



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

KALÁSZOS GABONÁK VÍZIGÉNYÉNEK ÉS VÍZHASZNOSÍTÓ
KÉPESSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA KÜLÖNBÖZŐ KÍSÉRLETI
RENDSZEREKBE

DOI: 10.54598/003540

Farkas Zsuzsanna
Keszthely
2023

A doktori iskola

megnevezése: Festetics Doktori Iskola (FDI)

tudományága: Környezettudományok

vezetője: Dr. habil. Anda Angéla Rita
egyetemi tanár, DSc
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Georgikon Campus, Agronómia Tanszék

Témavezető(k): Dr. Varga Balázs
tudományos főmunkatárs, PhD
ELKH, Agrártudományi Kutatóközpont
Mezőgazdasági Intézet, 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

TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék	3
Rövidítések jegyzéke	5
1. Bevezető és célkitűzések	7
2. Irodalmi áttekintés	10
2.1. Klímaváltozás okai és hatásai	11
2.1.1. A klímaváltozás magyarországi hatásai	16
2.1.2. A szén-dioxid-koncentrációemelkedés növényélettani hatásai	21
2.1.3. A szárazságstressz növényekre gyakorolt hatásai	26
2.2. A növényi vízhasznosító képesség	32
3. Anyag és módszer	35
3.1. Üvegházi kísérleti rendszer	35
3.1.1. Kísérleti elrendezés	35
3.1.2. Növénynevelési feltételek	37
3.1.3. Statisztika elemzés	38
3.2. Szántóföldi kísérleti rendszer	38
3.2.1. Kísérleti elrendezés	38
3.2.2. Növénynevelési feltételek	40
3.2.3. Statisztika elemzés	40
3.3. Liziméteres kísérleti rendszer	41
3.3.1. Kísérleti liziméterrendszer bemutatása	41
3.3.2. Kísérleti elrendezés	42
3.3.3. Növénynevelési feltételek	44
3.3.4. Statisztika elemzés	44
4. Eredmények	45
4.1. Kalászos gabonák produkciójának és vízforgalmának vizsgálata üvegházi modellkísérletben	45
4.1.1. A CO ₂ -koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a biomassza-produkcióra	45
4.1.2. A CO ₂ -koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a kalászszámmra	47
4.1.3. A CO ₂ -koncentráció és a szimulált vízhiány hatása az ezerszemtömegre	49
4.1.4. A CO ₂ -koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a szemtermésre	52
4.1.5. A CO ₂ -koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a Harvest-indexre	54
4.1.6. A CO ₂ -koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a növények vízfelvételére	56
4.1.7. A CO ₂ -koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a növények vízhasznosító képességére	59
4.1.8. Az üvegházi kísérleti rendszer eredményeinek megvitatása	61
4.2. Kalászos gabonák produkciójának és vízforgalmának vizsgálata szántóföldi modellkísérletben	67
4.2.1. A vizsgált fajták szemtermése a különböző termőhelyeken	68
4.2.2. A vizsgált fajták csapadékhasznosító képessége a különböző termőhelyeken	69

4.2.3. A szántóföldi kísérleti rendszer eredményeinek megvitatása	71
4.3. Kalászos gabonák produkciójának és vízforgalmának vizsgálata liziméteres modellkísérletben	72
4.3.1. A vizsgált fajták biomasszája-produkciója liziméteres kísérleti rendszerben	72
4.3.2. A vizsgált fajták szemtermése liziméteres kísérleti rendszerben	72
4.3.3. A vizsgált fajták Harvest-indexének meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben	73
4.3.4. Az evapotranszspiráció meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben	74
4.3.5. A vizsgált fajták agronómiai konstansának meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben	76
4.3.6. A vizsgált fajták vízhasznosító képességének meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben	77
4.3.7. A vizsgált fajták csapadékhasznosító képességének meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben	79
4.3.8. A liziméteres kísérleti rendszer eredményeinek megvitatása	80
5. Következtetések és javaslatok	82
6. Új tudományos eredmények	86
7. Összefoglalás	87
8. Abstract	89
9. Mellékletek	91
M1. Irodalomjegyzék	91
M2. Kiegészítő táblázatok	109
10. Köszönetnyilvánítás	118

RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

- ABA – abscisic acid, abszcizinsav
- ACC – anthropogenic climate change, antropogén hatások által indukált klímaváltozás
- ATP – adenzin-5'-triszofzfát
- BM – biomassza
- CAM – Crassulacean acid metabolism
- DHAP – dihidroxiaceton-foszfat
- E-4-P – eritróz-4-foszfat
- ESZT – ezerszemtömeg
- Fr-1,6-P₂ – fruktóz-1,6-biszofzfát
- Fr-6-foszfat – fruktóz-6-foszfat
- G-3-P – glicerinaldehid-3-foszfat
- GS-1,3-P₂ – glierinsav-1,3-biszofzfát
- HI – Harvest-index
- HOP – Mv Hópehely, őszizab-fajta
- IKVA – Mv Ikva, őszibúza-fajta
- INI – Mv Initium, ősziárpa-fajta
- K – kontroll
- KAL – kalászoláskor szimulált stresszkezelés
- KOL – Mv Kolompos, őszibúza-fajta
- KORC – K⁺ Outward Rectifying Conductance, depolarizáció hatására aktiválódó kálium csatorna
- L_{PUE} – liziméteres kísérleti rendszerben meghatározott csapadékhasznosító képesség
- L_{WUE} – liziméteres kísérleti rendszerben meghatározott vízhasznosító képesség
- NAD – Mv Nádor, őszibúza-fajta
- NADP⁺ – nikotinamid-adenin-dinukleotid-foszfat
- NEM – Mv Nemere, őszibúza-fajta
- PEP – foszfoenol-piruvát
- PGA – glicerinsav-3-foszfat
- PUE – precipitation-use efficiency, csapadékhasznosító képesség
- ROS – reactive oxygen species, reaktív oxigénformák
- RUBISCO – ribulóz-1,5-biszofzfát-karboxiláz-oxigenáz

SOC – soil organic carbon, talaj szerves széntartalma

SZ – szárbainduláskor szimulált stresszkezelés

Sz-1,7-P₂ – szedoheptulóz-7-biszfoszfát

Sz-7-P – szedoheptulóz-7-foszfát

WUE – water-use efficiency, vízhasznosító képesség

WU – water use, vízfelvétel

XI-5-P – xilulóz-5-foszfát

1. BEVEZETŐ ÉS CÉLKITŰZÉSEK

Az ipari forradalom vívmányai nem csak a gyorsütemű népességnövekedést tették lehetővé, hanem a fosszilis energiahordozók nagymértékű égetését is magukkal hozták, amellyel hozzájárultak a légköri szén-dioxid-koncentráció emelkedéséhez, a kezdeti 278 ppm-ről (Friedlingstein et al. 2019) napjainkig megközelítőleg 417 ppm szintre (NOAA, 2022). Ha a CO₂-kibocsátás üteme nem változik, akkor harminc éven belül a légköri koncentrációja elérheti az 550 ppm szintet (IPCC, 2014). 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 (Jiménez-de-la-Cuesta és Mauristen, 2019). A megnövekedett szén-dioxid-szint pozitívan befolyásolhatja a növények fotoszintézisét, csökkentheti a vízfelvételt, javíthatja a növekedést és termelést (Kimball, 2016; Dusenge et al. 2019; Hussien, 2020). A CO₂-szint emelkedése csökkentheti a sztómaellenállást, ezáltal javíthatja a vízhasznosító képességet (Yu-zheng et al. 2021). A C₃-as növényeknél az emelt CO₂-koncentráció stimulálhatja a nettó CO₂-asszimilációt, amely nagyobb biomassza-termeléshez és terméshez vezet (Kimball, 2016). A szén-dioxid pozitív hatása a C₃-as növényeknél jól ismert jelenség (Högy et al. 2009; Hasegawa et al. 2013; Fitzgerald et al. 2016), viszont ez a hatás nagyban függ a különböző környezeti hatásoktól, mint a léghőmérséklet vagy a talaj tápanyag- és víztartalma (Leakey et al. 2012; McGrath és Lobell, 2013; Reich et al. 2014; Kimball, 2016).

Előrejelzések szerint a következő évtizedekben várhatóan több és intenzívebb aszályos időszakra számíthatunk számos mezőgazdaságilag művelt területen (Dai, 2013; IPCC, 2015). Az aszály az egyik legfontosabb abiotikus stressz, amely jelentősen csökkenti a növényi termelést és akár a termőterületek 40-60%-át érintheti (Shahryari és Mollasadeghi, 2011). A vízhiány erősen befolyásolja a növények fejlődését és növekedését, különböző fiziológiai és biokémiai károsodásokat okozva. Például a sztómák záródásához vezet és csökkenti a fotoszintetikus aktivitást, a transzspirációt (Szegletes et al. 2000; Lawlor és Cornic, 2002; Zhu, 2002; Ma et al. 2017). Az szén-dioxid magas koncentrációja közreműködik a klímaváltozásban, beleértve a csapadékeloszlásban és csapadékintenzitásban jelentkező szélsőségek növekedését, mely növeli az aszály előfordulásának gyakoriságát és súlyosságát számos területen, többek között Közép-Európában (Chun et al. 2016; Deuthmann és Blöschl, 2018; Konapala et al. 2020). Számos kutatás szerint a növények a reproduktív fázisukban érzékenyebbek a szárazságstresszre (Farooq et al. 2014; Varga et al. 2017; Farkas et al. 2020), de az aszály hatásainak súlyossága nagyban függ a stressz intenzitásától és tartamától is. Ezen felül a vízhiány növényekre gyakorolt hatása eltérő lehet a talajtípus és a környezeti körülmények függvényében is (Setter és Waters, 2003; Semenov

et al. 2014), továbbá befolyásolhatja a termesztett faj vagy fajta genetikailag kódolt stressztűrő képessége (Bányai et al. 2020, 2021), valamint a termesztéstechnológia is (Yang et al. 2000; Wu et al. 2014). Mivel a búza (*Triticum aestivum* L.) az egyik legfontosabb gabonaféle az emberi és állati táplálkozásában, ez az egyik legszélesebb körben termesztett gabona (FAO, 2018; Igrejas és Branlad, 2020), az aszály jelentős károkat tud okozni az élelmiszerellátás biztonságában, hiszen a jelentős vízhiány akár 90%-kal csökkentheti a búza terméshozamát (Farooq et al. 2014). A búzafélék mellett az árpa (*Hordeum vulgare* L.) is fontos gabonaféle, melynél az aszály legnagyobb mértékben a kalászoláskor és virágzáskor okozhat károkat (Vaeizi et al. 2010). A marginális hidegebb-nedvesebb területeken termesztett zab (*Avena sativa* L.) iránt az utóbbi időben megnőtt a kereslet, leginkább a humán táplálkozásra gyakorolt pozitívabb hatása miatt (Hoffmann, 1995; Buerstmayr et al. 2007). A felsorolt gabonák közül a zab a leginkább aszály-érzékeny faj, főképp a bugázás időszakában hathat negatívan ez az abiotikus stresszfaktor (Varga et al. 2013).

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 (Ullah et al. 2019; Farkas, 2020). Munkánk során különböző kísérleti rendszerekben 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 vízhasznosítóképeség-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, amely a növények tenyészidőszaki vízfogyasztásának meghatározása mellett akár a 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 információval 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.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A gabonafélék jelentős hatással vannak mindennapi életünkre. Civilizációnk meghatározó alapjai, hiszen az intenzív mezőgazdaság kialakulásával vált lehetővé a népesség növekedése, kialakulhattak nagyobb közösségek, amelyek lakói később városokat alapítottak. Ez megteremtette a politikai hatalom, illetve a társadalmi rétegződés szükségességét, hiszen fontos döntéseket kellett hozni a munkaerő kiosztásában, illetve a vízhez vagy termőföldekhez való hozzáférési jogokkal kapcsolatban is. A gyűjtögetéssel és vadászattal szemben a földművelés egyfajta „helyhez kötöttséget” ozott, amely hosszabb idejű letelepedést okozott, mindez később anyagi javak felhalmozódásához vezetett (Gowdy, 2020). A különböző gabonafajok termesztésbe vonása sem térben, sem időben nem szűkíthető le egy bizonyos időpontra vagy területre. A jelenlegi búzák őse feltehetőleg egy diploid, vad alakorhoz hasonló faj lehetett. Leletek alapján a Natúf-kultúra népe már 13000 évvel ezelőtt is arathatta ezt a fajt. Az alakor domesztikációja jelenleg nem ismert, de feltehetőleg Délkelet-Anatóliához köthető és a kutatók úgy vélik, hogy a tetraploid búzák eredetileg a török Karaca dağ vulkán lábtól eredhetnek (Brandolini et al. 2016; Arranz-Otaegui et al. 2018; Oliveira et al. 2020). 12000-6000 évvel ezelőtt az alakor számított népszerű gabonának, majd a közép-bronzkorban a tönkebúzát is egyre jobban bevonták a termesztésbe. A bronzkortól kezdve a kenyereket inkább a tetraploid tönkéből vagy a hexaploid tönkölyből készítették, mintsem a diploid alakorból (LeClerc et al. 1918). Régészeti leletek alapján 8000 évvel ezelőtt a tönkebúza jelen volt már a mediterrán térségben is, 6000 évvel ezelőtt pedig már az Alpok lábánál is termesztették (Maier, 1996). A diploid árpa termesztésbe vonásának története egyszerűbb, mint a búzáé; valószínűleg a Jordán völgyében domesztikálták mintegy 10000 évvel ezelőtt. A vad árpa kétsoros volt, míg a termesztett változatok többsége hatsoros. A zabok eredete is a Közel-Keletre tehető, vad fajták között találtak diploid, tetraploid vagy hexaploid egyedeket is. A hexaploid zabokat a paleolitikum, illetve a neolitikum időszakában vonták termesztésbe (Zohary, 1971). A neolitikum időszakában a búzák és az árpák mellett a zabok csak mellékszerepet játszottak, amikor a gabonák a Közel-Kelet felől elkezdtek térhódításukat az Atlanti-óceán felé (9000-3000 évvel ezelőtt). Európa északnyugati, hidegebb és csapadékosabb időjárása a zabok termesztésének kedvezett; így 4000 évvel ezelőtt, a mai Németország területén már a zab volt a fő gabona. A melegebb és szárazabb Mediterráneumban az ókori görögök és rómaiak a zabot nem élelmiszerként tartották számon, hanem mint gyógyszeralapanyagot (Zohary et al. 2012). A Római Birodalom északi részein, illetve Európa kelták lakta területein az ókortól kezdve a mai napig fontos szerepe van a zabnak, erre legjobb példa az étkezésükben kulcsszerepet játszó zabkása (Thomas, 1995). A mai gabonaféléink eredete tehát az úgynevezett „termékeny

félhold” területére tehető, amely Elő-Ázsia és Közel-Kelet azon része, ami Mezopotámiától a Földközi-tengerig, illetve az Arab-félszigettől a Szíriai-pusztaságig terjed.

Mai életünk és kultúránk másik sorsfordító időszaka az első ipari forradalomkor kezdődött. Az olyan nagyszerű vívmányaival, mint például a gőzeke, az aratógép vagy a cséplőgép, történelmi léptékű népességnövekedést indított el. A klasszikus és a második ipari forradalom érintett területein erőteljes demográfiai robbanás zajlott le. Anglia népessége például 1800 és 1870 között 10 millióról 20 millió főre nőtt, mintegy 1,55%-os évi népességnövekedési ütemmel (Phelps Brown és Hopkins, 1955; Buskó, 2003). A Föld népessége pedig a XVIII. század elejétől a század közepéig 600 millió főről 1,2 milliárd főre növekedett, míg a következő évszázad közepére már 2,5 milliárd ember élt a Földön (Gyémánt és Katona, 2014). A második világháború, majd az ezt követő hidegháborús haditechnikai fejlődés az Amerikai Egyesült Államokban és a Szovjetunióban, erőteljes tudományos és technikai forradalmat is magával hozott. A tudományos forradalom hozadékaként az egyre hatékonyabb műtrágyák, növényvédő szerek és növekedésszabályozók elterjedésével növelni lehetett a terméshozamot (Cooke, 1965; Aktar et al. 2009; Buah et al. 2017). A jelentős népességnövekedés hozományaként bolygónk népessége a 1960-as évek elejére elérte a hárommilliárd főt, 2011-ben pedig a hétmilliárd főt. Jelenleg több, mint 8 milliárd ember él a Földön és várhatóan ez a szám csak növekedni fog (UN, 2022). Nem csak nagymértékű népességrobbanást figyelhettük meg, hanem az ipari forradalom óta az üvegházhatású gázok légköri koncentrációja is jelentősen megemelkedett, magával hozva a klímaváltozást. A klímaváltozás mezőgazdaságra gyakorolt negatív hatásai párosulva az egyéb környezeti stresszfaktorokkal és a növekvő népesség igényeivel komoly problémákhoz vezetnek az élelmiszerellátás-biztonságának tekintetében (FAO, 2018). Az antropogén klímaváltozás (angolul ACC „anthropogenic climate change”) miatt 1961 óta körülbelül 21%-kal csökkent bolygónkon a mezőgazdaság produktivitása, de a melegebb régiókban (pl. Afrika) nagyobb mértékű csökkenés figyelhető meg, mint Európában vagy Közép-Ázsiában (Ortiz-Bobera et al. 2021). Nem teszünk tehát túl merész megállapítást, ha korunk (és a jövő generációinak) egyik legnagyobb kihívásaként az egyre gyarapodó népesség megfelelő táplálását, illetve megfelelő minőségű és mennyiségű ivóvíz biztosítását jelöljük meg.

2.1. Klímaváltozás okai és hatásai

A klímaváltozás, az éghajlat tartós és jelentős mértékű változását jelenti, mely változás megjelenhet helyi vagy globális szinten, de az éghajlatváltozás jelentheti az éghajlat változékonyságának módosulását is. Az éghajlatváltozás bekövetkezhet természetes kényszerek hatására is; a Föld keringési pályaelemeinek módosulásakor, mind például a Föld tengelyferdeségének változásakor, de az elmúlt időszakban lezajlott klímaváltozás és annak

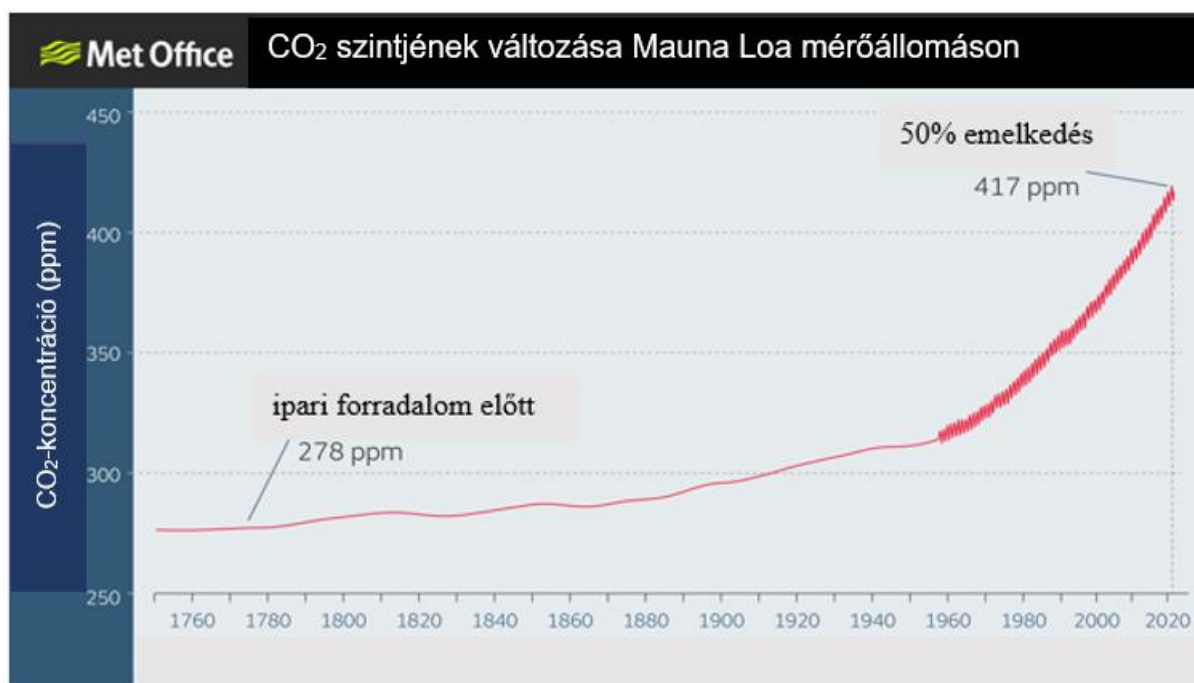
sebessége nem magyarázható pusztán a természetes folyamatokkal, az emberi tevékenység döntően befolyásolja a bolygónk klímáját, például az üvegházhatású gázok kibocsátása révén (Akhtar, 2019). A hétköznapi szóhasználatban az éghajlatváltozást, mint kifejezést gyakran az időjárás napjainkban végbemenő változásaira használják. A földtörténet során a hidegebb jégkorszakok és enyhébb interglaciálisok évezredek alatt végbemenő változásai voltak megfigyelhetők. Sokszor a globális felmelegedést és a klímaváltozást, mint szinonimát használják, de a két kifejezés nem fedt egymást. A globális felmelegedés alatt a teljes földfelszín felszínközeli átlaghőmérsékletének emelkedését értjük, mely az utóbbi kevesebb, mint 150 évben jelentősen felgyorsult. Az éghajlatváltozás magában foglalja a globális felmelegedést és annak hatásait és következményeit is, mint például a csapadékkal vagy a légmozgással kapcsolatos változásokat, illetve az üvegházhatású gázok által okozott egyéb változásokat is (Saklani és Khurana, 2019).

A Napból érkező és az űrbe visszasugárzott energia különbsége határozza meg bolygónk egyensúlyi hőmérsékletét és klímáját, melyet a légköri üvegházhatású gázok mennyisége jelentősen befolyásol azáltal, hogy a felszín hosszuhullámú sugárzását nem engedi távozni a világűr felé. Az előbb említett energiát a szelek és az óceáni áramlatok szállítják a Földön, mindezzel meghatározva a különböző régiók éghajlatát. A különböző, klímát befolyásoló folyamatok és visszacsatolási mechanizmusok határozzák meg éghajlati rendszerünket, melynek bizonyos elemei (pl. óceánok, vagy a sarki jégtakarók) lassan, míg mások gyorsabban reagálnak a változásokra. A klímaváltozásnak belső és külső okai is lehetnek. Belső okhoz sorolhatjuk például az óceánok változékonyságát. Az óceánok alapvető részei a Föld éghajlati rendszerének, de változásai, a légkörben bekövetkezett változásokhoz képest, jóval hosszabb időt vesznek igénybe, mely az óceánok nagy hőkapacitásának köszönhető (Gattuso et al. 2018). A rövidtávú változások, mint az El Niño, a csendes-óceáni vagy észak-atlanti ingadozások, vagy ellentétük, a megszokottnál hidegebb tengerfelszín eredményező La Niña, mely a Csendes-óceán trópusi területeinek középső és keleti részén fordul elő, inkább csak éghajlati változékonyságot jelentenek, mint klímaváltozást. Hosszútávon az óceánok áramlása fontos szerepet játszik a hő földi elosztásában (Herring et al. 2018). A klímaváltozás külső okai a keringéspálya változása, a naptevékenység, a vulkanikus tevékenység, a lemeztectonika és az emberi beavatkozás. A Föld napkörüli pályáján történő apró változások a bolygót érintő napsugárzás és annak eloszlásának változásához vezethetnek. Ez az éves napsugárzás összességében nem okoz jelentősebb változást, a földrajzi elhelyezkedés és az évszakok szerint azonban jelentősen módosulhat. A pálya változása három dologból adódhat; a keringési pálya excentricitásának változása, a tengelyferdeség változása és a Föld tengelyének precessziója (Maslin, 2016). Ezek a tényezők közösen felelősek a Milanković-elmélet szerinti napsugárzás földi bevételeinek ciklikusságáért, amely nagy hatást gyakorol bolygónk éghajlatára (Romano et al. 2021). Viszont nehéz korrelációt kimutatni a

glaciális és interglaciális ciklusok és a külső kényszerek között, mivel az északi és déli félteke klímaviszonyai jelentősen eltérnek egymástól. A déli pólus eljegesedései és melegedési periódusai más ciklust mutatnak, mint az északié. Bolygónk energiaforrása a Nap, 3-4 milliárd évvel ezelőtt a jelenleg kibocsátott energia csupán 70%-át sugározta a Földre, amely energiamentiség, a jelenlegi atmoszféra összetétel mellett, nem tette volna lehetővé a folyékony víz jelenlétét (Zahnle et al. 2020). Valószínűsítik, hogy akkoriban jóval nagyobb volt az üvegházhatású gázok légköri koncentrációja (Sagan és Chyba, 1997). Az azóta eltelt időben a Nap energia-kibocsátása, illetve a légkörünk is jelentősen változott, mely változások közül az egyik legjelentősebb a 2,4 milliárd évvel ezelőtt lezajlott nagy oxigenizációs esemény volt (Olejarz et al. 2021). Rövidebb távú változások is léteznek, mint például a 11 éves napciklus vagy a hosszabb modulációk. A Nap energia kibocsátásának ciklikussága nem teljesen ismert, ám a Nap öregedésével kapcsolatos változásoktól független. Kutatások szerint ez lehet a Maunder-minimum, a kis jégkorszak vagy az 1900 és 1950 közötti melegedés felelőse (Owens et al. 2017). Egy vulkánkitörés számos gázt és részecskét juttat az atmoszférába, viszont az éghajlatváltozáshoz elegendő nagyságú kitörések évszázadonként csak pár alkalommal történnek és pár évre (első sorban a napsugárzás akadályozásával) lehűtik a környezetet. Ilyen esetekre példa a Mount Pinatubo 1991-es kitörése (Aquila et al. 2021) vagy a Tambora 1815-ös kitörése, melyet „nyár nélküli év” követett (Schrauwers, 2020). A jóval nagyobb kitörések csak pár százmillió évente történnek, ám erőteljes változásokat hozhatnak magukkal, amely kihálási eseményeket eredményezhet (Ernst és Youbi, 2017). A vulkanikus tevékenység része a földi szenciklusnak, bár a vulkánkitörések által a légkörbe jutó szén-dioxid mennyisége eltörpül az emberi tevékenység mellett. Jóllehet, hogy a Föld összes vulkáni tevékenységéből származó mennyiségéről jelenleg még becslés sincs, mivel szén-dioxid nem csak a kitöréseknél szabadul fel, hanem más folyamatokban is (Fischer és Aiuppa, 2020). A földtörténeti évmilliók alatt a lemezmozgások megváltoztatták, illetve jelenleg is formálják a földfelszínt és az óceánokat, illetve azok arányát és elhelyezkedését. Ez jelentős befolyással bírt mind a helyi, mind a globális klímára (Ernst és Youbi, 2017). A szárazfölkék helyzete meghatározza az óceánok kiterjedését és formáját, így hatással van a bennük végbemenő áramlásokra is. Az óceánok jelentős szerepet játszanak a hő és a nedvesség globális áramlásában, így az óceánokban történő változások alapvetően befolyásolják a globális és a helyi klímát (Guan et al. 2019). Az óceánok közötti kapcsolat változására földtörténeti léptékben viszonylag friss példa lehet a Panama-földszoros kialakulása, mely 5 millió éve megszüntette a közvetlen kapcsolatot az Atlanti- és a Csendes-óceán között. Az óceáni áramlások változásával ez vezethetett a Golf-áramlat kialakulásához és az Északi-félteke jégsapkájához (Tripathi és Darby, 2018). A klímát megváltoztató emberi tevékenységek közül ugyan a legtöbb figyelmet a fosszilis energia használatából származó szén-dioxid és más üvegházhatású gázok kibocsátása kapja, viszont a

klimát alapvetően befolyásolják az olyan emberi tevékenységek is, mint például az erdőirtás, a földhasználat és az állattenyésztés. Az atmoszféra, a földfelszín és az óceánok hőmérsékletének emelkedése, a jégsapkák olvadása, a tengerszint emelkedése és az extrém időjárási események (pl. hőhullámok, heves esőzések és áradások) számának növekedése jelentős változásokat okozott (Trenberth, 2018).

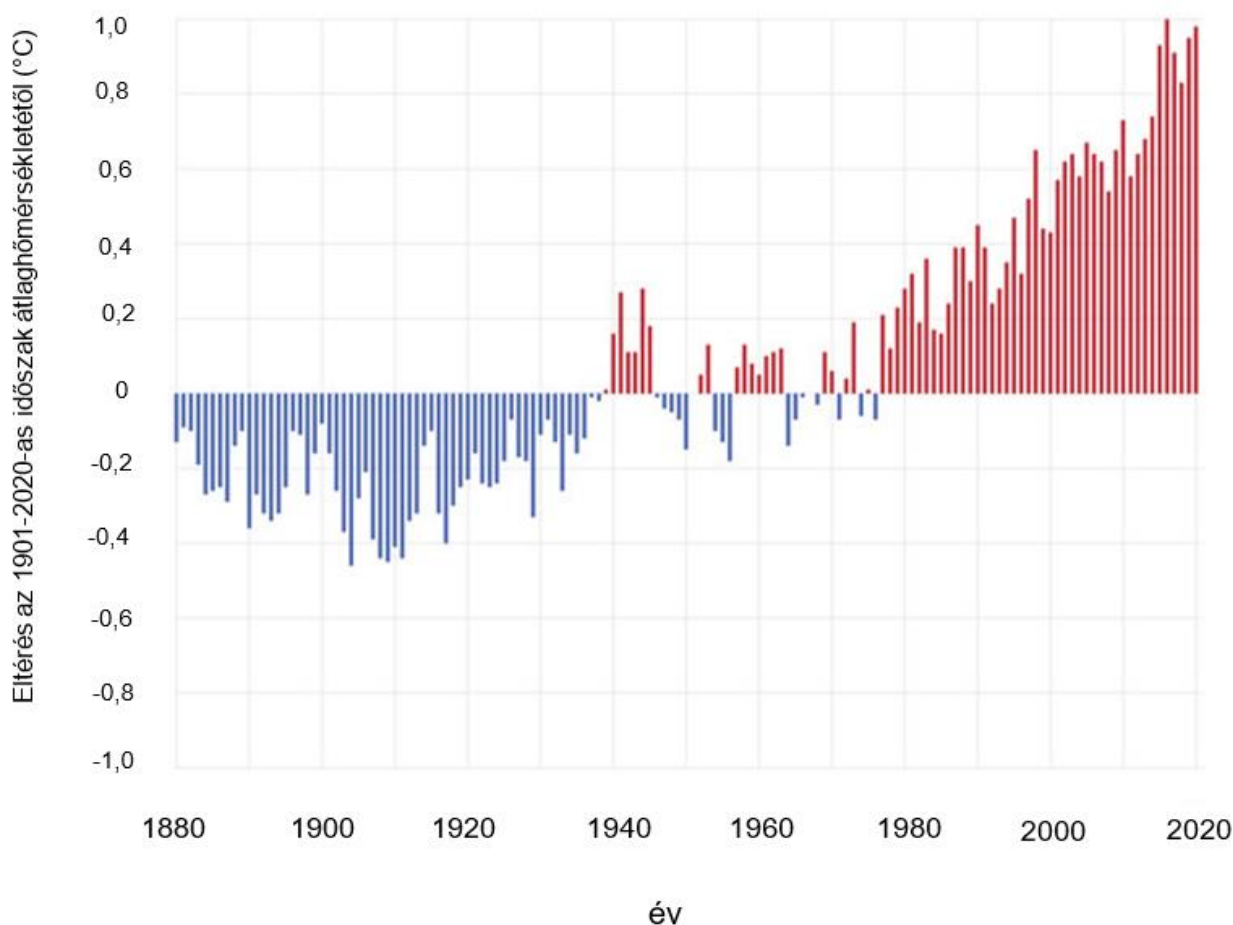
Az ipari forradalom óta a légköri szén-dioxid-koncentráció 278 ppm szintről 417 ppm szintre emelkedett (1. ábra). Az 1760-as évektől folyamatos emelkedést figyelhetünk meg a szén-dioxid-szintben, de ez az emelkedés az 1960-as évektől kezdve sokkal meredekebb lett. Attól függően, hogy a jövőben mennyire próbálják a szén-dioxid-kibocsátást visszaszorítani, az évszázad végére a gáz légköri szintje 550 és 1000 ppm szint között lehet (Anwar et al. 2018; Dusenge et al. 2019).



1. ábra: A szén-dioxid-koncentráció változása az ipari forradalom előtti időszaktól 2020-ig. (forrás: <https://www.carbonbrief.org/met-office-atmospheric-co2-now-hitting-50-higher-than-pre-industrial-levels>)

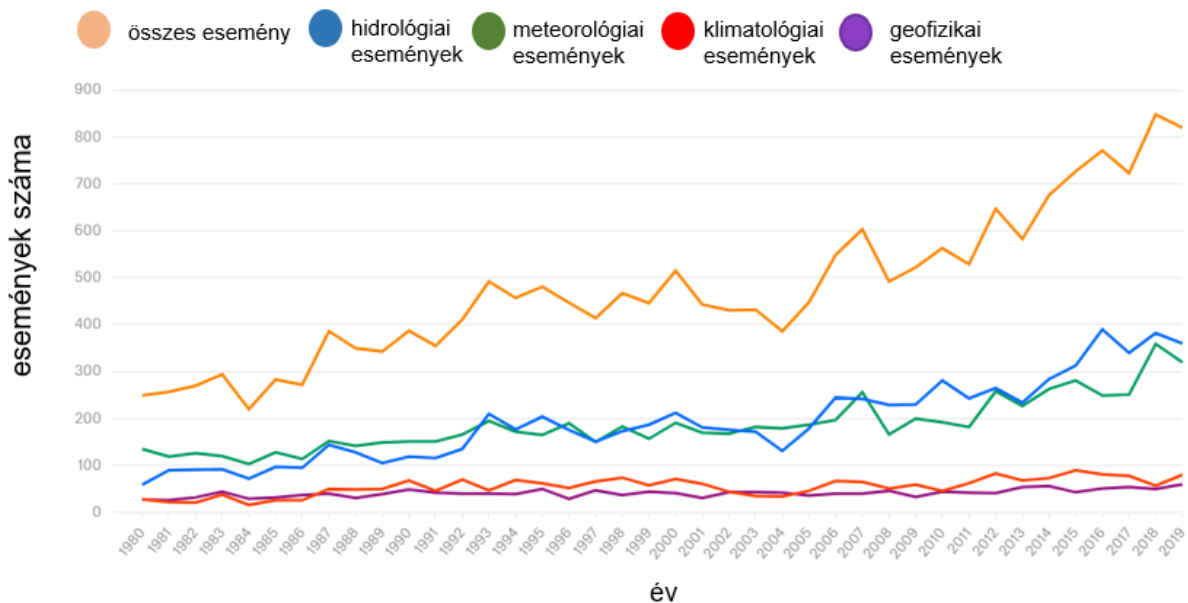
A megemelkedett CO₂-koncentráció, a többi üvegházhatású gázzal együtt megváltoztatta az atmoszféra összetételét, globális felmelegedést okozva (Dusenge et al. 2019). Ahogy a 2. ábrán láthatjuk, 1880 óta a Föld felszínközeli átlaghőmérséklete 0,08 °C-al emelkedett évtizedenként, illetve 1981 óta az emelkedés üteme felgyorsult; 0,18 °C-al emelkedik évtizedenként (Lindsey és Dahlman, 2021). Ez a melegedés nem egységes, a magasabb szélességi fokokon nagyobb mértékű melegedés várható (2100-ra akár 10 °C), mint a trópusi övön (3-4 °C a várható melegedés). Évszakonként is különböző mértékű lesz a melegedés várható üteme, legnagyobb mértékben a téli hónapokban fog emelkedni az átlaghőmérséklet (Ciais et al. 2013). A klímaváltozás nagy hatással

lesz Földünk vegetációjára. A megemelkedett hőmérséklet és a szárazabbá váló légkör, vagyis a hőmérséklet az alacsonyabb relatív légnedvességgel párosulva, növelheti a potenciális párologtatóképességet (Ficklin és Novick, 2017).



2. ábra: A 1880-2020-as időszak földfelszíni hőmérsékletének éves eltérése az 1901-2000-es időszak évi átlaghőmérsékletéhez képest.
(forrás: Lindsey és Dahlman, 2021)

A klímaváltozás miatti extrém események számában növekedést figyelhettünk meg az elmúlt 40 évben (3. ábra). A növekedés nagyobb mértékű volt a hidrológiai (pl. áradások) és meteorológiai (pl. viharok) események esetében, mint a klimatológiai (pl. extrém hőmérséklet, aszály, erdőtüzek) vagy geofizikai (pl. földrengések, cunami, vulkanikus aktivitás) eseményeknél (3. ábra). Az extrém időjárási események (pl. hóhullámok, heves esőzések és áradások) számának növekedése, illetve a talajok minőségromlása vagy a termőterület csökkenése egyre nagyobb terhet ró a mezőgazdaságra, ezáltal még nehezebb helyzetbe hozza az amúgy is ingatag élelmiszerellátási biztonságot (Del Buono, 2021).

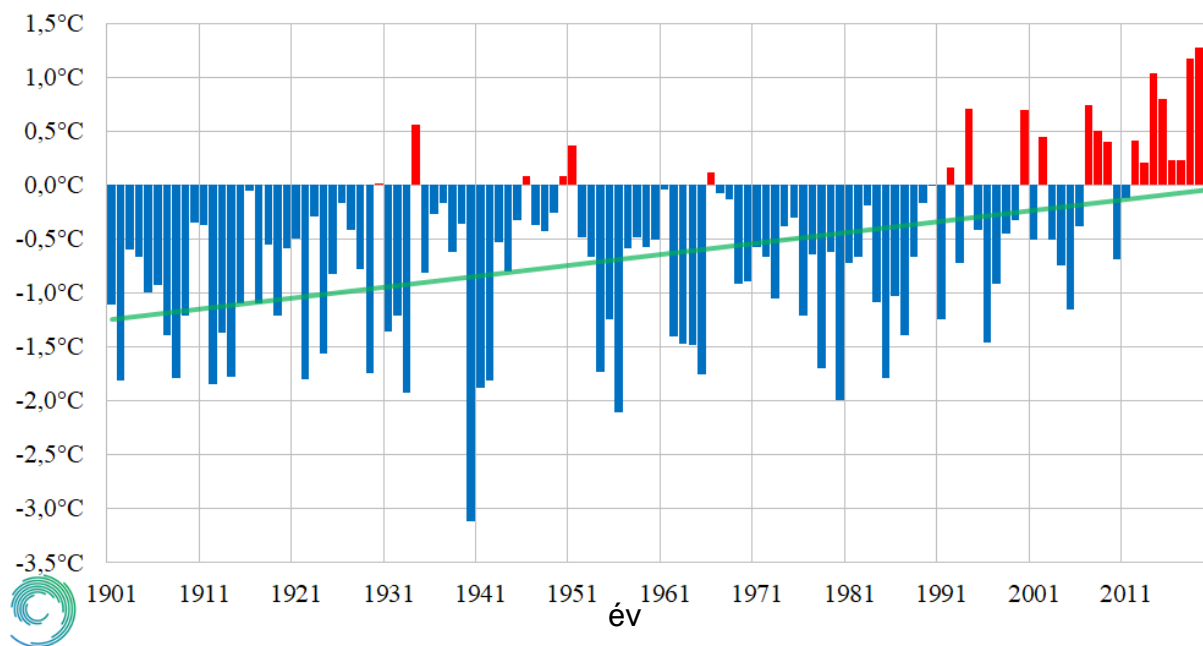


3. ábra: Extrém események gyakorisága 1980 és 2019 között.

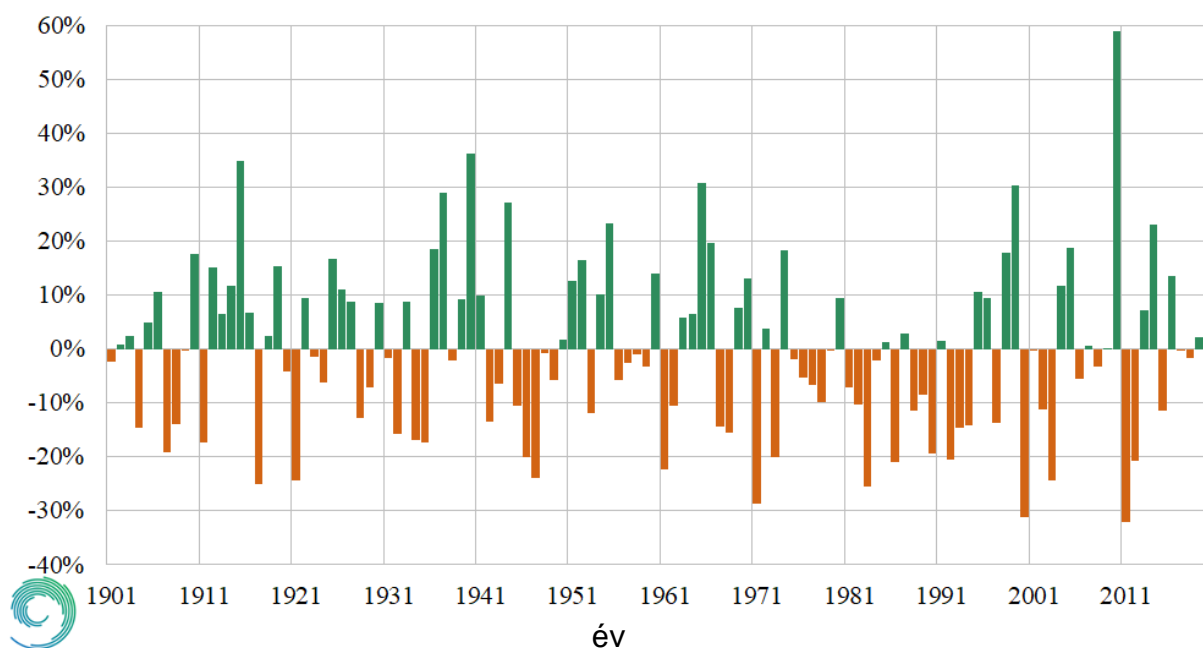
(forrás: <https://www.munichre.com/en/risks/natural-disasters-losses-are-trending-upwards.html?#1995343501>)

2.1.1. A klímaváltozás magyarországi hatásai

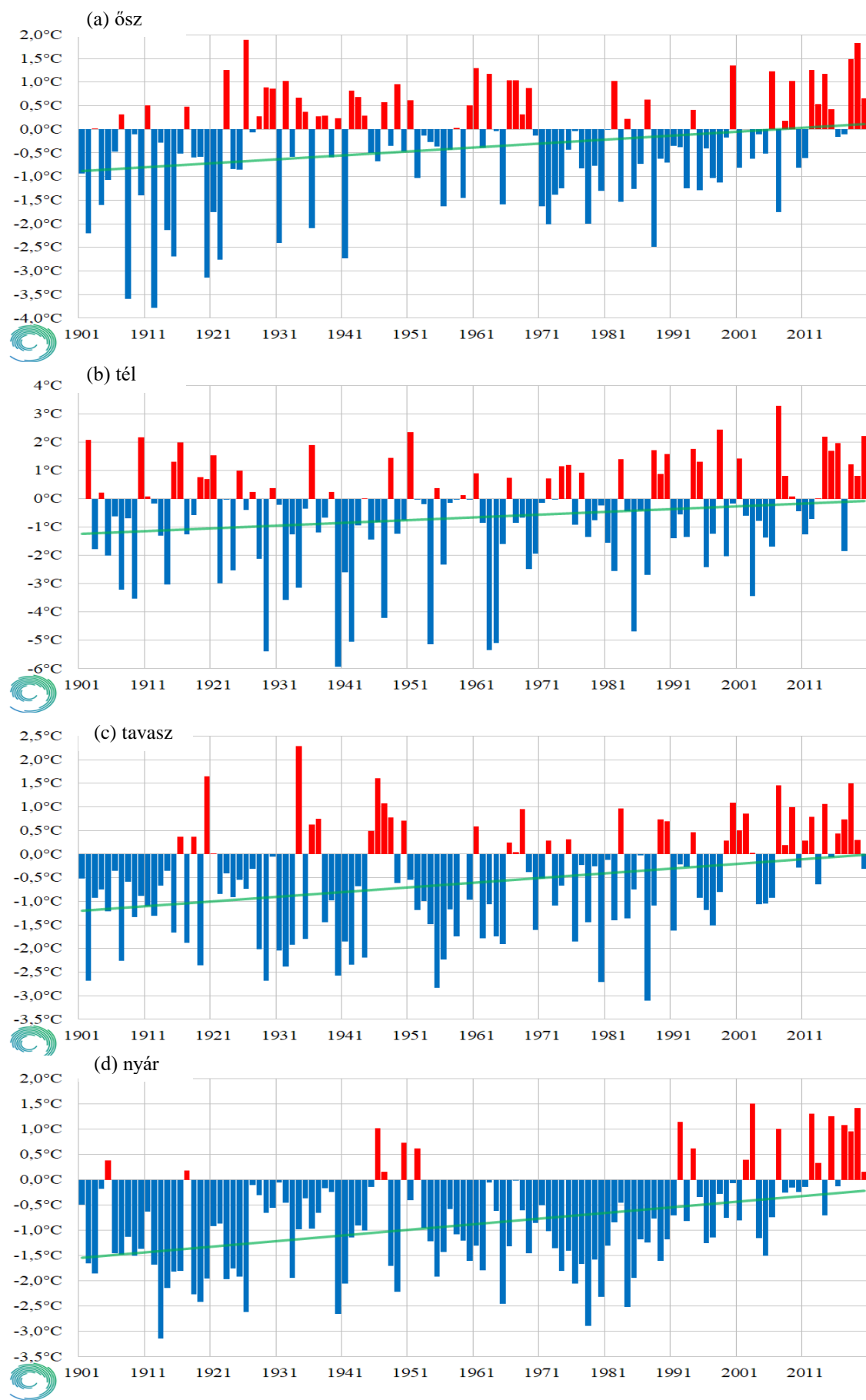
A Kárpát-medence a klímaváltozás szempontjából az egyik legsérülékenyebb területnek számít (Pieczka et al. 2009) Európában. Hazánk éghajlata is bizonyítottan változott az elmúlt évtizedekben, a globális tendenciákkal összhangban hőmérsékletemelkedést figyelhetünk meg (4. ábra). Magyarországon az éves csapadékmennyiség a XX. század elejétől tekintve némileg csökkent, viszont az elmúlt évtizedekben növekedés figyelhető meg (5. ábra). A csapadékmennyiség évről-évre nagy változékonyságot mutat, a több éven át áthúzódó tartós csapadékos vagy száraz időszakok ritkák (5. ábra). Az évszakos középhőmérséklet adatokból (6. ábra) megfigyelhetjük, hogy az elmúlt több mint 120 évben nyaraink melegedtek a leginkább, tavasszal és télen hasonló mértékben emelkedett a hőmérséklet, amely az őszi emelkedést meghaladta. Viszont az is kitűnik az Országos Meteorológiai Szolgálat adataiból, hogy az 1980-as évektől a hőmérséklet emelkedése gyorsuló tendenciát mutat. Az utóbbi negyven évben teleink során mérhető átlaghőmérsékletek nőttek a legnagyobb ütemben (6. ábra). Nemcsak az évszakos középhőmérsékletek, de a csapadékváltozások is sokkal nagyobb időbeli változékonyságot mutatnak, mint az éves anomáliák időszora (7. ábra).



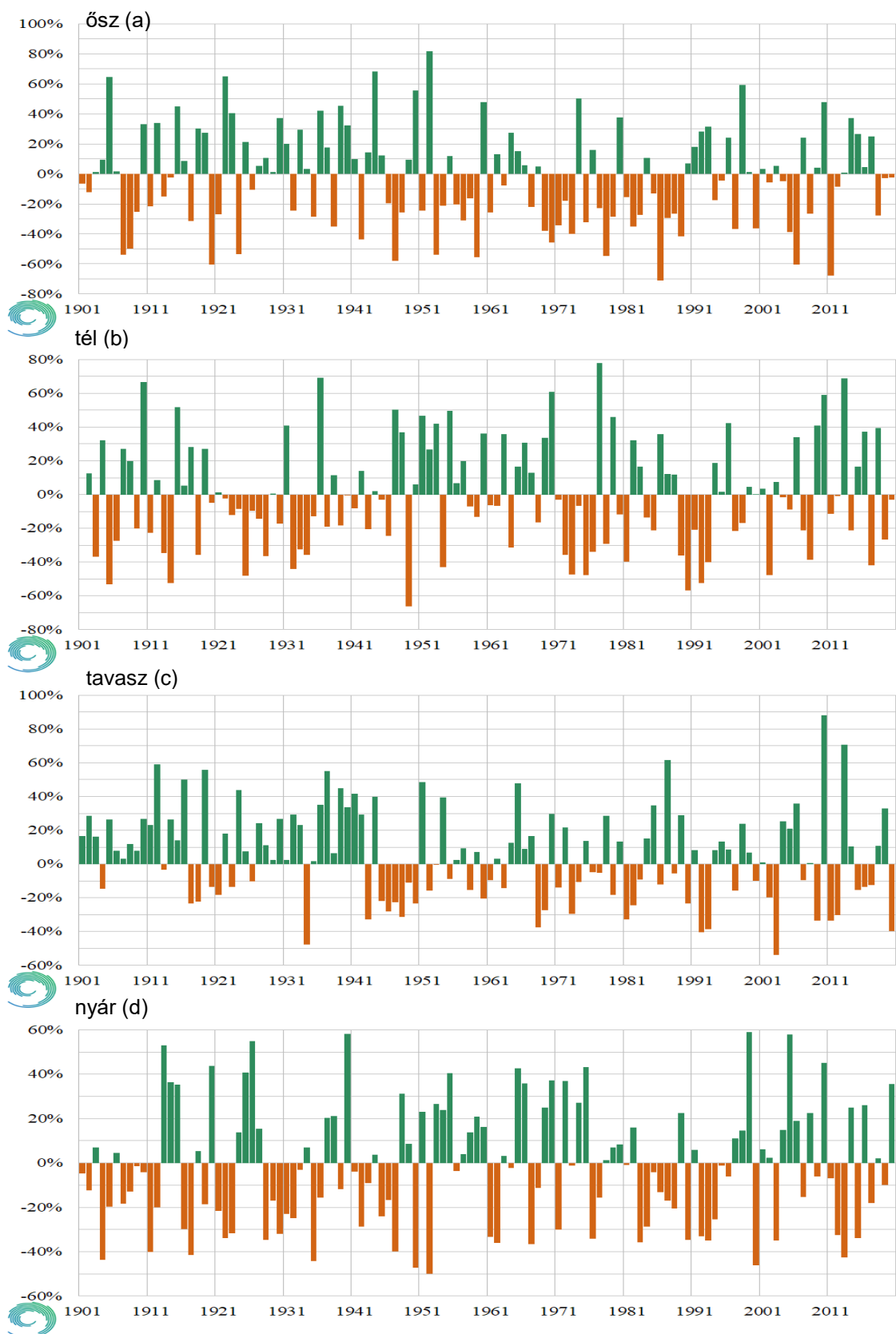
4. ábra: Magyarország éves középhőmérsékletének anomáliái 1901 és 2020 között. Az értékeket az 1991 és 2020 közötti időszak átlagához viszonyították. (Homogenizált, interpolált országos átlagok alapján) (forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat)



5. ábra: A magyarországi éves csapadékösszegek országos átlagának anomáliái 1901 és 2020 között. Az eltéréseket az 1991-2020 évek átlagához viszonyították (Homogenizált, interpolált országos átlagok alapján) (forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat)



6. ábra: Magyarország évszakos középhőmérsékletének anomáliái 1901 és 2020 között. Az értékeket az 1991 és 2020 közötti időszak átlagához viszonyították. (Homogenizált, interpolált alapszágosátlagok alapján) (forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat)



7. ábra: A magyarországi évszakos csapadékösszegek országos átlagának anomáliái 1901 és 2020 között.

Az eltéréseket az 1991-2020 évek átlagához viszonyították (Homogenizált, interpolált országos átlagok alapján) (forrás: Országos Meteorológiai Szolgálat)

A hazánkat sújtó éghajlatváltozás elsődleges hatása, a nyugati szelek övének Skandinávia felé tolódásának következményeként a csapadékeloszlás változása; a téli időszakban enyhébb, de csapadékosabb az időjárás, míg nyáron szárazabb és melegebb időjárás várható (Trájer és Páldy, 2021). Előrejelzések szerint az éves csapadékmennyiség csökkenésével hosszabb távon sem kell számolni (Bartholy és Gelybó, 2007; Pongrácz et al. 2011), viszont a csapadék éven belüli eloszlásának változása növelni fogja az aszályos időszakok kialakulásának kockázatát, illetve azok intenzitását a vegetációs időszakban (Gálos et al. 2007; Anda és Soós, 2016). Nyaraink várható melegedésével párhuzamosan nőni fog az éves párolgás mértéke, ezzel párhuzamosan a nyári csapadékhiány fokozott aszályveszélyt hordoz magában (Blanka et al. 2013). A növekvő nyári átlaghőmérséklet a csökkenő csapadékmennyiséggel párosulva a vegetációs időszak közepén negatív vízmérleget eredményezhet. Az előrejelzések szerint a téli melegedés üteme a nyári mértékétől elmarad (Pongrácz et al. 2011), így a szélsőségekkel együtt a felmelegedés nem vonja maga után tenyészidőszak hosszának növekedését (Trájer és Páldy, 2021). A fűfélék (*Poaceae*) esetében, a többi zárvatermőkhöz képest, a klímaváltozás hatása enyhébb lesz, mivel a család számos tagja (pl. a C₄-es kukorica) jobban adaptálódhat a száraz termőhelyi viszonyokhoz is. Gaál et al. (2014) szerint a XXI. század közepére (2021-2050) a gabonák termésátlaga akár meg is emelkedhet, illetve az évszázad végére, különösen a Dunántúlon és Észak-Magyarországon egyértelmű növekvő terméshozamot prognosztizálnak őszi búza esetében (Fodor és Pásztor, 2010). A klímaváltozás hatásai talajaink egy részét is érinti, hiszen a karsztos felszíneken létrejött talajokon, valamint a mezőgazdasági művelés alatt álló fedett karsztos területeken a talajerózió okozta részleges, illetve teljes progresszív denudáció sajnos már jelenleg is kimutatható (Trájer et al. 2020). A jövőben a talajpusztulás elősegíti a fás szárú vegetáció elvesztése, a szárazodási folyamatok legérzékenyebben hazánk Duna-Tisza közének homokhátsági talajait érintik (Zsákovics et al. 2007). A rossz vízmegtartó képességű homoktalajok feletti fás vegetáció eltűnésével megszűnik a talajszemcsék kohéziója, mely futóhomok ismételt kialakulásához vezet, valamint a homoktalaj felső rétegének gyors humusztartalom-erodálódása miatt a terület mező-, és erdőgazdasági szempontból hasznavehetetlen területté válhat (Trájer et al. 2020). Az éghajlatváltozás elősegíti továbbá az invazív gyomok, valamint gyomfák terjedését is (Bradley et al. 2010), mely a jövőben jelentősen megnehezíti majd a mezőgazdasági termelést is (Korres et al. 2016). A klímaváltozás meggyorsíthatja a gyomok vegyszer-rezisztenciájának kialakulását is (Matzrafi et al. 2016), illetve a gyomnövények a kultúrnövényeinkhez képest általában jobb alkalmazkodóképességet mutatnak a légköri szén-dioxid-szint emelkedésével, a talajnedvesség csökkenésével és a hőmérséklet emelkedésével szemben (Varanasi et al. 2016). Az éghajlatváltozás, a mezőgazdasági termelés mellett jelentős hatást gyakorol az élelmiszerbiztonságra és a közegészségügyre is. Hazánkban termesztett növények közül a

gabonafélékre (különösen a kukoricára és a búzára) és feldolgozott termékeikre, valamint a takarmánynövényekre jelentős veszélyt jelentenek a penészgombák, kiemelve a különböző *Fusarium* fajokat, valamint régióink éghajlatának egyre több mediterrán vonása miatt megjelenő *Aspergillus flavus* törzseket (Dobolyi et al. 2013; Varga-László et al. 2020). A klímaváltozás hatására módosulhat a virágzási idő is (Rezaei et al. 2018; Renner és Zohner, 2018), amely módosulás a rovarbeporzású növényeket érzékenyebben érint majd, akár ökológiai károkat is okozva (Inouye, 2020; Mathiasson és Rahan, 2020).

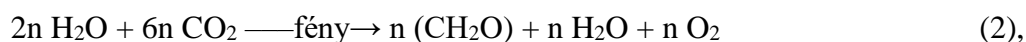
2.1.2. A szén-dioxid-koncentrációemelkedés növényélettani hatásai

A növényi növekedés, valamint a földi élet legfontosabb alapkövei közé tartozik a víz és a szén-dioxid. A növényi anyagcsere egyik legjellemzőbb vonása, illetve földi létünk egyik legjelentősebb folyamata, hogy a növények képesek a fényenergiát szerves anyagok előállítására felhasználni. Általánosságban elmondható, hogy a fotoszintézis egy redox-folyamat, melynek során valamilyen elektrondonorról úgy jut át az elektron egy akceptorra, hogy ahhoz a szükséges energiát a fény biztosítja (Láng, 2007). A fotoszintézis legáltalánosabb egyenletét a következőképpen (1. egyenlet) írhatjuk fel:



ahol H_2D az elektrondonort, A pedig az akceptort jelöli.

A fotoszintetizáló szervezetek döntő többsége a vizet használja elektrondonorként, hogy redukálja a szén-dioxidot vagy más elektronakceptort. Ebben az esetben a víz oxidációja miatt oxigén szabadul fel. Ezen szervezetek fotoszintézisére egy konkrétabb reakcióegyenlet (2. egyenlet) is felírható:



ahol a (CH_2O) a redukált terméket jelöli.

Ahogy az egyenletből is láthatjuk, az elnyelt szén-dioxiddal azonos mennyiségű oxigén termelődik. Mivel az oxigén légköri mennyisége a jelenkorban közel 21 tf%, a szén-dioxidé pedig 0,04 tf%, a redukáló szubsztrát igen alacsony mennyiségben van jelen a termelődő oxigénhez képest (Láng, 2007; NASA, 2019). Jelenleg a magas oxigéntartalom a fotoszintetikus produktivitás gátló tényezője a fotoszintetizáló szervezetek jelentős hányada számára. A fotoszintézis két, egymással párhuzamosan zajló, egymást feltételező szakaszra osztható. A gránumok membránjában fény hatására a fotoszintézis fényreakciójának fontos mozzanata a $NADP^+$ (nikotinamid-adenin-dinukleotid-foszfát) redukciója és a vízbontás. A fényszakaszban képződik a CO_2 -redukcióhoz szükséges redukáló anyag, az NADPH. Illetve ebben a szakaszban jön létre a CO_2 -redukció energetikai feltétele is, vagyis a fényszakaszban történik meg az ATP (adenozin-5'-triszfát) képződése, fényenergia terhére. A fotoszintézis másik fontos szakasza

a sötétszakasz. Ebben a szakaszban történik a szén-dioxid megkötése és átalakítása cukorrá, a fényszakaszban keletkezett redukált koenzimek és ATP felhasználásával. A több lépésből álló folyamat a színtestek belső plazmaállományában nagyszámú enzim közreműködésével zajlik le. A szén-dioxid fixációja és redukciója három úton lehetséges, vagyis megkülönböztetjük a CO₂-fixáció C₃-as, illetve C₄-es útját és a szén-dioxid-fixációt a CAM-típusú (Crassulacean acid metabolism) növényekben. A növényvilág jelentős részénél a Calvin-ciklust figyelhetjük meg, a keletkező primer termékek szénatomszáma alapján C₃-as növényeknek nevezzük őket. Bizonyos növények (például a kukorica) eltérő módon kötik meg a szén-dioxidot. Ebben az esetben a primer termék négyszénatomos molekula, ezért is nevezzük ezeket C₄-es növényeknek. A két növénycsoport között nemcsak biokémiai, hanem strukturális különbségeket is felfedezhetünk. Az előbb említett utaktól kissé eltérő szén-dioxid-fixációt figyelhetünk meg a *Crassulaceae* és egyéb családba tartozó fajok esetében. Ebben az esetben a CO₂-fixáció a C₃-as és C₄-es út jellegzetességeit is mutatja, de a kétféle út időben el van választva egymástól. A három út közül a C₃-as teljesen univerzális, a másik kettőt a növények szűkebb körében figyelhetjük meg. A CO₂-fixáció C₃-as útja, vagyis a Calvin-ciklus során a szén-dioxidot egy ötszénatomos szénhidrát köti meg és két háromszénatomos glicerinsav-3-foszfát (PGA) keletkezik. A reakciót katalizáló enzim a ribulóz-1,5-biszfoszfát-karboxiláz-oxigenáz (Rubisco). A Calvin-ciklus második lépésében a PGA glicerín-1,3-biszfoszfát (GS-1,3-P₂) alakul ATP felhasználásával. Majd a GS-1,3-P₂ gliceraldehid-3-foszfát-dehidrogenáz, egy NADP-dependens dehidrogenáz jelenlétében gliceraldehid-3-foszfáttá (G-3-P) redukálódik. A következő lépésben a gliceraldehid-3-foszfát és izomerje, a dihidroxiaceton-foszfát (DHAP), aldoláz-reakció eredményeképpen összekapcsolódik és hatszénatomos molekulát, a fruktóz-1,6-biszfoszfátot (Fr-1,6-P₂) adja. Majd a fruktóz-1,6-biszfoszfát katalizációja mellett a Fr-1,6-P₂-ről hidrolízissel fruktóz-6-foszfát (Fr-6-foszfát) keletkezik. A Calvin-ciklus következő lépésében egy transzketoláz-reakció játszódik le, mely során a Fr-6-foszfátról az első két szénatom áttevődik a G-3-P-ra. A reakció eritroz-4-foszfát (E-4-P) és xilulóz-5-foszfát (XI-5-P) keletkezését eredményezi. Majd az E-4-P és a dihidroxiaceton-foszfát aldoláz-reakcióval egy hétszénatomos cukorfoszfátot, a szedoheptulóz-7-biszfoszfátot (Sz-1,7-P₂) adja. A szedoheptulóz-1,7-biszfoszfát katalizáló hatására a Sz-1,7-P₂-ről az egyik foszfát lehidrolizál és szedoheptulóz-7-foszfát (Sz-7-P) keletkezik. A következőkben a Sz-7-P transzketoláz-reakcióban vesz részt a G-3-P-tal, mely reakció eredményeként két ötszénatomos cukorfoszfát keletkezik, nevezetesen a ribóz-5-foszfát és a xilulóz-5-foszfát. Minkét cukorfoszfát ribulóz-5-foszfáttá alakulhat. A Calvin-ciklus zárólépéseként a ribulóz-5-foszfátból egy foszforilációs lépés során ribulóz-1,5-biszfoszfát keletkezik. A CO₂-fixáció C₃-as útja tulajdonképpen három fő fázisra bontható: a karboxilációra, a redukcióra és a regenerációra. A karboxiláció a PGA képződésével zárul le és önmagában energiát nem igénylő folyamat. A

redukció a G-3-P keletkezésével játszódik le, és ebben a lépésben használódik fel a NADPH és az ATP kétharmad része. A gliceraldehid-3-foszfáttól a ribulóz-1,5-biszfoszfátig terjedő reakciók a CO₂-akceptor regenerációját szolgálja. Ennek során használódik fel az ATP egyharmad része. Összeségében CO₂-molekulánként a Calvin ciklusban 2 NADPH és 3 ATP használódik fel. A C₄-es növények szén-dioxid-fixációs útja a Calvin-ciklustól eltérő módon zajlik: a C₄-es növények primer fixációs terméke az oxálcetsav, almasav és az aszparaginsav; a CO₂-fixáció fényen történik; a négyszénatomos termékekből szénátadás történik a C₃-as ciklus felé. A C₄-es növényekben kétféle fotoszintetikus sejttípus van, a mezofill- és a hüvelyparenchima-sejt. A CO₂ primer fixációja a mezofillsejtek citoplazmájában történik. A szén-dioxid-akceptor ebben az esetben a foszfoenol-piruvát (PEP) és a karboxilációt katalizáló enzim a foszfoenol-piruvát-karboxiláz. Ez az enzim a citoplazmában lokalizált és a szubsztrátja HCO₃⁻ és nem a szén-dioxid, mint a Rubisco esetében (Láng, 2007).

A fotoszintézis intenzitására jelentős befolyást gyakorolhatnak a különböző külső környezeti tényezők, mint például a fényintenzitás, a hőmérséklet vagy a szén-dioxid légköri koncentrációja (Dusenge et al. 2019; Shafiq et al. 2021). A CO₂-fixáció hőmérsékletfüggését megfigyelve azt tapasztalták, hogy a C₃-as növényeknél a hőmérsékleti optimum 25 °C, míg a C₄-es növényeknél ez jóval magasabb, általában 35 °C, de akár 40 °C is lehet. Valamint az alacsonyabb hőmérsékleten (15–25 °C) a C₃-as növények fotoszintetikus aktivitása felülmúlja a C₄-es növényekét és körülbelül 27–30 °C az a hőmérséklet, melyen azonos aktivitást mutatnak (Láng, 2007). A hőmérséklet fotoszintézis intenzitására gyakorolt hatása komplex, mivel számtalan olyan folyamatra hat, amely befolyásolja a fotoszintetikus aktivitást. Ezen tényezők egyike a sztómák nyitásának és zárásának hőmérsékletfüggése, amely befolyásolja a külső gáztérből a CO₂ diffúzióját a levelekbe. A hőmérséklet emelkedése növeli a transzspirációt, ami elősegíti a sztómák zárását. Ez a folyamat közvetetten befolyásolja a fotoszintetikus CO₂-fixációt (Láng, 2007; Végh et al. 2018). Ugyanakkor a CO₂-asszimilációban résztvevő enzimek aktivitása is hőmérsékletfüggést mutat, akárcsak a légzésben résztvevő enzimeké. Valamint a hőmérséklet hat a membránok permeabilitására és a szén-dioxid oldékonyságára, ez utóbbi viszont befolyásolja a Rubisco karboxiláz és oxigenáz aktivitását (von Caemmerer, 2020; Evans, 2021). A C₃-as növényeknél a hőmérséklet emelkedése 15–30 °C között növeli a fotorespirációt. Ha a fotorespiráció gátlás alatt áll (például alacsony O₂-koncentráció fennállásakor), akkor a C₃-as növények szén-dioxid-asszimilációjának hőmérsékleti optimuma magasabb hőmérsékletek felé tolódik el (Láng, 2007). Mivel a szén-dioxid emelkedő légköri koncentrációja minden bizonnyal tovább emeli az átlaghőmérsékletet (Dusenge et al. 2019), így a jövőben a szén-dioxid-koncentráció közvetetten, a hőmérséklet változásával hatást gyakorolhat majd a C₃-as növények fotoszintetikus képességére. A szén-dioxid – mint a fotoszintézis szubsztrátjának – koncentrációja közvetlenül is befolyásolja

a fotoszintetikus aktivitást. Az atmoszféra jelenlegi CO₂-koncentrációja a telítési fényintenzitáson limitálja a fotoszintézis sebességét. A fotoszintézis CO₂-koncentrációtól való függése a légköri CO₂-koncentrációig gyakorlatilag lineáris összefüggés mutat mind a C₃-as, mind a C₄-es növényekben. A C₄-es növényeknél az aktuális légköri szén-dioxid-koncentráció felett hamar megszűnik a linearitás, míg a C₃-as növényeknél 800 ppm koncentráció felett a fotoszintetikus aktivitásukban felülmúlják a C₄-es növényeket. A szén-dioxid mellett az oxigén is a Rubisco szubsztrátja, így kompetíció alakul ki a két gáz között. Ez az egyik oka, hogy az O₂-koncentráció is befolyásolja a fotoszintetikus produktivitást a C₃-as növényekben. Az oxigén másik gátló hatásának oka az, hogy oxidálja a glikolsavat, ami fotorespirációval történő CO₂-kibocsátáshoz vezet (Láng, 2007). A szén-dioxid jelenlegi légköri koncentrációján a Rubisco karboxilációs reakciója nem szaturált, és ha a CO₂-koncentráció emelkedik, akkor a CO₂: O₂ arány változásával az enzim karboxilációs rátája emelkedni fog, míg az oxigenációs képessége csökken, ezzel javítva a növények fotoszintetikus képességét (Thompson et al. 2017; AbdElgawad et al. 2021).

A szén-dioxid-szintje a sztómamozgásokban is fontos szerepet játszik. A sztómazáródás normális körülmények között a fényintenzitás csökkenése és a CO₂-tenzió növekedése miatt következik be. Ezek az abiotikus hatások a H⁺-ATPázok inaktiválódását, illetve az anionszűrő indukcióját okozzák, melyet következtében gyors anion- (Cl⁻, malát²⁻) leadás következik be. Ez a folyamat hosszantartó membrán-depolarizációt okoz, aktiválva a KORC (K⁺ Outward Rectifying Conductance; depolarizáció hatására aktiválódó kálium csatorna) csatornákat. A képződött szacharóz lebomlik, leadódik, valamint keményítő szintetizálódik. Ezen folyamatok eredményeként a zárósejtekben vízpotenciál-növekedés történik, mely vízleadáshoz, turgorvesztéshez és sztómazáródáshoz vezet (Fodor, 2013). A CO₂-koncentráció növekedése sztómazáródáshoz, csökkenése pedig nyitódáshoz vezet a megvilágított és az elsötétített levelekben, illetve az etiolált levelekben is. Magasabb fényintenzitáson magasabb CO₂-koncentráció szükséges a sztómazáródás adott mértékéhez, mégpedig azért, mert a fotoszintézis során több CO₂ hasznosul nagyobb fényintenzitásnál, vagyis magasabb külső koncentráció kell ahhoz, hogy egy adott CO₂-koncentráció maradjon a sejt közötti járatokban. A CO₂ a fotoszintézis során felhasználódik, a légzés pedig szén-dioxidot termel. Ha a felhasználás és a termelés egyensúlyban van, akkor az intercelluláris CO₂-koncentráció nem változik (Cseh, 2007). A szén-dioxid-érzékelés a zárósejtek belső tulajdonsága, melyről úgy vélik, hogy a levélfelszíni CO₂-koncentráció helyett inkább az intercelluláris CO₂-koncentrációra reagálnak (Mott, 1988). Továbbá mind a C₃-as, mind pedig a C₄-es fajok konzisztensen és hasonlóan sztómakonduktancia-csökkenést mutatnak emelkedett CO₂-koncentráció mellett (Ainsworth és Long, 2005; Yu-zheng et al. 2021), illetve a zárósejtjeik fotoszintetikus hatékonysága érzékeny az O₂-koncentrációra (Lawson et al. 2003). A sztómák CO₂-érzékenysége vízhiány esetén növekszik (Cseh, 2007). A

megemelkedett CO₂-koncentráció növeli a fotoszintézis intenzitását, de ennek mértéke függ a levelek hőmérsékletétől, illetve az elérhető víz és tápanyag mennyiségétől is (Zhu et al. 2017). A szén-dioxid-szint emelkedésével párhuzamosan növekedhet a növények biomassza-produkciója, ezerszemtömege, Harvest-indexe, szemszáma, illetve javulhat a vízhasznosító képessége is, de ezek a pozitív hatások leginkább C₃-as növényeknél figyelhetők meg (Wu et al. 2004; Kimball, 2016; Dunn et al. 2019; Hussien, 2020; Gámez et al. 2020; Abdelhakim et al. 2021). A javuló növényi vízhasznosító képesség mérsékeli az aszály hatásait (Wang et al. 2018; Farkas et al. 2021; Varga et al. 2022). A magasabb szén-dioxid-szint növeli a fruktóz-, szacharóz- és keményítő-tartalmat (Gámez et al. 2020). Az emelkedő szacharóztartalom miatt emelkedett auxinszintet fedeztek fel (Sairanen et al. 2012). Továbbá a szén-dioxid koncentrációjának emelkedése csökkenheti a növények nitrogén-, fehérje-, vas-, magnézium-, kén-, cinktartalmát, valamint csökkent B1-, B2-, B5-, B9- és emelkedett E-vitamintartalmat is megfigyeltek (Broberg et al. 2017; Zhu et al. 2018; Blandino et al. 2020). De a sütési tulajdonságokra is hatással van a szén-dioxid emelkedett szintje, negatívan hat a Hagberg-féle esésszámra, a Zeleny-féle számra és a gluténtartalomra (Broberg et al. 2017). Az emelt szén-dioxid-szint hat a „virágzási fenológiára” is, vagyis a bimbószakadásra, a pollenérésre, a nektártermelésre vagy a virágöregedésre, így a növény-pollinátor kapcsolatra is (Crowley et al. 2021; Kim et al. 2017). A növény-patogén kölcsönhatásban is változást okoz a szén-dioxid emelkedett szintje. A légköri szén-dioxid-szinten nevelt növények esetében csökkent ellenállóképességet fedeztek fel búza esetében *Fusarium graminearum* és *Zymoseptoria tritici* fertőzőskor (Váry et al. 2015). Továbbá az emelt CO₂-koncentráció hatására megnövekedett dezoxinivalenol-, vagy másnéven vomitoxintartalmat mutattak ki (Blandino et al. 2020).

A szárazföldi ökoszisztémák az emberi tevékenység által keletkezett szén-dioxid-koncentrációnak évente körülbelül 30%-át kötik meg (Friedlingstein et al. 2020), de a szénmegkötő képesség fennmaradása részben attól függ, hogy a növényi biomassza vagy a talajban található szerves szén mennyisége (angolul „soil organic carbon”, SOC) hogyan reagál a légköri szén-dioxid-koncentráció jövőbeli növekedésére (Keenan et al, 2016). Az emelkedett szén-dioxid-koncentráció egyik hatása a növényi biomassza növekedése, viszont ez a növekedés negatívan hathat a SOC-ra. Megfigyelték, hogy ha az emelt CO₂-koncentráció enyhén növeli a biomasszát, akkor a talajban található szerves szén mennyisége nő, viszont erős biomassza-növekmény mellett a széntartalék csökkenése figyelhető meg (Terrer et al. 2021). A szén-dioxid megemelt szintje befolyásolja a gyökérnövekedést, -mélységet, -morfológiát és a gyökér iontranszportját (Jin et al. 2015; Thompson et al. 2017; Varga et al. 2020). Valószínűsíthető, hogy a növények foszforigénye jelentősen nő a megnövekvő szén-dioxid-szint hatására, a fotoszintézis serkentése, illetve az azt követő növekedés miatt.

2.1.3. A szárazságstressz növényekre gyakorolt hatásai

A stressz fogalmát először Selye János, osztrák-magyar származású orvos, kutató vezette be a tudománytörténetbe 1936-ban. Felismerte, hogy az emberi sejtek és szervek különböző alkalmazkodási reakciói mennyire hasonlóak, tekintet nélkül az „agresszor” sajátosságaira. Felismerései alapján megalkotta az általános adaptációs szindróma fogalmát, vagyis „az általános alkalmazkodási tünetegyüttes egy fiziológiai mechanizmus, amely a károsodás, mint olyan ellen védekezik” (Selye, 1936). Megállapításait elsősorban a magasabb rendű állatokra vonatkoztatta, értelemszerűen az emberre is, pár évtizeddel később már ő is leírta, hogy a stresszreakciók alacsonyabb rendű, idegrendszer nélküli állatok, illetve növények esetén is kimutathatók (Selye, 1976). A biológia a stressz fogalmát többféleképpen értelmezi. Selye (1973) szerint a stressz a szervezet túlterhelt, túlerőltetett állapota, a szervezet aspecifikus reakciója bárminemű megterheléssel szemben; míg a szervezet állapotának megváltozását okozó extrém környezeti tényező a stresszor, avagy stressztényező. Levitt (1980) pedig úgy vélte, hogy a stressz a szervezet számára potenciálisan előnytelen, kedvezőtlen környezeti tényező, valamint a stressz által a szervezetben kiváltott fizikai vagy kémiai változásokra, illetve következményekre a „strain” kifejezést használta. A „strain” a stressz következtében kialakuló, azzal arányos változás, amely még nem feltétlenül eredményezi a növekedés vagy a szaporodás szignifikáns csökkenését (Levitt, 1982). Szigeti (2018) szerint a stressz az a fiziológiai állapot, amelyben a növények növekedése, fejlődése és szaporodása az optimális alkalmazkodás tartományán kívül, a fokozott környezeti terhelés miatt a genomban meghatározott lehetőségek alatt marad. A növényekre ható stressztényezők lehetnek természetes vagy antropogén eredetűek, vagy másik csoportosítás szerint az abiotikus (abiogén) vagy a biotikus (biogén) faktorok okozhatnak stresszállapotot. A biotikus stresszt előidézhetik a növényeket fogyasztó, károsító állatok; a különböző kórokozók, vagyis vírusok, baktériumok vagy gombák; illetve ide kell sorolni a növényi kompetíciót is, tehát az élőhelyért vagy a forrásokért való versengést, valamint az allelopátiát is (Madani et al. 2019; Hierro és Callaway, 2021; Vilà et al. 2021). Az abiotikus stresszhatások a növényi élőhelytől függően gyakran szezonálisan, illetve egymással kombinált formában is jelentkezhetnek. Az optimálisnál tartósan magasabb vagy alacsonyabb hőmérséklet, a növények számára felvehető víz mennyiségének a csökkenése, vagy ellenkezőleg a tartós vízborítás, a leggyakrabban előforduló, éghajlati tényezőkre visszavezethető abiotikus stresszorok (Haak et al. 2017; Kurowska, 2021; Zhou et al. 2021). Ebbe a csoport sorolhatjuk továbbá a fény, az ultraviola vagy az ionizáló sugárzás miatti stresszhatásokat (D’Amico-Damião és Carvalho, 2018; Jeyasri et al. 2021). A talaj magas sótartalma, a szélsőséges pH viszonyok, a nehézfémek és a szermaradványok jelenléte, vagyis a kémiai ágensek is abiotikus stresszt okozhatnak (Haak et al. 2017; Li et al. 2018; Majeed

et al. 2019; Jeyasri et al. 2021). A szél, a talajmozgások és az áradások pedig a mechanikai stressz csoportjába tartoznak (Abhinandan et al. 2018; Mencin et al. 2021). Antropogén stresszorok közé tartoznak többek között a növényvédő szerek, a légszennyezés (SO₂, NO_x, O₃), a savas eső és a nehézfémek (Dangi et al. 2018; Fuchs et al. 2018). A stressznek is különböző szintjeit különböztetjük meg. Az eustressz egy pozitív, alkalmazkodási válasz, melyet egy stresszor kis dózisa vált ki (Selye 1964). Egy stresszor alacsony dózisa adaptív fenotípusos változást okozhat, amely fenotípus számos alkalmazkodás-jellegű változást magában foglal (Potters et al. 2007; Bienertova-Vasku et al. 2020). A distressz egy erősebb, negatív válasz, amit a stresszor intenzívebb, tartósabb hatása vagy nagyobb dózisa okoz, ami védekezéssel (coping), illetve alkalmazkodással már nem korrigálható, szubcelluláris károsodással járhat. A stresszor hatásának megszűnte után a funkciók képesek visszaállni a korábbi szintre. Tudományos kísérletekben általában, ha a stressz kifejezést használjuk, akkor a disztresszt értjük alatta, az eustresszt pedig egy fiziológiai alkalmazkodási reakciónak tekinthetjük (Szigeti, 2018; Bienertova-Vasku et al. 2020). A stresszválasz, vagyis az egész növény globális válasza egy környezeti stresszorra, függ a szenzortól, a jelátvivőktől és az anyagcsereváltozás jellegétől, valamint mértékétől. A növényi stresszválasz lehet rövid vagy hosszú távú. A rövid távú, vagyis a fenotípusos válaszok, melyek már az egyed életében jelentkeznek az akklimáció és az akklimatizáció. Az akklimáció esetében az egyed szervezet-, és élettani illeszkedése egy adott stresszorra adott kiegyensúlyozott válasz, mely kompenzálja a stresszor hatására, az élettani paraméterekben bekövetkezett csökkenést. Az akklimatizáció pedig a számos környezeti tényező esetén bekövetkezett komplex változásokra adott kiegyensúlyozott válaszok összessége. Az akklimáció és az akklimatizáció a környezeti tényezők megváltozásaira adott fenotípusos válaszok, melyeknek mértéke fenotípusos plaszticitásfüggő. A hosszú távú válasz az adaptáció. Az adaptáció az öröklés során egy populációban alakul ki, az adott gének előfordulása megváltozik, kedvezőbb génkombinációk jönnek létre, mely tartós rezisztenciát eredményez (Collier et al. 2019). Az alkalmazkodási mechanizmusok eredményeként a stresszor hatására adott növényi válaszok a hatás elkerülése, a hatás eltűrése és a rezisztencia. Az elkerülés nem feltétlenül a stresszor elől való (térbeli) kitérést jelenti, hanem egy extrém intenzitású vagy tartalmú stresszhatás esetén a növények az anyagcseréjüket lecsökkentik, vagy akár teljes nyugvó állapotba kerülnek, izolálják magukat a stresszor károsító hatása elől. Az elkerülés egyik legismertebb példája a mérsékelt égövi lombhullatók lombhullatása, amely az évszakok evolúciós időtávú periodikus változásainak hatására adaptáció révén alakult ki. De az időszakosan kiszáradó területeken élő növények gyors fenológiai fejlődése is példa lehet az elkerülésre, ebben az esetben a növény egyedfejlődése a kedvező körülmények rövid ideje alatt lezajlik a csírázástól a maghozásig, majd a körülmények kedvezőtlené válását követően a növények magjai biztosítják a túlélést. További elkerülési

mechanizmusnak tekinthető például az áttelelést biztosító rizómák, gumók képzése, illetve a rozetták éjszakai összecsukódása. A hatás eltéréséről akkor beszélhetünk, amikor a növények egy viszonylag gyenge stresszor hatása alatt képesek a stressz nélküli állapothoz hasonló, magas anyagcsere-aktivitást fenntartani, súlyosabb stressz esetén pedig csökkentett anyagcsere-aktivitással működni, így biztosítva a túlélést. A növények érzékelik a kedvezőtlen hatást, de anyagcsere-folyamataik révén ellensúlyozzák azt, vagy ha a károsodás már bekövetkezett, akkor megpróbálják kijavítani. Toleranciáról a környezeti tényezők azon tartományán belül beszélhetünk, melyen belül az egyedek életképesek maradnak. A tűrés az egyedi alkalmazkodóképesség, az akklimáció, akklimatizáció mértékének eredménye. Ellenállásról (vagyis rezisztenciáról) akkor beszélhetünk, ha a növény a stresszort nem érzékeli, elkerüli, vagy képes megelőzni funkciócsökkenés nélkül. A rezisztencia mechanizmusok irreverzibilis, örökletes evolúciós alkalmazkodás, vagy az adaptáció során alaknak ki (Szigeti, 2007; Szigeti, 2018).

A szélsőséges időjárási események hatására mind a légkörben, mind a talajban kedvezőtlen vízháztartási helyzetek állhatnak elő, amelyek akár a növényi fejlődést is hátráltathatják. A hosszú ideig fennálló csapadékhiány, elsősorban a magas hőmérséklettel kombinálva szárazsághoz vezet. A szárazság olyan szélsőségesen száraz időjárású időszak, amikor a párolgás tartósan felülmúlja a csapadék mennyiségét, emiatt a talajok nedvességtartalma, illetve a folyó- és állóvizek vízszintje lecsökken. Aszálynak nevezzük a hosszú időtartamú szárazságot, csapadékhiányt, amely következtében a növénytermesztés károkat szenved, illetve a növények vízellátásában zavar keletkezik. Különböző aszálytípusokat különböztetünk meg: a légköri aszályt, a talajaszályt és a fiziológiai aszályt. Légköri aszály alatt a légkör tartós, nagyfokú nedvességtartalom-csökkenését értjük. Ebben az esetben a párolgató növényi szerv körüli levegő nagyfokú telítési hiánya miatt a gyökérzet vízszállító kapacitása és a transzspiráció intenzitása közti egyensúly megbomlik. A talajaszály a talaj tartós, nagyfokú nedvességtartalom-csökkenése, amelynek eredményeként a növények által felvehető vízkészlet lecsökken. A fiziológiai aszály alatt pedig a gyökér vízfelvételi zavarát értjük, ez a zavar különböző környezeti tényezők hatására, például az alacsony talajhőmérséklet, a magas oldott sótartalom, vagy a mikroelemhiány miatt állhat elő (Aghelpour et al. 2020; Aguirre et al. 2021). Az aszály típusának és intenzitásának számszerűsítésére számos módszer létezik. Gyakorlati szempontból azonban megkülönböztetnek meteorológiai, hidrológiai, mezőgazdasági, szocioökonómiai és ökológiai aszályt. A meteorológiai aszály alatt a száraz időszakok dominálnak egy területen, hidrológiai alatt pedig azt, amikor az alacsony vízellátottság negatív hatást gyakorol egy vízrendszerre. A mezőgazdasági aszály negatívan hat a termesztett növények terméshozamára. Ha különféle áruk keresletét és kínálatát érinti az aszály, akkor szocioökonómiai aszályról beszélünk. Az ökológiai aszály esetében pedig egy természetes ökoszisztéma sérül. Általában a meteorológiai aszály vezet a hidrológiai aszály kialakulásához, ami

könnyen mezőgazdasági és szocioökonómiai aszályhoz vezethet (Mehran et al. 2015; Crausbay et al. 2017; Guo et al. 2019; Dai et al. 2020; Guo et al. 2020). A csapadék időbeni és térbeli eloszlása, így a rendelkezésre álló vízmennyiség is időről-időre periodikusan változik. Az aszályt hosszabban fennálló száraz időszakokra szokták vonatkoztatni, viszont szakirodalmi adatok alapján beszélhetünk „villámaszályról” is, angolul „flash drought”, amely magas, esetenként extrém magas hőmérséklet és csapadékhiány hatására jöhet létre. Következtében a növényi transzspiráció növekszik, mivel a talaj nedvességtartalma kritikus szintre csökken, akár a növény pusztulásához is vezethet (Wang és Yuan, 2018). Rövidebb ideig tartó vízhiányos időszakok a teljes fejlődési szakasz folyamán bármikor felléphetnek, viszont gyakran a tartósan fennálló, enyhe vízhiány is súlyos aszályhoz vezethet (Fukai et al. 1999).

Szárazságstressz akkor éri a növényt, ha nem áll rendelkezésre elegendő, megfelelő termodinamikai állapotban lévő víz, azaz, ha száraz a talaj, erős a párolgás vagy a talaj fagyott, illetve a talaj magas sótartalma miatt erőteljes a talaj ozmotikus vízkötése. A magasabb rendű növények szárazságstresszének egyik jellemzője, hogy nem hirtelen következik be, hanem fokozatosan, valamint a tünetek a stresszhatás tartamától függően erősödnek. Kiszáradó talajban, a talajszerkezet-változás miatt a gyökerek behatolása, illetve a víz és tápelemek felvételének lehetősége erősen csökken, valamint a növényen belüli tápanyagszállítást is jelentősen mérsékeli a vízhiány. Vízhiány kialakulása a növényekben összetett folyamat. A növények a transzspirációjuk folyamán a nedves talajt fokozatosan kiszáradtá teszik. A száradó talajban a növények fokozatosan vizet vesztenek, a vízpotenciál-értékük egyre negatívabb lesz. Az éjszakai periódusban, a transzspirációs vízvesztés csökkenésekor, a növény és a talaj vízpotenciál-értéke közt egyensúlyi állapot alakulhat ki. A talaj száradása következtében az egyensúlynak a szintje egyre alacsonyabb érték, és az éjszakai periódusban számos esetben nem elegendő a vízfelvétel ahhoz, hogy a növényekben a kialakult vízpotenciál-gradiens helyreálljon (Cseh, 2007). A vízhiány első és legérzékenyebb jele a turgor csökkenése, és ezáltal a növekedési folyamatok, elsősorban a megnyúlásos növekedés lelassulása (Coussement et al. 2021). A stressz eredményeként a gyökérben képződő és a xilémben a hajtásba szállítódó hormon, az abszcizinsav (ABA), hatására lokális gyökérnövekedés-serkenést figyeltek meg (Pashkovskiy et al. 2019). Az ABA hatására, valamint a kialakuló turgorcsökkenés miatt sztómazáródás következik be (Saradadevi et al. 2017; Corso et al. 2020). A hosszantartó vízhiány fennállásakor az ABA-indukált gázcsere-redukció miatt a szén-asszimiláció és tápanyagfelvétel csökkenése következik be, amely a növényi növekedés és biomassza-akkumuláció csökkenéséhez vezet; valamint sztómazáródás hatására gátolt vízáramlást, illetve intercelluláris szén-dioxid-koncentráció csökkenést és fotorespiráció fokozódást figyeltek meg (Medrano et al. 2015; Nisa et al. 2019; Furutani et al. 2020; Yang et al. 2021). Az intercelluláris CO₂-csökkenés légzésfokozódást

eredményez, illetve csökkent fotoszintetikus aktivitást von maga után, mely következtében keményítő-mobilizálódás, illetve fotoinhibíció, proteinszintézis-csökkenés és nem-proteinogén aminosav mennyiség-növekedés következik be (Adams et al. 2013; Chmielewska et al. 2016; Rodrigues-Corrêa et al. 2019; Furutani et al. 2020; Kumar et al. 2020; Yang et al. 2021). A szárazságstressz hatására növekedett aminosav-, és oldhatócukor-tartalmat (glükóz és fruktóz) mutattak ki, elágazó láncú aminosav-, szachropin-, prolin- és agmatin-akkumulációt (Macedo, 2012), valamint csökkent karotinoid, korofill-a-, és klorofill-b-tartalmat, klorofill-a/b-arányt és sejtmembrán-stabilitást (Chowdhury et al. 2017). Továbbá a szárazságstressz hatására változik a sztómamorfológia, -méret, -sűrűség, és -mozgás is (Zhao et al. 2015; Hasanuzzaman et al. 2019; Cruz et al. 2019). A jelentős szárazságstressz nem csupán az anyagcsere-folyamatokat befolyásolja, hanem ezzel egy időben, másodlagos hatásként oxidatív stresszfolyamatokat is indukál. Az oxigén a légkörben nem reaktív formában (O_2) van jelen, mely fizikai vagy kémiai úton aktiválódhat. Ez az aktivitás nemcsak a környezetben, de a közvetlenül a növényekben is végbe mehet. Ebben az esetben olyan aktív, reakcióképes oxigénformák (ROS, reactive oxygen species) képződnek, melyek a növények életfunkcióit károsíthatják, oxidatív stresszt okoznak. A leggyakrabban előforduló oxigénformák a szinglet oxigén (1O_2), a hidroxilgyök ($OH\cdot$), a szuperoxid aniongyök ($O_2\cdot^-$) és a hidrogénperoxid (H_2O_2). Az oxigén növénybeli aktivitásának a kloroplasztisz a leggyakoribb helye, ahol a fotoszintetikus oxigéntermelés miatt a legnagyobb az oxigénkoncentráció. Az aktív oxigénformák kis mennyiségben a normális működés során is keletkeznek, viszont stresszhatások során mennyiségük olyan mértékben megnő, hogy hatásukat a természetes antioxidáns védőszerek már nem képesek kivédeni, amely hatására a sejtalkotók oxidatív destrukciója következik be. Antioxidánsok olyan anyagok, melyek úgy képesek az aktív oxigénformákkal reakcióba lépni, hogy közben önmaguk nem alakulnak gyökké. Az antioxidáns enzimek pedig azok az enzimek, melyek a reakciókat katalizálják. Az antioxidánsok és antioxidáns enzimek az oxidatív stresszt megelőző- és kivédő rendszer fontos elemei, funkciójuk a szabályozatlan oxidációs láncreakció megszakítása. Az antioxidáns rendszert hidrofil és lipofil antioxidánsok (aszorbát, glutation, α -tokoferol), detoxifikáló enzimek, enzim-repair folyamatok és regenerációs folyamatok alkotják (Szigeti, 2007). Szárazságstressz hatására fokozott reaktív oxigénformák képződés figyelhető meg, beleértve H_2O_2 -t is, amely membránkárosodáshoz vezet, ez fokozott elektrolit szivárgásában és lipid-peroxidációban nyilvánul meg (Begum et al. 2019). Stresszválaszként a növényeket ért oxidatív stresszre megemelkedett peroxidáz-, aszorbát-peroxidáz-, kataláz-, és szuperoxid-dizmutáz-szintet figyeltek meg (Maghsoudi et al. 2019).

A szárazságstressz az egyes életfolyamatokra különböző hatást gyakorolhat. Ha a turgornyomás csökkenése elég nagy, akkor az éppen növekvő sejtek mérete kisebb marad. A sejt méret csökkenése a növény külső megjelenését befolyásolja, de különbségek adódhatnak attól

függően, hogy a vízhiány mely növekedési szakaszban lép fel. Ha a szárazság a növekedési ciklus elején áll fenn, akkor morfológiai változást, a levélfelület-csökkenését figyelték meg, ezáltal a szén-dioxid-felvétel az egész vegetációs időszak alatt alacsonyabb marad, valamint az aszály a növények vegetatív fázisában limitálja a hajtásnövekedést és a bokrosodás mértékét (Kato et al. 2008; Barnabás et al. 2008; Lipiec et al. 2013; Aslam et al. 2013; Dietz et al. 2021). A szárbainduláskor elszenvedett szárazságstressz hatására csökken a növénymagasság, a levélfelület-index és ezzel párhuzamosan csökkent vízhasznosító képességet figyeltek meg (Li et al. 2017). Számos kutatás szerint a növények a reprodukív fázisukban érzékenyebbek a szárazságstresszre (Farooq et al. 2014; Ma et al. 2017; Varga et al. 2017; Farkas et al. 2020), de az aszály hatásainak súlyossága nagyban függ a stressz intenzitásától és tartamától is. A korai reprodukív fázisban a szárazságstressz a pollen és a kalászka elhalásához vezet, amely csökkent szemszámot eredményez (Kato et al. 2008; Dolferus et al. 2011). Virágzás előtti aszály csökkenti a kalászka/kalász számot (Kato et al. 2008), valamint csökkenti a növénymagasságot és a növények Harvest-indexét (Quaseem et al. 2019), megváltoztathatja a virágzási időt (Foulkes et al. 2007; Cattivelli et al. 2008). Virágzáskori aszály növeli a pollen- és a magházelhalás mértékét, portokok fejlődését akadályozza, illetve kalászsterilitást okozhat (Praba et al. 2009; Rang et al. 2011; Powell et al. 2012; Aslam et al. 2013), valamint a magas ABA-akkumuláció miatt csökken a pollenek szacharóz ellátása, amely alacsony pollen-életképességet eredményez (Powell et al. 2012). Szemtelítődéskori aszály megrövidíti a szemtelítődés időtartamát, a szemszámot, a termés- és ezerszemtömeget és a Harvest-indexet (Samarah, 2005; Foulkes et al. 2007; Samarah et al. 2009; Blum, 2017). Akár 58-92% termés-csökkenésről is beszámoltak elhúzódó, enyhe szárazságstressz hatására, búza esetében (Farooq et al. 2014). A szárazságstressz befolyásolja a fehérjetartalmat és a makro-, és mikroelemtartalmat. Az aszály csökkentheti a nagy és a kis molekulásúlyú glutein- és a γ -gliadin tartalmat, a vas-, réz, cink- és magnéziumtartalmat, viszont α -gliadintartalmat és kálim, kalcium-, és nátriumtartalmat növeli (Tadayyon et al. 2017; Phakela et al. 2021). A szárazságstressz növényekre gyakorolt hatása és annak mértéke függ a talajtípustól és a környezeti körülményektől (Setter és Waters, 2003; Semenov et al. 2014), a termesztett fajtól vagy fajtától (Bányai et al. 2020, 2021), valamint a termesztéstechnológiától is (Yang et al. 2000; Wu et al. 2014).

A vízhiányt kompenzáló mechanizmusokat két csoportba sorolhatjuk. Az egyik a szárazság eltűrése, a másik pedig a csökkent vízellátottság elkerülése. A korlátozó vízviszonyok elkerülése egy kompenzáló mechanizmus az évelő növények életciklusában és az egynyári növények szezonális fejlődésében. Ilyennek tekintjük a gyors magérlelést, a gyors csírázást, a jó víztároló képességgel rendelkező, földalatti szervekkel történő túlélést (Szigeti, 2007). A vízhiány eltűrésére több stratégiát is alkalmazhatnak a növények. Az egyik esetben a növények a szárazságstressz

körülményei között alacsony vízpontenciálon tartják szervezetüket, így tartva fent anyagcsere-folyamataikat. Viszont a szárazságtűrés másik alapvető módszerével a növények a vízhiány potenciális veszélyét épp úgy védik ki, hogy magasan tartják a vízpotenciáljukat. Ennek a módszernek alapvetően két módja lehetséges: a vízvesztés csökkenése vagy a vízakumuláció fokozása. A vízakumuláció fokozása az optimálisan szabályozott transzspiráció mellett csak abban az esetben lehetséges, ha a vízfelvétel a talajból fokozódik. Ezt a növények több módon oldhatják meg; gyökereikkel behatolhatnak a talaj mélyebb rétegébe, ahol esetleg több vizet találnak. Bizonyos növények hajtásaikon vagy leveleiken keresztül vesznek fel vizet, de találtak már olyan növényt is, mely a sókristályokat használja a levegő víztartalmának megkötésére. A vízleadás mérséklésnek lehetséges módjai a sztómák zárása, a transzspiráló levélfelület csökkentése. A növények vízhasznosító képessége a szárazsághoz való adaptálódásuk fontos mutatója és növekedése jelzi, hogy kevesebb víz felhasználásával több szén akkumulálódik a növényben.

2.2. A növényi vízhasznosító képesség

A növényi vízhasznosító képesség fogalmát több mint egy évszázada Briggs és Shantz (1913) szerzőpáros vezette be. A fogalom általános értelmezésén a megtermelt szervesanyag és az ehhez felhasznált víz hányadosát értjük. Alapvetően két különböző módszerrel szokás meghatározni. Az egyik az agronómiai értelmezés (angolul „water-use efficiency of productivity” vagy „integrated water-use efficiency” esetleg „seasonal” vagy „integral over time water-use efficiency”) a termés (biomassza, vagy szemtermés értelemben) és a vegetáció során felhasznált összes vízmennyiség hányadosa. Illetve a fiziológiai értelmezés (angolul „photosynthetic water-use efficiency” vagy „instantaneous water-use efficiency” esetleg „leaf water-use efficiency”) szerint a CO₂-asszimiláció és a transzspiráció hányadosa ez az érték. Míg az első értelmezés a növény teljes életteljesítményére vonatkozik, addig az utóbbi értelmezés szerint egy adott, jóval rövidebb időszakban (pl. nap) mért érték, így mintegy kvázi pillanatfelvételnként értelmezhető. Viszont egyes kutatók szerint a szántóföldi rendszerekben érdemesebb lehet a vízhasznosító képesség fogalmát a csapadékhasznosító képesség (PUE, precipitation-use efficiency) fogalmára cserélni (Peterson et al. 1996; Sun és Du, 2017). Ebben az esetben csak a lehullott csapadék mennyiségét veszik figyelembe, figyelmen kívül hagyva például a párolgás mértékét, vagy a talaj különböző vízforgalmi értékeit. A víz körforgásának egyik legfontosabb komponense a párolgás. A talaj-növény-légkör rendszerben a talajnedvesség a csupasz talaj párolgása, vagyis az evaporáció és a növények párologtatása, vagyis a transzspiráció révén, illetve a mélybe szivárgáson (drainage) keresztül távozik a rendszerből. A mezőgazdaságban az evapotranszspiráció minél pontosabb meghatározása stratégiai fontosságú, különösen az

aszályveszélyes területeken (Alataway et al. 2019). A tényleges evapotranszpiráció legpontosabb mérése jelenleg a különböző típusú liziméterekkel lehetséges. Liziméternek nevezzük azokat az eszközöket, melyekben elkülönítenek egy adott térfogatú talajoszlopot a környezetétől, illetve a kiszivárgó vizet (csurgalékvíz) összegyűjtik (Howell et al. 1991). A liziméterek használata sokrétű célt szolgálhat; alkalmazható klimatológiai (Leitinger et al. 2017), hidrológiai (Duncan et al. 2017), geokémiai (Karlsson et al. 2018), agrotechnikai (Chen et al. 2018) és környezetvédelmi (Wijewardana et al. 2017) kutatásokhoz. A lizimétereket mérési elv alapján különböztethetjük meg: térfogatmérésen (volumetrikus) vagy tömegmérésen alapulnak. A tömegmérésen alapuló liziméterek közvetlenül mérik az evapotranszpirációját azáltal, hogy a talajoszlop tömegének változását detektálják, ezzel pontos mérést tesznek lehetővé. Az legprecízebb monolitikus liziméterek, nyomásszabályozással ellátottak és a tömegmérés elvén működnek (Pütz et al. 2016). Megkülönböztethetünk hidro-lizimétereket, meteo-lizimétereket, tudományos szabadföldi lizimétereket és agro-lizimétereket (von Unold és Fank, 2008). Az evapotranszpiráció napi szintű meghatározására és a tenyészidőszaki vízfelhasználás számszerűsítésére kompenzációs evapotranszpirométerek használhatók. Működési elvük a liziméterhez hasonló, de ebben az esetben nem súly, hanem víztérfogat-mérés elvén határozzák meg a talaj és a növény együttes párolgását (Anda et al. 2020).

A vízhasznosító képesség fogalmának jelentőségét nagyon jól példázza, hogy számos számítási módjával találkozhatunk a különböző tudományos munkákban (Farkas, 2020). A növények vízhasznosító képességét számos biológiai és környezeti tényező meghatározhatja. Biológiai meghatározók közé tartozik a fotoszintézis típusa (C_3 , C_4 , CAM), a faj/fajtajelleg és a populáció szerkezete. Környezeti faktorokhoz sorolhatjuk a termőhely jellemzőit, a talajt és a mikroklímát, a talajművelést (mulcsozás, művelés, trágyázás), a termesztési rendszert (tőszám, sortávolság) és az időjárási tényezőket (Tambussi et al. 2007; Medrano et al. 2015). Ezen tényezők közül néhány mind a felhasznált összes víz mennyiségét, mind a vízhasznosító képességet befolyásolja. Az egyik legfontosabb tényező a növények fenológiai fejlődését és a csapadék szezonális eloszlását, illetve ezek egymáshoz való viszonyát érinti. Míg a korai gyors növényfejlődés mind a felhasznált összes víz mennyiségét, mind a vízhasznosító képességet növeli, addig a fejlett növények mélyre hatoló gyökerei több víz felhasználását teszik lehetővé. A virágzás időpontja is meghatározható lehet: a korán virágzó fajtáknál kevesebb mobilizálható szervesanyag-tartalom halmozódik fel szemtelítődéskor a vegetatív szervekben, mint a késői érésű fajtáknál (Passioura, 2002). A tápanyagellátás, főleg a nitrogén-ellátottság kiemelten befolyásolja a növények vízhasznosítását és a szárazságtűrését (Saud et al. 2017). A nitrogénhiány növeli az egységnyi levélfelületre eső transzpirációt, ezáltal csökkentve a vízhasznosítást (van Herwaarden et al. 1998). A növények vízhasznosító képességének növekedése akár egy jellemző válaszreakció

is lehet a közepes vagy jelentős vízhiányos környezetre. Ez a növények alkalmazkodási reakciójának eredményeképpen jöhet létre, melynek mértéke genotípusfüggő (Farkas et al. 2021; Farkas et al. 2022). A részben antropogén hatások miatt bekövetkezett, és várhatóan egyre jelentősebb éghajlatváltozás miatt, a légköri CO₂-koncentráció növekedése nagy bizonyossággal prognosztizálható. A megnövekedett légköri CO₂-szint részleges sztómazáródást okoz, ezáltal csökkentve a transzspiráció mértékét és egyidőben, az asszimilációt. Jó talajvíz-ellátottság mellett, a magasabb CO₂-koncentráció miatt transzspirációcsökkenés jelentkezik, akkor szezonális vízfogyasztás-csökkenést figyelhetünk meg. Valamint azt is tapasztalták, hogy a növényállományban megfigyelhető mikroklíma-változások miatt a CO₂-koncentráció növekedése okozta transzspiráció-változás az állományban mérve kisebbnek bizonyult, mint egyedi leveleken mérve. A CO₂-koncentráció növekedésének hatása a növényi vízellátottságra többtényezős kölcsönhatás (Láng, 2007; Hoffman, 2011; Varga et al. 2017; Farkas et al. 2021). A fotoszintézis szolgáltat alapot a növényeknek arra, hogy felhalmozhassanak szerves anyagokat, biomassza és termés képződhessen. A fotoszintézis aktivitása a fény, illetve hőmérsékleti viszonyok változásának függvénye, jellegzetes napi görbét mutat, de értéke a növény általános élettani állapotától és környezeti hatásoktól, mint például a vízellátottságtól, vagy a szén-dioxid légköri koncentrációjától is függ. A distresszként érzékelt szárazságstressz hatására az ABA-szintézis fokozódik, a stresszhormon-szint emelkedése a sztómák bezáródását váltja ki. A zárósejtek a sztómák nyitásával és zárásával befolyásolják a növényi vízvesztés mértékét, a CO₂ felvételét. A jó vízellátottságú növények aktív anyagcserét, szervesanyag-felhalmozást folytatnak, vízhiányos állapotban a megkötött CO₂ mennyisége csökken, végül fotorespiráció lép fel. Ebben az esetben nincs szervesanyag-felhalmozás, hanem légzési veszteség jelentkezik. A vízhiányra érzékeny genotípusok hamarabb fotorespirálnak, az extenzív genotípusok a sztómák korai zárásával reagálnak a vízhiányra (Fodor, 2013). Hasonló körülmények között a C₄-es növények vízhasznosító képessége másfélszer – négyszer akkora, míg a CAM típusú növényeké három – tízszer akkora, mint a C₃-as növényeké (Kocacinar és Sage, 2005). Azok a tényezők, melyek a CO₂-fixációt és a növény vízállapotát is érintik, egy bizonyos mértékig befolyásolják a vízhasznosítást. Ennek genetikai alapjai tehát valójában átfedik mindazokat a géneket, melyek a növény szén- és vízmérlegének szabályozásában szerepet játszó biokémiai és morfo-fiziológiai jellegeket szabályozzák (mint például klorofilltartalom, a Rubisco és a PEP-karboxiláz aktivitás, a gyökérzet mérete és szerkezete, ozmotikus alkalmazkodás, ABA-koncentráció, sztómakonduktancia, a levél vastagsága és állásának szöge stb.) (Nyitrai és Solti, 2013).

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. Üvegházi kísérleti rendszer

3.1.1. Kísérleti elrendezés

Klíma-kontrollált üvegházi modellkísérletben vizsgáltunk négy őszi búza-fajtát (*Triticum aestivum* L.): Mv Ikva, Mv Nádor, Mv Nemere, Mv Kolompos; egy őszi árpa-fajtát (*Hordeum vulgare* L.): Mv Initium; és egy őszi zab-fajtát (*Avena sativa* L.): Mv Hópehely. A kísérletet az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Agrártudományi Kutatóközpont Mezőgazdasági Intézetben végeztük Martonvásáron, a 2019/20-as üvegházi tenyészidőszakban. A kísérlet 2020.02.03-án kezdődött és az év júniusának végén, a növények kézi aratásával végződött. A vizsgált fajták martonvásári nemesítésűek, korai (Mv Ikva, Mv Initium); közepes (Mv Nádor, Mv Nemere) és kései (Mv Kolompos, Mv Hópehely) érésűek. Kísérleti elrendezésünk három kezelést, három szén-dioxid-szintet és hat genotípust foglalt magában. A kontroll (K) növényeket (54 tenyészedeny, összesen 216 növény) hetente háromszor öntöttük csapvízzel. Az optimális vízellátás az alkalmazott talajkeverék (3:1:1 arányú talaj, homok és humusz) maximális víztartókapacitásának 60%-a volt. Stresszkezelésként aszályt szimuláltunk a növények harmadánál (54 tenyészedeny, összesen 216 növény) szárbainduláskor (SZ) (BBCH 21 növekedési állapotban), illetve a növények harmadánál (54 tenyészedeny, összesen 216 növény) kalászoláskor (KAL) (BBCH 55 növekedési állapotban) (Lancashire et al. 1991). A talaj víztartalmát 5TE szenzorokkal (5TE Soil Moisture Sensors, Decagon Devices Ltd., Pullman, WA, USA) 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. A tiszta CO₂-gázt perforált műanyagcső-hálózaton keresztül juttattuk a kamrákba; az egységes gázelosztás biztosítására ventilátorral mozgattuk a levegőt. A kamrai szén-dioxid-szintet SH-VT250 (SH-VT250 CO₂, Temperature and Humidity Transmitter, Soha Tech Co., Ltd., Seoul, Korea) automata szelepvezérlővel szabályoztuk, illetve a gázszintet Wöhler CDL 210 (Wöhler CDL Serie 210 CO₂ Messgerät, Wöhler Technik GmbH, Bad Wünnenber, Németország) készülékkel mértük és ellenőriztük.

Négy vernalizált növényt (kezelésenként tizenkettőt minden genotípusból) ültettünk műanyag vödörökbe (mélység 27 cm; átmérő 24 cm) majd a talaj felszínét fekete fóliával takartuk le, az evaporáció minimalizálása érdekében (Farkas et al. 2021). Teljes érés után mértük a növények talajszint feletti száraz biomasszatömegét (BM), meghatároztuk a kalász-, illetve bugaszámot és a termésmennyiséget. A kísérlet indulása előtt gravimetrikus módszerrel meghatároztuk az alkalmazott talajkeverék víztartó képességét és maximális víztartó képesség

60%-os szintjét tekintettük optimumként (kontroll). A növények pontos vízfelvételét az öntözések alkalmával digitális mérleg segítségével (AHW-15, T-Scale MFG. CO. LTD. Kunshan, Kína) határoztuk meg és a két öntözési időpont között felhasznált vízmennyiséggel pótoltuk. A tenyészedényekben vízfogyasztást (WU) az öntözéseknél regisztrált vízáradatok 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 (NUVE FN 055/120 Dry Heat Sterilizer/Oven, Henderson Biomedical, London, Egysült Királyság), majd digitális mérleg (440-45N, KERN & SOHN GmbH, Balingen, Németország) segítségével megmértük a tömegüket.

A vízhasznosító képességet az 3. egyenlettel számítottuk ki,

$$WUE = \frac{GY}{WU} \quad (3),$$

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

A Harvest-indexet (HI) a 4. egyenlettel számítottuk ki,

$$HI = \frac{GY*100}{BM} \quad (4),$$

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

A különböző szén-dioxid-szintekre az általunk mért növényi paraméterek relatív változásait az 5. egyenlettel számítottuk ki,

$$\frac{Ex}{A} \text{ vagy } \frac{Ey}{A} \quad (5),$$

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 tenyészvények elrendezését és az üvegházi kamrák szerkezetét a 1. kép szemlélteti.



1. kép: Fényképek az üvegházi kamrákról és a tenyészedeényekről

3.1.2. Növénynevelési feltételek

Minden vizsgált genotípusból 300-350 szemet tettünk le csíráztatni 2019. december 14-én. A szemeket sötétben, szobahőmérsékleten (22 °C) csíráztattuk két napig és csírázásuk után tőzegkorongokba (Jiffy-7, Jiffy International AS, Lindtsedijk, Hollandia) ültettük, majd átraktuk azokat egy vernalizációs kamrába (4 °C) 48 napra. A vernalizációt követően 2019.02.03-án négy, azonos fajtájú növényt ültettünk műanyag tenyészedeényekbe, minden kezelést fajtánként három tenyészedeényben ismételtünk meg. A tenyészedeények 10 liter, homogén, 3:1:1 arányú talaj, homok és humusz keveréket tartalmaztak. A növényeket három különböző üvegházi kamrában neveltük, mindhárom kamra levegőjének szén-dioxid-szintje különbözött (~400 ppm, 700 ppm, 1000 ppm). A szén-dioxid-szinteken kívül a kamráink klimatikus jellemzői megegyeztek és a klímaszabályzást a fitotronban alkalmazott Tavasz-Nyár program alapján állítottunk be (Tischner et al. 1997). A kamrák léghőmérséklete a kezdeti 10–12 °C-ról 24–26 °C-ra emelkedett, a növényi egyedfejlődés előrehaladtával és a relatív páratartalom 60% és 80% közt mozgott. Ha szükséges volt, a természetes megvilágítást mesterséges világítással egészítettük ki. Ha a stresszkezelés nem indokolta máshogy, a növények öntözés előtt, tenyészedeényenként 200 ml 0,322 m/m%-os vízdékony tápoldatot (gyártói adat: 14% N, 7% P₂O₅, 21% K₂O, 1 Mg, 1% B, Cu, Mn, Fe, Zn; Volldünger Classic; Kwizda Agro Ltd., Bécs, Ausztria) kaptak kéthetente egyszer. A kísérlet soránként (Thiovit Jet, Syngenta, Bázél, Svájc) és lambda-cihalotrint (Karate Zeon 5 CS, Syngenta, Bázél, Svájc) alkalmaztunk két alkalommal a lisztharmat és a levéltetvek ellen.

3.1.3. Statisztika elemzés

A kísérleti beállítás négy őszi búza-fajtát, egy őszi árpa-fajtát és egy őszi zab-fajtát, három öntözési szintet és három szén-dioxid-szintet foglalt magában három ismétlésben. Többtényezős 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.

3.2. Szántóföldi kísérleti rendszer

3.2.1. Kísérleti elrendezés

Szántóföldi kísérleteinkben négy őszi búza-fajtát (*Triticum aestivum* L.): Mv Ikva, Mv Nádor, Mv Nemere, Mv Kolompos; egy őszi árpa-fajtát (*Hordeum vulgare* L.): Mv Initium; és egy őszi zab-fajtát (*Avena sativa* L.): Mv Hópehely, vizsgáltunk különböző termőhelyeken. A vizsgált fajták martonvásári nemesítésűek, korai (Mv Ikva, Mv Initium); közepes (Mv Nádor, Mv Nemere) és kései (Mv Kolompos, Mv Hópehely) érésűek. Három termőhelyen vizsgáltunk növényeinket: Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Agrártudományi Kutatóközpont Mezőgazdasági Intézetben Martonvásáron, Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani Intézetben Pusztáegresen, illetve Debreceni Egyetem Agrár Kutatóintézetek és Tangazdaság Nyíregyházi Kutatóintézetében. Martonvásáron és Pusztáegresen agyagos vályogtalajon, Nyíregyházán homoktalajon folytak a kísérletek. A vizsgált termőhelyek talajadottságait az M2.1. táblázatban, a termőhelyeken mért középhőmérsékletek-értékeket az M2.2. táblázatban, a termőhelyek mért csapadékösszegeket az M2.3. táblázatban mutatjuk be. Két tenyészidőszakban (2019/2020-ban és 2020/2021-ben) állítottuk be kísérleteinket azonos elrendezésben. Martonvásáron és Pusztáegresen bruttó 8 m² (nettó 6 m²), Nyíregyházán pedig bruttó 16 m² (nettó 13 m²) (2019/2020) és bruttó 17 m² (nettó 14 m²) (2020/2021) kisméretű kispárcellákba vetettünk, 4,5 millió csíra/ha tőszámmal. A nyíregyházi adatokat arányosítottuk a nettó 6 m²-es parcellákhoz. Martonvásáron és Pusztáegresen fajtánként hat-hat ismétlést, Nyíregyházán pedig három ismétlést tartalmazott a kísérlet. A növények feldolgozása után a növényi csapadékhasznosító képességet a 6. egyenlettel határoztuk meg,

$$PUE = \frac{GY}{P} \quad (6),$$

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

A termőhelyekről és a kísérleti elrendezésről készült fényképeket a 2. képen mutatjuk be.



2. kép: Fényképek a martonvásári, a pusztaegresi és a nyíregyházi termőhelyekről (a fotókat Martonvásáron és Pusztaegresen a szerző, Nyíregyházán Dr. Makádi Marianna készítette)

3.2.2. Növénynevelési feltételek

A talajelőkészítést követően a vizsgált fajtákat 4,5 millió csíra/ha tőszámmal, Wintersteiger parcellavetőgéppel (Wintersteiger, Ljh-Holding Gmbh, Ried im Innkreis, Ausztria) vettünk és Wintersteiger Nursery Master parcellabetakarító kombájnnal (Wintersteiger, Ljh-Holding Gmbh, Ried im Innkreis, Ausztria) arattuk. A vetési és aratási időpontokat az M2.4. táblázat tartalmazza. A talajelőkészítés részeként vetés előtt tárcsázás majd magágy-előkészítés történt SYNCHROGERM kombinált nehéz magágykészítővel (Franquet, Villeneuve-sur-Aisne, Franciaország). Vetés előtt Martonvásáron és Pusztaegresen őszi alaptrágyázás (20% N, 20% P₂O₅, 0% K) és pétisóval (27% N, 7% CaO, 5% MgO; Genezis Trans Kft, Pétfürdő, Magyarország) fejtrágyázás történt. Gyomirtás is több ízben történt a különböző termőhelyeken. Granstar Super 50 SX (500 g/kg tribenuron-metil; FMC-Agro Hungary Kft., Budapest, Magyarország) kétszikű gyomirtó szerrel permeteztek Martonvásáron és Pusztaegresen, valamint Nyíregyházán a magról kelő és évelő kétszikű gyomnövények és mezei acat ellen. Starane Forte 333 EC (333 g/L fluroxipir (480 g/L fluroxipir-meptil); Corteva Agriscience, Jonhston, Iowa, USA) kétszikű gyomirtó szerrel permeteztek ragadós galaj ellen Martonvásáron és Nyíregyházán. Ezenfelül Lontrel 600 (600 g/L klopritalid (48,5 m/m %); Corteva Agriscience, Jonhston, Iowa, USA) posztemergens gyomirtót is alkalmaztak Martonvásáron, főként parlagfű és mezei acat ellen. Nyíregyházán a felsoroltakon kívül permeteztek még Falcon Pro (53 g/L (5,4 m/m%) protiokonazol, 224 g/L (22,9 m/m%) spiroxamin, 148 g/L (15,1 m/m%) tebukonazol; Bayer Crop Science, Budapest, Magyarország) gombaölővel. A rovarirtás Decis Mega (50 g/L (4,8 m/m%) deltametrin; Bayer Crop Science, Budapest, Magyarország) rovarölő permetszerrel történt Nyíregyházán. Sumi Alfa 5 EC (50 g/L eszfenvalerát; Nufarm Hungária Kft., Budapest, Magyarország) széles hatásspektrumú rovarölő repellens permetszerrel permeteztek Martonvásáron és Pusztaegresen. A trágyázási és permetezési időket a M2.5. táblázat tartalmazza. A martonvásári termőhelyen olajretek (*Raphanus sativus* L. *convar. oleiferus* (Mill)) volt az elővetemény az első, facélia (*Phacelia tanacetifolia* L.) a második évet megelőzően. Pusztaegresen mindkét tenyészidőszakot megelőzően napraforgó (*Helianthus annuus* L.), Nyíregyházán facélia (*Phacelia tanacetifolia* L.) az első és olajtök (*Cucurbita pepo convar. oleifera* L.) a második kísérletet megelőző évben.

3.2.3. Statisztika elemzés

A kísérleti beállítás négy őszi búza-fajtát, egy ősziárpa-fajtát és egy őszi zab-fajtát, három termőhelyet, két évet és hat, illetve három ismétlést foglalt magában. Többtenyezős ANOVA-t használtunk a tesztelt faktorok (növényfajta, termőhely, év) hatásainak meghatározására és Tukey

post hoc tesztel (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.

3.3. Liziméteres kísérleti rendszer

3.3.1. Kísérleti liziméterrendszer bemutatása

A kísérleti rendszert 2018-as évben telepítették a „*Multifunkcionálisan hasznosítható növények, mint alternatívák a fenntartható mezőgazdaság szolgálatában*” című GINOP-2.3.2-15-2016-00029 és „*Interdiszciplináris Kutatóműhely Létrehozása a Klímaadaptív és Fenntartható Mezőgazdaságért*” című GINOP-2.3.2-15-2016-00028 azonosító számú projektek finanszírozásában. A projekt anyagi segítségével osztályunk 6 darab lizimétert és egy darab műszeraknát telepíthetett az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Agrártudományi Kutatóközpont martonvásári telephelyén. A rendszerünkben hat darab nagy érzékenyséű mérlegen (felbontás 0,01 mm, pontosság 0,1 mm csapadék egyenérték vagy jobb) elhelyezett egyenként két méter magas, egy négyzetméter felületű bolygatatlan csernozjom talajmonolitot tartalmazó liziméterhenger található. A rendszert felszerelték csurgalékvíz-gyűjtővel, amelyet szintén nagy pontosságú mérlegekre helyeztek (pontosság <0,05%), illetve a csurgalékvíz automatikus eltávolítását szivattyúk biztosítják. A rendszert különböző szenzorokkal látták el. Mérhető a talajnedvesség-tartalom (oszloponként: 10 db ML3 Theta szenzor, érzékenység: $\pm 2-3$ V%; 5, 10, 20, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150 cm mélységben elhelyezve); a talajhőmérséklet (oszloponként: 5 db Th1 szenzor, érzékenység: $\pm 0,5$ °C; 5, 20, 70, 150 cm mélységben elhelyezve); a nedvességpotenciál és hőmérséklet (oszloponként: 5 db T8 szenzor; 10, 30, 50, 100, 190 cm mélységben elhelyezve). Ezen kívül a rendszer képes mérni a csapadékot (érzékenység: 0,1 mm), a szél sebességét és irányát, a léghőmérsékletet és a páratartalmat. A liziméterhengerekről és a szenzorokról a fényképeket a 3. kép mutatja.



3. kép: Fényképek a liziméterhengerekről és a szenzorokról
(a fotókat Dr. Varga Balázs készítette)

3.3.2. Kísérleti elrendezés

Az liziméteres kísérletünkben négy őszi búza-fajtát (*Triticum aestivum* L.): Mv Ikva, Mv Nádor, Mv Nemere, Mv Kolompos; egy őszi árpa-fajtát (*Hordeum vulgare* L.): Mv Initium; és egy őszi zab-fajtát (*Avena sativa* L.): Mv Hópehely, vizsgáltunk. A vizsgált fajták martonvásári nemesítésűek, korai (Mv Ikva, Mv Initium); közepes (Mv Nádor, Mv Nemere) és kései (Mv Kolompos, Mv Hópehely) érésűek. A kísérlet helyszíne az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Agrártudományi Kutatóközpont Mezőgazdasági Intézete, Martonvásár. A hengerek mélysége 2 m, a felszíne 1 m². A kísérleti rendszert a 4. kép ábrázolja, a kísérleti elrendezést pedig az 8. ábrán mutatjuk be. A kísérlet végén a learatott kalászokat és bugákat Wintersteiger Hege 16 (Wintersteiger, Ljh-Holding GmbH, Ried im Innkreis, Ausztria) laboratóriumi cséplőgéppel csépeztük le és digitális mérleg segítségével (AHW-15, T-Scale MFG. CO. LTD. Kunshan, Kína) határoztuk meg a szemtermés tömegét.

A vízhasznosító képességet az 7. és 8. egyenlettel számítottuk ki,

$$WUE_{SZ} = \frac{GY}{ET} \quad \text{és} \quad WUE_{BM} = \frac{BM}{ET} \quad (7) \text{ és } (8),$$

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

A csapadékhasznosító képességet az 9. egyenlettel számítottuk ki,

$$PUE = \frac{GY}{P} \quad (9),$$

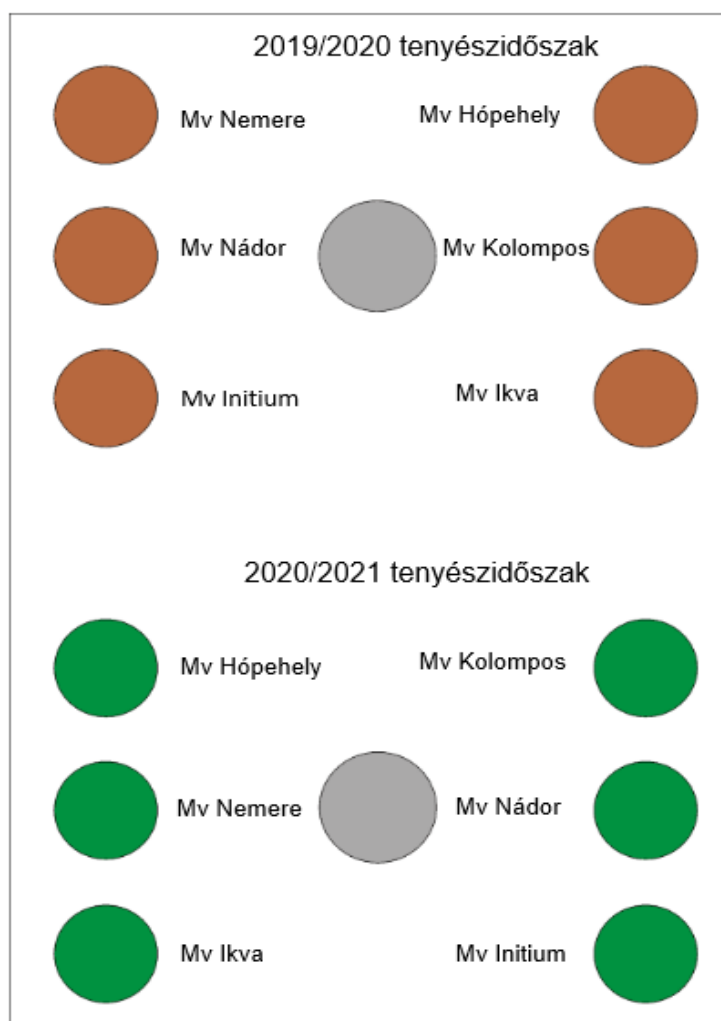
ahol PUE (precipitation-use efficiency) a csapadékhasznosító képességet ($\text{g}\cdot\text{mm}^{-1}$), GY (grain yield) a terméshozamot (g) és P (precipitation) a tenyészedőszaki csapadékmennyiséget (mm) jelöli. A meghatározás során nem vettük figyelembe a hozzátárolt és az elszívott vízmennyiséget.

Az agronómiai konstans (K_a) a 10. egyenlet szerint számoltuk ki,

$$K_a = \frac{ET_{akt}}{E_{akt}} \quad (10),$$

Ahol K_a az agronómiai konstans, ET_{akt} a növényállomány borított talajfelszín evapotranspirációját (mm) és E_{akt} a talajfelszín evaporációját (mm) jelöli.

A két vizsgált tenyészedőszak (2019/2020 és 2020/2021) liziméteres kísérleti rendszer elrendezése az 8. ábrán látható.



8. ábra: A liziméteres kísérleti rendszer elrendezése a vizsgált években.



4. kép: Fénykép a liziméteres kísérleti rendszerről

3.3.3. Növénynevelési feltételek

A liziméterekbe kézzel vetettünk 2019. 10. 10-én és 2020. 10. 26-án, 4,5 millió csíra/ha vetéssűrűséggel, melyet az 1 m²-es felszínre arányosítottunk. A liziméterekbe történő vetés másnapján kézzel (szórva vetés) 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.

3.3.4. Statisztika elemzés

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.

4. EREDMÉNYEK

4.1. Kalászos gabonák termelésének és vízforgalmának vizsgálata üvegházi modellkísérletben

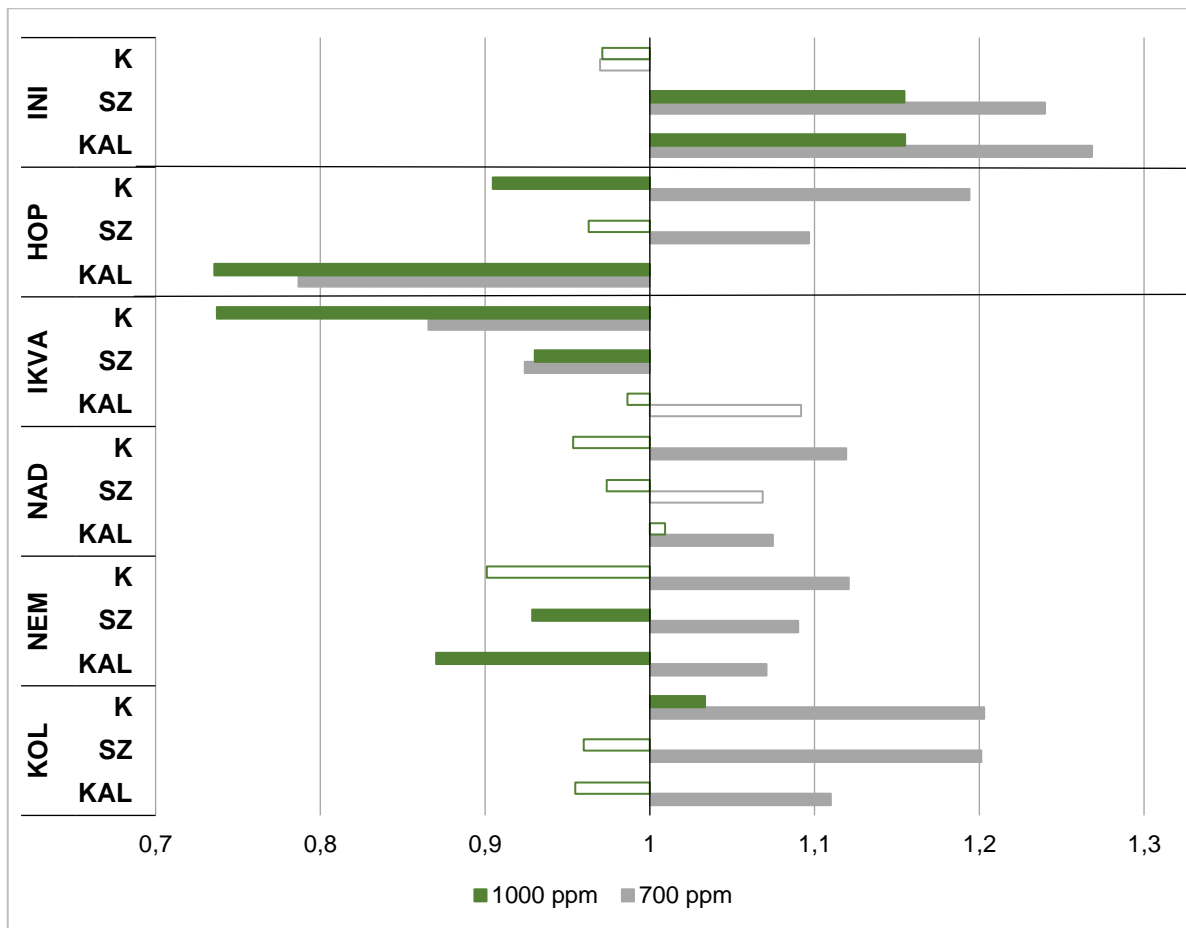
4.1.1. A CO₂-koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a biomassza-termelésre

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 genotípusnál szignifikánsan csökkentette a biomasszát az optimális vízellátás mellett fejlődött növényekéhez képest (1. táblázat). A kontrollhoz viszonyított legjelentősebb mértékű biomassza-csökkenést az Mv Ikva őszi búza-fajta esetében figyelhetünk meg, 29% a korai („SZ”) és 33% a kései („KAL”) stresszkezelésekben. Az Mv Hópehely őszi búza-fajta esetében szignifikáns különbségeket figyeltünk meg a két stresszkezelés között is; a korai stresszhez képest a kései nagyobb mértékű biomassza-csökkenést eredményezett. A 700 ppm CO₂-szinten nevelt növények esetében az őszi árpa-fajtánál, az őszi búza-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 (1. táblázat). 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 (1. táblázat). A szén-dioxid-szint emelése pozitív hatást gyakorolt Mv Initium őszi árpa-fajta biomassza-termelésére, mely hatás csak a stresszelt növényeknél volt kimutatható (9. ábra). Optimális vízellátás mellett vagy szárbainduláskori stresszkezelésnél a vizsgált őszi búza-fajtánál (Mv Hópehely) 700 ppm CO₂-koncentráción szignifikáns biomassza-növekedést figyeltünk meg, azonban 1000 ppm szinten biomassza-csökkenést tapasztaltunk az optimálisan öntözött növényeknél. A kalászoskorai vízmegvonás mellett mindkét megemelt szén-dioxid-koncentráció biomassza-csökkenést eredményezett az Mv Hópehely fajta esetében. A vizsgált őszi búza-fajták közül az Mv Ikva fajtára szignifikánsan negatív hatást gyakorolt a szén-dioxid-szint emelése optimális vízellátás mellett és a szárbainduláskor szimulált vízhiányos állapotban. A többi három vizsgált búzafajtánál (Mv Nádor, Mv Nemere és Mv Kolompos) pozitív CO₂-reakciót figyelhetünk meg a növények biomassza-termelésében 700 ppm szén-dioxid-szinten minden kezelésben, de ez a tendencia már nem volt kimutatható 1000 ppm-en (9. ábra). A biomassza-értékek szórásait az M2.6. táblázat tartalmazza.

1. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták átlagos biomassza-produkciója (g) a különböző kezelésekben

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	55,46 ^{Ba1}	53,78 ^{Cc1}	53,86 ^{Aa1}
	SZ	47,26 ^{Bb3}	58,59 ^{Aa1}	54,56 ^{Aa2}
	KAL	45,3 ^{Ab3}	54,61 ^{Ab1}	52,32 ^{Aa2}
Mv Hópehely (őszi zab)	K	61,70 ^{Aa2}	73,67 ^{Aa1}	55,82 ^{Aa3}
	SZ	54,55 ^{Ab2}	59,82 ^{Ab1}	52,52 ^{Aa2}
	KAL	49,05 ^{Ac1}	38,59 ^{Cc2}	36,08 ^{Cb2}
Mv Ikva (őszi búza)	K	50,15 ^{Da1}	43,41 ^{Ea2}	36,97 ^{Ca3}
	SZ	35,73 ^{Cb1}	33,02 ^{Ec2}	33,24 ^{Cb2}
	KAL	33,82 ^{Cb12}	36,92 ^{Db1}	33,36 ^{CDb2}
Mv Nádor (őszi búza)	K	40,05 ^{Ea2}	44,82 ^{DEa1}	38,19 ^{Ca2}
	SZ	35,79 ^{Cb12}	38,24 ^{Cb1}	34,86 ^{Ca2}
	KAL	34,62 ^{Cb2}	37,21 ^{Db1}	34,94 ^{CDa2}
Mv Nemere (őszi búza)	K	40,93 ^{Ea2}	45,86 ^{Da1}	36,87 ^{Ca2}
	SZ	37,91 ^{Cb2}	41,32 ^{Db1}	35,19 ^{Cab3}
	KAL	36,74 ^{Cb2}	39,34 ^{Cb1}	31,97 ^{Db3}
Mv Kolompos (őszi búza)	K	46,49 ^{Ca3}	55,91 ^{Ba1}	48,03 ^{Ba2}
	SZ	45,65 ^{Ba2}	54,83 ^{Ba1}	43,82 ^{Bb2}
	KAL	45,00 ^{Ba2}	49,94 ^{Bb1}	42,96 ^{Bb2}

“K”: kontroll, “SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, “KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. Az indexben a nagybetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a fajták között, azonos szén-dioxid-szinten; a kisbetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a kezelések között, azonos szén-dioxid-szinten; a felső indexben lévő számok jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a CO₂-szintek között p ≤ 0,05 szinten (n = 3).



9. ábra: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták biomassza-értékeinek relatív változása a megemelt CO₂-szint függvényében.

„K”: kontroll, „SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, „KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. „INI”: Mv Initium (őszi árpa); „HOP”: Mv Hópehely (őszi zab); „IKVA”: Mv Ikva (őszi búza); „NAD” Mv Nádor (őszi búza); „NEM”: Mv Nemere (őszi búza); KOL”: Mv Kolompos (őszi búza). A kitöltés a szignifikáns különbséget jelzi a légköri szén-dioxid-szinten nevelt növények értékeihez képes $p \leq 0,05$ szinten ($n = 3$).

4.1.2. A CO₂-koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a kalászsámra

Normál légköri szén-dioxid-koncentráción a szárbainduláskor indukált szárazságstressz szignifikánsan növelte a kalászsámot az Mv Nemere (30%) és Mv Nádor (18%) ősibúza-fajtáknál, de az Mv Initium őszi árpánál ez a kezelés 13%-os csökkenést okozott (2. táblázat). A kalászoláskori aszály szintén 13%-kal csökkentette a vizsgált árpafajta kalászsámát, illetve az Mv Ikva ősibúza-fajta esetében is szignifikáns csökkenést (24%) figyelhettünk meg. 700 ppm CO₂-koncentráción nevelt növények esetében megfigyeltük, hogy a szárbainduláskor stresszelt növények kalászsáma az Mv Ikva fajtánál szignifikánsan csökkent (12%), az Mv Nemere és az Mv Initium búza- és árpafajtánál szignifikánsan növekedett (23%, illetve 13%-kal). A kalászoláskor szimulált aszály növelte az Mv Nádor ősibúza-fajta kalászsámát (43%), de az Mv Ikva esetében ennél a kezelésnél is szignifikáns csökkenést (12%) figyelhettünk meg az optimálisan öntözött növények kalászsámához képest (2. táblázat). Az 1000 ppm CO₂-szinten nevelt növények esetében a szárbainduláskori vízhiány 30%-kal növelte az Mv Nemere búzafajta

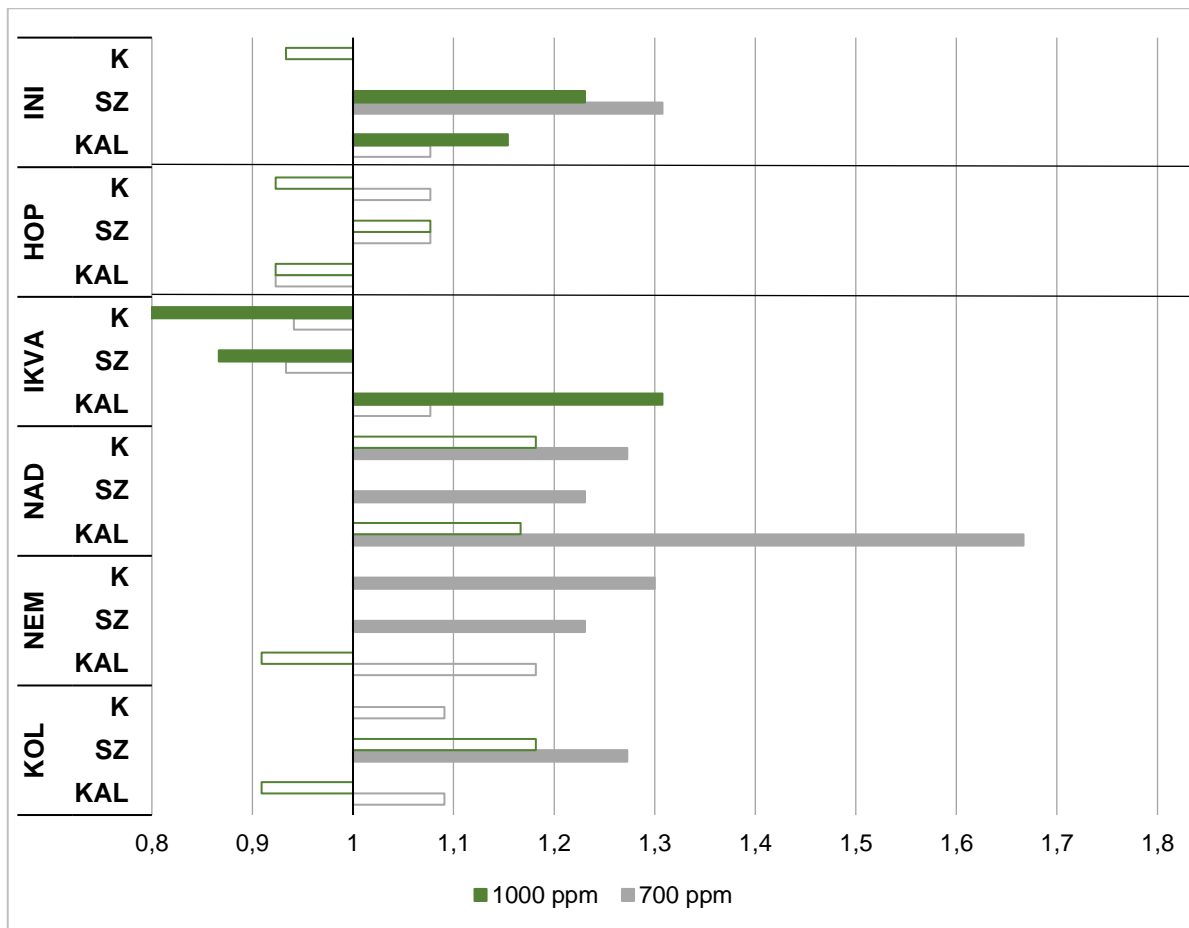
kalászsámát, a kalászoláskori vízhiány viszont az Mv Ikva búzafajtánál szignifikánsan növelte (31%-kal) a kalászok számát. Az Mv Ikva, Mv Nemere és az Mv Kolompos őszi búza-fajták esetében szignifikáns különbségeket figyelhetünk meg a két stresszkezelés között is; az Mv Nemere és Mv Kolompos fajták esetében magasabb kalászsám volt abban az esetben, mikor az aszályt a növények korai fejlődési állapotában szimuláltuk, míg az Mv Ikva esetében pedig a kései stressz hatására növekedett a kalászok száma (2. táblázat). A kalászsám-értékek szórásait az M2.7. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták kalászszáma a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	15 ^{ABa1}	15 ^{ABb1}	14 ^{Aa1}
	SZ	13 ^{Bb2}	17 ^{Aa1}	16 ^{Aa1}
	KAL	13 ^{Ab2}	14 ^{Bb12}	15 ^{ABa1}
Mv Hópehely (őszi zab)	K	13 ^{BCa1}	14 ^{ABa1}	12 ^{ABa1}
	SZ	13 ^{Ba1}	14 ^{ABa1}	14 ^{Aa1}
	KAL	13 ^{Aa1}	12 ^{Ca1}	12 ^{BCa1}
Mv Ikva (őszi búza)	K	17 ^{Aa1}	16 ^{Aa1}	13 ^{ABb2}
	SZ	15 ^{Aa1}	14 ^{ABb12}	13 ^{Ab2}
	KAL	13 ^{Ab2}	14 ^{Bb2}	17 ^{Aa1}
Mv Nádor (őszi búza)	K	11 ^{Cb2}	14 ^{ABb1}	13 ^{ABa12}
	SZ	13 ^{Ba2}	16 ^{ABb1}	13 ^{Aa2}
	KAL	12 ^{Ab2}	20 ^{Aa1}	14 ^{Ba2}
Mv Nemere (őszi búza)	K	10 ^{Cb2}	13 ^{Bb1}	10 ^{Bb2}
	SZ	13 ^{Ba2}	16 ^{ABa1}	13 ^{Aa2}
	KAL	11 ^{Ab12}	13 ^{BCb1}	10 ^{Cb2}
Mv Kolompos (őszi búza)	K	11 ^{Ca1}	12 ^{Ba1}	11 ^{ABa1}
	SZ	11 ^{Ca12}	14 ^{Ba1}	13 ^{Aa12}
	KAL	11 ^{Aa1}	12 ^{BCa1}	10 ^{Cb1}

“K”: kontroll, “SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, “KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. Az indexben a nagybetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a fajták között, azonos szén-dioxid-szinten; a kisbetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a kezelések között, azonos szén-dioxid-szinten; a felső indexben lévő számok jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a CO₂-szintek között p ≤ 0,05 szinten (n = 3).

Általánosságban a szén-dioxid-szint emelkedése pozitívan hatott a növények bokrosodására, illetve a kalászsámra (10. ábra). Egyedül az Mv Ikva búzafajta optimális öntözött, illetve a szárbainduláskor vízmegvonással stresszelt egyedein figyeltünk meg szignifikáns negatív CO₂-reakciót 1000 ppm szinten. A szén-dioxid-trágyázás nem befolyásolta szignifikánsan a vizsgált őszi zab-fajta (Mv Hópehely) bugaszámát. A vizsgált őszi búza-fajták közül az Mv Nádorra hatott legkedvezőbben a szén-dioxid-szint emelése: a 700 ppm CO₂-koncentráción nevelt növények kalászszáma szignifikánsan magasabb volt a légköri szén-dioxid-szinten nevelt növényekhez képest, mindhárom kezelésben, azonban a CO₂-trágyázás pozitív hatása már nem volt kimutatható 1000 ppm CO₂-koncentráción. Hasonló trendet figyeltünk meg az Mv Nemere és az Mv Kolompos búzafajták esetében is (10. ábra).



10. ábra: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták kalászszám-értékeinek relatív változása a megemelt CO₂-szint függvényében.

„K”: kontroll, „SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, „KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. „INI”: Mv Initium (őszi árpa); „HOP”: Mv Hópehely (őszi zab); „IKVA”: Mv Ikva (őszi búza); „NAD” Mv Nádor (őszi búza); „NEM”: Mv Nemere (őszi búza); KOL”: Mv Kolompos (őszi búza). A kitöltés a szignifikáns különbséget jelzi a légköri szén-dioxid-szinten nevelt növények értékeihez képes $p \leq 0,05$ szinten ($n = 3$).

4.1.3. A CO₂-koncentráció és a szimulált vízhiány hatása az ezerszemtömegre

Normál légköri szén-dioxid-szinten a szárbainduláskor indukált szárazságstressz szignifikánsan, 20% és 16%-kal csökkentette az Mv Nádor és az Mv Ikva őszi búza-fajták ezerszemtömegét, a kései aszály pedig az Mv Nádor (16%), az Mv Hópehely (8%) és az Mv Initium (7%) fajtáknál okozott, az optimálisan öntözött növények ezerszemtömegéhez képest, szignifikáns csökkenést (3. táblázat). Az Mv Kolompos búzafajtán kívül minden vizsgált fajtánál szignifikáns különbségek adódtak a két stresszkezelés között; az Mv Initium, az Mv Hópehely és az Mv Nemere fajták esetében a kései aszály hatásaként csökkent nagyobb mértékben a fajták ezerszemtömege. Az Mv Ikva és az Mv Nádor fajtáknál 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 ősziárpa-fajtán 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%) fajtáknál, de a kezelés szignifikánsan csökkentette az Mv Hópehely (58%)

és az Mv Nádor (28%) fajták ezerszemtömegét. Minden vizsgált fajtánál szignifikáns különbségeket figyeltünk meg a stresszkezelések között, a vizsgált zabfajtán kívül minden esetben a korai stressz hatására alacsonyabb ezerszemtömeg-értékeket mértünk (3. táblázat). Megemelt, 1000 ppm szén-dioxid-szinten a korai vízmegvonás 33%-kal csökkentette az Mv Nádor és Mv Ikva, valamint 24%-kal az Mv Nemere ősibúza-fajták ezerszemtömegét. A kései stressz pedig csak az Mv Ikva esetében okozott szignifikáns csökkenést (13%). Az általunk vizsgált ősibúza-fajtáknál szignifikáns különbségek adódtak a két stresszkezelés között is, a kései stressz hatására magasabb ezerszemtömeg-értékeket mértünk (3. táblázat). Az ezerszemtömeg-értékek szórásait az M2.8. táblázat tartalmazza.

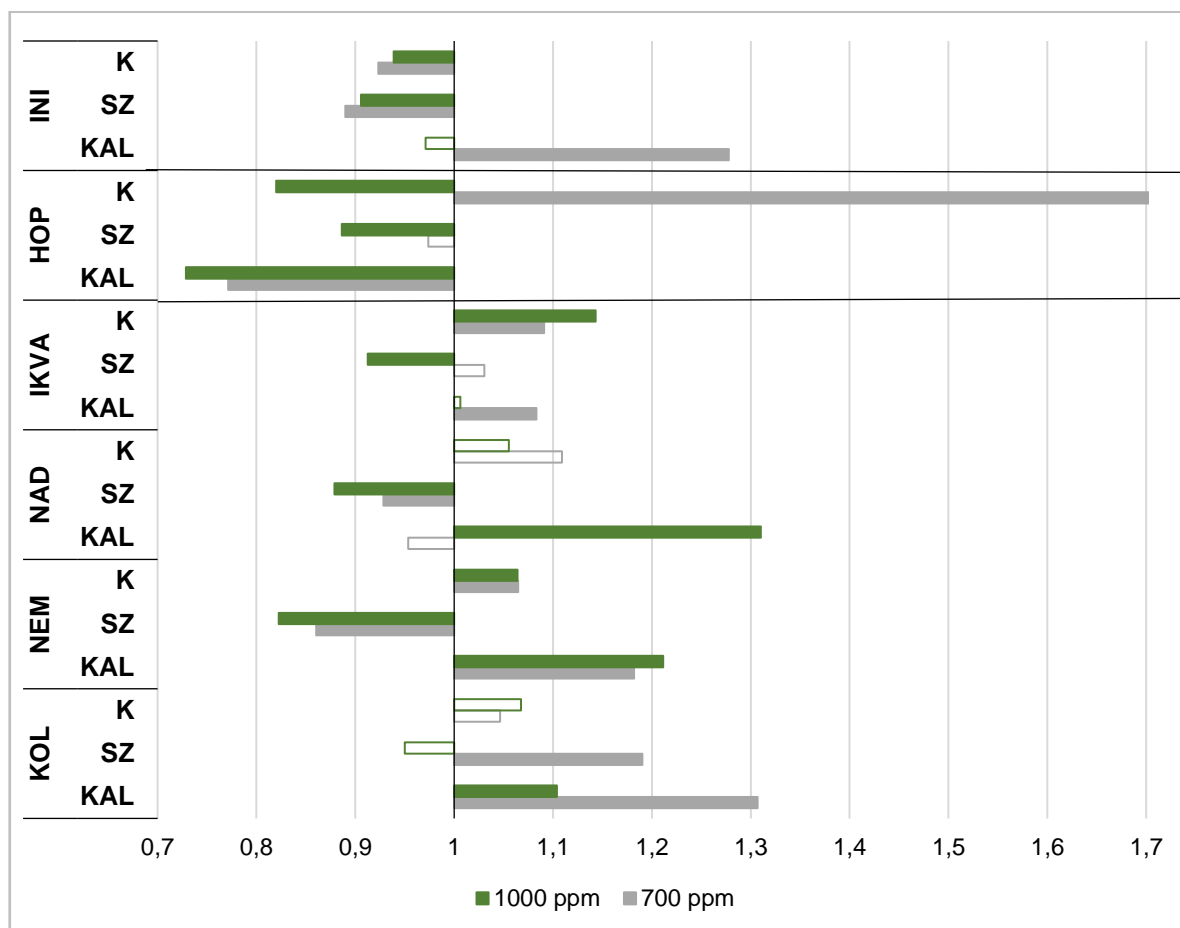
3. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták ezerszemtömege (g) a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	45,30 ^{Ba1}	41,82 ^{Db2}	42,53 ^{Ba2}
	SZ	44,67 ^{Ba1}	39,75 ^{Bb2}	40,46 ^{Ca2}
	KAL	42,05 ^{Bb2}	53,73 ^{Ba1}	40,83 ^{Ba2}
Mv Hópehely (őszi zab)	K	38,02 ^{Da2}	64,73 ^{Aa1}	31,18 ^{Cab3}
	SZ	37,65 ^{Ea1}	36,67 ^{Bb12}	33,37 ^{BCa12}
	KAL	35,16 ^{Db1}	27,13 ^{Dc2}	25,61 ^{Cb2}
Mv Ikva (őszi búza)	K	41,68 ^{Ca2}	45,48 ^{Ca1}	47,65 ^{Ba1}
	SZ	35,24 ^{Fb1}	36,32 ^{Cb1}	32,16 ^{Cc2}
	KAL	40,98 ^{Ba2}	44,39 ^{Ba1}	41,23 ^{Bb2}
Mv Nádor (őszi búza)	K	51,52 ^{Aa1}	57,13 ^{Ca1}	54,36 ^{ABa1}
	SZ	41,29 ^{Cc1}	38,33 ^{Bc2}	36,28 ^{BCb2}
	KAL	43,42 ^{Bb2}	41,40 ^{Cb2}	56,89 ^{Aa1}
Mv Nemere (őszi búza)	K	56,61 ^{Aa2}	57,08 ^{Ba1}	57,04 ^{Aa1}
	SZ	52,60 ^{Aa1}	45,25 ^{Ab2}	43,27 ^{Ab2}
	KAL	49,44 ^{Ab2}	58,44 ^{Aa1}	59,90 ^{Aa1}
Mv Kolompos (őszi búza)	K	40,37 ^{Ca1}	42,25 ^{Dc1}	43,10 ^{Bab1}
	SZ	40,08 ^{Da2}	47,71 ^{Ab1}	38,08 ^{Bab2}
	KAL	37,21 ^{CBa3}	51,23 ^{Ba1}	43,28 ^{Ba2}

“K”: kontroll, “SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, “KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. Az indexben a nagybetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a fajták között, azonos szén-dioxid-szinten; a kisbetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a kezelések között, azonos szén-dioxid-szinten; a felső indexben lévő számok jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a CO₂-szintek között p ≤ 0,05 szinten (n = 3).

A vizsgált árpafajta (Mv Initium) ezerszemtömegére negatívan hatott a szén-dioxid-szint mesterséges emelése (11. ábra). Az optimális vízellátást, 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 nevelteké, ez a csökkenés 700 ppm szinten még jelentősebb volt. Ezzel szemben a kalászoláskori stressz jelentősen megnövelte a növények ezerszemtömegét 700 ppm CO₂-koncentráción. Az Mv Hópehely ősizab-fajtánál 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-szint emelése (700 ppm) szignifikánsan növelte a vizsgált zabfajta ezerszemtömegét, abban az esetben, amikor a növények optimális vízellátást kaptak. Az Mv Nemere és Mv Ikva őszi búza-fajtáknál a szén-dioxid-koncentráció emelése pozitívan hatott a fajták ezerszemtömegére az optimálisan öntözött növények esetében, 1000 ppm CO₂-koncentráción a növekedés még számottevőbb volt. A korai stresszkezelés viszont szignifikánsan csökkentette az ezerszemtömeget az Mv Nemere és Mv Nádor esetében, 1000 ppm szinten ez a csökkenés még jelentősebb volt. Az Mv Ikva fajta esetében is szignifikáns csökkenést figyeltünk meg a korai stresszkezelés hatásaként, de csak 1000 ppm szén-dioxid-szinten. A szén-dioxid-szint emelése és kalászoláskori aszály mind a négy őszi búza-fajta esetében ezerszemtömeg-növekedést okozott, az Mv Nemere és az Mv Kolompos esetében mindkét megemelt szinten, viszont az Mv Nádor esetében ezt a pozitív változást csak 1000 ppm-en, az Mv Ikva esetében csak 700 ppm szinten mutattuk ki (11. ábra).



11. ábra: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták ezerszemtömeg-értékeinek relatív változása a megemelt CO₂-szint függvényében.

„K”: kontroll, „SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, „KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. „INI”: Mv Initium (őszi árpa); „HOP”: Mv Hópehely (őszi zab); „IKVA”: Mv Ikva (őszi búza); „NAD” Mv Nádor (őszi búza); „NEM”: Mv Nemere (őszi búza); KOL”: Mv Kolompos (őszi búza). A kitöltés a szignifikáns különbséget jelzi a légköri szén-dioxid-szinten nevelt növények értékeihez képes $p \leq 0,05$ szinten ($n = 3$).

4.1.4. A CO₂-koncentráció és a szimulált vízhiány hatása a szemtermésre

400 ppm szén-dioxid-szinten minkét szárazságstressz-kezelés (szárbainduláskori és kalászoláskori aszály) csökkentette a növények szemtermését minden vizsgált fajtánál, az Mv Kolompos őszebúza-fajta kivételével (4. táblázat). Az optimális vízellátáshoz képest a legjelentősebb változásokat az Mv Hópehely őszi zab-fajtánál figyeltünk meg, a szárbainduláskori vízmegvonás 24%-os, a bugázáskor szimulált aszály pedig 54%-os szemtermés-csökkenést eredményezett. Az Mv Initium, Mv Ikva és Mv Hópehely őszi árpa-, -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 az Mv Nemere (10%) fajták szemtermését. A kalászoláskori (BBCH 55) stressz csökkentette a vizsgált zab- és búzafajták szemtermését az optimális vízellátáshoz képest. A legnagyobb mértékű csökkenést (77%) az Mv Hópehely zabfajta esetén figyeltünk meg. A kezelés szignifikánsan, 34%-kal, 26%-kal, 25%-kal és 23%-kal csökkentette az 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 kalászolás időszakában szimulált stresszkezelés (4. táblázat). 1000 ppm szén-dioxid-szinten a szárbainduláskori stresszkezelés csak az Mv Ikva búzafajtánál csökkentette (15%) szignifikánsan a szemtermést, de a kalászoláskori stressz az Mv Kolompos kivételével minden fajtánál szignifikáns terméscsökkenést 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 terméscsökkenéshez vezetett (4. táblázat). A szemtermés-értékek szórásait az M2.9. táblázat tartalmazza.

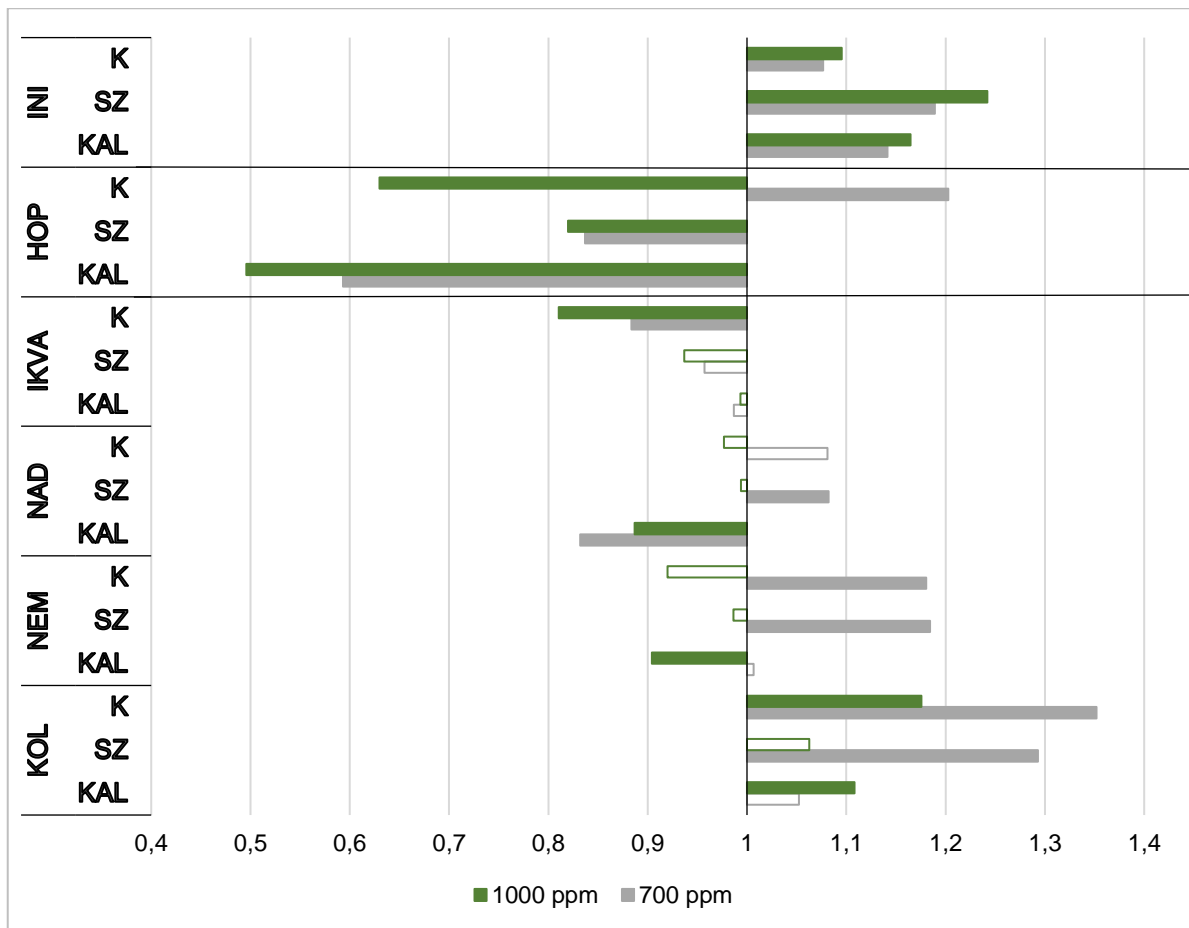
Mv Initium őszi árpa-fajta szignifikánsan pozitívan reagált a szén-dioxid-szint emelkedésére minden általunk alkalmazott kezelésben, de nagyobb szemtermés-növekedést figyelhettünk meg a stresszkezelte növényeknél (12. ábra). Az Mv Hópehely őszi zab-fajtánál ellentétes tendenciát figyeltünk meg; a szén-dioxid-trágyázás, 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 őszebúza-fajta esetében is negatív CO₂-reakciókat mutattunk ki, ami viszont csak az optimálisan öntözött növényeknél volt szignifikáns.

4. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták szemtermése (g) a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	21,38 ^{Ba2}	23,01 ^{Ba1}	23,42 ^{Aa1}
	SZ	19,08 ^{ABb2}	22,68 ^{Aa1}	23,70 ^{Aa1}
	KAL	18,28 ^{ABc2}	20,86 ^{Aa1}	21,28 ^{Ab1}
Mv Hópehely (őszi zab)	K	25,89 ^{Aa2}	31,14 ^{Aa1}	16,31 ^{Ca3}
	SZ	19,60 ^{Ab1}	16,40 ^{Bb2}	16,07 ^{Ca2}
	KAL	11,97 ^{Cc1}	7,10 ^{Dc2}	5,94 ^{Db2}
Mv Ikva (őszi búza)	K	27,72 ^{Aa1}	24,49 ^{Ba2}	22,46 ^{Aa2}
	SZ	20,41 ^{Ab1}	19,54 ^{ABb1}	19,12 ^{Bb1}
	KAL	18,63 ^{ABc1}	18,38 ^{Cb1}	18,50 ^{Bb1}
Mv Nádor (őszi búza)	K	21,10 ^{Ba1}	22,81 ^{Ba1}	20,61 ^{Aa1}
	SZ	18,63 ^{Bb2}	20,16 ^{Ab1}	18,51 ^{Bab2}
	KAL	18,06 ^{ABb1}	15,03 ^{Bc2}	16,02 ^{Cb2}
Mv Nemere (őszi búza)	K	21,16 ^{Ba2}	24,98 ^{Ba1}	19,47 ^{Ba2}
	SZ	18,39 ^{ABb2}	22,43 ^{Ab1}	18,68 ^{Bab2}
	KAL	19,22 ^{Ab1}	19,35 ^{Cc1}	17,37 ^{BCb2}
Mv Kolompos (őszi búza)	K	17,34 ^{Ca3}	23,44 ^{Ba1}	20,38 ^{Aa2}
	SZ	17,70 ^{Ba2}	22,88 ^{Aa1}	18,81 ^{Ba2}
	KAL	16,54 ^{Ba2}	17,40 ^{Cb12}	18,32 ^{Ba1}

“K”: kontroll, “SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, “KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. Az indexben a nagybetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a fajták között, azonos szén-dioxid-szinten; a kisbetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a kezelések között, azonos szén-dioxid-szinten; a felső indexben lévő számok jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a CO₂-szintek között p ≤ 0,05 szinten (n = 3).

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 (12. ábra).



12. ábra: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták szemtermés-értékeinek relatív változása a megemelt CO₂-szint függvényében.

„K”: kontroll, „SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, „KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. „INI”: Mv Initium (őszi árpa); „HOP”: Mv Hópehely (őszi zab); „IKVA”: Mv Ikva (őszi búza); „NAD” Mv Nádor (őszi búza); „NEM”: Mv Nemere (őszi búza); KOL”: Mv Kolompos (őszi búza). A kitöltés a szignifikáns különbséget jelzi a légköri szén-dioxid-szinten nevelt növények értékeihez képes $p \leq 0,05$ szinten ($n = 3$).

4.1.5. 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 (5. táblázat). A kalászoláskor indukált aszály 45%-kal csökkentette Mv Hópehely Harvest-indexét és 7%-kal növelte a vizsgált árpafaját (Mv Initium). Az Mv Hópehely zabfajtnál 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 (5. táblázat). 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%) őszi búza-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 zabfajtnál 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 (5. táblázat). 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 (5. táblázat). A Harvest-index-értékek szórásait az M2.10. táblázat tartalmazza.

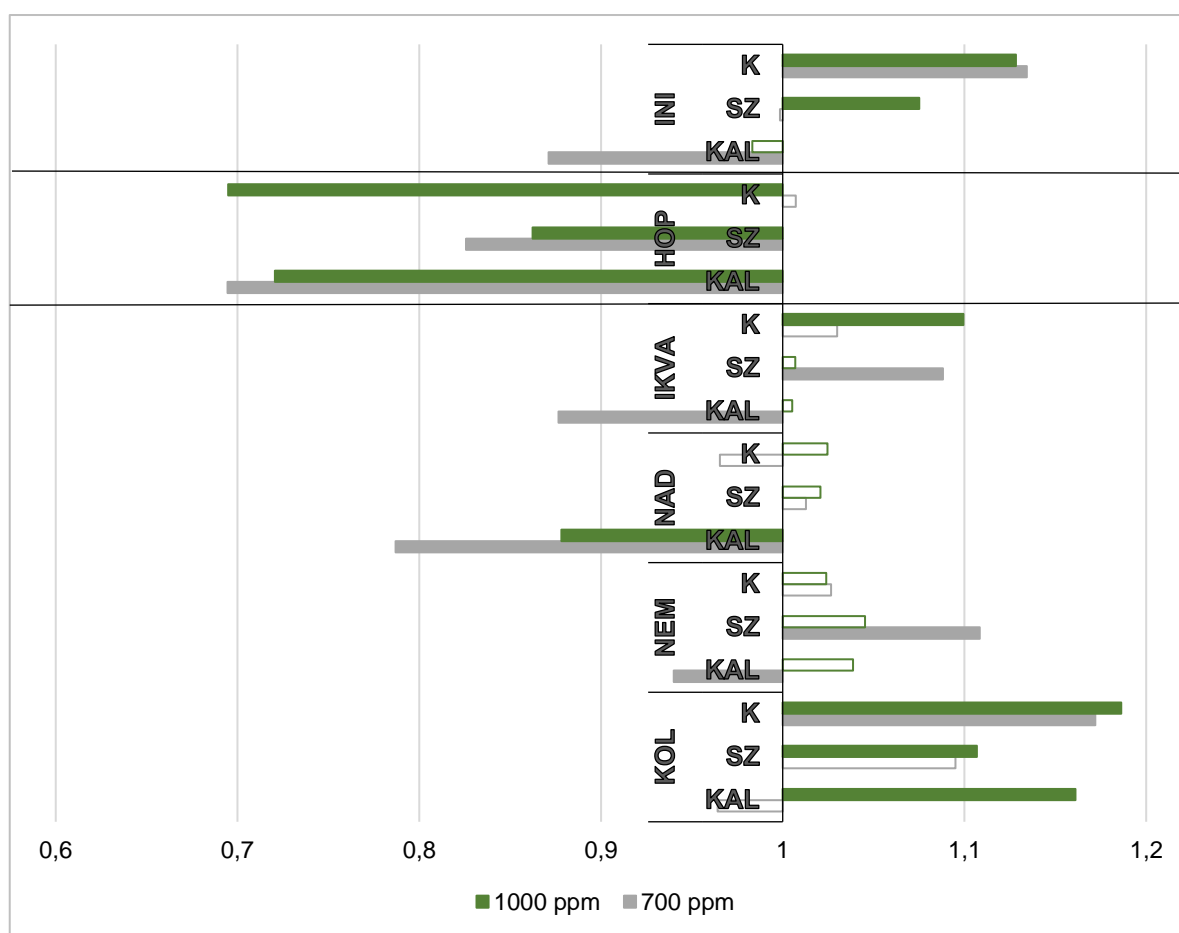
5. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták Harvest-index (%) értékei a különböző kezelésekre hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	38,5 ^{Db2}	43,7 ^{Da1}	43,5 ^{Ca1}
	SZ	40,4 ^{Cab2}	40,3 ^{Db2}	43,4 ^{Ca1}
	KAL	41,4 ^{Ba1}	36,0 ^{Dc2}	40,7 ^{Ca1}
Mv Hópehely (őszi zab)	K	42,0 ^{Ca1}	42,3 ^{Da1}	29,2 ^{Da2}
	SZ	35,5 ^{Db1}	29,3 ^{Eb2}	30,6 ^{Da2}
	KAL	22,9 ^{Cc1}	15,9 ^{Ec2}	16,5 ^{Db2}
Mv Ikva (őszi búza)	K	55,3 ^{Aa2}	56,9 ^{Ab2}	60,8 ^{Aa1}
	SZ	57,1 ^{Aa2}	62,2 ^{Aa1}	57,5 ^{Aab2}
	KAL	55,2 ^{Aa1}	48,4 ^{Bc2}	55,5 ^{Ab1}
Mv Nádor (őszi búza)	K	52,7 ^{Ba1}	50,9 ^{Ab1}	54,0 ^{Aa1}
	SZ	52,0 ^{Ba1}	52,7 ^{Ca1}	53,1 ^{Ba1}
	KAL	52,2 ^{Aa1}	41,1 ^{Cc3}	45,8 ^{Bb2}
Mv Nemere (őszi búza)	K	51,7 ^{Ba1}	53,1 ^{Ab1}	53,0 ^{Ba1}
	SZ	49,9 ^{Ba2}	55,4 ^{Ba1}	52,2 ^{Ba12}
	KAL	52,3 ^{Aa1}	49,2 ^{Ac2}	54,3 ^{Aa1}
Mv Kolompos (őszi búza)	K	35,8 ^{Eb2}	41,9 ^{Da1}	42,4 ^{Ca1}
	SZ	38,8 ^{Ca2}	42,5 ^{Da12}	42,9 ^{Ca1}
	KAL	36,7 ^{Bab2}	35,4 ^{Db2}	42,6 ^{Bca1}

“K”: kontroll, “SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, “KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. Az indexben a nagybetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a fajták között, azonos szén-dioxid-szinten; a kisbetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a kezelésekre között, azonos szén-dioxid-szinten; a felső indexben lévő számok jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a CO₂-szintek között p ≤ 0,05 szinten (n = 3).

A növények szén-dioxid-szint emelkedésére adott válaszreakciói a Harvest-index-adatak tekintetében csak az Mv Hópehely őszi zab-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 (13. ábra). A szén-dioxid-szint emelése (700 ppm és 1000 ppm) pozitívan hatott a vizsgált árpafajta (Mv Initium) Harvest-indexére, de ez a trend csak a kontroll növények esetében volt kimutatható (13. ábra). A vizsgált őszi búzák esetében nem figyeltünk meg egységes reakciókat. Az Mv Kolompos Harvest-indexe szignifikánsan magasabb

volt mindhárom kezelésben 1000 ppm CO₂-szinten a légköriéhez képest, de ez a pozitív változás 700 ppm szinten csak a kontroll növények esetében mutatkozott meg. Az Mv Nádor, Mv Ikva és Mv Nemere fajtáknál a szárbainduláskori szárazságstressz szignifikánsan csökkentette a HI-et 700 ppm CO₂-szinten, az Mv Nádor fajtánál ezt a csökkenést 1000 ppm szinten is kimutattuk. Az Mv Ikva és Mv Nemere fajtáknál kedvezőbb értékeket számítottunk a korai szárazságstressz hatásaként 700 ppm szén-dioxid-szinten a légköri koncentráción nevelt növényekhez képest. Az Mv Ikva fajta esetében az optimális szinten öntözött növények Harvest-indexe szignifikánsan magasabb volt 1000 ppm CO₂-szinten, mint a kontroll kamrában (13. ábra).



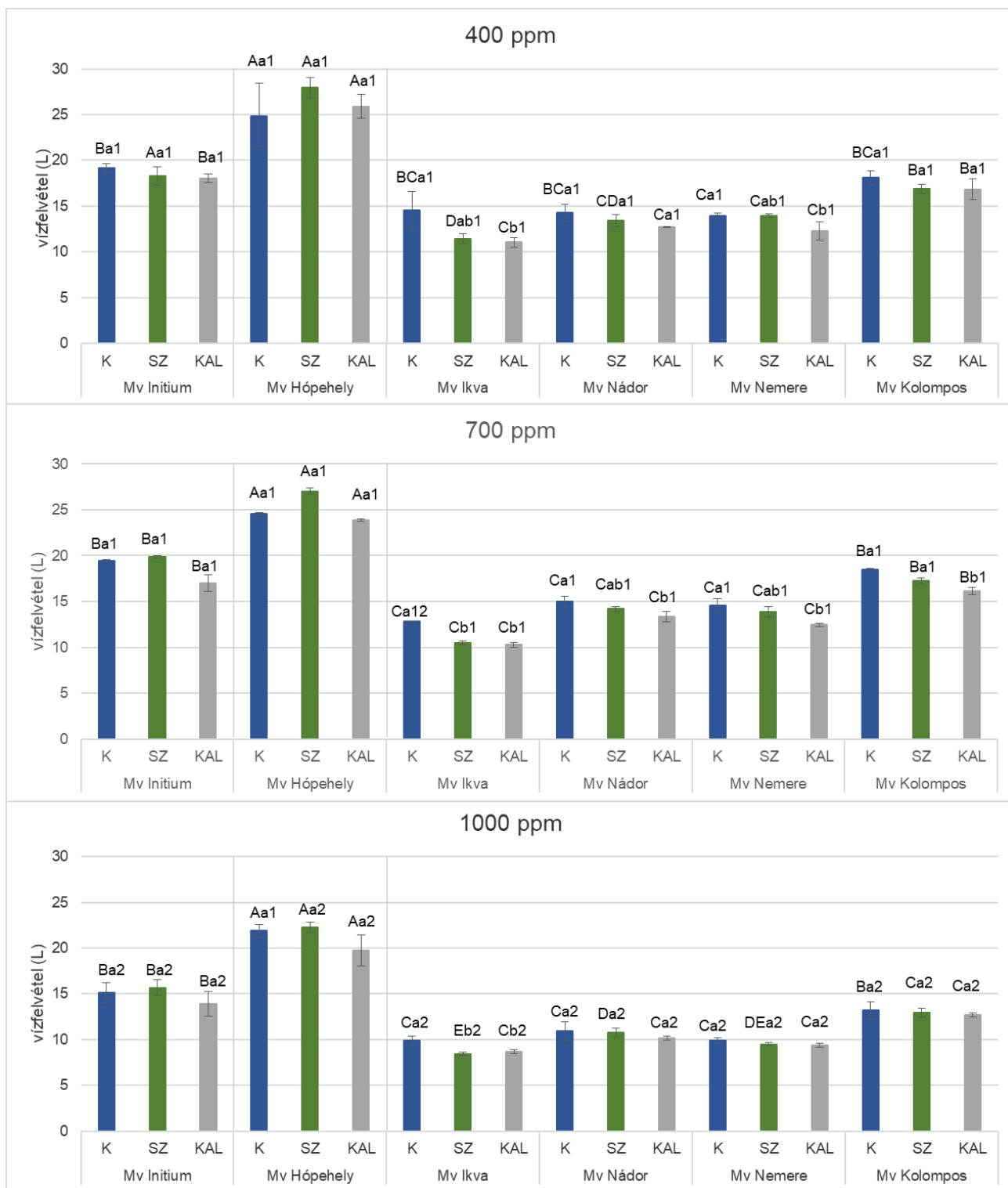
13. ábra: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták Harvest-index-értékeinek relatív változása a megemelt CO₂-szint függvényében.

„K”: kontroll, „SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, „KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. „INI”: Mv Initium (őszi árpa); „HOP”: Mv Hópehely (őszi zab); „IKVA”: Mv Ikva (őszi búza); „NAD” Mv Nádor (őszi búza); „NEM”: Mv Nemere (őszi búza); KOL”: Mv Kolompos (őszi búza). A kitöltés a szignifikáns különbséget jelzi a légköri szén-dioxid-szinten nevelt növények értékeihez képest $p \leq 0,05$ szinten ($n = 3$).

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

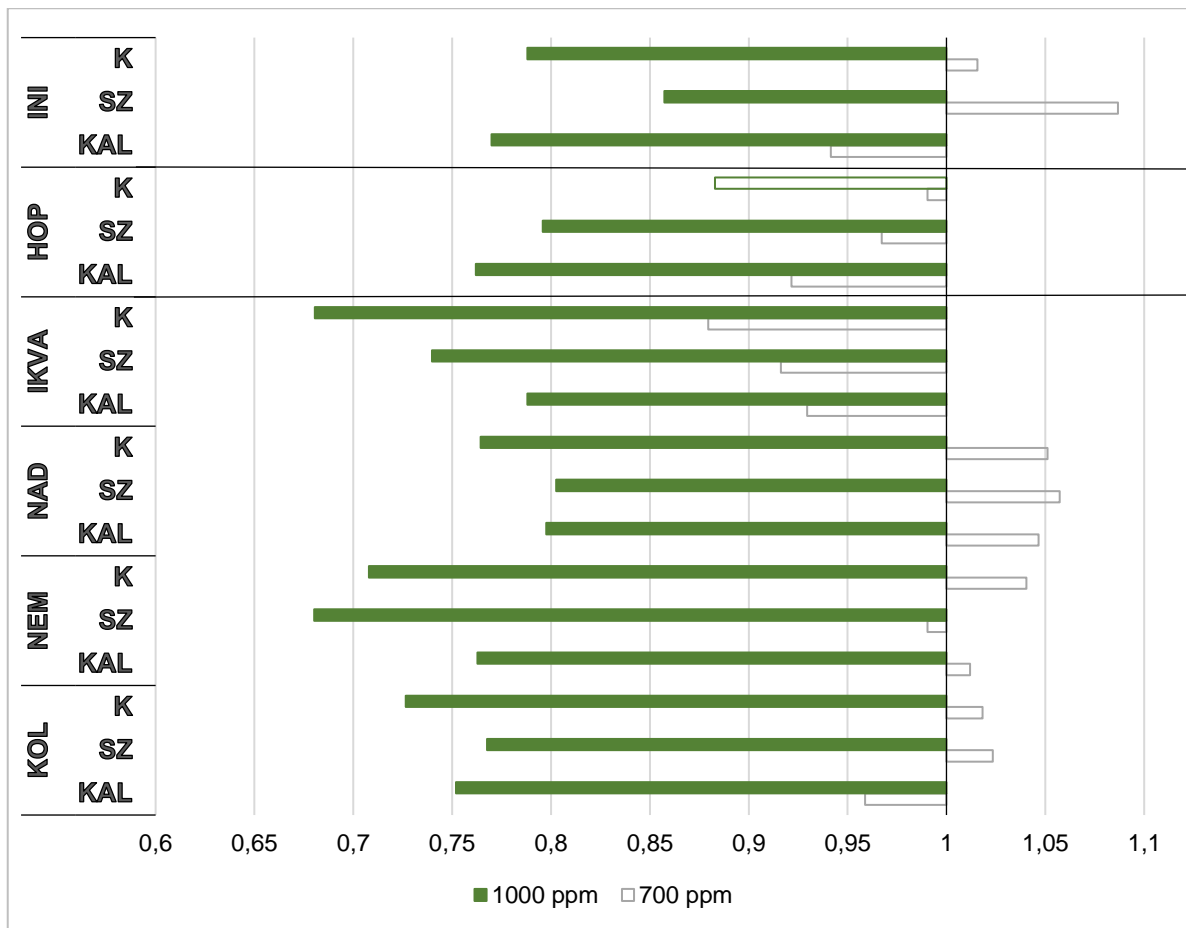
A légköri szén-dioxid-szinten nevelt növényeknél a korai szárazságstressz nem okozott szignifikáns változást a vízfelvételben, viszont a kalászoláskori aszály szignifikánsan csökkentette az Mv Ikva (24%) és Mv Nemere (12%) őszi búza-fajták vízfelvételét a kontroll körülmények között fejlődött növényekhez képest. Az Mv Nemere estében szignifikáns különbségek adódtak a

két stresszkezelés között is, a kalászoláskor szimulált vízhiány nagyobb mértékben csökkentette a vízfelvételt (14. ábra). 700 ppm szén-dioxid-koncentráción a szárbainduláskori vízmegvonás csak az Mv Ikva esetében eredményezett szignifikáns változás, 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 őszibúza-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 (14. ábra). 1000 ppm szén-dioxid-szinten mindkét szárazságstressz-kezelés szignifikánsan csökkentette Mv Ikva fajta vízfelvételét (15%-kal a szárbainduláskori és 12%-kal a kalászoláskori aszály) (14. ábra). A WU-t a szén-dioxid-trágyázás csak abban az esetben befolyásolta szignifikánsan, ha 1000 ppm-re emeltük a kamrában a CO₂-szintet (15. ábra). 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 (15. ábra). A vízfelvétel-értékek szórásait az M2.11. táblázat tartalmazza.



14. ábra: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták vízfelvétele a különböző kezelések hatására.

“K”: kontroll, “SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, “KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza). A nagybetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a fajták között, azonos CO₂-szinten; a kisbetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a kezelések között, azonos CO₂-szinten; a számok jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a CO₂-szintek között p ≤ 0,05 szinten (n = 3).



15. ábra: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták vízfelvétel-értékeinek relatív változása a megemelt CO₂-szint függvényében.

„K”: kontroll, „SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, „KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. „INI”: Mv Initium (őszi árpa); „HOP”: Mv Hópehely (őszi zab); „IKVA”: Mv Ikva (őszi búza); „NAD” Mv Nádor (őszi búza); „NEM”: Mv Nemere (őszi búza); KOL”: Mv Kolompos (őszi búza). A kitöltés a szignifikáns különbséget jelzi a légköri szén-dioxid-szinten nevelt növények értékeihez képes $p \leq 0,05$ szinten ($n = 3$).

4.1.7. 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 (6. táblázat). Emelt CO₂-koncentráción (700 ppm) a szárbainduláskor szimulált aszály szignifikánsan csökkentette az Mv Hópehely és Mv Nádor fajták WUE-értékeit 48% és 6%-kal, a többi vizsgált fajta esetében nem volt szignifikáns változás. A kései aszállyal 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-fajtánál 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 fajtánál szignifikáns különbségeket figyeltünk meg a két stresszkezelés között, a kalászoláskori

vízmegvonás nagyobb mértékben csökkentette a növények vízhasznosító képességét, mint a korai aszály (6. táblázat). 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 (6. táblázat). A vízhasznosítóképeség-értékek szórásait az M2.12. táblázat tartalmazza.

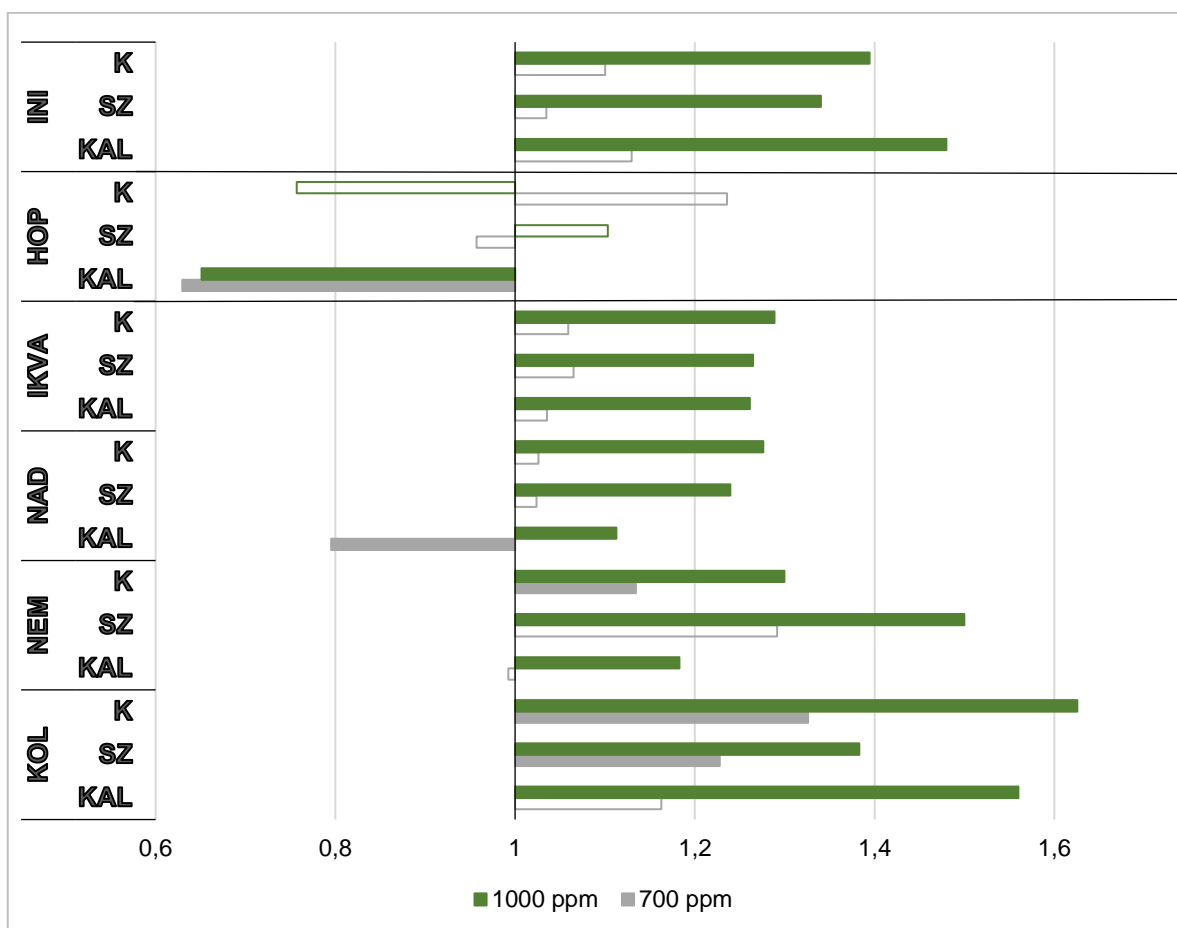
6. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták vízhasznosítóképeség-értékei ($g \cdot L^{-1}$) a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	1,115 ^{Ba2}	1,227 ^{Ca2}	1,555 ^{Ca1}
	SZ	1,130 ^{Ba2}	1,169 ^{Da2}	1,515 ^{CDa1}
	KAL	1,040 ^{Ca2}	1,174 ^{Ba2}	1,538 ^{Ca1}
Mv Hópehely (őszi zab)	K	0,985 ^{Ba12}	1,217 ^{Ca1}	0,746 ^{Da2}
	SZ	0,656 ^{Cab1}	0,628 ^{Eb1}	0,724 ^{Ea1}
	KAL	0,461 ^{Db1}	0,291 ^{Cc2}	0,300 ^{Db2}
Mv Ikva (őszi búza)	K	1,762 ^{Aa2}	1,867 ^{Aa2}	2,271 ^{Aa1}
	SZ	1,789 ^{Aa2}	1,905 ^{Aa2}	2,262 ^{Aa1}
	KAL	1,686 ^{Aa2}	1,745 ^{Aa2}	2,126 ^{Aa1}
Mv Nádor (őszi búza)	K	1,480 ^{Aa2}	1,516 ^{Ba2}	1,889 ^{Ba1}
	SZ	1,389 ^{Aa2}	1,422 ^{Cb2}	1,722 ^{BCab1}
	KAL	1,416 ^{Ba2}	1,126 ^{Bc3}	1,576 ^{Cb1}
Mv Nemere (őszi búza)	K	1,516 ^{Aa3}	1,720 ^{Aa2}	1,970 ^{Ba1}
	SZ	1,289 ^{Ba2}	1,664 ^{Ba1}	1,933 ^{Ba1}
	KAL	1,567 ^{ABa2}	1,555 ^{Ab2}	1,853 ^{Ba1}
Mv Kolompos (őszi búza)	K	0,957 ^{Ba2}	1,269 ^{Ca1}	1,556 ^{Ca1}
	SZ	1,051 ^{BCa2}	1,290 ^{Da1}	1,453 ^{Da1}
	KAL	0,927 ^{Ca2}	1,077 ^{Bb2}	1,445 ^{Ca1}

“K”: kontroll, “SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, “KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. Az indexben a nagybetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a fajták között, azonos szén-dioxid-szinten; a kisbetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a kezelések között, azonos szén-dioxid-szinten; a felső indexben lévő számok jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a CO₂-szintek között p ≤ 0,05 szinten (n = 3).

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) (16. ábra). A vizsgált zabfajtánál (Mv Hópehely) optimális vízellátás mellett vagy a korai aszálykezelés hatására a megemelt szén-dioxid-szinteken csökkent termésprodukción 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 őszi búza-fajta esetében kedvezőbb vízhasznosítóképesség-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) (16. ábra).



16. ábra: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták vízhasznosítóképesség-értékeinek relatív változása a megemelt CO₂-szint függvényében.

„K”: kontroll, „SZ”: BBCH 21 fejlettségi állapotban indukált aszály, „KAL”: BBCH 55 fejlettségi állapotban indukált aszály. „INI”: Mv Initium (őszi árpa); „HOP”: Mv Hópehely (őszi zab); „IKVA”: Mv Ikva (őszi búza); „NAD” Mv Nádor (őszi búza); „NEM”: Mv Nemere (őszi búza); KOL”: Mv Kolompos (őszi búza). A kitöltés a szignifikáns különbséget jelzi a légköri szén-dioxid-szinten nevelt növények értékeihez képes $p \leq 0,05$ szinten ($n = 3$).

4.1.8. 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 őszi zab-, 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) csökkentti 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 csökkentti a biomasszát durum búzában (Garmendia et al. 2017) és árpában (Bista et al. 2020), azonban az eredményeink alapján a vizsgált árpafajta biomassza-termelése 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, kalászolás) 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 optimális vízellátású 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 Initium 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 reprodukív 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 kalászaok számaát a vizsgált árpafajtában és az egyik búzafajtában (Mv Nemere), illetve csökkentette az Mv Ikva (őszi búza) esetében. 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 durumbúza 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, kísérletünkben 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 változásokot ebben a paraméterben a vizsgált őszi búza-fajta (Mv Hópehely) esetében. Az 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 őszi búza-fajtánál, az Mv Ikva és az Mv Nádor esetében, szignifikánsan csökkentette a fajta ezer szem tömeget, a kései aszály pedig az Mv Initium, Mv Hópehely, Mv Nádor és Mv Nemere fajtaánál 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 árpa fajta esetében 700 ppm CO₂-szinten és Mv Hópehely és Mv Nemere fajtáknál 1000 ppm CO₂-szinten. A kalászoláskori szárazságstressz az Mv Ikva búza fajta 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 őszi búza-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 búza fajtákra 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 őszi árpa-fajtáknál ebben a paraméterben mindkét általunk vizsgált CO₂-szinten. Wu et al. (2004) hasonlóan eredményeinkhez, magasabb ezerszemtömeg-értékeket talált megemelt szén-dioxid-szinten (700 ppm), mint légkörin, az optimális vízellátású és aszálykezelt búzák 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 ezerszemtömegét 800 ppm szén-dioxid-koncentráción, sőt a gáz koncentrációjának mesterséges emelése negatívan hatott erre a paraméterre; a légköri szinten neveltékhez 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 optimális vízellátású növényekhez képest) csökkentette az Mv Ikva őszi búza-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 negatívát 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 őszi búza-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 vízellátás 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 az Mv Kolompos búzafajta esetében légköri CO₂-szinten és az Mv Ikva, Mv Nádor, Mv Nemere őszi búza-fajtáknál légköri és emelt CO₂-szinten (700 ppm), valamint csökkentette az Mv Hópehely őszi zab-fajtánál 400 és 700 ppm CO₂-szinteken, az Mv Initium őszi árpa-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 az 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 őszi zab-fajta Harvest-index-értékeire. Ellentétben az eredményeinkkel Zhao et al. (2021) megfigyelte, hogy az általunk vizsgált zabfajta HI-ére pozitívan hatott az alkalmazott aszálykezelés normál légköri szén-dioxid-szinten. Samarah et al (2009) szerint a vizsgált árpák 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 búzánál 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.

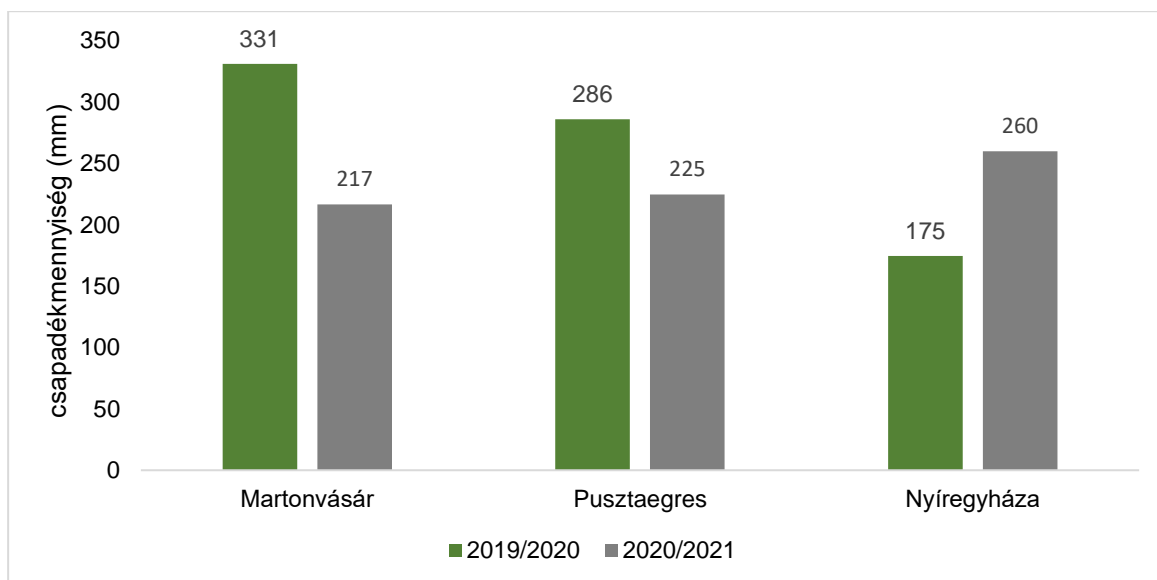
Normál légköri szén-dioxid-szinten a szárbainduláskori szárazságstressz nem okozott szignifikáns változást a vízfelvételben, viszont a kalászoláskori aszály csökkentette ezt a paramétert az Mv Ikva és Mv Nemere ősibúza-fajták esetében. 700 ppm szén-dioxid-szinten minden általunk vizsgált kalászos gabonafajta esetében csökkent vízfelvételel figyeltünk meg a kései stressz hatására. Valamint a korai érésű Mv Ikva esetében az alkalmazott szárazságstressz (korai vagy kései aszály) csökkentette a fajta vízfelvételelét 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 vízellátási szinten (optimális, vízmegvonás szárbainduláskor vagy kalászoláskor). Varga et al. (2017) kutatása szerint az optimális vízellátás és kései aszály csökkenti a növényi vízfelvételel 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 ősizab-fajta esetében mindhárom szén-dioxid-szinten, Mv Nádor ősibúza-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 vízellátás mellett, viszont a mi kutatásunk alapján nem volt szignifikáns különbség az optimálisan

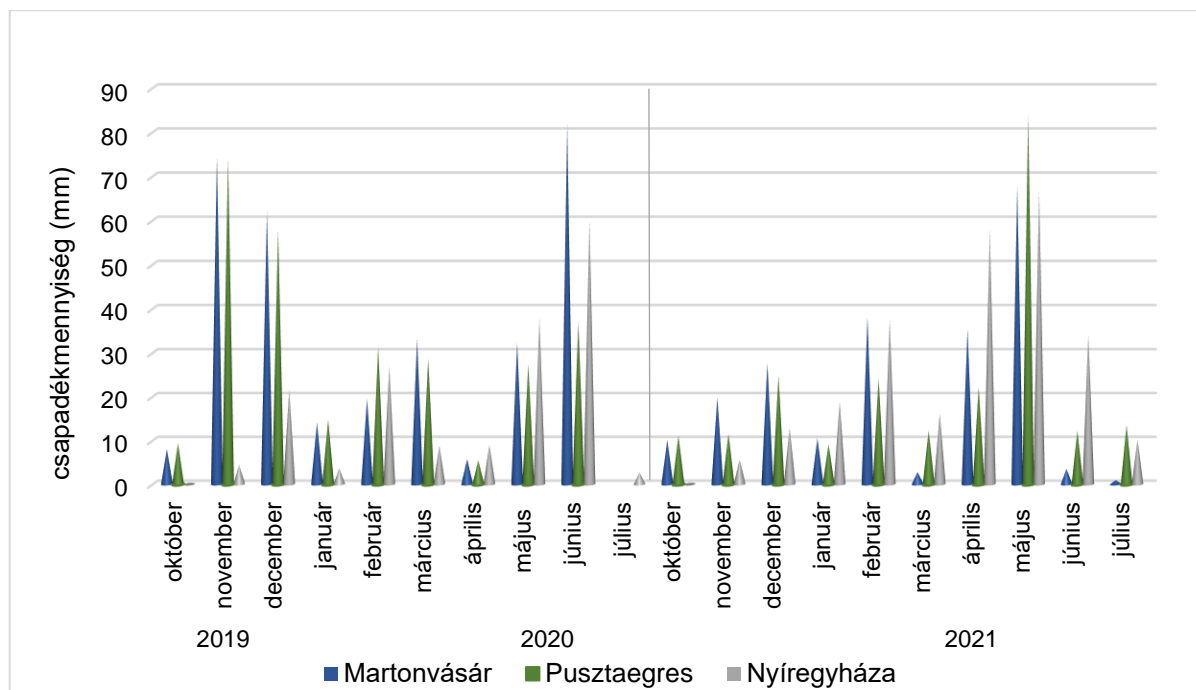
öntözött növények vízhasznosító képességében a különböző szén-dioxid-szinteken. Li et al. (2017) szerint az őszi búzák vízhasznosító képessége enyhén növekedett (a kontrollhoz képest) kései aszálykezelés hatására emelt CO₂-koncentráción (800 ppm). Eredményeink alapján emelt szén-dioxid-szinten (700 ppm) 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.

4.2. Kalászos gabonák termelésének és vízfelvételeinek vizsgálata szántóföldi modellkísérletben

A két vizsgált tenyészidőszak (2019/2020 és 2020/2021) csapadékadatában (17. ábra) jelentős különbségeket figyeltünk meg; Martonvásáron és Pusztaegresen az első vizsgált év volt csapadékos, míg Nyíregyházán a második évben hullott több csapadék (17. ábra). A csapadék havi eloszlásának (18. ábra) adatai alapján megállapítottuk, hogy Martonvásáron és Pusztaegresen az első vizsgált tenyészidőszak novemberében és decemberében hullott számottevő mennyiségű csapadék, valamint júniusban Martonvásáron és Nyíregyházán. A második évben (2020/2021-es tenyészidőszak) májusban hullott a többi hónaphoz képest kiemelkedő mennyiségű csapadék mindhárom termőhelyen (18. ábra).



17. ábra: A vizsgált termőhelyeken mért csapadék mennyisége a vetéstől az aratás előtt két héttel tartó időszakban.



18. ábra: A vizsgált termőhelyeken mért csapadékmennyiségek havi eloszlása a vetéstől az aratás előtt két héttel tartó időszakban.

4.2.1. A vizsgált fajták szemtermése a különböző termőhelyeken

Kísérletünk első évében (2019/2020-as tenyészidőszak) a három termőhely közül Nyíregyházán voltak a legalacsonyabbak a termésátlagok (7. táblázat). A pusztaegresi termőhelyhez képest a homokos talajon (Nyíregyháza) minden fajta esetében szignifikánsan alacsonyabb termésenyiséget 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 pusztaegresi 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 pusztaegresi termőhelyen volt magasabbak a termés, míg a vizsgált zabfajta (Mv Hópehely) esetében Martonvásáron (7. táblázat). 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 (7. táblázat). A vizsgált búzafajtáknál szignifikáns különbségeket figyeltünk meg a termőképességben Pusztaegres és a másik két termőhely között. Az Mv Ikva termőképessége Pusztaegresen volt magasabb, viszont a három másik vizsgált búzafajta (Mv Kolompos, Mv Nádor és Mv Nemere) esetében Pusztaegresen 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 (7. táblázat). 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 terméshozama a két vizsgált év között, az első, csapadékosabb évben mértünk magasabb értékeket. A legnagyobb különbséget (34%) az Mv Nádor őszi búza-fajta 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 terméshozamot produkáltak a csapadékosabb évben (2020/2021-es tenyészidőszak), ez a különbség Mv Initium őszi árpa-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 (7. táblázat). A szemtermés-értékek szórásait az M2.13. táblázat tartalmazza.

7. táblázat: A szántóföldi kísérleti rendszerben vizsgált fajták szemtermése (g/parcella)

Fajta	Martonvásár		Pusztáegres		Nyíregyháza	
	2019/2020	2020/2021	2019/2020	2020/2021	2019/2020	2020/2021
Mv Initium (őszi árpa)	5477 ^{Bb}	5480 ^{Aa}	6344 ^{Ba*}	5522 ^{Aa*}	4829 ^{ABc}	5316 ^{Ca}
Mv Hópehely (őszi zab)	5356 ^{Ba*}	4324 ^{Ba*}	4621 ^{Cb}	4597 ^{BCa}	3012 ^{Cc*}	4321 ^{Da*}
Mv Ikva (őszi búza)	6841 ^{Aa*}	5688 ^{Aa*}	6707 ^{Aa*}	4798 ^{Bb*}	4099 ^{Bb*}	6150 ^{ABa*}
Mv Nádor (őszi búza)	5963 ^{ABb}	6103 ^{Aa}	6699 ^{Aa*}	4416 ^{Cb*}	4367 ^{Ac*}	5829 ^{BCb*}
Mv Nemere (őszi búza)	5988 ^{ABb}	6074 ^{Aa}	6917 ^{Aa*}	4637 ^{BCb*}	4437 ^{ABc*}	6671 ^{Aa*}
Mv Kolompos (őszi búza)	5402 ^{Bb}	5323 ^{Aa}	6247 ^{Ba*}	4304 ^{Cb*}	5148 ^{ABb*}	5950 ^{Ba*}

A nagybetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a fajták között, azonos termőhelyen, egy tenyészidőszakban; a kisbetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket fajtán belül, termőhelyek között, egy tenyészidőszakban; az indexben lévő csillagok jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a két vizsgált tenyészidőszak között, azonos termőhelyen, azonos fajta esetében $p \leq 0,05$ szinten ($n = 3$).

4.2.2. 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 (8. táblázat), viszont az Mv Hópehely és Mv Ikva őszi zab-, illetve –búzafajta esetében a csapadékhasznosító képesség nem mutatott szignifikáns különbségeket a vizsgált termőhelyek (Martonvásár, Pusztáegres 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 csapadékhasznosítóképesség-értékeket Martonvásáron számítottuk, illetve Mv Initium és Mv Kolompos esetében Pusztáegresen a növények alacsonyabb PUE-vel rendelkeztek a homokos talajon (Nyíregyháza) fejlődött állományokkal szemben. A 2020/2021-es

tenyészedőszakban a három vizsgált termőhely között szintén nem figyeltünk meg szignifikáns különbségeket a vizsgált zabfajta csapadékhasznosítóképesség-értékeiben (8. táblázat). A második időszakban 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 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 (8. táblázat). A fajták PUE-értékei Pusztaegresen szintén szignifikánsan különbözik a két vizsgált év között, de ezen a termőhelyen az Mv Ikva és Mv Nemere őszi búzafajták 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 az Mv Nádor, valamint az Mv Kolompos őszi búzafajták esetében különbözött a két év szignifikánsan, minden esetben a 2019/2020-as tenyészedőszak eredményezett magasabb PUE-értékeket. A csapadékhasznosítóképesség-értékek szórásait az M2.14. táblázat tartalmazza.

8. táblázat: A szántóföldi kísérleti rendszerben vizsgált fajták átlagos csapadékhasznosító képesség-értékei ($g \cdot mm^{-1}$)

Fajta	Martonvásár		Pusztaegres		Nyíregyháza	
	2019/2020	2020/2021	2019/2020	2020/2021	2019/2020	2020/2021
Mv Initium (őszi árpa)	2,759 ^{Bc*}	4,219 ^{Aa*}	3,699 ^{Bb*}	4,098 ^{Aa*}	4,610 ^{ABa*}	3,410 ^{Cb*}
Mv Hópehely (őszi zab)	2,705 ^{Ba*}	3,329 ^{Ba*}	2,694 ^{Ca*}	3,412 ^{BCa*}	2,876 ^{Ca}	2,772 ^{Da}
Mv Ikva (őszi búza)	3,445 ^{Aa*}	4,378 ^{Aa*}	3,910 ^{Aa*}	3,561 ^{Bb*}	3,913 ^{Ba}	3,945 ^{Aab}
Mv Nádor (őszi búza)	3,011 ^{ABb*}	4,699 ^{Aa*}	3,906 ^{Aa*}	3,277 ^{Cb*}	4,169 ^{ABa*}	3,739 ^{BCb*}
Mv Nemere (őszi búza)	3,016 ^{ABb*}	4,676 ^{Aa*}	4,033 ^{Aa*}	3,441 ^{Cb*}	4,236 ^{ABa}	4,280 ^{Aa}
Mv Kolompos (őszi búza)	2,728 ^{Bc*}	4,098 ^{Aa*}	3,642 ^{Bb*}	3,194 ^{BCb*}	4,914 ^{Aa*}	3,817 ^{BCab*}

A nagybetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a fajták között, azonos termőhelyen, egy tenyészedőszakban; a kisbetűk jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket fajtán belül, termőhelyek között, egy tenyészedőszakban; az indexben lévő csillagok jelölik a statisztikailag szignifikáns különbségeket a két vizsgált tenyészedőszak között, azonos termőhelyen, azonos fajta esetében $p \leq 0,05$ szinten ($n = 3$).

4.2.3. A szántóföldi kísérleti rendszer eredményeinek megvitatása

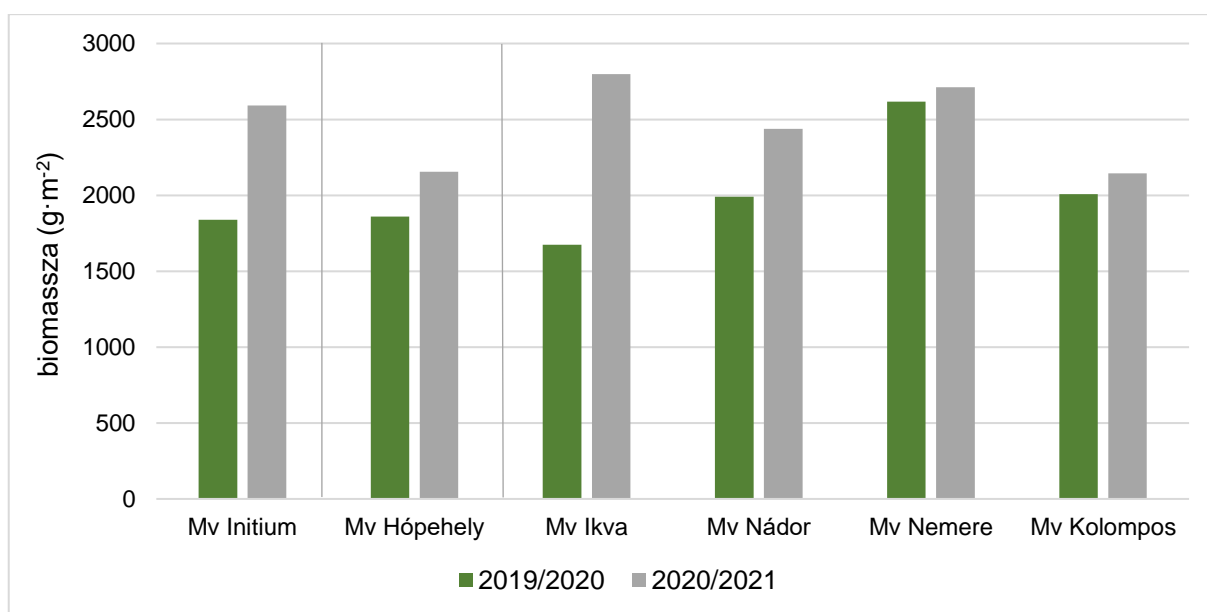
Az aszály csökkentheti a kalászosok termését (Sadras et al. 2017; Schmidthoffer et al. 2018; Chowdhury et al. 2021), viszont a különböző növekedési fázisokban elszenvedett szárazságstressz különböző módon hat (Mehraban et al. 2019), illetve az elszenvedett aszály időbeli kitettsége és erőssége is fontos 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, Pusztægres, 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. Pusztægresen 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 vizsgálatokor 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.

4.3. Kalászos gabonák produkciójának és vízfelvételeinek vizsgálata liziméteres modellkísérletben

4.3.1. A vizsgált fajták biomasszája-produkciója liziméteres kísérleti rendszerben

Magasabb talaj feletti biomassa-produkciót a második tenyészidőszakban (2020/2021) figyeltünk meg, mindegyik vizsgált fajta esetében (19. ábra). 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 tenyészidőszak között ($94 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). Az első tenyészidőszakban a legalacsonyabb biomassa tömeget az Mv Ikva búzafajta ($1674 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) esetében mértük. A második vizsgált tenyészidőszakban a legtöbb biomasszát ($2798 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) a korai érésű Mv Ikva búzafajtánál figyeltük meg, a legalacsonyabbat ($2144 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) pedig a kései érésű búzafajtnál (Mv Kolompos) (19. ábra). 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 őszi búza-fajta esetében adódott (19. ábra).



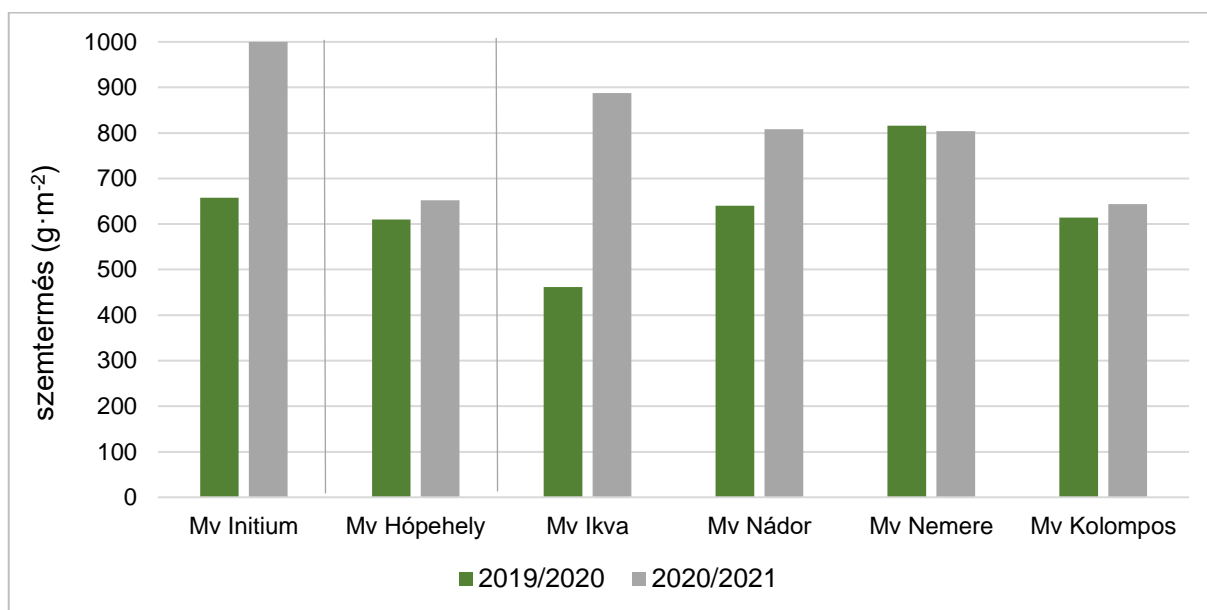
19. ábra: A liziméterekben fejlődött fajtáink biomassaértékei.

Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

4.3.2. A vizsgált fajták szemtermése liziméteres kísérleti rendszerben

A liziméterhengerekben fejlődött növények szemtermés értékei (20. ábra) alapján megállapítottuk, hogy a második tenyészidőszakban (2020/2021) több termést hoztak a vizsgált fajták, kivéve az Mv Nemere őszi búza-fajta. A 2019/2020-as tenyészidőszakban 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 tenyészidőszak 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 éréscsoportba tartozó fajtáknál (Mv Hópehely zabfajta és Mv Kolompos búzafajta) közel azonos mennyiségű volt a mért szemtermés (610 és $614 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). A két fajta között a második tenyészidőszakban 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 ősziarpa-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 (20. ábra).

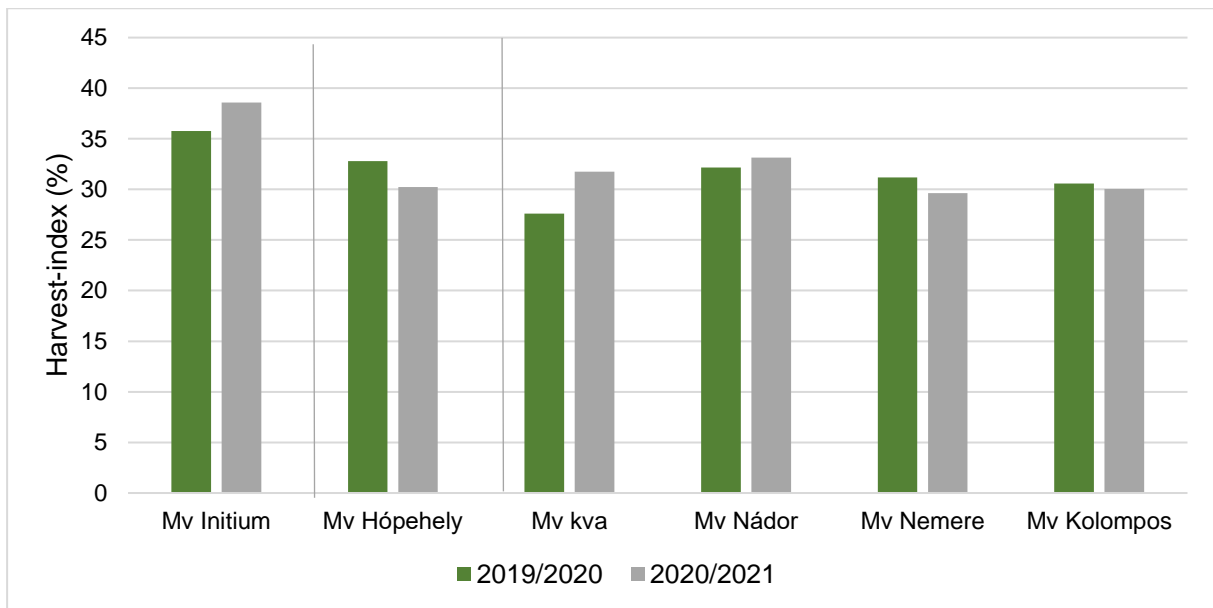


20. ábra: A liziméterekben fejlődött fajtáink szemtermésértékei.

Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

4.3.3. A vizsgált fajták Harvest-indexének meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

Az Mv Hópehely zabfajta, az Mv Nemere és Mv Kolompos búzafajtáknál az első vizsgált tenyészidőszakban (2019/2020), míg az Mv Initium árpa-fajta és az Mv Ikva és Mv Nádor búzafajták esetében a második vizsgált tenyészidőszakban (2020/2021) határozhattunk meg magasabb Harvest-indexet (21. ábra). Mindkét vizsgált időszakban a legmagasabb HI-értéket (36 és 39 %) a vizsgált árpa-fajtánál figyeltük meg (21. ábra), 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 (21. ábra).

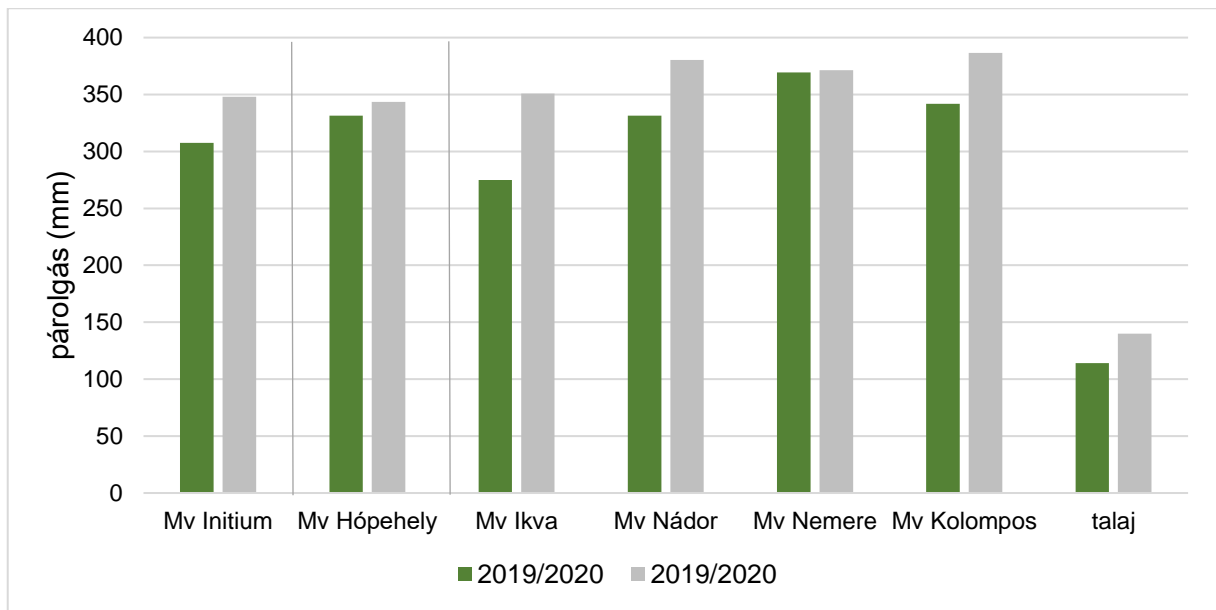


21. ábra: A liziméterekben fejlődött fajtáink Harvest-indexe.

Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

4.3.4. Az evapotranszspiráció meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

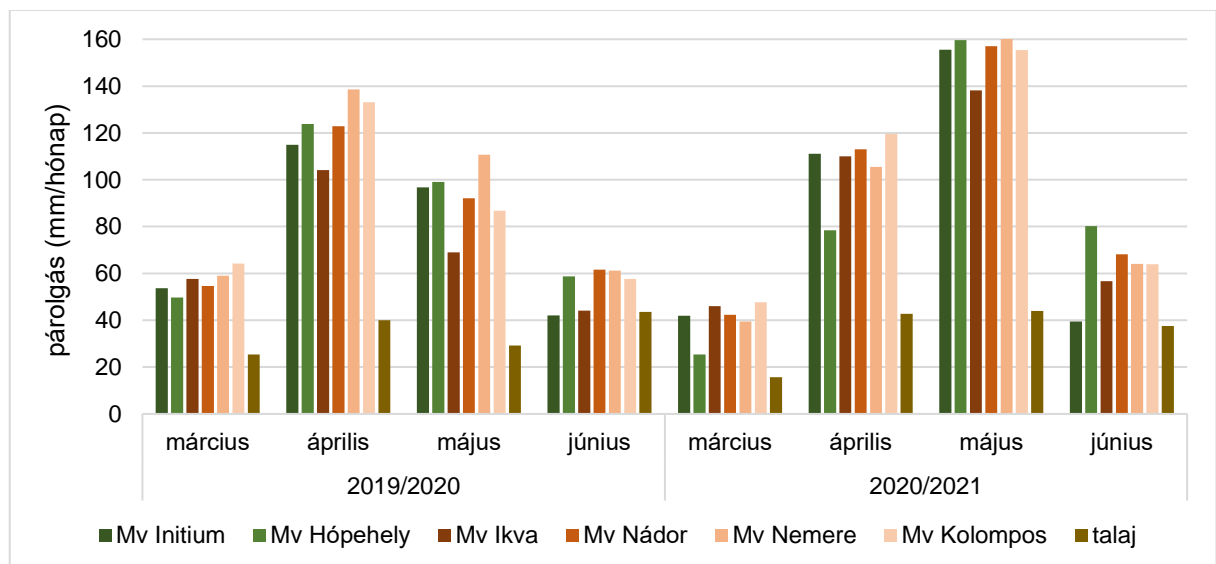
Az evapotranszspirációt, valamint a csupasz talajfelszínű liziméterhengerek átlagos evaporációját a 22. ábrán foglaltuk össze. A második vizsgált időszakban (2020/2021-es tenyészidőszak) figyeltünk meg magasabb értékeket. A 2019/2020-as időszakban a legmagasabb evapotranszspirációt (369 mm) az Mv Nemere búzafajtával, a legalacsonyabbat (275 mm) pedig Mv Ikva fajtával bevetett hengerben mértük. A második vizsgált időszakban a legmagasabb érték (386 mm) az Mv Kolompos búzafajta esetében adódott, míg a legalacsonyabbat (344 mm) az Mv Hópehely zabfajtánál állapítottunk meg. A vizsgált két tenyészidőszak között a legnagyobb különbséget az evapotranszspirációban (76 mm) az Mv Ikva búzafajtával bevetett hengerekben figyeltük meg, míg a legkisebb különbség (3 mm) az Mv Nemere búzafajta esetében adódott. A zab (Mv Hópehely) esetében szintén nem volt számottevő a két év közti különbség (13 mm) (22. ábra). Az első vizsgált időszakban az általunk meghatározott evapotranszspirációs értékek átlaga 326 mm volt, az átlagtól legnagyobb mértékben az Mv Ikva és Mv Nemere búzafajták esetében mért értékek tértek el. A második vizsgált tenyészidőszakban az átlagos evapotranszspiráció 363 mm volt, ebben az időszakban az Mv Kolompos és Mv Hópehely esetében figyelhetjük meg a legnagyobb eltéréseket az átlagértékekhez képest (22. ábra).



22. ábra: A vizsgált fajták evapotranszpirációja, valamint a talaj evaporációja március 1. és június 25. között.

Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

Az evapotranszpiráció havi összegei alapján (23. ábra) megfigyeltük, hogy az első vizsgált évben (2019/2020-as tenyészidőszak) áprilisban, a második évben (2020/2021-es tenyészidőszak) pedig májusban volt a legmagasabb az evapotranszpiráció havi összege, illetve márciusban és áprilisban az első, míg májusban és júniusban a második tenyészidőszakban párologtattak többet a növények. Ez alól kivételt képez az Mv Ikva őszi búza-fajta és Mv Initium őszi árpa-fajta. Az Mv Ikva búzafajta esetében 2021 májusában mérhettünk magasabb értéket, míg az árpafajtánál 2020 júniusában (23. ábra).

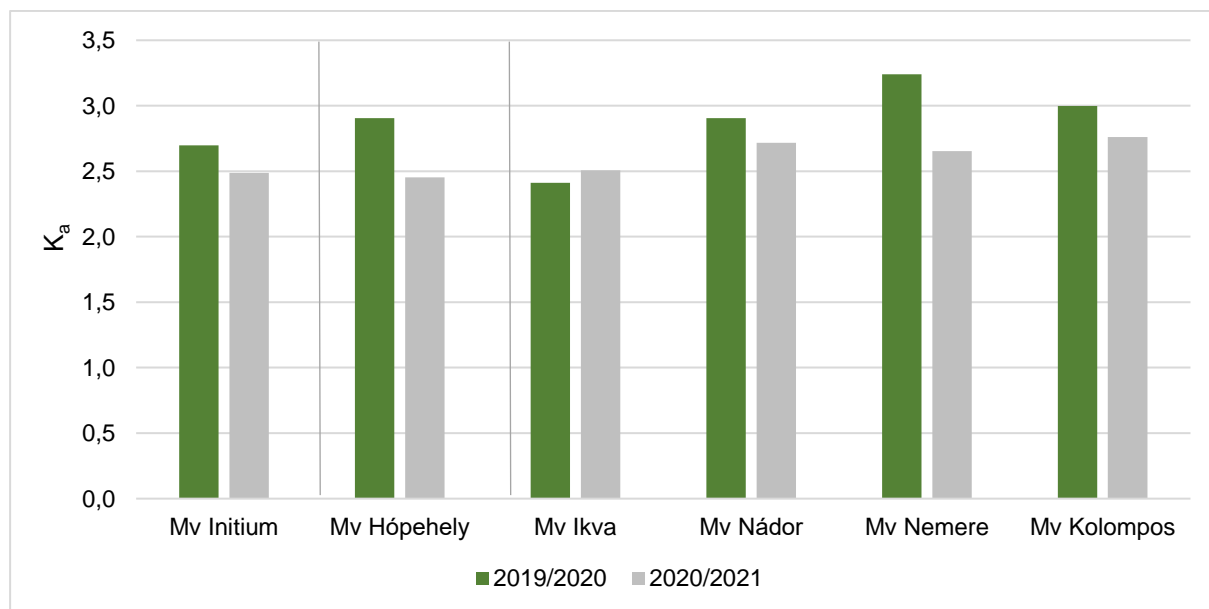


23. ábra: A vizsgált állományok evapotranszpirációja, valamint a talaj evaporációja havi bontásban, március 1. és június 25. között.

Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

4.3.5. A vizsgált fajták agronómiai konstansának meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

Az agronómiai konstans (K_a) a növényállomány evapotranszpirációjának és a talaj evaporációjának hányadosaként értelmeztük és az eredményeket a 24. ábrán foglaltuk össze. Az evapotranszpirációs értékekkel ellentétben a K_a esetében a második vizsgált időszakban (2020/2021-es tenyészidőszak) volt alacsonyabb ez az érték, kivéve a vizsgált korai érésű búzafajta (Mv Ikva) esetében. Az első vizsgált időszakban (2019/2020-as tenyészidőszak) a legmagasabb értéket (3,24) az Mv Nemere őszi búzájánál határoztunk meg, míg a legalacsonyabbat (2,41) Mv Ikva esetében. Az második vizsgált időszakban a legmagasabb értéket (2,76) Mv Kolompos őszi búzájánál számítottuk, míg a vizsgált zabfajta esetében a legalacsonyabbat (2,45). A vizsgált növények agronómiai konstansa 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 (24. ábra).

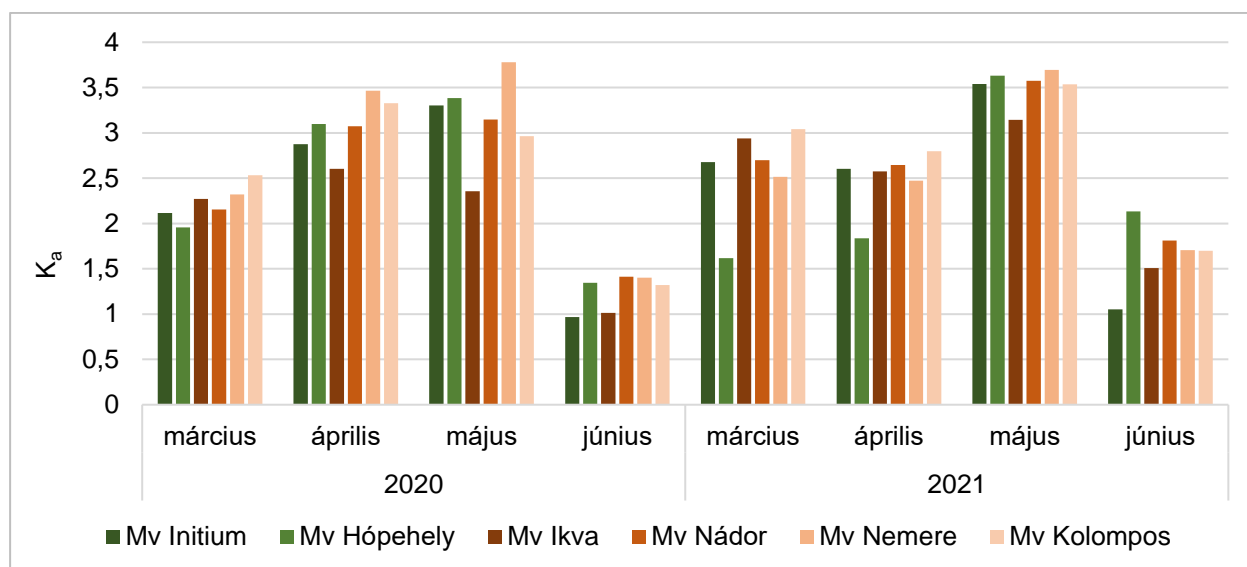


24. ábra: A liziméter rendszerben vizsgált fajták agronómiai konstansa március 1. és június 25. között.

Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

A vizsgált fajták agronómiai konstansát havi szinten is meghatároztuk (25. ábra). Megfigyeltük, hogy az első vizsgált év márciusától májusáig emelkedtek a K_a -értékei, majd júniusban ez a paraméter jelentős csökkenést mutatott; ami az éréssel párhuzamosan jelzi a növények vízfelhasználásának csökkenését. A második vizsgált évben is hasonló tendenciákat láthatunk, viszont Mv Hópehely őszi zab-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 őszi árpa-fajta (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 nedvességtartalmával magyarázható (25. ábra).

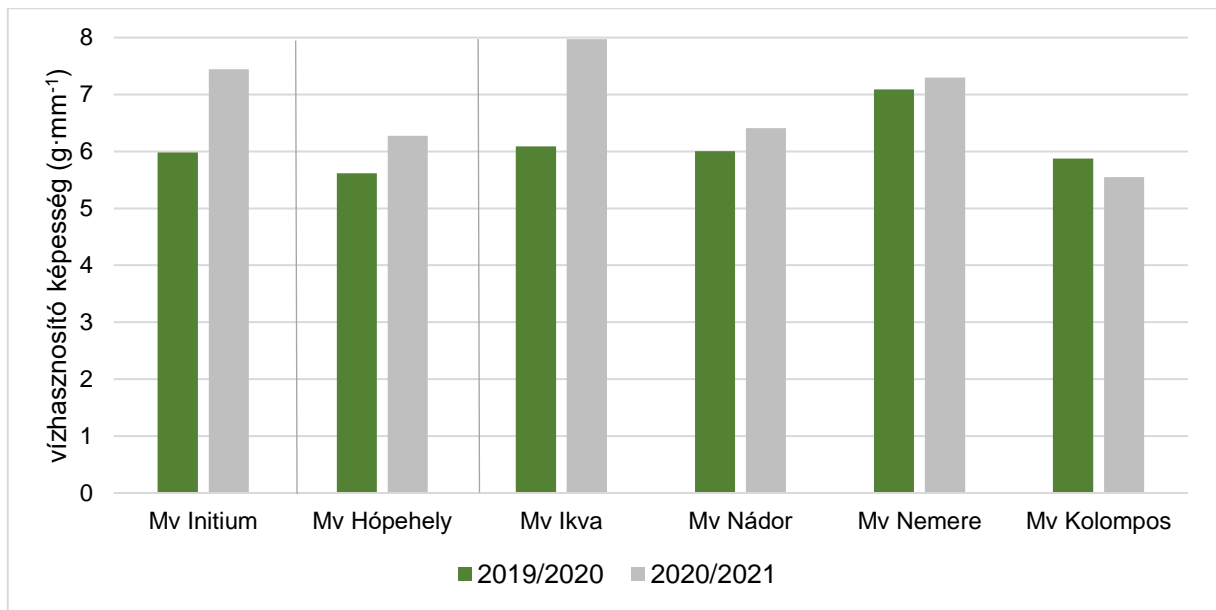


25. ábra: A liziméter rendszer vizsgált fajták agronómiai konstansa havi bontásban, március 1. és június 25. között.

Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

4.3.6. A vizsgált fajták vízhasznosító képességének meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

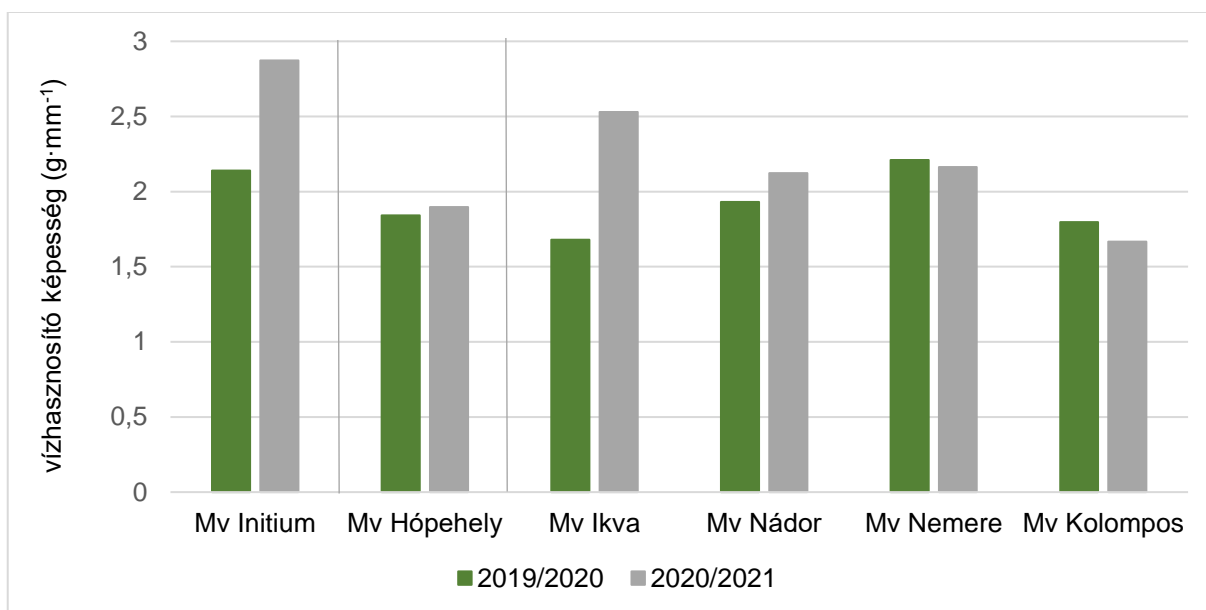
A liziméterhengerekben fejlődött növények vízhasznosítóképesség-értékeit kétféle módon számítottuk ki. A 26. ábrán a növényi biomassza alapján számított értékeket (WUE_{BM}) láthatjuk, a 27. ábrán pedig a szemtermés alapján meghatározott értékeket (WUE_{Sz}). A második vizsgált tenyészidőszakban (2020/2021) határoztunk meg magasabb WUE_{BM} -értéket minden vizsgált fajtánál, kivélt csak az Mv Kolompos őszi búza-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 (26. ábra). 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 az Mv Kolompos mutatta (26. ábra).



26. ábra: A liziméter rendszerben vizsgált fajták biomasszája alapján meghatározott vízhasznosító képessége.

Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

A szemtermésre vonatkoztatott vízhasznosító képesség a második vizsgált időszakban volt magasabb, kivéve az Mv Nemere és Mv Kolompos őszi búza-fajtákat (27. ábra). 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 ($1,67 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-1}$) (27. ábra). A két vizsgált év között a legkisebb különbségek az őszi zab-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) figyeltünk 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 (27. ábra).

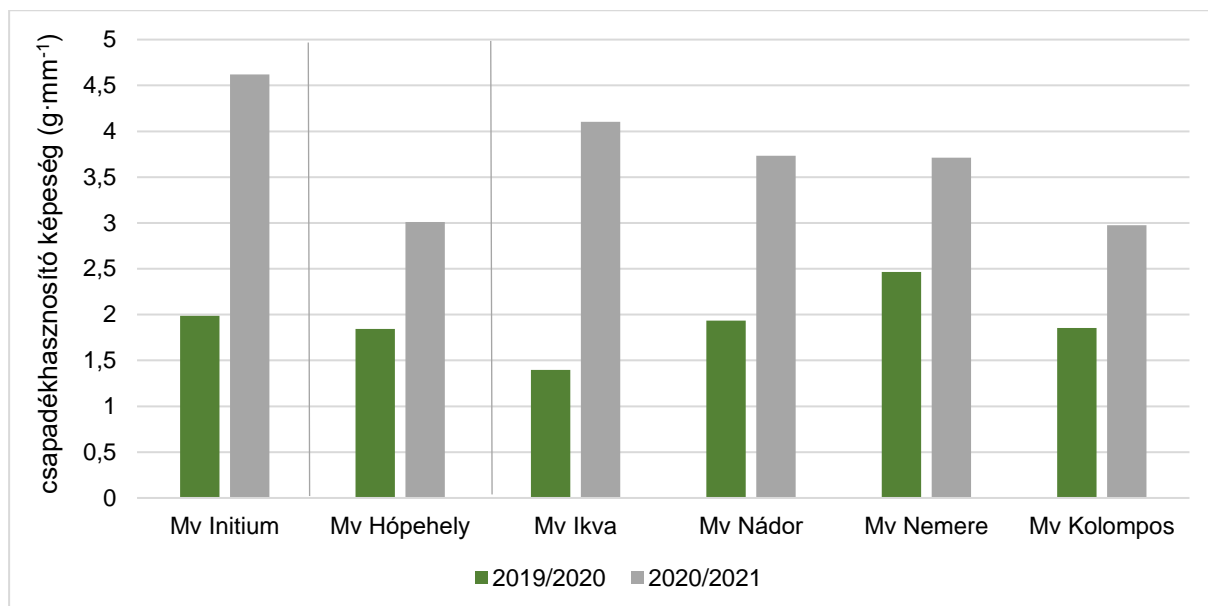


27. ábra: A liziméter rendszerben vizsgált fajták szemtermése alapján meghatározott vízhasznosító képessége.

Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

4.3.7. A vizsgált fajták csapadékhasznosító képességének meghatározása liziméteres kísérleti rendszerben

A csapadékhasznosító képességet is meghatároztuk vizsgált fajtáink esetében (28. ábra). A két vizsgált időszak közül a másodikban (2020/2021) figyelhattunk meg magasabb értékeket. Az első vizsgált tenyésztési időszakban (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 (28. ábra). 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 az Mv Kolompos búzafajta esetében figyeltük meg az első vizsgált időszakban és a vizsgált árpafajta (Mv Initium) esetében a második időszakban (28. ábra).



28. ábra: A liziméter rendszerben vizsgált fajták csapadékhasznosító képessége. Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza).

4.3.8. A liziméteres kísérleti rendszer eredményeinek megvitatása

Groh et al. (2020) liziméterrel végzett kutatásában a vizsgált őszi zab- és -búzafajták biomassa-értékei közel azonos értéket mutattak a különböző csapadékkellátottságú területen, az általuk vizsgált őszi árpa-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, 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 biomassza alapján számították a vízhasznosító képességet, akkor is a szárazabb területen határoztak meg magasabb értékeket. Zhang et al. (2015) tavaszi búza és csupasz zab vizsgálatokor 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 biomassza alapján számítottuk azt, Groh et al. (2020) munkájához hasonlóan.

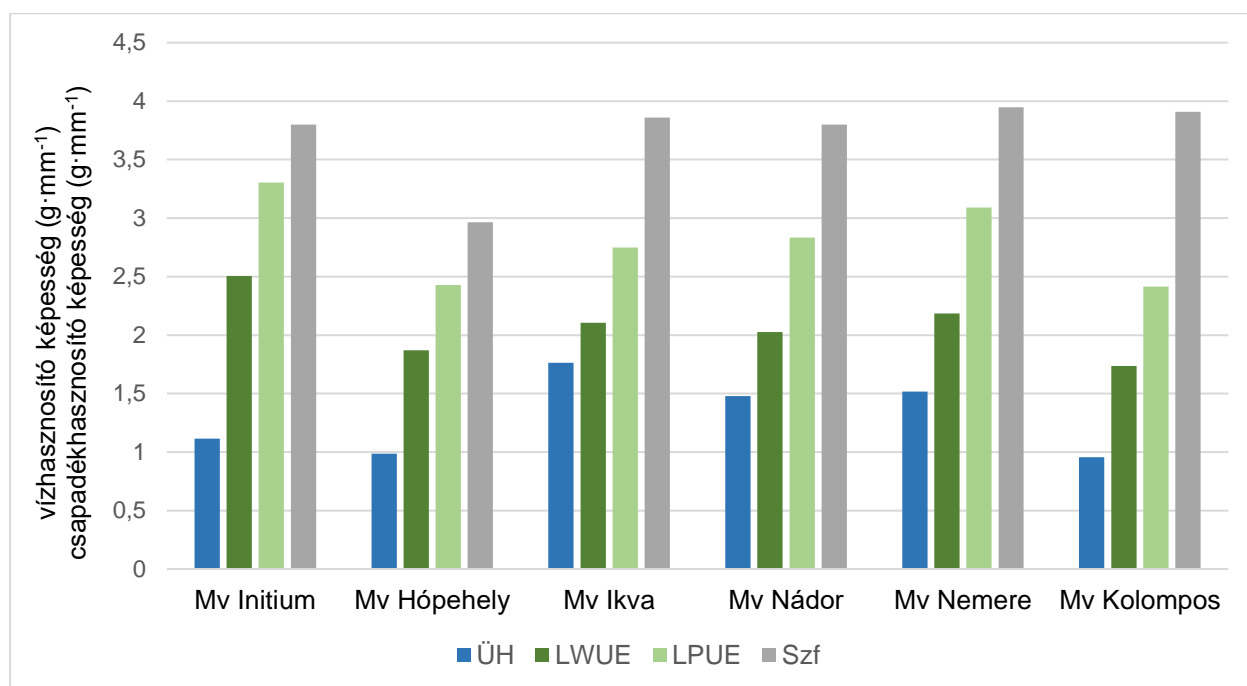
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A klímaváltozásának köszönhetően hazánkban egyre gyakrabban fordulnak elő extrém események - többek között az intenzív és hosszan tartó aszály - 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 üvegházi kamrákban beállított kísérleteinkben hat, martonvásári nemesítésű, őszi kalászos vizsgáltunk légköri és emelt szén-dioxid-koncentráción, három vízellátási szinten. Szabályozott klimatikus körülmények mellett a vízhiány és a széndioxid-koncentráció hatásait vizsgáltuk a kiválasztott fajtáink produkcióbiológiai és vízforgalmi paramétereire. A szimulált vízhiányos állapot minden esetben egy stressztényező, az emelt szén-dioxid-koncentráció pedig egy olyan faktor, melynek kapcsán számos kutatás rámutatott arra, hogy a fajok és fajták nagyon eltérő módon reagálnak a szén-dioxid szintjére. Így ez a kezelés lehet stresszor is egyben, de pozitív hatásai is lehetnek a produkcóra. 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 hatott, hanem mint egyfajta stimulátor volt jelen. Az árpafajtánál megfigyeltük, hogy az emelt szén-dioxid-koncentrációk nemcsak az alkalmazott aszálykezelések negatív hatásait enyhítették, de szignifikánsan javították a termőképességet is. Az őszi zab-fajta (Mv Hópehely) esetében a szén-dioxid koncentrációjának emelése stresszorként hatott, negatív szén-dioxid-reakciót figyelhettünk meg. A zabfajta érzékeny volt mindkét 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 fajtánkat (Mv Ikva) érintette legsúlyosabban a szárbainduláskor szimulált aszálykezelés, melyet a szén-dioxid-szint emelése sem tudott enyhíteni. A koriai érésű fajtánk esetében a CO₂-szint emelése stresszorként hatott. A középérésű fajtáinknál (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 megfigyelhető képest egyik vizsgált gabonafaj, illetve fajta 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.

Kutatásaink egyik célja a különböző módszerekkel meghatározott vízhasznosítóképesség-értékek összehasonlítása volt. A három különböző kísérleti rendszerben nevelt növények vízhasznosítóképesség- és csapadékhasznosítóképesség-értékeit a 29. ábrán összegeztük. Az általunk vizsgált fajták közül a zabfajta (Mv Hópehely) értékei voltak a legalacsonyabbak, mindhárom kísérleti rendszerben. A kései érésű Mv Kolompos őszi búza-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.

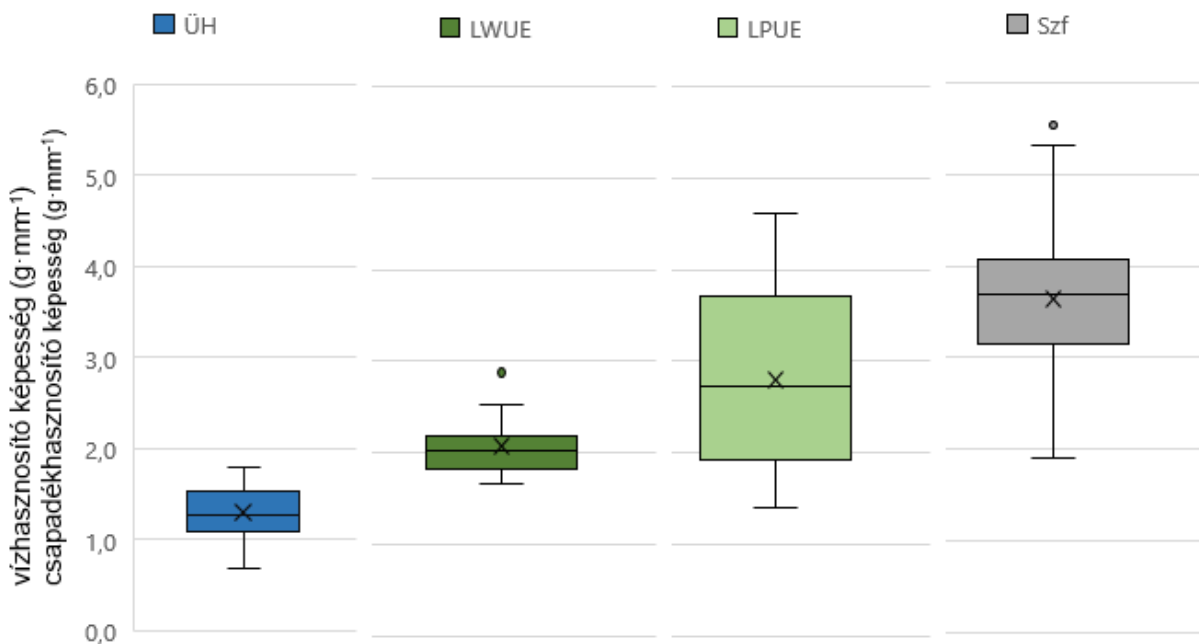


29. ábra: Különböző kísérleti rendszerekben nevelt kalászosok vízhasznosító és csapadékhasznosító képessége.

„ÜH”: üvegházi kísérleti rendszerben meghatározott vízhasznosító képesség; „LWUE”: liziméteres kísérleti rendszerben meghatározott vízhasznosító képesség; „LPUE”: a liziméteres kísérleti rendszerben meghatározott csapadékhasznosító képesség; „Szf”: szántóföldi kísérleti rendszerben meghatározott csapadékhasznosító képesség; Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza). Az üvegházi kísérleti rendszer oszlopa a vizsgált fajták légköri szén-dioxid-szinten, optimális vízellátású növényeinek WUE-értékének átlagát ábrázolja; a liziméteres kísérleti rendszer oszlopa két tenyészidőszakban (2019/2020 és 2020/2021) vizsgált fajták WUE- vagy PUE-értékének átlagát ábrázolja; a szántóföldi kísérleti rendszer oszlopa a két tenyészidőszakban (2019/2020 és 2020/2021) és a három termőhelyen (Martonvásár, Puszttaegres, Nyíregyháza) vizsgált fajták PUE-értékének átlagát ábrázolja.

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 (29. ábra). 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 mutat (30. ábra). A legalacsonyabb értékeket az üvegházi kísérleti rendszerben nevelt növények esetében határoztunk meg, melynél magasabb vízhasznosítóképesség-értékeket kaptunk a liziméterekben fejlődött növényeknél. A liziméterrendszerben meghatározott csapadékhasznosítóképesség-adatok magasabbak voltak a vízhasznosítóképesség-értékeknél. A legmagasabb értékeket a szántóföldi kísérleti rendszerben határozhattunk meg (30. ábra). A liziméteres kísérleti rendszer az evapotranszpiráció legpontosabb meghatározását teszi lehetővé, viszont a rendszer 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.



30. ábra: Különböző kísérleti rendszerekben nevelt kalászosok vízhasznosító és csapadékhasznosító képessége.

„ÜH”: üvegházi kísérleti rendszerben meghatározott vízhasznosító képesség; „LWUE”: liziméteres kísérleti rendszerben meghatározott vízhasznosító képesség; „LPUE”: a liziméteres kísérleti rendszerben meghatározott csapadékhasznosító képesség; „Szf”: szántóföldi kísérleti rendszerben meghatározott csapadékhasznosító képesség; Mv Initium (őszi árpa); Mv Hópehely (őszi zab); Mv Ikva (őszi búza); Mv Nádor (őszi búza); Mv Nemere (őszi búza); Mv Kolompos (őszi búza). Az üvegházi kísérleti rendszer oszlopa a vizsgált fajták légköri szén-dioxid-szinten, optimális vízellátású növényeinek WUE-értékének átlagát ábrázolja; a liziméteres kísérleti rendszer oszlopa két tenyészidőszakban (2019/2020 és 2020/2021) vizsgált fajták WUE- vagy PUE-értékének átlagát ábrázolja; a szántóföldi kísérleti rendszer oszlopa a két tenyészidőszakban (2019/2020 és 2020/2021) és a három termőhelyen (Martonvásár, Pusztagegres, Nyiregyháza) vizsgált fajták PUE-értékének átlagát ábrázolja.

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 tekintetében, 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.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Az őszi búza-, őszi árpa-, őszi zab-fajták vízhasznosító képességének meghatározására alkalmas, a liziméteres adatokkal validált, nagy átteresztő 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 vízhasznosítóképeség-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 megemlése 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.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A szén-dioxid és az egyéb üvegházhatású gázok légköri koncentráció emelkedésének hozadéka a klímaváltozás, mely érzékenyen érinti a mezőgazdaságot is. Az időjárási szélsőségek egyre gyakoribbá válása miatt a következő évtizedekben várhatóan több és intenzívebb aszályos időszakra számíthatunk. Az aszály az egyik legfontosabb abiotikus stresszfaktor, mely jelentősen csökkenti a növényi produktiót és a termőterületek jelentős hányadát érinti. Az aszálytűrő képesség fontos indikátora a növényi vízhasznosító képesség, hiszen a szén- és vízforgalom közötti kapcsolatra világít rá. A vízhasznosító képesség számszerűsítése fontos a klímaváltozásra adott növényi válaszok vizsgálatában, mely mérőszám a fajták között jelentős különbséget mutat és számos környezeti tényező befolyásolja.

Kutatásaink során martonvásári nemesítésű őszi kalászosok vízigényét és vízhasznosító képességét vizsgáltuk különböző kísérleti rendszerben. Egy ősziárpa-fajtát (Mv Initium), egy őszi zab-fajtát (Mv Hópehely) és négy őszi búza-fajtát (Mv Ikva, Mv Nádor, Mv Nemere, Mv Kolompos) vizsgáltunk üvegházban, liziméteres rendszerben és szántóföldi körülmények között. Az üvegházi kísérlet kontrollált körülményei lehetővé tették, hogy a szárazságstressz és a szén-dioxid-koncentráció produkcióra és a vízforgalomra gyakorolt együttes hatását vizsgálhassuk. Az optimális öntözés mellett két szárazságstressz-kezelés alkalmaztunk; vízmegvonást a növények szárbaindulásakor, illetve kalászolásakor. Azonos módon programozott kamrákban a CO₂-szintet kontroll légköri, valamint emelt (700 és 1000 ppm) szintekre állítottuk be. Szántóföldi kísérletben több termőhelyen (Martonvásár, Pusztaegres, Nyíregyháza), különböző klimatikus és talajadottságokkal rendelkező területen vizsgáltunk azonos fajtakört, két különböző tenyészedőszakban. A liziméteres rendszer rendkívül pontos méréseket tesz lehetővé, de a rendszer sajátosságaiból kifolyólag csak kevés ismétlésben vizsgálhattuk fajtaikat, két különböző tenyészedőszakban.

Az üvegházi kamrákban beállított kísérleteink eredményei alapján vizsgált fajták közül az alkalmazott szárazságstressz-kezelésre az Mv Hópehely zabfajta és Mv Ikva búzafajta volt a legérzékenyebb, valamint ezeknél a fajtáknál a szárazságstressz negatív hatásait a megemelt szén-dioxid-koncentráció sem tudta ellensúlyozni. Az Mv Kolompos és az Mv Initium fajták szárazságtűrők voltak üvegházi körülmények között. Ezek a genotípusok reagáltak továbbá legjobban a szén-dioxid-trágyázásra, a gáz mesterséges emelése enyhíteni tudta az alkalmazott aszálykezelések negatív hatásait. A légköri szinthez képest a szén-dioxid-koncentráció emelése csak 1000 ppm szinten volt pozitív hatású a vízigény tekintetében; az általunk vizsgált fajták vízfelvétele szignifikáns mértékben csökkent minden öntözési szinten (optimális vízellátás, vízmegvonás szárbainduláskor vagy kalászoláskor). 1000 ppm CO₂-koncentráción javult továbbá a

vizsgált árpa- és búzafajták vízhasznosító képessége (WUE) mindhárom kezelésben. A szántóföldi kísérletek alapján a vizsgált fajták szemtermése a csapadékosabb tenyészidőszakban volt magasabb Pusztáegresen és Nyíregyházán, a csapadékhasznosítóképesség-értékekben (PUE) fordított tendenciát figyelhettünk, a szárazabb időszakban határozhattunk meg magasabb értékeket Martonvásáron és Nyíregyházán. A liziméteres kísérleti rendszerben a fajták biomasszája, evapotranszpirációja (ET) és agronómiai konstansa (K_a) ellentétes tendenciát mutattak a két vizsgált évben. Míg a párologtatás és biomassza a szárazabb évben volt magasabb, addig a K_a -értékek a csapadékosabb évben, ez alól csak a vizsgált korai érésű búzafajta volt kivétel. A két év adatai közt a legnagyobb eltérést az ET-ban az Mv Ikva búzafajtánál figyeltük meg, míg az K_a -értékekben a különbségek ennél a fajtánál voltak a legkisebbek. Vizsgált fajták szemtermés- és WUE-eredményeit vizsgálva hasonló tendenciát figyeltünk meg, a kevésbé csapadékos évben volt magasabb mindkét érték, kivéve az Mv Nemere őszi búza-fajtát. Az Mv Kolompos őszi búza WUE-értéke is a második évben volt alacsonyabb. A PUE-értékek is a szárazabb tenyészidőszakban voltak magasabbak. A növények vízfelvételét üvegházi körülmények között összehasonlítva a liziméterhengerekben mért evapotranszpirációval azt tapasztaltuk, hogy kontrollált körülmények között a vizsgált árpa- és zabfajta értékei voltak a magasabbak, míg a szabadföldben fejlődött növényeknél ez a különbség kisebb volt vagy esetleg meg is haladta a búzák állományban mérhető evapotranszpirációját. A különböző rendszerekben nevelt növények WUE- vagy PUE-értékeit megfigyelve azt tapasztaltuk, hogy ha abszolút értékben nem is egyeztek meg, de a megfigyelt tendenciák, a fajták közötti különbségek azonosak voltak. A legalacsonyabb WUE-értékeket az üvegházi rendszerben határoztunk meg, melynél magasabb volt a liziméterekben fejlődött növények WUE-értéke. A liziméterrendszerben PUE-értéket is meghatároztunk, melyek magasabbnak bizonyultak a rendszerben meghatározott WUE-értékeknél. A vizsgált rendszerek között a legmagasabb értékek a szántóföldi rendszerben meghatározott PUE-értékek voltak. Az általunk vizsgált fajták közül a zab WUE- és PUE-értékei voltak a legalacsonyabbak, mindhárom rendszerben. Az Mv Kolompos is hasonlóan alacsony WUE-értékekkel rendelkezett az üvegházi és a liziméteres kísérleti rendszerben, de szántóföldön a fajta PUE-értékei a többi búzafajtaéhoz hasonlóan magasak voltak. A korai és középkorai érésű búzafajták vízhasznosító és csapadékhasznosító képessége hasonló trendet mutatott, mindhárom kísérleti rendszerben. Eredményeink alapján megállapítottuk, hogy a liziméterhengerekben meghatározott vízhasznosító képességben és a szántóföldön mért csapadékhasznosító képességben a fajták variabilitása azonos volt, illetve az üvegházi rendszer eredményei is követik a másik rendszerben meghatározott trendeket.

8. ABSTRACT

The increase in the atmospheric concentration of carbon dioxide and other greenhouse gases resulted in climate change, which has a great impact on agriculture. Due to the increasing frequency of extreme weather events, researchers expect an increase in the number and the severity of drought periods in the coming decades. Drought is one of the most determining abiotic stress factors, which significantly reduces plant production and affects a significant part of croplands. Water-use efficiency is an important indicator of drought tolerance in plants, as it sheds light on the relationship between the carbon cycle and the water cycle. The quantification of water-use efficiency has great importance in the study of plant responses to climate change, which shows significant differences between species or genotypes, and it is influenced by several environmental factors.

In our research, we investigated the water demand and water-use efficiency of different winter cereals in various experimental systems. One winter barley variety ('Mv Initium'), one winter oat variety ('Mv Hópehely') and four winter wheat varieties ('Mv Ikva', 'Mv Nádor', 'Mv Nemere', 'Mv Kolompos') were tested in greenhouse, lysimeters and under field conditions. The controlled conditions of the greenhouse system made it possible to examine the combined effects of drought stress and carbon dioxide concentration on production and water use properties. In addition to optimal irrigation, two drought stress treatments were used: water withdrawal by tillering or heading developmental stages. In identically programmed greenhouse chambers, the carbon dioxide level was set to control atmospheric level and elevated levels of 700 ppm and 1000 ppm. In the field experiments, we examined the same cultivars in two different growing seasons in areas with different soil and climatic conditions (Martonvásár, Pusztaegres, Nyíregyháza). The lysimeter system allowed extremely accurate measurements, but due to the specifics of the system, we could test our varieties only in a few repetitions, in two different growing seasons.

Based on the results of our greenhouse experiment, among the tested varieties, the oat ('Mv Hópehely') and wheat ('Mv Ikva') varieties were the most sensitive to the applied drought stress treatments, and in these genotypes, the elevated carbon dioxide concentrations could not alleviate the negative effects of drought. 'Mv Kolompos' and 'Mv Initium' were the most drought tolerant varieties under greenhouse conditions. Furthermore, these genotypes reacted most positively to carbon dioxide fertilization and the artificial increase of this gas could mitigate the negative effects of the applied drought treatments. Compared to the atmospheric level, the increase of the carbon dioxide concentration had a positive effect on water demand only at the 1000 ppm level; the water uptake of the varieties was significantly decreased at all irrigation levels (optimal, drought stress at tillering or heading stage). At 1000 ppm CO₂ concentration the water-use efficiency (WUE) of

the tested barley and wheat genotypes was improved at all irrigation levels. Based on our field experiments, the grain yield of the studied varieties was higher in Pusztaegres and Nyíregyháza during the wetter growing season, we could observe a reverse trend in the precipitation-use efficiency (PUE), higher values could be determined in Martonvásár and Nyíregyháza during the drier season. In the lysimeter experimental system the biomass, the transpiration, and the agronomic constants (K_a) of the tested varieties showed opposite trends in the two investigated years. While evapotranspiration (ET) and biomass production were higher in the drier year, the K_a values were higher in the wetter year. The only exception to this was the investigated early rippling wheat variety, in which case the K_a value was higher in the second year. The largest difference in ET between the two investigated years was observed for the 'Mv Ikva' variety, while the differences in the agronomic constant were the smallest for this variety. Examining the results of the grain yield and water-use efficiency of the tested cultivars we observed a similar trend, both values were higher in the wetter year, except for the 'Mv Nemere' wheat variety, in which case the grain yield and WUE were lower in the drier year. The WUE of 'Mv Kolompos' wheat variety was also lower in the second year. Comparing the water uptake of the plants under greenhouse conditions with the evapotranspiration measured in the lysimeters we found that under controlled conditions the values of the examined barley and oat cultivars were higher, while for the plants grown in the open field this difference was smaller or even exceeded the wheat varieties' evapotranspiration. Observing the WUE and PUE of the plants grown in different systems, we found that even if they did not match in absolute value, the observed trends and differences between the varieties were the same. The lowest WUE values were determined in the greenhouse system, where the WUE value of the plants grown in the lysimeters was higher, and the PUE of the plants grown in the lysimeters was higher than WUE. The PUE values of the plants tested in the field was the highest. The WUE and PUE values of oats were the lowest among the examined varieties, in all three systems. 'Mv Kolompos' also had similarly low WUE values in the greenhouse and lysimeter experimental systems, but in the fields, the cultivar's PUE values were similar to those of the other wheat varieties. The water-use and the precipitation-use efficiency of the early and middle rippling wheat varieties showed a similar trend in all examined experimental systems. Based on our results, we find that the variability of the cultivars in the WUE values determined in the lysimeters, and the PUE values determined in the field were the same, and the results of the greenhouse experiments also follow the trends determined in the other two systems.

9. MELLÉKLETEK

Ml. Irodalomjegyzék

- ABDELGAWAD, H., DE SOUA, A., ALOTAIBI, M.O., MOHAMMED, A.E., SCHOENAERS, S., SELIM, S., SALEH, A.M. (2021): The differential tolerance of C₃ and C₄ cereals to aluminum toxicity is faded under future CO₂ climate. In: *Plant Physiology and Biochemistry*, 169 249-258. p.
- ABDELHAKIM, L.O., PALMA, C.F.F., ZHOU, R., WOLLENWEBER, B., OTTOSEN, C.-O., ROSENQVIST, E. (2021): The effect of individual and combined drought and heat stress under elevated CO₂ on physiological responses in spring wheat genotypes. In: *Plant Physiology and Biochemistry*, 162 301-314. p.
- ABHINANDAN, K., SKORI, L., STANIC, M., HICKERSON, N.M.N.M., JAMSHEDM M., SAMUEL, M.A. (2018): Abiotic stress signaling in wheat – an inclusive overview of hormonal interactions during abiotic stress responses in wheat. In: *Frontiers in Plant Science*, 9 734.
- ADAMS III., W.W., MULLER, O., COHU, C.M., DEMMING-ADAMS, B. (2013): May photoinhibition be a consequence, rather than a cause, of limited plant productivity? In: *Photosynthesis Research*, 117 31-44. p.
- AGHELPOUR, P., MOHAMMADI, B., BIAZAR, S.M., KISI, O., SOURMIRINEZHAD, Z. (2020): A theoretical approach for forecasting different types of drought simultaneously, using entropy theory and machine-learning methods. In: *International Journal of Geo-Information*, 9 (12) 701.
- AGUIRRE, B.A., HSIEH, B., WATSON, S.J., WRIGHT, A.J. (2021): The experimental manipulation of atmospheric drought: teasing out the role of microclimate in biodiversity experiments. In: *Journal of Ecology*, 109 (5) 1986-1999. p.
- AINSWORTH, E.A., LONG, S.P. (2005): What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. In: *New Phytologist*, 165 351-372. p.
- AKTAR, Md. W., SENGUPTA, D., CHOWDHURY, A. (2009): Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazard. In: *Interdisciplinary Toxicology*, 2 (1) 1-12. p.
- AKHTAR, S. (2019): An overview of scientific debate of global warming and climate change. In: *Journal of Aquatic Sciences and Oceanography*, 1 201.
- ALATAWAY, A., AL-GHOBARI, H., MOHAMMAD, F., DEWINAR, A. (2019): Lysimeter-based water used and crop coefficient of drip-irrigated potato in an arid environment. In: *Agronomy*, 9 756.
- ANDA, A., SOÓS, G. (2016): Some physiological responses of agricultural crops to global warming. In: *Időjárás*, 120 85-101. p.
- ANDA, A., SIMON, B., SOÓS, G., TEIXEIRA DA SILVA, J.A., FARKAS, Z., MENYHÁRT, L. (2020): Assessment of soybean evaporation and controlled water stress using traditional and converted evapotranspirometer. In: *Atmosphere*, 11 (8) 830.
- ANWAR, M.N., FAYYAZ, A., SOHAIL, N.F., KHOKHAR, M.F., BAQAR, M., KHAN, W.D., RASOOL, K., REHAN, M., NIZAMI, A.S. (2018): CO₂ capture and storage: A way forward for sustainable environment. In: *Journal of Environmental Management*, 226 131-144. p.

- AQUILA, V., BALDWIN, C., MUKHERJEE, N., HACKERT, E., LI, F., MARSHAK, J. (2021): Impacts of the eruption of Mount Pinatubo on surface temperatures and precipitation forecasts with the NASA GEOS subseasonal-to-seasonal system. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126 e2021JD034830.
- ARRANZ-OTAEGUI, A., CARRETRE, L.G., RAMSEY, M.N., FULLER, D.Q., RICHTER, T. (2018): Archaeobotanical evidence reveals the origins of bread 14,400 years ago in northeastern Jordan. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115 (31) 7925-7930. p.
- ASLAM, M., ZAMIR, M.S.I., AFZAL, I., YASEEN, M., MUBEEN, M., SHOAB, A. (2013): Drought stress, its effect on maize production and development of drought tolerance through potassium application. In: *Cercetări Agronomice în Moldova*, 46 99-114. p.
- BARNABÁS, B., JÄGER, K., FEHÉR, A. (2008): The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. In: *Plant, Cell & Environment*, 31 11-38. p.
- BARTHOLY, J., GELYBÓ, R.P.G. (2007): Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. In: *Applied Ecology and Environmental Research*, 5 (1) 1-17. p.
- BÁNYAI, J., KISS, T., GIZAW, S.A., MAYER, M., SPITKÓ, T., TÓTH, V., KUTI, C., MÉSZÁROS, K., LÁNG, L., KARSAI, I. (2020): Identification of superior spring durum wheat genotypes under irrigated and rain-fed conditions. In: *Cereal Research Communications*, 48 355-364. p.
- BÁNYAI, J., MACCAFERRI, M., LÁNG, L., MAYER, M., TÓTH, V., CSÉPLŐ, M., PÁL, M., MÉSZÁROS, K., VIDA, G. (2021): Abiotic Stress response of near-isogenic spring durum wheat lines under different sowing densities. In: *International Journal of Molecular Sciences*, 22 2053.
- BEGUM, N., AHANGER, M.A., SU, Y., LEI, Y., MUSTAFA, N.S., AHMAD, P., ZHANG, L. (2019): Improved drought tolerance by AMF inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications. In: *Plants*, 8 (12) 579.
- BIENERTOVA-VASKU, J., LENART, P., SCHERINGER, M. (2020): Eustress and distress: neither good nor bad, but rather the same? In: *BioEssays*, 42 1900238.
- 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.
- BLANDINO, M., BADECK, F-W., GIORDANO, D., MARTIN, A., RIZZA, F., SCARPINO, V., VACCINO, P. (2020): Elevated CO₂ on common wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, wholemeal quality, and sanitary risk. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (39) 10574-10585. p.
- BLANKA, V., MEZŐSI, G., MEYER, B. (2013): Projected changes in the drought hazard in Hungary due to climate change. In: *Időjárás*, 117 (2) 219-237. p.
- BLUM, A. (2017): Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant reproduction. In: *Plant, Cell & Environment*, 40 (1) 4-10. p.
- BRANDOLINI, A., VOLANTE, A., HEUN, M. (2016): Geographic differentiation of domesticated einkorn wheat and possible Neolithic migration routes. In: *Heredity*, 117 135-141. p.
- BRADLEY, B. A., WILCOVE, D. S., OPPENHEIMER, M. (2010): Climate change increases risk of plant invasion in the Eastern United States. In: *Biological Invasions*, 12 (6) 1855-1872. p.
- BRIGGS, L. J., SHANTZ, H. L. (1913): The water requirement of plants – I. Investigations in the Great Plains in 1910 and 1911. In: *Bulletin*, 284 282-285. p.

- BUAH, S.S.J., IGRAHIM, H., DERIGUBAH, M., KUZIE, M., VUURO SEGTA, J. V., BAYALA, J., ZOUGMORE, R., OUEDRAOGO, M. (2017): Tillage and fertilizer effect on maize and soybean yields in the Guinea savannah zone of Ghana. In: *Agriculture and Food Security*, 6 (1) 17.
- BUERSTMAYR, H.; KRENN, N.; STEPHAN, U.; GRASGRUBER, H.; ZECHNER, E. (2007): Agronomic performance and quality of oat (*Avena sativa* L.) genotypes of worldwide origin produced under Central European growing conditions. *Field Crops Research*, 101 343-351. p.
- BUSKÓ, T.L. (2003): A hosszú távú demográfiai vizsgálat angol modellje. KSH NKI Történelmi Demográfiai Évkönyve. 371 pp. 271-295. p.
- BROBERG, M., HÖGY, P., & PLEIJEL, H. (2017): CO₂-induced changes in wheat grain composition: Meta-analysis and response functions. In: *Agronomy*, 7 (2) 32.
- CATTIVELLI, L., RIZZA, F., BADECK, F.W., MAZZUCOTELLI, E., MASTRANGELO, A.M., FRANCA, E., MARE, C., TONDELLI, A., STANCA, A.M., (2008): Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. In: *Field Crops Research*, 105 1-14. p.
- CHEN, Y., MAREK, G.W., MAREK, T.H., BRAUER, D.K., SRINIVASAN, R. (2018): Improving SWAT auto-irrigation functions for simulating agricultural irrigation management using long-term lysimeter field data. In: *Environmental Modelling & Software*, 99 25-38. p.
- CHMIELEWSKA, K., RODZIEWICZ, P., SWARCEWICZ, B., SAWIKIWSKA, A., KRAJEWSKI, P., MARCZAK, Ł., CIESIOŁKA, D., KUCZYŃSKA, A., MIKOŁAJCZAK, K., OGRODOWICZ, P., KRYSZKOWIAK, K., SURMA, M., ADAMSKI, T., BEDNAREK, P., STOBIECKI, M. (2016): Analysis of drought-induced proteomic and metabolomics changes in barley (*Hordeum vulgare* L.) leaves and roots unravels some aspects of biochemical mechanisms involved in drought tolerance. In: *Frontiers in Plant Science*, 7 1108.
- CHOWDHURY, J., KARIM, M., KHALIQ, Q., & AHMED, A. (2017): Effect of drought stress on bio-chemical change and cell membrane stability of soybean genotypes. In: *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 42 (3) 475-485. 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., ELSANAFAWY, 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.
- CHUN, J.A.; LI, S.; WANG, Q. (2016): Effects of Elevated Carbon Dioxide and Drought Stress on Agricultural Crops. In HOSSAIN, M., WANI, S., BHATTACHARJEE, S., BURRITT, D., TRAN, L.S., (Szerk.): *Drought Stress Tolerance in Plants*. Berlin/Heidelberg: Springer, Volume 1. 526 p.
- CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROVKIN, V., CANADELL, J., CHHABRA, A., DFRIES, R., GALLOAWAY, J., HEIMANN, M., JONES, C., LeQUÉRE, MYNENI, R.B., PIAO, R.B., THORNTON, P. (2013): Carbon and other biogeochemical cycles. 465-570. p. In: TIGNOR M, ALLEN SK, BOSCHUNG J, NAUELS A, XIA Y, BEX V, MIDGLEY PM. (Szerk.): *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 465-570. p.
- COLLIER, R.J., BAUMGARD, L.H., ZIMBELMAN, R.B., XIAO, Y. (2019): Heat stress: physiology of acclimation and adaptation. In: *Animal Frontiers*, 9 (1) 12-19. p.

- COOKE, G.W. (1965): Trágyázás és jövedelmező gazdálkodás. Budapest: Mezőgazdasági Kiadó. 198. p.
- CORSO, D., DELZON, S., LAMARQUE, L.J., COCHARD, H., TORRES-RUIZ, J.M., KING, A., BRODRIBB, T. (2020): Neither xylem collapse, cavitation, nor changing leaf conductance drive stomatal closure in wheat. In: *Plant, Cell & Environment*, 43 (4) 854-865. p.
- COUSSEMENT, J.R., VILLERS, S.L.Y., NELISSEN, H., INZÉ, D., STEPPE, K. (2021): Turgor-time controls grass leaf elongation rate and duration under drought stress. In: *Plant, Cell & Environment*, 44 (5) 1361-1378. p.
- CRAUSBAY, S.D., RAMIREZ, A.R., CARTER, S.L., CROSS, M.S., HALL, K.R., BATHKE, D.J., BETANCOURT, J.L., COLT, S., CRAVENS, A.R., DALTON, M.S., DUNHAN, J.B., HAY, L.E., HAYES, M.J., McEVOY, J., McNUTT, C.A., MORITZ, M.A., NISLOW, K.H., RAHEEM, N., SANFORND, T. (2017): Defining ecological drought for the twenty-first century. In: *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (12) 2543-2550. p.
- CROWLEY, L.M., SADLER, J.P., PRITCHARD, J., HAYWAND, S.A.L. (2021): Elevated CO₂ on plant-pollinator interactions: a systematic review and free air carbon enrichment field study. In: *Insects*, 12 (6) 512.
- CRUZ, Y. DA C., SCARPA, A.L.M., PEREIRA, M.P., CASTRO, E.M. DE, PEREIRA, F.J. (2019): Growth of *Typha domingensis* as related to leaf physiological and anatomical modifications under drought conditions. In: *Acta Physiologiae Plantarum*, 41 1-9. p.
- CSEH, E. (2007): Vízforgalom. In: LÁNG, F. (Szerk.) *Növényélettan – A növényi anyagcsere I-II.*, Budapest: ELTE Eötvös Kiadó 999 pp.
- DAI, A. (2013): Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3 52-58. p.
- DAI, M., HUANG, S., HUANG, Q., GUOYONG, L., GUO, Y., WANG, L., FANG, W., LI, P., ZHENG, X. (2020): Assessing agricultural drought risk and its dynamic evolution characteristics. In: *Agricultural Water Management*, 231 106003.
- DANGI, A.K., SHARMA, B., KHANGWAL, I., SHUKLA, P. (2018): Combinatorial interactions of biotic and abiotic stresses in plants and their molecular mechanism: systems biology approach. In: *Molecular Biotechnology*, 60 636-650. p.
- D'AMICO-DAMIÃO, V., CARVALHO, R.F. (2018): Cryptochrome-related abiotic stress responses in plants. In: *Frontiers in Plant Science*, 9 1897
- DEL BUONO, D. (2021): Can biostimulants be used to mitigate the effect of anthropogenic climate change on agriculture? It is time to respond. In: *Science of the Total Environment*, 751 141763.
- DEUTHMANN, D.; BLÖSCHL, G. (2018): Why has catchment evaporation increased in the past 40 years? A data-based study in Austria. In: *Hydrology and Earth System Sciences*, 22 5143-5158. p.
- DIETZ, K.-J., ZÖRB, C., GEILFUS, C.-M. (2021): Drought and crop yield. In: *Plant Biology*, 23 (6) 881-893. p.
- 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.
- DOBOLYI, C. S., SEBŐK, F., VARGA, J., KOCSUBÉ, S., SZIGETI, G., BARANYI, N., SZOBOSZLAY, S. (2013): Occurrence of aflatoxin producing *Aspergillus flavus* isolates in maize kernel in Hungary. In: *Acta Alimentaria*, 42 (3) 451-459. p.

- DOLFERUS, R., JI, X., RICHARDS, R.A., (2011): Abiotic stress and control of grain number in cereals. In: *Plant Science*, 181 331-341. p.
- 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.
- DUNCAN, E.W., KLEINMAN, P.J., FOLMAR, G.J., SAPORITON, L., FEYEREISEN, G.W., BUDA, A.R. (2017): Field scale lysimeters to assess management impacts on runoff. In: *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 60 419-429. p.
- DUNN, J., HUNT, L., AFSHARINAFAR, M., AL MESELMANI, M., MITCHELL, A., HOWELLS, R., WALLINGTIN, E., FLEMING, A.J., GRAY, J.E. (2019): Reduced stomatal density in bread wheat leads to increased water-use efficiency. In: *Journal of Experimental Botany*, 70 (18) 4737-4748. p.
- DUSENGE, M.E., DUARTE, A.G., WAY, D.A. (2019): Plant carbon metabolism and climate change: elevated CO₂ and temperature impacts on photosynthesis, photorespiration and respiration. In: *New Phytologist*, 221 32-49. p.
- ERNST, R.E., YOUBI, N. (2017): How large igneous provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record. In: *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 478 30-52. p.
- EVANS, J.R. (2021): Mesophyll conductance: walls, membranes and spatial complexity. In: *New Phytologist*, 229 1864-1876. p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). The Future of Food and Agriculture – Alternative Pathways to 2050. Summary Version; FAO: Rome, Italy, 2018; 60p.
- 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.
- FARKAS, ZS. (2020): A növények vízhasznosító képességének számítási módjai és meghatározó faktorai. In: *Kertgazdaság*, 53 (3) 76-89. p.
- 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, 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., VEISZ, O., VARGA, B. (2022): Az emelkedő légköri szén-dioxid-koncentráció vajon enyhíteni tudja-e a gabonákat is érintő súlyos aszálykárokat? In: *Agrofórum*, 33 (9) 32-33 p.
- FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; SIDDIQUE, K.H. (2014): Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. In: *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33 331-349. p.
- FICKLIN, D.L., NOVICK, K.A. (2017): Historic and projected changes in vapour pressure deficit suggest a continental-scale drying of the United States atmosphere. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122 2061-2079. p.
- FISCHER, T.P., AIUPPA, A. (2020): AGU centennial grand challenge: volcanoes and deep carbon global CO₂ emissions from subaerial volcanism – recent progress and future challenges. In: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21: e2019GC008690.

FITZGERALD, G.J., TAUSZ, M., O'LEARY, G., MOLLAH, M.R., TAUSZ-POSCH, S., SENEWEERA, S. (2016): Elevated atmospheric CO₂ can dramatically increase wheat yields in semi-arid environments and buffer against heatwaves. In: *Global Change Biology*, 22 2269-2284. p.

FODOR, F. (2013): A növények vízháztartása, ásványi táplálkozása, transzportfolyamatok. 29-66. p. In: BRATEK, Z., FODOR, F., KIRÁLY, I., NYITRAI, P., PARÁDI, I., RÁCZ, I., RUDNÓY, SZ., SÁRVÁRI, É., SOLTI, Á., SZIGETI, Z., TAMÁS, L. (Szerk): *A növényi anyagcsere élettana*. Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem. 379. p.

FODOR, N., PÁSZTOR, L. (2010): The agro-ecological potential of Hungary and its prospective development due to climate change. In: *Applied Ecology and Environmental Research*, 8 (3) 177-190. p.

FOULKES, M.J., SYLVESTER-BRADLEY, R., WEIGHTMAN, R., SNAPE, J.W., (2007): Identifying physiological traits associated with improved drought resistance in winter wheat. In: *Field Crops Research*, 103 11-24. p.

FRIEDLINGSTEIN, P., JONES, M.W., O'SULLIVAN, M., ANDREW, R.M., HAUCK, J., PETERS, G.P., PETERS, W., PONGRATZ, J., SITHC, S., LE QUÉRÉ, C., BAKKER, D.C.E., CANADELL, J.G., CIAIS, P., JACKSON, R.B., ANTHPNI, P., BARERO, L., BASTOS, A., BASTRIKOV, V., BECKER, M., BOPPR, L., BUITENHUIS, W., CHANDRA, N., CHEVALLIER, F., CHIHIN, L.P., CURRIE, K., I., FEELEY, R.A., GEHLEN, M., GILGILLAN, D., KHRITZALIS, T., GOLL, D.S., GRUBER, N., GUTEKUNST, S., HARRIS, I., HAVERD, V., HOUGHTIN, R.A., HURTT, G., ILYIANA, T., JAIN, A.K., JOETZJER, E., KAPLAN, J.O., KATO, E., GOLDEWIJK, K.K., KORSBAKKEN, J.I., LANDSCHÜTZER, P., LAUVSET, S.K., LEFÉVRE, N., LENTON, A., LIENERT, S., LOMBARDOZZI, D., MARLAND, G., MCGUIRE, P.C., MELTON, J.R., METZL, N., MUNRO, D.R., NABERL, J.E.M.S., NAKAOKA, S-I., NEILL, C., OMAR, A.M., ONO, T., PEREGON, A., PIERROT, D., PUOLTER, B., REHDER, G., RESPLANDY, L., ROBERTSON, E., RÖDENBECK, C., SÉFÉRIAN, R., SCHWINGER, J., SMITH, N., TANS, P.P., TIAN, H., TILBROOK, B., TUBIELLO, F., N., VAN DER WERF, G.R., WILTSHIRE, A.J., ZAEHLE, S. (2019): Global carbon budget 2019. In: *Earth System Science Data*, 11 1783-1838. p.

FRIEDLINGSTEIN, P., O'SILLIVAN, M., JONES, M.W., ANDREW, R.M., HAUCK, J., OLSEN, A., PETERS, G.P., PETERS, W., PONGRATZ, J., SITCH, S., LE QUÉRÉ, C., CANADELL, J.G., CIAIS, P., JACKSON, R.B., ALIN, S., ARAGAO, L.E.O.C., ARNETH, A., ARORA, V., BATES, N.R., BECKER, M., BENOIT-CATTIN, A., BITTIG, H.C., BOPP, L., BULTAN, S., CHANDRA, N., CHEVALLIER, F., CHINI, L.P., EVANS, W., FLORENTIE, L., FORSTER, P.M., GASSER, T., GEHLEN, M., GIFILLAN, D., GKRTZALIS, T., GREGOR, L., GRUBER, N., HARRIS, I., HARTUNG, K., HAVERD, V., HOUGHTON, R.A., ILYINA, T., JAIN, A.K., JOETZJER, E., KADONO, K., KATON, E., KITIDIS, V., KORSBAKKEN, J.I., LANDSCHÜTZER, P., LEFÉVRE, N., LENTON, A., LIENERT, S., LIU, Z., LOMBARDOZZI, D., MARLAND, G., METZL, N., MUNRO, D.R., NABERL, J.E.M.S., NAKAIKA, S-I., NIWA, Y., O'BRIEN, K., ONO, T., PALMER, P.I., PIERROT, D., POULTER, B., RESPLAMDY, L. ROBERTSON, E., RÖDENNECK, C., SCHWINGER, J., SÉFÉRIAN, R., SKJELVAN, I., SMITH, A.J.P., SUTTON, A.J., TANHUA, T., TANS, P.P., TIAN, H., TILBROOK, B., VAN DER WERF, G., VUICHARD, N., WALKER, A.P., WINNINKHOF, R., WATSON, A.J., WILLIS, D., WILTSHIRE, A.J., YUAN, W., YUE, X., ZAEHLE, S. (2020): Global carbon budget 2020. In: *Earth System Science Data*, 12 3269-3340. p.

FUCHS, L.K., JENKINS, G., PHILLIPS, D.W. (2018): Anthropogenic impacts on meiosis in plants. In: *Frontiers in Plant Science*, 9 1429.

- FUKAI, S., PANTUWAN, G., JONGDEE, B., COOPER, M. (1999): Screening for drought resistance in rainfed lowland rice. In: *Field Crop Research*, 64 61-74. p.
- FURUTANI, R., MAKINO, A., SUZUKI, Y., WASA, S., SHIMAKAWA, G., MIYAKE, C. (2020): Intrinsic fluctuations in transcriptome induced photorespiration to oxidize P700 in Photosystem I. In: *Plants*, 9 (12) 1761.
- GAÁL, M., QUIROGA, S., & FERNÁNDEZ-HADDAD, Z. (2014): Potential impacts of climate change on agricultural land use suitability of the Hungarian counties. In: *Regional Environmental Change*, 14 (2) 597-610. 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.
- GATTUSO, J.-P., MAGNAN, A.K., BOPP, L., CHEUNG, W.W.L., DUARTE, C.M., HINKEL, J., McLEOD, E., MICHELI, F., OSCHLIES, A., WILLIAMSON, P., BILLÉ, R., CHALSATANI, V.I., GATES, R.D., IRISSON, J.-O., MIDDELBURG, J.J., PÖRTNER, H.-O., RAU, G.H. (2018): Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems. In: *Frontiers in Marine Science*, 5 337.
- GÁLOS, B., LORENZ, P., JACOB, D. (2007). Will dry events occur more often in Hungary in the future? In: *Environmental Research Letters*, 2 (3) 034006.
- GÁMEZ, A.L., VICENTE, R., SANCHEZ-BRAGADO, R., JAUREGUI, I., MORCUENDE, R., GIOCOECHEA, N., ARANJUELO, I. (2020): Differential flag leaf and ear photosynthetic performance under elevated [CO₂] conditions during grain filling period in durum wheat. In: *Frontiers in Plant Science*, 11 587958.
- GUO, Y., HUANG, S., HUANG, Q., WANG, H., WANG, L., FANG, W. (2019): Copulas-based bivariate socioeconomic drought dynamic risk assessment in changing environment. In: *Journal of Hydrology*, 575 1052-1064. p.
- GUO, Y., HUANG, S., HUANG, Q., LENG, G., FANG, W., WANG, L., WANG, H. (2020): Propagation threshold of meteorological drought for triggering hydrological drought at various levels. In: *Science of The Total Environment*, 712 136502.
- GYÉMÁNT, R., KATONA, T. (2014): Demográfia. Szeged: Pólay Elemér Alapítvány 231. p.
- GOWDY, J. (2020): Our hunter-gatherer future: Climate change, agriculture and uncivilization. In: *Futures*, 115 102844.
- GROH, J., VANDERBORGHT, J., PÜTZ, T., VOGER, H.-J., GRÜNDLING, R., RUPP, H., RAHMATI, M., SOMMER, M., VEREECKEN, 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.
- GUAN, X., MA, J., HUANG, J., HUANG, R., ZHANG, L., MA, Z. (2019): Impact of oceans on climate change in drylands. In: *Science China Earth Sciences*, 62 (6) 891-908. p.
- HAAK, D.C., FUKAO, T., GRENE, R., HUA, Z., IVANOV, R., PERRELLA, G., LI, S. (2017): Multilevel regulation of abiotic stress responses in Plants. In: *Frontiers in Plant Science*, 8 1564.
- HASANUZZAMAN, MD., SHABALA, L., BRODRIBB, T.J., ZHOU, M., SHABALA, S. (2019): Understanding physiological and morphological traits contributing to drought tolerance in barley. In: *Journal of Agronomy and Crop Science*, 205 (2) 129-140. p.

- HASEGAWA, T., SAKAI, H., TOKIDA, T., NAKAMURA, H., ZHU, C.W., USUI, Y. (2013): Rice cultivar responses to elevated CO₂ at two free-air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan. In: *Functional Plant Biology*, 40 148-159. p.
- HERRING, S.C., CHRISTIDIS, N., HOELL, A., KOSSIN, J.P., SCHRECK III., C.J. STOTT, P.A. (2018): Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective. In: *Bulletin of American Meteorological Society*, 99 (1) 1-157. p.
- HIERRO, J.L., CALLAWAY, R.M. (2021): The ecological impact of allelopathy. In: *Annuals Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 52 25-45. 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.
- HOFFMANN, L.A. (1995): World production and use of oats. 34-61. p. In: Welch, R.W., (Szerk.): *The Oat Crop—Production and Utilization*. London: Chapman and Hall, 584 p.
- HOWELL, T.A., SCHNEIDER, A.D., JENSEN, M.E. (1991): History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In: Allen, R.G., Howell, T.A., Pruitt, W.O., Walter, I.A., Jensen, M.E. (Szerk.): *Lysimetry: Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements*. The American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, 1-9. p.
- HUSSEN, A. (2020): Review on: Response of cereal crops to climate change. In: *Advances in Bioscience and Bioengineering*, 8 (4) 63-72. p.
- IGREJAS, G.; BRANLARD, G. (2020): The importance of wheat. 1-7. p. In: Igrejas, G., Ikeda, T., Guzmán (Szerk.): *Wheat Quality for Improving Processing and Human Health*. Berlin/Heidelberg: Springer, 557. p.
- INOUYE, D.W. (2020): Effects of climate change on alpine plants and their pollinators. In: *Annals of The New York Academy of Sciences*, 1469 (1) 26-37. p.
- IPCC (2014): Technical summary. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2014.
- IPCC (2015): Fifth Assessment Report (AR5), *Climate Change 2014, Synthesis Report Summary for Policymakers*; Intergovernmental Panel on Climate Change: Washington, DC, USA, 2015.
- JEYASRI, R., MUTHURAMALINGAN, P. SATISH, L., PANDIAN, S.K., CHEN, J-T., AHMAR, S., WANG, X., MORA.POBLETE, F., RAMESH, M. (2021): An overview of abiotic stress in cereal crops: negative impacts, regulation, biotechnology and integrated omics. In: *Plants*, 10 (7) 1472.
- JIMÉNEZ-DE-LA-CUESTA, D.; MAURISTEN, T. (2019): Emergent constraints on Earth's transient and equilibrium response to doubled CO₂ from post-1970 global warming. In: *National Geoscience*, 12 902-905. p.
- JIN, J., TANG, C., SALE, P. (2015): The impact of elevated carbon dioxide on the phosphorus nutrition of plants: a review. In: *Annals of Botany*, 116 (6) 987-999. p.
- KARLSSON, T., KAUPPILA, P. M., LEHTONEN, M. (2018): Potential for beneficial reuse of waste rocks from Kevitsa and Hitura mines: indicative data from lysimeter tests. In: *Geological Survey of Finland, Bulletin*, 408 43-58. p.

- KATO, Y., KAMOSHITA, A., YAMAGISHI, J. (2008): Preflowering abortion reduces spikelet number in upland rice under water stress. In: *Crop Science*, 48 2389-2395 p.
- KEENAN, T.F., PRENTICE, I.C., CANADELL, J.G., WILLIAMS, C.A., WANG, H., RAUPACH, M., COLLATZ, J. (2016): Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enchanted terrestrial carbon uptake. In: *Nature Communications*, 7 13428.
- 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.
- KIM, H.J., CHO, A.R., PARK, K.S., KIM, Y.J. (2017): Effect of CO₂ enrichment on growth and flowering of Phalaenopsis. In: *The Horticulture Journal*, 83 (3) 389-394. p.
- KIMBALL, B.A. (2016): Crop responses to elevated CO₂ and interactions with H₂O, N and temperature. In: *Current Opinion in Plant Biology*, 31 36-43. p.
- KOCACINAR, F., SAGE, R.F. (2005): Hydraulic properties of the xylem in plants of different photosynthetic pathways. 517-533. p. In: *Vascular Transport in Plants*. Academic Press, 592. p.
- KONAPALA, G., MISHRA, A.K., WADA, Y., MANN, M.E. (2020): Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. In: *Nature Communications*, 11 3040.
- KORRES, N. E., NORSWORTHY, J. K., TEHRANCHIAN, P., GITSOPOULOS, T. K., LOKA, D. A., OOSTERHUIS, D. M., GEALY, D. R., MOSS, S. R., BURGOS, N. R., MILLER, M. R., & PALHANO, M. (2016): Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: a review. In: *Agronomy for Sustainable Development*, 36 (1) 12.
- KUMAR, S., DWIVEDI, S. K., BASU, S., KUMAR, G., MISHRA, J. S., KOLEY, T. K., RAO, K.K., CHOUDHARY, A.K., MONDAL, S., KUMAR, S., BHAKTA, N., BHATT, B.P., PAUL, R.K. KUMAR, A. (2020): Anatomical, agro-morphological and physiological changes in rice under cumulative and stage specific drought conditions prevailed in eastern region of India. In: *Field Crops Research*, 245 107658.
- KUROWSKA, M.M (2021): Aquaporins in cereals – important players in maintaining cell homeostasis under abiotic stress. In: *Genes*, 12 (4) 477.
- LANCASHIRE, P.D., BLEIHOLDER, H., BOOM, T.V.D., LANGELÜDDEKE, P., STAUSS, R., WEBER, E., WITZENBERGER, A. (1991): A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. In: *Annals of Applied Biology*, 119 561-601. p.
- LÁNG, F. (2007): Fotoszintézis. In: LÁNG, F. (Szerk.) *Növényélettan – A növényi anyagcsere I-II.*, Budapest: ELTE Eötvös Kiadó 999 pp.
- LAWLOR, D.W., CORNIC, G. (2002): Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. In: *Plant, Cell & Environment*, 25 275-294. p.
- LAWSON, T., OXBOROUGH, K., MORISON, J.I.L., BAKER, N.R. (2003): The response of guars and mesophyll cell photosynthesis to CO₂, O₂, light and water stress in a range of species are similar. In: *Journal of Experimental Botany*, 54 (388) 1743-1752. p.
- LEAKEY, A.D.B., BISHOP, K.A., AINSWORTH, E.A. (2012): A multi-biome gap in understanding of crop and ecosystem responses to elevated CO₂. In: *Current Opinion in Plant Biology*, 15 228-236. p.
- LECLERC, J.A., BAILEY, L.H., WESSLING, H.L. (1918): Milling and baking tests of einkorn, emmer, spelt, and polish wheat. In: *Agronomy Journal*, 10 215-217. p.

- LEITINGER, G., FRENCK, G., TAPPEINER, U., OBOJES, N., NEWSELY, C., WELLSTEIN, C., SCANDELLARI, F., THOMA, M., TAGLIAVINI, M., TASSER, E. (2017): Valorization of grassland management for the water supply in context with climate change. In: 17. Gumpensteiner lysimeteragung, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft. Raumberg-Gumpenstein, Austria, 145-148. p.
- LEVITT, J. (1980): Responses of plants to environmental stresses. New York: Academic Press Inc. 497 p.
- LEVITT, J. 1982: Stress terminology. 437–439. P. In: Turner N. C., Kramer P. J. (Szerk.): *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. New York, Wiley-Interscience. 482. 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.
- LI, X., LV, X., WANG, X., WANG, L., ZHANG, M., REN, M. (2018): Effects of abiotic stress on anthocyanin accumulation and grain weight in purple wheat. In: *Crop and Pasture Science*, 69 (12) 1208-1214. p.
- LINDSEY, R., DAHLMAN, L. (2021): Climate Change: Global Temperature. Sciences & information for a climate-smart nation (NOAA). <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>. 2022.09.26.
- LIPIEC, J., DOUSSAN, C., NOSALEWICZ, A., KONDRACKA, K. (2013): Effect of drought and heat stresses on plant growth and yield: a review. In: *International Agrophysics*, 27 463-477. 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.
- MA, J., LI, R., WANG, H., LI, D., WANG, X., ZHANG, Y., ZHEN, W., DUAN, H., YAN, G., LI, Y. (2017): Transcriptomics analyses reveal wheat responses to drought stress during reproductive stages under field conditions. In: *Frontiers in Plant Science*, 8 592. p.
- MACEDO, A.F. (2012): Abiotic Stress Responses in Plants: Metabolism to Productivity. 41-43. p. In: AHMAD P., PRASAD M. (Szerk.) *Abiotic Stress Responses in Plants*. New York: Springer, 473. p.
- MADANI, B., MIRSHAKAR, A., IMAHORI, Y. (2019): Physiological responses to stress. In: Yahia, E.M. (szerk.) *Postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables*. Amsterdam: Elsevier, 476. p.
- MAGHSOUDI, K., EMAM, Y., ASHRAF, M., ARVIN, M.J. (2019): Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. In: *Crop & Pasture Science*, 70 36-43. p.
- MAIER, U. (1996): Morphological studies of free-threshing wheat ears from a Neolithic site in southwest Germany, and the history of naked wheats. In: *Vegetation History and Archaeobotany*, 5 39-55. p.

- MAJEED, A., MUHAMMAD, Z., ISLAM, S., AHMAD, H. (2019): Salinity imposed stress on principal cereal crops and employing seed priming as a sustainable management approach. In: *Acta Ecologica Sinica*, 39 (4) 280-283. 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.
- MASLIN, M. (2016): Forty years of linking orbits to ice ages. In: *Nature*, 540 208-209. p.
- MATHIASSEN, M.E., RAHAN, S.M. (2020): Wild bee declines linked to plant-pollinator changes and plant species introduction. In: *Insect Conservation and Diversity*, 13 (6) 595-605. p.
- MATZRAFI, M., SEIWERT, B., REEMTSMA, T., RUBIN, B., PELEG, Z. (2016): Climate change increases the risk of herbicide-resistant weeds due to enhanced detoxification. In: *Planta*, 244 (6) 1217-1227. p.
- MCGRATH, J.M., LOBELL, D.B. (2013): Regional disparities in the CO₂ fertilization effect and implications for crop yields. In: *Environmental Research Letters*, 8 014054.
- 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.
- MEDRANO, H., TOMÁS, M., MARTORELL, S., FLEXAS, J., HERNÁNDEZ, E., ROSSELLÓ, J., BOTA, J. (2015): From leaf to whole-plant water use efficiency (WUE) in complex canopies: Limitations of leaf WUE as selection target. In: *The Crop Journal*, 3 (3) 220-228. p.
- MEHRAN, A., MAZDIYASNI, O., AGHAKOUCHAK, A. (2015): A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: linking between climate variability, local resilience, and demand. In: *Journal of Geophysical Research*, 120 7520-7533. 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.
- MENCIN, M., ABRAMOVIĆ, H., JAMNIK, P., MIKULIČ PETKOVŠEK, M., VEBERIČ, R., TERPINC, P. (2021): Abiotic stress combinations improve the phenolics profiles and activities of extractable and bound antioxidants from germinated spelt (*Triticum spelta* L.) seed. In: *Food Chemistry*, 128704.
- MOTT, K.A. (1988): Do stomata respond to CO₂ concentrations other than intercellular? In: *Plant Physiology*, 86 200-203. p.
- NYITRAI, P., SOLTI, Á. (2013): Fotoszintézis. 67-130. p In: BRATEK, Z., FODOR, F., KIRÁLY, I., NYITRAI, P., PARÁDI, I., RÁCZ, I., RUDNÓY, SZ., SÁRVÁRI, É., SOLTI, Á., SZIGETI, Z., TAMÁS, L. (Szerk): *A növényi anyagcsere élettana*. Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem. 379. p.
- NASA (2019): The atmosphere: getting a handle on carbon dioxide. Available online: <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/> (2022.09.26.).
- NISA, W., NISA, V., NAGOO, SA., DAR, ZA. (2019): Drought tolerance mechanism in wheat: A review. In: *The Pharma Innovation Journal*, 8 (2) 714-724. p.
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. Available online: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/monthly.html> 2022.09.26.

- OLEJARZ, J., IWASA, Y., KNOLL, A.H., NOWAK, M.A. (2021): The Great Oxygenation Event as a consequence of ecological dynamics modulated by planetary change. In: *Nature Communications*, 12 3985.
- OLIVEIRA, H.R., JACOCKS, L., CZAJKOWSKA, B.I., KENNEDY, S.L., BROWN, T.A. (2020): Multiregional origins of the domesticated tetraploid wheats. In: *PLoS ONE*, 15 (1) e0227148.
- ORTIZ-BOBEA, A.; AULT, T.R.; CARILLO, C.M.; CHAMBERS, R.G.; LOBELL, D.B. (2021): Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. In: *Nature Climate Change*, 11 306-312. p.
- OWENS, M.J. LOCKWOOD, M., HAWKINS, E., USOSKIN, I., JONES, G.S., BARNARD, L., SCHURER, A., FASULLO, J. (2017): The Maunder minimum and the Little Ice Age: an update from recent reconstructions and climate simulations. In: *Journal of Space Weather and Space Climate*, 7 A33.
- PASHKOVSKIY, P.P., VANKOVA, R., ZLOBIN, I.E., DOBREV, P., IVANOV, Y.V., KARTASHOV, A.V., KUZNETSOV, V.V. (2019): Comparative analysis of abscisic acid levels and expression of abscisic acid-related genes in Scots pine and Norway spruce seedling under water deficit. In: *Plant Physiology and Biochemistry*, 140 105-112. p.
- PASSIOURA, J.B. (2002): Environmental biology and crop improvement. In: *Functional Plant Biology*, 29 537-546. 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.
- PETERSON, A.G., SCHLEGEL, A.J., TANAKA, D.L., JONES, O.R. (1996): precipitation use efficiency as affected by cropping and tillage systems. In: *Journal of Production Agriculture*, 9 (2) 180-186. p.
- PHAKELA, K., VAN BILJON, A., WENTZEL, B., GUZMAN, C., LABUSCHANGE, M.T. (2021): Gluten protein response to heat and drought stress in durum wheat as measured by reverse phase – high performance liquid chromatography. In: *Journal of Cereal Science*, 100 103267.
- PHELPS BROWN, E.H., HOPKINS, S.V. (1955): Seven centuries of building wages. In: *Economica*, 22 (87) 195-206. p.
- PIECZKA, I., BARTHOLY, J., PONGRACZ, R., & HUNYADY, A. (2009): Climate change scenarios for Hungary based on numerical simulations with a dynamical climate model. In: *International Conference on Large-Scale Scientific Computing*. Berlin, Springer. 613-620. p.
- PONGRÁCZ, R., BARTHOLY, J., MIKLÓS, E. (2011): Analysis of projected climate change for Hungary using ensembles simulations. In: *Applied Ecology and Environmental Research*, 9 (4) 387-398. p.
- POTTERS, G., PASTERNAK, T. P., GUISEZ, Y., PALME, K. J., JANSEN, M. A. K. (2007): Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? In: *Trends in Plant Science*, 12 98-105. p.
- PRABA, M.L., CAIRNS, J.E., BABU, R.C., LAFITTE, H.R., (2009): Identification of physiological traits underlying cultivar differences in drought tolerance in rice and wheat. In: *Journal of Agronomy and Crop Science*, 195 30-46. p.
- PÜTZ, T., KIESE, R., WOLLSCHLAGER, U., GROH, J., RUPP, H., ZACHARIAS, S., PRIESACK, E., GERKE, H. H., GASCHKE, R., BENS, O., BORG, E., BAESSLER, C., KAISER,

- K., HERBRICH, M., MUNCH, J.-C., SOMMER, M., VOGEL, H.-J., VANDERBORGHT, J., VEREECKEN, H. (2016): TERENO-SOILCan – A lysimeter network in Germany observing soil processes and plant diversity influenced by climate change. In: *Environmental Earth Sciences*, 75 1242.
- 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.
- RANG, Z.W., JAGADISH, S.V.K., ZHOU, Q.M., CRAUFURD, P.Q., HEUER, S., (2011): Effect of high temperature and water stress on pollen germination and spikelet fertility in rice. In: *Environmental and Experimental Botany*, 70 58-65. p.
- REICH, P.B.; HOBBIE, S.E.; LEE, T.D. (2014): Plant growth enhancement by elevated CO₂ eliminated by joint water and nitrogen limitation. In: *Nature Geoscience*, 7 920-924. p.
- RENNER, S.S., ZOHNER, C.M. (2018): Climate change and phenological mismatch in tropic interactions among plants, insects, and vertebrates. In: *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 49 165-182. p.
- REZAEI, E.E., SIEBERT, S., HÜGING, H., EWERT, F. (2018): Climate change effect on wheat phenology depends on cultivar change. In: *Scientific Reports*, 8 4891.
- 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.
- RODRIGUES-CORRÊA, K. C. DA S.; FETT-NETO, A. G. (2019): Abiotic Stresses and Non-Protein Amino Acids in Plants. In: *Critical Reviews in Plant Sciences*, 38 (5-6) 411-430. 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.
- ROMANO, M., RUBIDGE, B., SARDELLA, R. (2021): A century since the recognition of cyclic climate change by Milanković. In: *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, 53 9-13. p.
- POWELL, N., JI, X., RAVASH, R., EDLINGTON, J., DOLFERUS, R. (2012): Yield stability for cereals in a changing climate. In: *Functional Plant Biology*, 39 539-552. 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.
- SAGAN, C., CHYBA, C. (1997): The early faint sun paradox: organic shielding of ultraviolet-labile greenhouse gases. In: *Science*, 276 (5316) 1217-1221. p.
- SAIRANEN, I., NOVÁK, O., PĚNČÍK, A., IKEDA, Y., JONES, B., SANDBERG, G., LJUNG, K. (2012). Soluble carbohydrates regulate auxin biosynthesis via PIF proteins in *Arabidopsis*. In: *Plant Cell*, 24 (12) 4907-4916. p.
- SAKLANI, N., KHURANA, A. (2019): Global warming: effect on living organism, causes and its solutions. In: *International Journal of Engineering and Management Research*, 09 (05) 24-26. p.
- SAMARAH, N.H., (2005): Effects of drought stress on growth and yield of barley. In: *Agronomy for Sustainable Development*, 25 145-149. 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.
- SAUD, S., FAHAD, S., YAJUN, C., IHSAN, M.Z., HAMMAD, H.M., NASIM, W., AMANULLAH, Jr., ARIF, M., ALHARBY, H. (2017): Effects of nitrogen supply on water stress and recovery mechanism in Kentucky Bluegrass plants. In: *Frontiers in Plant Science*, 8 983.
- SARADADEVI, R., PALTA, J.A., SIDDIQUE, K.H.M. (2017): ABA-mediated stomatal response in regulating water use during the development of terminal drought in wheat. In: *Frontiers in Plant Science*, 8 1251.
- 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.
- SCHRAUWERS, A. (2020): Colonies of benevolence: A carceral archipelago of empire in the greater Netherlands. In: *History and Anthropology*, 31 (3) 352-370. p.
- SELYE, H. (1936): A syndrome produced by diverse nocuous agents. In: *Nature*, 138 32.
- SELYE, H. (1964): From dream to discovery: on being a scientist. New York, McGraw-Hill Book Comp., 419 p.
- SELYE, H. (1973): The evolution of the stress concept. In: *American Scientist*, 61 692-699. p.
- SELYE, H. (1976): Stress without distress. In: Serban G. (Szerk.): *Psychopathology of human adaptation*. New York: Springer. 137-146. p
- SEMENOV, M.A.; STRATONOVITCH, P.; ALGHABARI, F.; GOODING, M.J. (2014): Adapting wheat in Europe for climate change. In: *Journal of Cereal Science*, 59 245-256. p.
- SETTER, T.L.; WATERS, I. (2003): Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats. In: *Plant and Soil*, 253 1-34. p.
- SHAFIQ, I., HUSSAIN, S., RAZA, M.A., IQBAL, N., ASGHAR, M.A., RAZA, A., FAN, Y., MUMTAZ, M., SHOAB, M., ANSAR, M., MANAF, A., YANG, W., YANG, F. (2021): Crop photosynthetic response to light quality and light intensity. In: *Journal of Integrative Agriculture*, 20 (1) 4-23. p.
- SHAHRYARI, R.; MOLLASADEGHI, V. (2011): Introduction of two principal components for screening of wheat genotypes under end seasonal drought. In: *Advances in Environmental Biology*, 5 519-522. p.
- SHOKAT, S., GROßKINSKY, D.K., LIU, F. (2021): Impact of elevated CO₂ on two contrasting wheat genotypes expose 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.
- SZEGLETES, Z.; ERDEI, L.; TARI, I.; CSEUZ, L. (2000): Accumulation of osmoprotectants in wheat cultivars of different drought tolerance. In: *Cereal Research Communications*, 28 403-410. p.
- SZIGETI, Z. (2007): Növények és a stressz. In: LÁNG, F. (Szerk.) *Növényélettan – A növényi anyagcsere I- II.*, Budapest: ELTE Eötvös Kiadó 999 pp.
- SZIGETI, Z. (2018): A növényi stresszel kapcsolatos felfogásunk változásai. In: *Botanikai Közlemények*, 105 (2) 165-178. p.

- SUN, J., DU, W. (2017): Effects of precipitation and temperature on net primary productivity and precipitation use efficiency across China's grassland. In: *GIScience & Remote Sensing*, 54 (2) 881-897.
- TADAYYON, A., NIKNESHAN, P., PESSARAKLI, M. (2017): Effects of drought stress on concentration of macro- and micro-nutrients in castor (*Ricinus communis* L.) plant. In: *Journal of Plant Nutrition*, 41 (3) 304-310. p.
- TAMBUSSI, E.A., BORT, J., GUIAMET, J.J., NOGUÉS, S., ARAUS, J.L. (2007): The photosynthetic role of ears in C₃ cereals: metabolism, water use efficiency and contribution to grain yield. In: *Critical Reviews in Plant Science*, 26 1-16. p.
- TERRER, C., PHILLIPS, R.P., HUNGATE, B.A., ROSENDE, J., PETT-RIDGE, J., CRAIG, M.E., VAN GROENIGEN, K.J., KEENAN, T.F., SULMAN, B.N., STOCKER, B.D., REICH, P.B., PELLEGRINI, A.F.A., PENDALL, E., ZHANG, H., EVANS, R.D., CARRILLO, Y., FISHER, J.B., VAN SUNDER, K., VICCA, S., JACKSON, R.B. (2021): A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂. In: *Nature*, 591 (7851) 599-603. 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.
- THOMAS, H. (1995): Oats. In: SMARTT, J., SIMMONDS, N.W. (Szerk.): *Evolution of crop plants*. Harlow: Longman Scientific & Technical, Burnt Mill. 132-137 p
- THOMPSON, M., GAMAGE, D., HIROTSU, N., MARTIN, A., SENEWEERA, S. (2017): Effects of elevated carbon dioxide on photosynthesis and carbon partitioning: a perspective on root sugar sensing and hormonal crosstalk. In: *Frontiers in Physiology*, 8 578.
- 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.
- TISCHNER, T., KÓSZEGI, B., VEISZ, O. (1997): Climatic programs used in the Martonvásár phytotron most frequently in recent years. In: *Acta Agronomica Hungarica*, 45 85-104. p.
- TRÁJER, A. J., MLINÁRIK, L., HAMMER, T., FÖLDÉNYI, R., SOMLAI, J., BEDEFÁZEKAS, Á. (2020): Investigation of the vulnerability of a partly covered karst feature in Veszprem, Hungary. In: *Environmental Science and Pollution Research*, 1-17. p.
- TRÁJER, A.J., PÁLDY, A. (2021): Az antropogén éghajlatváltozás várható növény-, állat- és humánegészségügyi következményei a 21. század második felében. In: *Egészségtudomány*, 65 (1) 4-29. p.
- TRENBERTH, K.E. (2018): Climate change caused by human activities is happening and it already has major consequences. In: *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 36 (4) 463-481. p.
- TRIPATI, A., DARBY, D. (2018): Evidence for ephemeral middle Eocene to early Oligocene Greenland glacial ice and pan-Arctic sea ice. In: *Nature Communication*, 9 1038.
- ULLAH, H.; SANTIAGO-ARENAS, R.; FERDOUS, Z.; ATTIA, A.; DATTA, A. (2019): Chapter Two - Improving water use efficiency, nitrogen use efficiency, and radiation use efficiency in field crops under drought stress: A review. In: *Advances in Agronomy*, 156 109-157. p.

- ULFAT, A.; SHOKAT, S.; LI, X.; FANG, L.; GROBKINSKY, 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.
- UN (United Nations) DESA/ Population Division (2022): World population to reach 8 billion on 15 November 2022. (un.org)
- VAEIZI, B., BAVEI, V., SHIRAN, B. (2010): Screening of barley genotypes for drought tolerance by agro-physiological traits in field condition. In: *African Journal of Agricultural Research*, 5 881-892. P.
- van HERWAARDEN, A.F., ANGUS, J.F., RICHARDS, R.A., FARQUHAR, G.D. (1998): Haying-off, the negative grain yields response of dryland wheat to nitrogen fertilizer. II. Carbohydrate and protein dynamics. In: *Australian Journal of Agricultural Research*, 49 1083-1093. p.
- VARANASI, A., PRASAD, P. V., JUGULAM, M. (2016): Impact of climate change factors on weeds and herbicide efficacy. In: *Advances in agronomy*, 135 107-146. p.
- VARGA, B.; VARGA-LÁSZLÓ, E.; BENCZE, S.; BALLA, K.; VEISZ, O. (2013): Water use of winter cereals under well-watered and drought-stressed conditions. In: *Plant, Soil & Environment*, 59 150-155. p.
- 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.
- VARGA, B., FARKAS, Z., VARGA-LÁSZLÓ, E., VIDA, GY., VEISZ, O. (2022): Elevated atmospheric CO₂ influences the rooting habits of winter-wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties. In: *Sustainability*, 14 (6) 3304.
- VARGA-LÁSZLÓ, E., PUSKÁS, K., VARGA, B., FARKAS, Z., VEISZ, O., VIDA, G. (2020): Analysis of genetic factors defining head blight resistance in an old Hungarian wheat variety-based mapping population. In: *Agronomy*, 10 1128.
- VÁRY, Z., MULLINS, E., MCELWAIN, J.C., DOOHAN, F.M. (2015): The severity of wheat diseases increases when plants and pathogens are acclimatized to elevated carbon dioxide. In: *Global Change Biology*, 21 2661-2669. p.
- VÉGH, B., MARČEK, T., KARSAL, I., JANDA, T., DARKÓ, É. (2018): Heat acclimation of photosynthesis in wheat genotypes of different origin. In: *South African Journal of Botany*, 117 184-192. p.
- VILÀ, M.; BEAURY, E.M.; BLUMENTHAL, D.M.; BRADLEY, B.A.; EARLY, R.; LAGINHAS, B.B.; TRILLO, A.; DUKES, J.S.; SORTE, C.J.B.; IBÁÑEZ, I (2021): Understanding the combined impacts of weeds and climate change on crops. In: *Environmental Research Letters*, 16 (3) 034043.
- VON CAEMMERER, S. (2020): Rubisco carboxylase/oxygenase: From the enzyme to the globe: A gas exchange perspective. In: *Journal of Plant Physiology*, 252 153240.

- VON UNOLD, G., FANK, J. (2008): Modular design of field lysimeters for specific application needs. In: *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 8 (2) 233-242. p.
- WANG, L., YUAN, X. (2018): Two types of flash drought and their connections with seasonal drought. In: *Advances in Atmospheric Sciences*, 35 (12) 1478-1490. p.
- WANG, A., LAM, S.K., HAO, X., LI, F.Y., ZONG, Y., WANG, H., LI, P. (2018): Elevated CO₂ reduces the adverse effects of drought stress in a high-yielding soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) cultivar by increasing water use efficiency. In: *Plant Physiology and Biochemistry*, 132 660-665. p.
- WIJewardana, Y. N. S., Shilpadi, A. T., Mowjood, M. I. M., Kawamoto, K., Galagedara, L. W. (2017): Ground-penetrating radar (GPR) responses for sub-surface salt contamination and solid waste: Modeling and controlled lysimeter studies. In: *Environmental Monitoring and Assessment*, 189 57.
- 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.
- WU, J.; LI, J.-C.; WEI, F.-Z.; WANG, C.-Y.; ZHANG, Y.; SUN, G. (2014): Effects of nitrogen spraying on the post-anthesis stage of winter wheat under waterlogging stress. In: *Acta Physiologiae Plantarum*, 36 207-216. 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.
- YANG, J.; ZHANG, J.; HUANG, Z.; ZHU, Q.; WANG, L. (2000): Remobilization of carbon reserves is improved by controlled soil-drying during grain filling of wheat. In: *Crop Science*, 40 1645-1655. p.
- YANG, Y.; BI, M.; NIE, Z.; JIANG, H.; LIU, X.; FANG, X.; BRODRIBB, T. J. (2021): Evolution of stomatal closure to optimize water-use efficiency in response to dehydration in ferns and seed plants. In: *New Phytologist*, 230 (5) 2001-2010. p.
- YU-ZHENG, Z., HAN-QING, Z., PING, L., DONG-SHENG, Z., XING-YU, H., ZHI-QIANG, G. (2021): Leaf nitrogen have a better relationship with photosynthesis performance across wheat species under elevated CO₂ and drought. In: *Plant Physiology and Biochemistry*, 166 964-973. p.
- ZAHNLE, K.J., LUPU, R., CATLING, D.C., WOGAN, N. (2020): Creation and evolution of impact-generated reduced atmospheres of early Earth. In: *The Planetary Science Journal*, 1 11.
- 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, W., SUN, Y., KJELGREN, R., LIU, X. (2015): Response of stomatal density and bound gas exchange in leaves of maize to soil water deficit. In: *Acta Physiologiae Plantarum*, 37 1704.
- 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.

- ZHOU, Y., SOMMER, M.L., HOCHHOLDINGER, F. (2021): Cold response and tolerance in cereal roots. In: *Journal of Experimental Botany*, 72 (21) 7474-7481. p.
- ZHU, J.K. (2002): Salt and drought stress signal transduction in plants. In: *Annual Review of Plant Biology*, 53 247-273. p.
- ZHU P, ZHUANG Q, CIAIS P, WELP L, LI W, XIN Q. (2017): Elevated atmospheric CO₂ negatively impacts photosynthesis through radiative forcing and physiology-mediated climate feedback. In: *Geophysical Research Letters*, 44 1956-1963. p.
- ZHU, C., KOBAYASHI, K., LOLADZE, I. ZHU, J., JIANG, X., LIU, G., SENEWEERA, S., EBI, K.L., DREWNOWSKI, A., FUKAWAGAM N., K., ZISKA, L.H. (2018): Carbon dioxide (CO₂) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries. In: *Science Advances*, 4 (5) eaaq1012.
- ZOHARY, D. (1971): Origin of south-west Asiatic cereals: wheats, barley, oats and rye. 235-260 p. In: Davis, P.H., Harper, P.C., Hedge, I.C. (Szerk.): *Plant Life of South-west Asia*, Edinburgh: Royal Society of Edinburgh, 335 p.
- ZOHARY, D., HOPF, M., WEISS, E. (2012): Domestication of plants in the old world. The origin and spread of domesticated plants in southwest Asia, Europe, and the Mediterranean Basin. Fourth edition. Oxford: Oxford University Press, pp. 243.
- ZSÁKOVICS, G., KOVÁCS, F., KISS, A., PÓCSIK, E. (2007): Risk analysis of the aridification-endangered sand-ridge area in the Danube-Tisza Interfluve. In: *Acta Climatologica et Chorologica Universitatis Szegediensis*, 40 (41) 169-178. p.

M2. Kiegészítő táblázatok

M2.1. táblázat: A vizsgált termőhelyek talajadottságai

Vizsgált paraméterek	Martonvásár		Pusztáegres		Nyíregyháza	
	J35D5-M-16	J4LL5-A-16	JYUMJ-U-16	JYQ1Y-4-16	NYH27	NYH49
blokkazonosító	J35D5-M-16	J4LL5-A-16	JYUMJ-U-16	JYQ1Y-4-16	NYH27	NYH49
talajtípus	réti csernozjom	réti csernozjom	réti csernozjom	réti csernozjom	kovárványos futóhomok	barna erdőtalaj
fizikai féleség	agyagos vályog	agyagos vályog	agyagos vályog	agyagos vályog	durva homok/homok	homokos vályog/vályog
pH (KCl 1:2,5) [-]	6,70	6,88	7,31	7,40	6,34	6,72
Arany-féle kötöttségi szám [K _A]	48	45	44	42	25	38
vízben oldható összes só [m/m%]	0,10	0,10	0,05	0,02	<0,02	0,04
szénsavas mész [m/m%]	0,5	1,4	5,7	6,9	<0,100	1,68
humusz [m/m%]	3,0	2,8	3,2	2,8	0,858	2,86
nitrogén-nitrit+nitrát (kálium-klorid oldható) [mg/kg légsz.a.]	37	43	21	13	111	119
magnézium (kálium-klorid oldható) [mg/kg légsz.a.]	278	347	91	129	n.a.	n.a.
kén (kálium-klorid oldható) [mg/kg légsz.a.]	10,2	5,4	3,2	3,1	n.a.	n.a.
kálium-oxid (ammónium-laktát oldható) [mg/kg légsz.a.]	344	321	184	212	136	272
nátrium (ammónium-laktát oldható) [mg/kg légsz.a.]	41	31	19	12	n.a.	n.a.
foszfor-pentoxid (ammónium-laktát oldható) [mg/kg légsz.a.]	112	133	69	136	234	442
réz (kálium-kloridos EDTA oldható) [mg/kg légsz.a.]	4,7	3,8	1,9	2,9	n.a.	n.a.
mangán (kálium-kloridos EDTA oldható) [mg/kg légsz.a.]	260	220	132	160	n.a.	n.a.

cink (kálium-klorid oldható EDTA) [mg/kg légsz.a.]	1,6	1,4	0,8	0,6	n.a.	n.a.
--	-----	-----	-----	-----	------	------

A J35D5-M-16, JYUMJ-U-16, NYH27 blokkazonosítójú területen a 2019/2020-as tenyészidőszakban, a J4LL5-A-16, JYQ1Y-4-16, NYH49 blokkazonosítójú területen a 2020/2021-es tenyészidőszakban történt a növénynevelés. A martonvásári és pusztaegresi mintákat a PROKAT Mérnöki Iroda Tervezési, Fejlesztési és Tanácsadó Kft. HL-LAB Környezetbédelmi és Talajvizsgáló Laboratórium, a NAH által NAH-1-1/2015 számon akkreditált vizsgálólaboratóriumban, a nyíregyházi mintákat a Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományis és Környezetgazdálkodási Kar Agrárműszerközpont, a NAH által NAH-1-1054/2018 számon akkreditált vizsgálólaboratóriumban vizsgálták. A mintavétel 0-30 cm mélységből történt.

M2.2. táblázat: A vizsgált termőhelyeken mért napi középhőmérsékletek (°C) havi átlaga a két vizsgált tenyészidőszakban a vetéstől az aratásig

vizsgált időszak	Martonvásár	Puszttaegres	Nyíregyháza
2019			
október	11,7	12,5	11,7
november	8,4	8,9	8,9
december	2,6	3,7	3,0
2020			
január	-0,5	-0,2	-0,9
február	5,3	6,1	4,6
március	6,3	6,9	6,6
április	11,1	12,0	11,5
május	14,2	14,8	14,3
június	19,7	19,7	20,0
július	21,4	24,0	20,2
október	10,9	11,8	11,9
november	4,9	5,5	4,9
december	2,4	3,7	4,1
2021			
január	1,3	2,1	1,2
február	2,0	3,0	1,5
március	5,1	5,8	4,9
április	8,3	8,8	9,0
május	13,5	14,2	14,9
június	22,1	22,1	22,1
július	23,9	22,9	23,7

M2.3. táblázat: A vizsgált termőhelyeken mért csapadékmennyiségek (mm) havi eloszlása a vetéstől az aratás előtt két héttel tartó időszakban.

vizsgált időszak	Martonvásár	Pusztaegres	Nyíregyháza
2019			
október	8,0	9,3	0
november	74,4	74,1	4,7
december	61,9	57,8	21,9
2020			
január	14,1	14,78	3,9
február	19,5	31,3	27,4
március	33,2	28,7	8,9
április	5,7	5,4	9,7
május	32,3	27,3	38,2
június	81,8	36,9	59,8
július			2,6
október	10,1	11,1	0
november	19,8	11,5	5,6
december	27,7	24,8	12,8
2021			
január	10,5	9,1	18,8
február	38,1	24,1	37,6
március	2,8	12,2	16,2
április	35,4	22,2	57,8
május	67,7	83,9	66,6
június	3,5	12,2	34,2
július	0,9	13,5	10,2

M2.4. táblázat: A vetésidő és aratási idő a különböző termőhelyeken

termőhely	vetésidő	aratási idő
Martonvásár	2019.10.18.	2020.07.14.
	2020.10.22.	2021.07.15.
Pusztaegres	2019.10.21.	2020.07.03.
	2020.10.27.	2021.07.24.
Nyíregyháza	2019.10.30.	2020.07.14. (árpa)
	2020.11.03. (zab és árpa)	2020. 07.23. (búza és zab)
	2020.11.09. (búza)	2021.07.26.

M2.5. táblázat: A különböző termőhelyen alkalmazott szerek és a kijuttatás dátumai

termőhely	alkalmazott kezelés/szer	dátum
Martonvásár	alaptrágyázás pétisó Granstar Super 50 SX Starane Forte 333 EC Lontrel 600 Suni Alfa 5 EC	2019.09.25 és 2020.09.22 (300 kg/ha) 2020. 02. 25. és 2021. 02. 24 (220 kg/ha) 2020.04.17. és 2021.04.12. (50 g/ha) 2020. 04. 17. és 2020. 04. 12. (0,3 L/ha) 2020.05.20. 2020.05.20. és 2021.04.29. (0,2 L/ha)
Pusztægres	alaptrágyázás pétisó Granstar Super 50 SX Suni Alfa 5 EC	2019.09.27. és 2020.09.25. (300 kg/ha) 2020. 03.01. és 2021.02.28. (220 kg/ha) 2020.04.20. és 2020. 04. 21. (50 g/ha) 2020.05.14. és 2021.04.30. (0,2 L/ha)
Nyíregyháza	pétisó YaraMila Granstar Super 50 SX Starane Forte 333 EC Falcon Pro Decis Mega	2020.04.16. (250 kg/ha) 2021.015-én (300 kg/ha) 2020.03.16. 2020. 04. 16. és 2021.05.08. (50 g/ha) 2020.04.16. (0,2 L/ha) és 2021.05.08. (0,275 L/ha) 2020.05.05. és 2021.05.08. (0,8 L/ha) 2020.04.16. (0,15 L/ha) és 2021.05.08. (0,2 L/ha)

M2.6. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták biomassza-értékeihez tartozó szórásértékek (g) a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	0,49	0,115	1,530
	SZ	1,590	0,295	1,077
	KAL	1,216	0,446	1,490
Mv Hópehely (őszi zab)	K	1,670	0,705	2,665
	SZ	1,430	1,300	0,808
	KAL	1,588	0,650	1,544
Mv Ikva (őszi búza)	K	1,785	0,395	0,600
	SZ	0,514	0,788	0,548
	KAL	2,280	0,175	0,363
Mv Nádor (őszi búza)	K	1,115	1,588	1,790
	SZ	1,761	0,295	1,478
	KAL	0,932	0,075	0,228
Mv Nemere (őszi búza)	K	1,018	0,175	2,627
	SZ	0,458	0,908	0,732
	KAL	1,282	0,545	0,699
Mv Kolompos (őszi búza)	K	0,648	0,095	0,268
	SZ	1,497	0,915	1,613
	KAL	0,590	0,100	1,516

M2.7. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták kalászsám-értékeihez tartozó szórásértékek a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	0,000	0,577	1,000
	SZ	0,577	0,577	0,500
	KAL	0,577	0,000	1,000
Mv Hópehely (őszi zab)	K	2,500	1,528	1,000
	SZ	0,577	0,577	1,155
	KAL	1,155	1,528	1,732
Mv Ikva (őszi búza)	K	0,500	1,000	1,732
	SZ	0,000	0,577	0,577
	KAL	1,000	0,000	1,000
Mv Nádor (őszi búza)	K	0,000	1,115	1,528
	SZ	0,577	1,155	1,155
	KAL	0,500	0,000	1,155
Mv Nemere (őszi búza)	K	0,577	0,000	0,577
	SZ	0,577	1,528	1,000
	KAL	1,000	0,577	0,577
Mv Kolompos (őszi búza)	K	1,000	1,000	0,577
	SZ	0,000	1,000	1,528
	KAL	1,528	1,155	1,155

M2.8. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták ezerszemtömeg-értékeihez tartozó szórásértékek (g) a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	1,070	0,967	0,039
	SZ	0,307	0,653	0,958
	KAL	1,416	2,042	1,016
Mv Hópehely (őszi zab)	K	0,873	0,817	2,838
	SZ	0,568	2,386	0,075
	KAL	0,072	2,215	4,429
Mv Ikva (őszi búza)	K	1,054	0,380	2,237
	SZ	0,086	1,045	1,534
	KAL	0,459	0,202	1,976
Mv Nádor (őszi búza)	K	0,241	0,705	4,193
	SZ	0,418	1,041	1,623
	KAL	0,819	1,112	2,201
Mv Nemere (őszi búza)	K	0,583	0,701	1,556
	SZ	0,576	0,534	2,295
	KAL	0,427	1,373	1,485
Mv Kolompos (őszi búza)	K	0,566	1,330	2,141
	SZ	0,420	1,643	2,877
	KAL	0,634	0,297	0,107

M2.9. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták szemtermés-értékeihez tartozó szórásértékek (g) a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	0,303	0,915	0,085
	SZ	0,265	1,645	0,905
	KAL	0,095	0,390	1,159
Mv Hópehely (őszi zab)	K	0,565	0,195	1,675
	SZ	00390	1,936	0,320
	KAL	1,470	1,593	0,635
Mv Ikva (őszi búza)	K	0,935	0,769	0,947
	SZ	0,234	0,006	0,872
	KAL	0,540	0,874	0,609
Mv Nádor (őszi búza)	K	0,647	1,112	1,698
	SZ	0,860	0,090	0,598
	KAL	0,299	0,483	0,715
Mv Nemere (őszi búza)	K	0,165	0,124	0,297
	SZ	0,570	1,051	0,573
	KAL	0,822	0,325	0,594
Mv Kolompos (őszi búza)	K	1,083	0,400	1,086
	SZ	0,831	1,342	1,338
	KAL	0,875	0,245	0,753

M2.10. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták Harvest-index-értékeihez tartozó szórásértékek (%) a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	0,804	0,390	1,078
	SZ	0,798	0,019	1,298
	KAL	0,894	0,627	1,147
Mv Hópehely (őszi zab)	K	0,220	0,140	1,610
	SZ	1,165	0,486	0,539
	KAL	0,758	0,133	2,049
Mv Ikva (őszi búza)	K	0,103	0,759	2,297
	SZ	0,558	1,572	2,085
	KAL	2,051	0,615	1,251
Mv Nádor (őszi búza)	K	1,708	0,831	4,187
	SZ	0,852	0,561	0,800
	KAL	2,002	0,691	1,987
Mv Nemere (őszi búza)	K	0,905	0,791	3,639
	SZ	0,896	0,659	1,237
	KAL	1,186	0,145	0,914
Mv Kolompos (őszi búza)	K	0,344	0,787	2,176
	SZ	1,017	1,327	2,249
	KAL	1,463	0,599	0,355

M2.11. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták vízfelvétel-értékeihez tartozó szórásértékek (L) a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	0,474	0,063	1,112
	SZ	0,989	0,095	0,883
	KAL	0,450	0,887	1,355
Mv Hópehely (őszi zab)	K	3,658	0,140	0,669
	SZ	1,139	0,360	0,568
	KAL	1,300	0,105	1,699
Mv Ikva (őszi búza)	K	2,095	0,100	0,509
	SZ	0,555	0,223	0,154
	KAL	0,504	0,260	0,203
Mv Nádor (őszi búza)	K	0,899	0,587	1,043
	SZ	0,643	0,271	0,466
	KAL	0,059	0,566	0,201
Mv Nemere (őszi búza)	K	0,298	0,768	0,324
	SZ	0,194	0,575	0,199
	KAL	1,039	0,167	0,187
Mv Kolompos (őszi búza)	K	0,720	0,125	0,930
	SZ	0,540	0,315	0,486
	KAL	1,120	0,385	0,240

M2.12. táblázat: Az üvegházi kísérleti rendszerben vizsgált fajták vízhasznosítóképesség-értékeihez tartozó szórásértékek ($g \cdot L^{-1}$) a különböző kezelések hatására

Fajta	Kezelés	~400 ppm	700 ppm	1000 ppm
Mv Initium (őszi árpa)	K	0,029	0,102	0,111
	SZ	0,098	0,115	0,089
	KAL	0,061	0,110	0,105
Mv Hópehely (őszi zab)	K	0,268	0,089	0,080
	SZ	0,069	0,036	0,033
	KAL	0,042	0,072	0,010
Mv Ikva (őszi búza)	K	0,043	0,089	0,057
	SZ	0,068	0,077	0,073
	KAL	0,029	0,098	0,116
Mv Nádor (őszi búza)	K	0,088	0,021	0,034
	SZ	0,025	0,031	0,086
	KAL	0,028	0,015	0,098
Mv Nemere (őszi búza)	K	0,044	0,029	0,039
	SZ	0,330	0,054	0,057
	KAL	0,069	0,037	0,085
Mv Kolompos (őszi búza)	K	0,072	0,013	0,189
	SZ	0,080	0,024	0,107
	KAL	0,123	0,041	0,034

M2. 13. táblázat: A számtóföldi rendszerben vizsgált fajták szemtermés-értékeihez tartozó szórásértékek (g/parcella)

Fajta	Martonvásár		Pusztagegres		Nyíregyháza	
	2019/2020	2020/2021	2019/2020	2020/2021	2019/2020	2020/2021
Mv Initium (őszi árpa)	912,014	337,427	325,766	302,431	662,217	428,836
Mv Hópehely (őszi zab)	136,859	930,123	350,367	485,846	210,058	105,705
Mv Ikva (őszi búza)	1054,979	514,775	108,517	246,750	745,342	267,643
Mv Nádor (őszi búza)	717,303	703,525	314,315	175,340	267,857	311,268
Mv Nemere (őszi búza)	460,824	666,580	180,128	331,039	244,565	118,019
Mv Kolompos (őszi búza)	415,681	786,235	384,287	297,633	69,876	449,660

M2.14. táblázat: A számtóföldi rendszerben vizsgált fajták csapadékhasznosítóképesség-értékeihez tartozó szórásértékek ($g \cdot mm^{-1}$)

Fajta	Martonvásár		Pusztægres		Nyíregyháza	
	2019/2020	2020/2021	2019/2020	2020/2021	2019/2020	2020/2021
Mv Initium (őszi árpa)	0,495	0,260	0,190	0,224	0,632	0,275
Mv Hópehely (őszi zab)	0,372	0,716	0,204	0,361	0,201	0,068
Mv Ikva (őszi búza)	0,531	0,396	0,063	0,183	0,711	0,172
Mv Nádor (őszi búza)	0,362	0,542	0,183	0,130	0,265	0,200
Mv Nemere (őszi búza)	0,232	0,513	0,105	0,246	0,233	0,076
Mv Kolompos (őszi búza)	0,210	0,605	0,224	0,221	0,067	0,288

10. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm az ELKH ATK Mezőgazdasági Intézet vezetőségének, kiemelten Dr. Vida Gyulának és Dr. Veisz Ottónak, valamint a kapcsolódó pályázati forrásoknak (GINOP-2.3.2-15-2016-00029 „*Multifunkcionálisan hasznosítható növények, mint alternatívák a fenntartható mezőgazdaság szolgálatában*”), valamint (GINOP-2.3.2-15-2016-00028) „*Interdiszciplináris Kutatóműhely Létrehozása a Klímaadaptív és Fenntartható Mezőgazdaságért*” munkám és egyben tanulmányaim támogatását.

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek Dr. Varga Balázs tudományos főmunkatársnak és Dr. habil. Anda Angéla professzor asszonynak, akik lehetőséget biztosítottak arra, hogy munkámat az irányításuk alatt végezhessem. Köszönettel tartozom a szakmai irányításukért és a kutatómunkámhoz elengedhetetlen feltételek biztosításáért.

Továbbá az ELKH ATK MGI Kalászos Gabona Nemesítési Osztály munkatársainak, hogy segítettek a kísérletek kivitelezésében.

Szeretném megköszönni Dr. Makádi Marianna és DE AKIT Nyíregyházi Kutatóintézet munkatársainak munkáját a nyíregyházi termőhelyen elvégzett kísérletek kivitelezésért.

Köszönettel tartozom Dr. Barcza Zoltánnak és Incze Dórának a liziméteres kísérleti rendszer adatainak feldolgozásában nyújtott segítségükért.

Szüleimnek, testvéremnek, családomnak és barátaimnak külön köszönettel tartozom. A biztatásuk és bátorításuk nélkül nem készülhetett volna el dolgozatom.