől függetlenül felveszik a szükséges vízmennyiséget, ami viszont a teljes tenyészidőszaki vízigény jelentős részét teszi ki. A vízhasznosító képességet azonban jellemzően a fejlődés utolsó másfél hónapja befolyásolja, amikor a vízforgalom már csökkent intenzitású, ellenben az, hogy a korábban felhasznált talajvíz-mennyiség hogyan hasznosul a produkció oldaláról, ebben az időszakban dől el. A vízhasznosító képesség tehát nem választható el az aszálytűréstől, mivel a talaj vízkészletét szélesebb tartományban felvenni képes, megfelelő gyökérstruktúrával és növényélettani mechanizmusokkal rendelkező fajok és fajták tovább tarthatják fenn asszimiláló felületüket, hatékonyabb lehet a transzlokáció és magasabb termésszintet produkálhatnak, így a vízhasznosító képességük is hatékonyabb lehet.

Új tudományos eredmények

- 1.** Az őszebúza-, ősziárpa-, őszi zab-fajták vízhasznosító képességének meghatározására alkalmas, a liziméteres adatokkal validált, nagy áteresztő képességű, széles kalászosfajtakör tesztelését lehetővé tevő modellkísérleti rendszert alakítottunk ki. Az új kísérleti módszertan felhasználható a nemesítésben fejlett törzsek vízhasznosító képességének összehasonlító vizsgálatára, továbbá az alap kutatásban szélesebb fajtakörből a liziméterrendszerben tesztelhető fajták kiválasztására.
- 2.** A vízforgalom és vízhasznosító képesség meghatározására több, különböző kísérleti rendszer párhuzamos alkalmazása adhatja a legpontosabb eredményt. Szabályozott klimatikus körülmények szükségesek a stresszválaszok és a vízforgalom közötti összefüggések vizsgálatához, azonban a kapott vízhasznosítóképesség-értékek csak genotípus-összehasonlításra alkalmazhatók. A liziméteres és szántóföldi vizsgálatok eredményei az agronómiai gyakorlatban felhasználható adatokat szolgáltatnak, azonban a környezeti feltételek összetett kölcsönhatásai miatt az egyes tényezők vízforgalmi hatásai nem meghatározhatók.
- 3.** A szárazságtűrés és a vízhasznosító képesség egymástól nem elválasztható mutatók, önmagában a vízhasznosító képesség, mint mutató nem alkalmas a szárazságtűrő képesség jellemzésére. A termőképességben tapasztalható variabilitás jelentősen nagyobb, mint a fajták evapotranszpirációjában tapasztalt változatosság.
- 4.** Üvegházi körülmények között a vizsgált fajták közül a legnagyobb érzékenységet az alkalmazott szárazságstressz-kezelésekre az Mv Hópehely zabfajta és az Mv Ikva búzafajta mutatta, valamint ezeknél a fajtáknál a szárazságstressz negatív hatásait a megemelt szén-dioxid-koncentráció sem tudta ellensúlyozni. A legkedvezőbb szárazságtűrő képességet a kései búzafajtánál (Mv Kolompos) és az árpafajtánál (Mv Initium) figyeltük meg üvegházi körülmények között. Ezen fajták CO₂-reakciója volt a legkedvezőbb, az emelt szén-dioxid-koncentráció enyhítette az aszálykezelések negatív hatásait.
- 5.** A légköri szinthez képest a szén-dioxid-koncentráció mesterséges megemelése csak 1000 ppm szinten volt pozitív hatású, a vizsgált szén-dioxid-koncentrációk közül, az őszi kalászosok vízigényének tekintetében, a vizsgált fajok és fajták vízfelvétele szignifikánsan csökkent optimális vízellátás és szimulált aszály esetén is.

Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

A disszertáció témájához kötődő, nemzetközi és hazai folyóiratban megjelent cikkek

Farkas, Z., Anda, A., Vida, G., Veisz, O., Varga, B. (2021): CO₂ responses of winter wheat, barley and oat cultivars under optimum and limited irrigation. In: *Sustainability*, 13 9931.

Farkas, Z.; Varga-László, E.; Anda, A.; Veisz, O.; Varga, B. (2020): Effects of waterlogging, drought and their combination on yield and water-use efficiency of five Hungarian winter wheat varieties. In: *Water*, 12 1318.

Farkas, ZS. (2020): A növények vízhasznosító képességének számítási módjai és meghatározó faktorai. In: *Kertgazdaság*, 53 (3) 76-89. p.

Konferencia közlemények és összefoglalók

Farkas, Z., Veisz, O., Varga, B. (2022): A korai vagy a kései aszály hatása martonvásári nemesítésű árpa-, búza-, és zabfajtákra megemelt szén-dioxid-koncentráción. In: Polgár, Zs.; Karsai, I.; Bóna, L.; Matuz, J.; Taller, J. (szerk.) XXVIII. Növénynevelési Tudományos Napok: Összefoglaló kötet, Keszthely, Magyarország: Magyar Növénynevelők Egyesülete (2022) 122 p. pp. 51-51., 1 p.

Farkas, Z., Vida, GY., Veisz, O., Varga, B. (2020): Őszi kalászosok evapotranszpirációjának meghatározása liziméterekben. In: Bóna, L.; Karsai, I.; Matuz, J.; Pauk, J.; Polgár, Zs.; Veisz, O. (szerk.) XXVI. Növénynevelési Tudományos Napok: Összefoglaló kötet. Szeged, Magyarország: MTA Agrártudományok Osztálya Növénynevelési Tudományos Bizottság, Magyar Növénynevelők Egyesülete (2020) 113 p. pp. 32-32., 1 p.

Farkas, Z., Varga-László, E., Anda, A., Varga, B. (2019): Szimulált vízborítás és aszály kombinált hatásainak vizsgálata őszi búza fajták termésére és vízhasznosítására. In: Karsai, I. (szerk.) Növénynevelés a 21. század elején: kihívások és válaszok: XXV. Növénynevelési Tudományos Nap, Budapest, Magyarország: MTA Agrártudományok Osztálya Növénynevelési Tudományos Bizottság (2019) 502 p. pp. 279-282., 4 p.

Farkas, Z., Varga-László, E., Anda, A., Vida, G., Varga, B. (2019): Combined effects of simulated waterlogging and drought on production of Hungarian winter wheat varieties. In: Kende, Z.; Bálint, Cs.; Kunos, V. (szerk.) 18th Alps-Adria Scientific Workshop: Alimentation and Agri-environment: Abstract book. Gödöllő, Magyarország: Szent István Egyetem Egyetemi Kiadó (2019) 186 p. pp. 56-57., 2 p.