

AKADÉMIAI DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**A kukorica és napraforgó fotoszintézisét és vízfelhasználásuk
hatékonyságát befolyásoló tényezők elemzése**

Dr. Csajbók József

Debreceni Egyetem

**Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és
Környezetgazdálkodási Kar**

Debrecen

2024

*„...mert akármilyen kérges a paraszt tenyere,
mégis csak abban van mindenki kenyege.”*

Móra Ferenc

Rövidítések jegyzéke

- BS01: Biostimuláns 01 (MTU + pidolsav); kereskedelmi neve Főnix (Danuba)
- BS02: Biostimuláns 02 (N: 140 g l⁻¹, P₂O₅: 70 g l⁻¹, K₂O: 70 g l⁻¹, MgO: 2 g l⁻¹, Cu: 600 mg l⁻¹, Zn: 600 mg l⁻¹, Mn: 600 mg l⁻¹, Mo: 40 mg l⁻¹, B: 300 mg l⁻¹, γ-PGA, DPU, DPU-szulfít, DMS, pidolsav); kereskedelmi neve Nutrino Turbo + (Danuba)
- Ci: (Intercellular CO₂ level), CO₂ szint a sejtközi járatokban
- CID: Carbon Isotope Discrimination
- DAT: Days After Treatment-kezeléstől eltelt napok száma
- DEV0085: kísérleti biostimuláns anyag, szilíciumot tartalmaz
- DMS: dimetil-szulfon
- DPU: difenil-urea
- DPU-szulfít: difenil urea szulfít
- ETR: Elektron Transzport Ráta
- K_A: Arany-féle kötöttségi szám
- LUE: Light Use Efficiency-a fényhasznosítás hatékonysága
- MTU: 1-(2-Methoxyethyl)-3-(1,2,3-thiadiazol-5yl) urea
- PaDI: (Palfai Drought Index), módosított Pálfai-féle aszály index
- PAR: Photosynthetically Active Radiation-fotoszintetikusán aktív sugárzás
- PET: Potenciális evapotranszspiráció
- pidolsav: L-Pyroglutamin sav
- pikoxistrobin: metil (E)-3-metoxi-2-[2-(6-trifluorometil-2-piridiloximetil)-fenil] akrilát
- PNUE: Photosynthetic Nitrogen Use Efficiency
- PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density
- TET: Tényleges Evapotranszspiráció
- WUE: Water Use Efficiency (kg CO₂ m⁻³ H₂O)-a vízhasznosítás hatékonysága
- γ-PGA: poli-L-γ-glutaminsav

1. Bevezetés

A növények számára a fény, a tápanyagok és a víz jelentik azokat a legfontosabb tényezőket, melyekre szükségük van a növekedésükhöz és termésképzésükhöz. A növénytermesztési tér három alrendszere (talaj, növény, levegő) igen bonyolult, komplex kölcsönhatásban áll egymással. A kölcsönhatás energia- és anyagforgalmi folyamatokban nyilvánul meg. E folyamatok szabályozzák a tápanyagok és víz felvételi sebességét, a növény szöveteibe történő beépülésének mértékét és határát. Az egyes alrendszerek tulajdonságai igen széles értékskálát átfogó valószínűségi változóknak tekinthetők.

Az agroökológiai rendszer egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy alrendszerei eltérő érzékenységek, vagyis tehetetlenségük időskálája lényegesen eltér egymástól. A levegő változási tehetetlensége a legkisebb, néhány óra vagy nap alatt óriási szélsőségek következhetnek és következnek be különböző tulajdonságai értékében. Az időjárási hatás időbeli változása gyorsan lejátszódó folyamat és igen széles értékskálán zajlik le, melyhez a növényeknek alkalmazkodni kell. Ezzel szemben a talaj, emberi léptékkel mérve, egy rendkívül lassú reakció formájában válaszol a természeti, vagy emberi hatásokra, bár a változás sebessége nagymértékben függ az adott talaj fizikai és kémiai tulajdonságaitól és a hatás mértékétől. A növény genetikai tulajdonságai által meghatározott határok között képes elviselni e különböző időskálán lezajló hatásokat, de ehhez a növénynek igen nagy variációban megnyilvánuló hatásokat kell tolerálni, károsodás nélkül elviselni.

A mezőgazdaságnak, ezen belül a szántóföldi növénytermesztésnek gyorsan kell alkalmazkodnia a változó körülményekhez, amihez alapvetően szükséges az adott területen rendelkezésre álló víz minél hatékonyabb felhasználása. Hazánkban a növénytermesztés természetbiztonságának egyik döntő tényezője a tenyészidőszakban rendelkezésre álló víz mennyisége (a talajban tárolt víz, és az aktuálisan hulló csapadék). A csapadék szeszélyesen, időben és térben nagy szélsőségek között változik, és a bizonytalanág az ország keleti régióiban fokozottan jelentkezik. Az aszály gyakoriságában és mértékében jelentős eltérések tapasztalhatók az ország egyes régiói között. Különösen a Tiszántúl kontinentális térségeiben érezteti hatását, ahol a csapadékhiány okozta aszály fellépése gyakoribb, valamint a légköri aszály hatásaival is szinte minden évben számolnunk kell.

A víz alapvetően befolyásolja a növények anyagcserefolyamatait, többek között az asszimilációt, a légzést, a párologtatást, a különböző transzport folyamatokat. A víz fiziológiai fontosságát mutatja, hogy az egész növényi szervezetben jelen van, a gyökereket körülvevő víztől egészen a levelek víz-pára határfelületéig. A növények növekedési üteme sokkal érzékenyebben és gyorsabban reagál a vízellátás változására, mint a környezet bármely más tényezőjének változására.

A vízhiány a szántóföldi növényállomány szervesanyag termelési potenciálját jelentősen csökkentheti, a csapadék mennyiségétől, eloszlásától és az egyéb időjárási tényezőktől függően a növény pusztulását is okozhatja. A súlyosan aszálykáros területek aránya 1983-tól jelentősen megnőtt, a növekedés a hagyományosan vízhiányos, keleti - délkeleti térségektől északi és nyugati irányba történt. A növények számára elérhető vízmennyiség minél hatékonyabb felhasználása az egyik legfontosabb kérdése a termesztésnek és a termesztéstechnológiai kutatásoknak.

Hazánkban az aszálykárok bekövetkezési gyakoriságának, illetve a károk nagyságának növekedéséhez, a meteorológiai okok mellett, egyéb tényezők is hozzájárulnak. A vízgazdálkodási feltételek hazánk szántóterületein nagy hányadban kedvezőtlenek vagy közepesek, ráadásul romló tendenciát mutatnak. Az eredendően jó vízháztartású talajok állapota az utóbbi két évtizedben, az egyoldalú és szakszerűtlen talajhasználat, a gépesítési hiányosságok, a mélylazítások elmaradása, az organikus gazdálkodás elhanyagolása miatt a leginkább igénybe vett, felső 50-60 cm-es szelvényben jelentős mértékben romlott. A

hidrometeorológiai szélsőségek előfordulásának gyakorisága viszont ezzel együtt megnőtt, következésképpen a szántóföldi növények, a növénytermesztés kitettsége fokozódott, alkalmazkodó képessége romlott.

Munkánk célja, hogy újabb adatokkal szolgáljunk a szántóföldi növények termésképzési folyamatainak jobb megértéséhez, a különböző eredetű stresszfaktorok negatív hatásainak enyhítését célzó kutatásokhoz, ezzel hozzájárulva a növénytermesztési térben hasznosítható vízmennyiség felhasználási hatékonyságának javításához.

Annak, hogy a kukorica és a napraforgó került a vizsgálataink középpontjába, több oka is van. Egyrészt, nyilvánvalóan rendkívül fontos kultúrák hazánkban, akár a vetésterület, akár gazdasági jelentőség tekintetében, így a vízhasznosításukat befolyásoló tényezők elemzése nagy fontossággal bír, melyet még jobban kiemelnek az előzőekben említett, az aszályhajlam fokozódását okozó tényezők. Másrészt a két növényfajban eltérő fotoszintézis rendszer működik (C_3 , C_4), ami jelentős mértékben befolyásolja az asszimiláció és vízfelhasználás hatékonyságát, és a vízhiányos körülményekhez való alkalmazkodás lehetőségeit, formáját és korlátait.

Kutatásaink során célunk volt annak a vizsgálata, milyen eltérések azonosíthatók a napraforgó és a kukorica vízhasznosításában, és az azt befolyásoló tényezők hatása hogyan érvényesül, illetve milyen lehetőségek vannak a negatív hatások enyhítésére.

A következő kérdésekre kerestünk választ a kutatási munka során:

- A vizsgált növények fotoszintézis paramétereit hogyan befolyásolják a fontosabb abiotikus tényezők, kiemelten a vízellátottság, tápanyagellátás, fényintenzitás, illetve különböző növényvédő szerek?
- Igazolható-e a fotoszintézis paraméterek és asszimilációs fénygörbe alapján, a fontosabb szántóföldi C_3 -as és C_4 -es gyomfajok, kukoricához képest jó kompetíciós képessége?
- A vízellátottság, tápanyagellátás, fényintenzitás, illetve különböző növényvédő szerek hatással vannak-e a kukorica és napraforgó vízhasznosítására?
- Eltérően alakul-e a kukorica vízhasznosításának hatékonysága extrém száraz és csapadékos évjáratokban?
- Eltérően alakul-e a napraforgó vízhasznosításának hatékonysága extrém száraz és csapadékos évjáratokban?
- Milyen különbségek azonosíthatók a genotípusok között a fotoszintézis és vízhasznosítás tekintetében a kukoricában és napraforgóban?
- Biostimulátorok alkalmazásával lehetséges-e enyhíteni a gyomirtószerek által okozott stressz hatását napraforgóban?
- Enyhíteni lehet-e a szárazságstressz negatív hatásait kukoricában biostimulátorok alkalmazásával?

2. Anyag és módszer

2.1. Szántóföldi kísérletek

Szántóföldi kisparcellás kísérletekben mértük 1999-2023 között, a kukorica, napraforgó, fotoszintézisének különböző paramétereit, transzspirációját, kiszámoltuk a vízfelhasználás hatékonyságát, illetve vizsgáltuk a vízstressz negatív hatásainak enyhítési lehetőségeit. A vizsgálatok egyik helyszíne a DE AKIT Látóképi Növénytermesztési Kísérleti Telepe volt a másik a Debrecen, Böszörményi úti kampuszon található kísérleti terület. Összefüggéseket kerestünk az egyes asszimilációs jellemzők, a vízellátottság, vízfogyasztás és az agrotechnika néhány eleme, (pl. tápanyagellátás, növényvédelem) között.

Terjedelmi korlátok miatt az egyes szántóföldi kísérletek leírását, körülményeit, az alkalmazott agrotechnikát, vizsgálati módszereket nincs módomban itt közölni, ezek megtalálhatók az alábbi publikációkban:

Csajbók, J., Kutasy, E., Hunyadi Borbélyné É., Lesznyák M., Futó Z., Jakab P. Effects of nutrient supply on the photosynthesis of maize hybrids, *Cereal Research Communications*, **2005**, 33(1), 169-172

Kutasy, E., Csajbók, J., Borbély, É.H. Relations between yield and photosynthetic activity of winter wheat varieties. *Cereal Research Communications*, **2005**, 33, 173–176.

Csajbók, J., Kutasy E. A transzspiráció és a fotoszintetikus aktivitás összefüggései kukoricában Talaj-víz-növény kapcsolatrendszer a növénytermesztési térben (Szerk. Lehoczy É.) MTA AK TAKI, Budapest, **2012**, ISBN: 97896389041-6-4, 151-154.

Csajbók, J., Kutasy, E. A transzspiráció és a fotoszintetikus aktivitás összefüggései kukoricában (Correlations between transpiration and photosynthetic activity in maize). In: Lehoczy, É. (ed.) I. Talajtani, Vízgazdálkodási és Növénytermesztési Tudományos Nap. Budapest, MTA ATK TAKI, **2012**, 151-154. (In Hungarian).

Csajbók, J., Kutasy, E., Pepó, P. The water use efficiency of maize depending on abiotic stress factors in field experiments. *Columella*, **2014**, 1(1) 23-28, DOI: 10.18380/SZIE.COLUM.2014.1.1.23

Csajbók, J.; Pepó, P.; Kutasy, E. Photosynthetic and Agronomic Traits of Winter Barley (*Hordeum vulgare* L.) Varieties. *Agronomy*, **2020**, 10, 1999, DOI: 10.3390/agronomy10121999

A DE AKIT Látóképi Növénytermesztési Kísérleti Telep talajának jellemzői

A látóképi terület talaja löszön képződött, mély humuszcsernozjom, mély humuszcsernozjom, jó kultúrallapotú, talajfizikailag a középkötött vályog kategóriába sorolható (Arany-féle kötöttség 42). A WRB nemzetközi talajosztályozási rendszer szerinti besorolása *Calcic Endofluvic Chernozem* (Endoskeletal) (WRB, 2015).

A humuszos réteg vastagsága 80-90 cm között változik, amiből 40-50 cm az egyenletesen humuszosodott réteg. Az egyenletesen humuszos réteg átlagos humusztartalma 2,8 %. A művelt réteg pH-ja (KCl) 6,3-6,5 között változik, az össznitrogén tartalom 0,12-0,15 % közötti a terület N-ellátottsága közepes. Az AL K₂O tartalom meghatározás eredményei alapján a kísérleti terület talajának káliumszolgáltató képessége (240 g kg⁻¹) a közepes és jó között változik. Foszfor ellátottság tekintetében a terület meglehetősen változékonyságot mutat. A talaj közepes-jó ellátottsággal jellemezhető (133 g kg⁻¹).

A kísérleti telep talajának vízháztartási jellemzőit értékelve megállapítható, hogy a csernozjom talajokra jellemző, kedvező vízgazdálkodási tulajdonságokkal rendelkezik. A minimális vízkapacitás (VK_{min}) 33,6-46% a 0-200 cm-es rétegben. A holtvíztartalom (HV)

8,5-15,7% a 0-200 cm-es rétegben. A talajvíz 8-10 m mélyen található, a talaj nagy mennyiségű (808 mm/0-200 cm), csapadékból származó víz raktározására képes.

A DE AKIT Debrecen, Böszörményi úti kísérleti terület talajának jellemzői

A felső réteg humusztartalma jó ($Hu\% = 2,70-3,66$), a humuszréteg vastagsága 70-80 cm. Az Arany-féle kötöttségi szám (KA) 38. A felső talajrétegek kémhatása enyhén lúgos ($pH\ H_2O = 8,30-8,43$). A foszforellátottsága nagyon jó (AL-oldható P_2O_5 1076,8-1671,6 mg kg^{-1}), és káliumellátottsága is nagyon jó (AL-oldható K_2O 525,5-658,9 mg kg^{-1}). A talaj SO_4^- ion tartalma alacsony, ami a kén kijuttatásának szükségességét jelzi. A talaj vízháztartása jó, a talajvíz szintje 6-7 m mélyen van.

2.2. Tenyészedényes kísérletek

Klímaszobás napraforgó tenyészedényes kísérlet, Nyíregyháza, 2023

A kísérlet leírása: Genotípus: SY Excellio HO CL; Klímaszoba, fénycső világítás, PAR 300 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, hőmérséklet 20 °C; 24 edény (3 literes), 4 kezelés, 6 ismétel. Termesztőközeg: kvarchomok, vetés 2023. 02. 09. Öntözés, tápoldatos öntözés

Kezelések:

március 13. (BBCH14) (Meier, 2018)	Imazamox	1,2 l ha^{-1}
március 17. (4 DAT)	BS01	0,2 l ha^{-1}
	BS02	2,5 l ha^{-1}

A kísérlet felszámolása: 2023. 03. 22.

Klímaszobás kukorica tenyészedényes kísérlet, Nyíregyháza, 2023

A kísérlet leírása: Genotípus: Pioneer P0023 FAO420; Klímaszoba, fénycső világítás, PAR 300 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, hőmérséklet 20 °C; 72 edény (3 literes), 12 kezelés, 6 ismétel. Termesztőközeg: kvarchomok. Vetés: 2023. 09. 20. Öntözés, tápoldatos öntözés (normál öntözés „N”; féladagú öntözés, vízstressz „D”). A kísérlet felszámolása: 2023. 11. 06.

Kezelések:

2023. október 11. (BBCH14)

1	Negatív kontroll	Normál
2	Pozitív kontroll	Vízstressz
3	Biostimulátor 01 (BS01) 0,25 l/ha	Normál
4	Biostimulátor 01 (BS01) 0,25 l/ha	Vízstressz
5	DEV0085 0,25 l/ha	Normál
6	DEV0085 0,5 l/ha	Normál
7	DEV0085 0,75 l/ha	Normál
8	DEV0085 1,0 l/ha	Normál
9	DEV0085 0,25 l/ha	Vízstressz
10	DEV0085 0,5 l/ha	Vízstressz
11	DEV0085 0,75 l/ha	Vízstressz
12	DEV0085 1,0 l/ha	Vízstressz

Szabadföldi tenyészedényes kísérlet, Debrecen, 2023

A kísérlet leírása: Genotípus: Pioneer P64LP180; 78 db edény (15 literes), 13 féle kezelés, 6 ismétlés; Termesztőközeg: csernozjom termőföld; Vetés 2023. május 02. A, B kísérletek felszámolása: 2023. július 31. D kísérlet felszámolása: 2023. szeptember 27.

Kezelések:

június 08.	imazamox (40 g l ⁻¹)	1,2 l ha ⁻¹ (A kísérlet)
	imazamox2 (25 g l ⁻¹)	2 l ha ⁻¹ (B kísérlet)
június 16.	halauxifen-metil (3 g l ⁻¹)	1 l ha ⁻¹ (D kísérlet)

4 DAT (Days After Treatment)	Biostimuláns 01	0,2 l ha ⁻¹ (A, B kísérlet)
------------------------------	-----------------	--

7 DAT	Biostimuláns 01	0,2 l ha ⁻¹ (A kísérlet)
-------	-----------------	-------------------------------------

10 DAT	Biostimuláns 01	0,2 l ha ⁻¹ (A kísérlet)
--------	-----------------	-------------------------------------

4 DAT	Biostimuláns 01	0,2 l ha ⁻¹ (D kísérlet)
-------	-----------------	-------------------------------------

Biostimuláns 01 (BS01): MTU (1-(2-Methoxyethyl)-3-(1,2,3-thiadiazol-5yl) urea) (2 g l⁻¹) + pidolsav (320 g l⁻¹)

2.3. Asszimilációs paraméterek mérése

A kísérletekben 1999-2018 között a LICOR cég LI-6400, 2019-2023 között a LI-6800 hordozható fotoszintézis mérő műszerét használtuk a vizsgálatokhoz. Mindkét rendszer két nagy pontosságú infravörös gázelemzővel rendelkezik a levegő CO₂ és H₂O molfrakciójának mérésére. A CO₂ (μmol mol⁻¹) és H₂O (mmol mol⁻¹), a levélhőmérséklet (°C), levegő hőmérséklet (°C), a légköri nyomás (kPa), a levegő áramlási sebessége (μmol s⁻¹) és más mért paraméterek felhasználásával a műszer kiszámítja a nettó asszimilációt, a transzspirációt, a sztómák átjárhatóságát széndioxidra és vízgőzre, az elektrontranszport rátát, a sejtközi járatok CO₂-koncentrációját (intercelluláris CO₂ szint, C_i), a PSII fotokémiai központ hatékonyságát és más fiziológiai paramétereket. Az alkalmazott megvilágítási szint a mintakamrában 1500 μmol foton m⁻² s⁻¹ PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density), illetve a megvilágítási görbék (Light Response Curve) felvételénél 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500 és 2000 μmol foton m⁻² s⁻¹ PPFD volt, a nagyobb fényintenzitás felől a kisebbek felé haladva. A megvilágítás 90% vörös (630 nm) és 10% kék (470 nm) fénnel történt a LI-6400, és 90% vörös (625 nm) és 10% kék (475 nm) fénnel a LI-6800 esetében. A méréseket fényhez adaptálódott leveleken végeztük, 3, 4, illetve 6 ismétlésben, parcellánként 2 vagy 3 növényen, növényenként 6 méréssel. Az ismétlések, illetve mérések pontos száma az egyes ábráknál vagy táblázatoknál feltüntetésre került.

A fénygörbe méréseknél a CO₂ koncentrációt 400 μmol mol⁻¹ értékre állítottuk be injektor és szén-dioxid patronok segítségével. A levélkamrában lévő kontakthőmérő a mérések során a levél alsó levélfelületével érintkezve rögzítette a levél hőmérsékletét. A leolvasásokat a mért paraméterek stabilizálódásakor (CV<1%), de legalább 120 s elteltével rögzítettük, a készülékhez általam írt háttérprogram (Background Program) használatával, a szubjektív mérésekből eredő torzítás elkerülése érdekében.

2.4. A potenciális (PET) és tényleges (TET) evapotranszpiráció meghatározása

A klimatikus vízmérleg meghatározásához, az évjáratok jellemzőinek többrétű bemutatásához a potenciális evapotranszpiráció is szükséges. A párolgást befolyásoló legfontosabb időjárási paraméterek a sugárzás, a levegő hőmérséklete, a páratartalom és a szélsébség. Számos eljárást dolgoztak ki a párolgás mértékének ezekből a paraméterekből történő meghatározására, melyek egy része nem vesz figyelembe a helyi speciális adottságokat.

A vizsgálatba vont években a potenciális evapotranszpirációt naponkénti számítással határoztam meg Szász (1997) módszerével, mely a víz párolgását döntő módon befolyásoló

léggöri elemeket és folyamatokat veszi figyelembe. Hazánk területére e formula alkalmazása javasolható, mivel a kidolgozása és validálása, hitelesítése hazai adatokra alapozott.

$$PET = \beta \left[0,0054 (T + 21)^2 (1 - R)^{\frac{2}{3}} f(v) \right], \quad (mm \text{ nap}^{-1})$$

A szükséges adatok: T: napi középhőmérséklet (°C)

R: relatív páratartalom vagy a telítési hányad (e/E)

β : oázishatás tényezője

$f(v)$: a szélesebbesség hatásfüggvénye

A tényleges evapotranszpirációt (TET) szintén naponkénti számítással határoztam meg Antal (1969) módszerével. A számítás figyelembe veszi a légkör vízfelvevő képességét, a talaj nedvességtartalmát és a növényzet hatását.

$$TET = \frac{w + b}{1 + b} \cdot w \cdot PET \quad [mm \text{ nap}^{-1}],$$

ahol w = a relatív talajnedvesség tartalom a gyökérszintben (mm)

b = a növényzet hatását figyelembe vevő faktor, a fontosabb szántóföldi növények esetében meghatározásra került

PET = a potenciális evapotranszpiráció napi értéke (mm nap⁻¹)

A w értékének kiszámítása:

$$w = \frac{NT - HV}{VK_{min} - HV}$$

ahol NT = a talaj aktuális nedvességtartalma az adott rétegben (mm)

HV = a talaj holtvíztartalma az adott rétegben (mm)

VK_{min} = a talaj minimális vízkapacitása az adott rétegben (mm)

2.5. A módosított Pálfai-féle aszályindex és az ariditási index kiszámítása

A módosított Pálfai-féle aszályindex (Pálfai, 2004, OMSZ, 2012) alapérték:

$$PaDI_0 = \frac{\frac{[\sum_{i=apr}^{aug} T_i]}{5} * 100}{10 + \sum_{i=okt}^{sept} (P_i * w_i)}$$

$PaDI_0$ = módosított Pálfai-féle aszályindex alapértéke (°C 100 mm⁻¹)

T_i = a havi középhőmérséklet áprilistól augusztusig (°C)

P_i = havi csapadékösszeg októbertől szeptemberig (mm)

w_i = havi csapadéksúly

1. táblázat A havi csapadéksúlyok a Pálfai-féle aszályindex számításához (Pálfai, 2004)

Hónap	w_i
október	0,1
november-december	0,4
január-április	0,5
május	0,8
június	1,2
július	1,6
augusztus	0,9
szeptember	0,1

A módosított Pálfai-féle aszályindex számítása a korrekciós tényezők figyelembe vételével:

$$PaDI = PaDI_0 * k_1 * k_2 * k_3$$

$PaDI$ = módosított Pálfai-féle aszályindex ($^{\circ}\text{C } 100 \text{ mm}^{-1}$)

$PaDI_0$ = módosított Pálfai-féle aszályindex alapértéke ($^{\circ}\text{C } 100 \text{ mm}^{-1}$)

k_1 = hőmérsékleti korrekciós tényező

k_2 = csapadék korrekciós tényező

k_3 = a megelőző 36 hónap csapadékviszonyait figyelembe vevő korrekciós tényező

Az ariditási index kiszámítása:

A vizsgálatba vont tenyészidőszakokra vonatkozó ariditási indexet a potenciális evapotranspiráció és az időszak csapadékösszegének felhasználásával számoltam a következők szerint:

$$ARI = \frac{\sum_{i=\text{apr}}^{\text{szept}} PET}{\sum_{i=\text{apr}}^{\text{szept}} Cs}$$

ARI = ariditási index

PET = potenciális evapotranspiráció értéke (mm)

Cs = csapadékösszeg (mm)

2.6. Klorofilltartalom mérése

Az egyes parcellákon belül három mintavételi pontról vettünk levélmintákat. A levélmintákat Lichtenthaler és Wellbum (1983) megállapításai szerint tartósítottuk és készítettük elő az elemzéshez. A leveleket 4°C -on hűtöttük, mielőtt a szokásos eljárás szerint 6 órán belül a laboratóriumba szállítottuk és feldolgoztuk. A levélminták roncsolásához 80 százalékos acetont és 1 g kvarchomokot használtunk. A szuszpenziókat Hettich ROTOFIX 32A készülékben 3000 fordulat perc^{-1} fordulatszámon 3 percig centrifugáltuk, majd a tiszta oldatot 2,5 ml-es kvarcküvetába töltöttük. Az oldat abszorbanciáját SECOMAN Anthelie Light II készülékkel határoztuk meg, UV-VIS spektrofotométerrel 470, 644 és 663 nm-es hullámhosszon. A vörös tartományban lévő fényt a klorofill-a, míg a kék tartományban lévő fényt a klorofill-b nyeli el. Az értékek átszámításához következő képletet használtuk (Droppa et al. 2003):

$$\text{Chla+b} = (20,2 \times A_{644} + 8,02 \times A_{663}) \times V/w$$

Chla+b : klorofill-A és B tartalom ($\mu\text{g g}^{-1}$),

V : a kivont növényi szövet térfogata (ml),

A_{644} : spektrális abszorbanciaérték 644 nm hullámhosszon,

A_{663} : spektrális abszorbanciaérték 663 nm hullámhosszon,

w : a friss növényi szövetminta tömege (g).

2.7. A vízfelhasználás hatékonyságának meghatározása

A vízfelhasználás hatékonyságát (Water Use Efficiency, WUE) a fotoszintézis során megkötött CO_2 és a transzspiráció felhasználásával számítottuk ki a fotoszintézis mérések adataiból Tanner és Sinclair (1983) által javasolt formula alapján.

$$WUE = \frac{Ass * M_{\text{CO}_2}}{Emm * M_{\text{H}_2\text{O}}}$$

ahol:

WUE = vízfelhasználási hatékonyság (kg m^{-3})

Emm = transzspirált H_2O mennyisége ($\text{mmol m}^2 \text{s}^{-1}$)

Ass = a megkötött CO_2 mennyisége ($\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$)

M_{CO_2} = a széndioxid móltömege (g)

M_{H_2O} = a víz moltömege (g)

2.8. Alkalmazott statisztikai módszerek

Az adatok elemzéséhez és értékeléséhez az IBM SPSS Statistics 26.0 statisztikai szoftvert (IBM Corp. Chicago, IL, USA) használtuk. A különböző paraméterek átlagainak a fajták és a kezelések közötti összehasonlításához egy- és többváltozós varianciaanalízist (GLM-modell) használtunk, leíró statisztikákkal kiegészítve. A varianciaanalízis előfeltételeit (normalitás, homogenitás és függetlenség) a függő változókon ellenőriztük, figyelembe véve Berzsenyi (2016) ajánlásait. A Kolmogorov-Smirnov-tesztet használtuk a normalitás ellenőrzésére. Az átlagok páronkénti összehasonlításához LSD Post Hoc tesztet alkalmaztunk. A szignifikáns eltérések vizsgálatakor az elsőfajú hiba (alfa) megengedett nagyságának a $p = 0,05$ szintet választottuk. Az egyes változók közötti kapcsolatok feltárásához lineáris és parabolikus regresszióanalízist alkalmaztunk.

A csoporthoz tartozás vizsgálatához diszkriminancia-analízist alkalmaztunk a standardizált értékeken. A diszkriminancia-analízis a csoporttagság előrejelző modelljét építi fel a prediktív változók lineáris kombinációi alapján. Az elemzéshez a következő változókat használtuk fel: transzspiráció, nettó asszimilációs ráta, intercelluláris CO_2 szint, sztóma-konduktancia vízgőzre, sztóma-konduktancia széndioxidra, $VPD_{levél}$, elektrontranszport ráta, $\Phi PS2$. A csoportokat a kezelések alapján képeztük.

A paraméterek közötti lineáris kapcsolatokat Pearson korrelációs analízis segítségével (kétoldalú) detektáltuk. A sztenderd hiba és a szignifikancia szint jelölését az ábrákon és a táblázatokban bemutatjuk, ahol az releváns. Az Szd 5% értékek kiszámítása Sváb (1981) módszerével történt, az általam írt, validált Visual Basic makró használatával az Ms Excel 2016 szoftverben.

3. Eredmények

3.1. A vizsgálatba vont évjáratok értékelése (2000-2023)

3.1.1. Párolgási adatok, relatív párolgás index (TET:PET arány) elemzése a vizsgált években

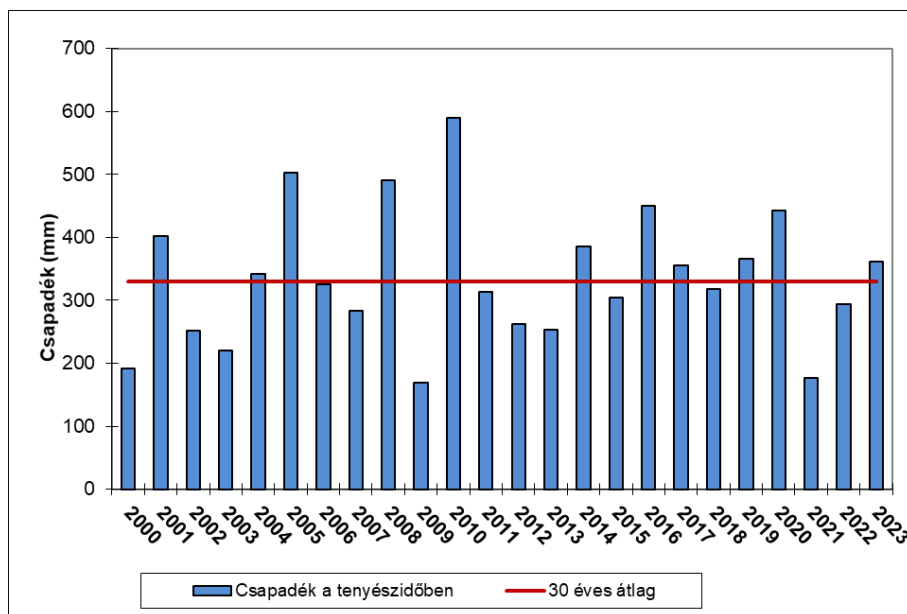
A vizsgálatba vont 24 év nagyon különböző időjárási feltételeket jelentett a növények számára. Az évjáratok elemzésénél azokat az éveket minősítettem átlagosnak vízellátás szempontjából, melyekben a kukorica tenyészidejében (április-szeptember) lehullott csapadékmennyiség nem tért el 10%-nál nagyobb mértékben a 30 éves átlagtól (1991-2020) sem negatív, sem pozitív irányban. A vizsgálatba vont 24 évjárat közül 7 volt átlagosnak minősíthető ezek alapján (2004, 2006, 2011, 2015, 2017, 2018, 2023). Kilenc év esetében nem érte el a tenyészidő csapadéka a 30 éves átlag 90%-át, ezek száraznak tekinthetők (2000, 2002, 2003, 2007, 2009, 2012, 2013, 2021, 2022). Nyolc évben a 30 éves átlag 110%-ánál több csapadékot rögzítettünk (2001, 2005, 2008, 2010, 2014, 2016, 2019, 2020), így ezeket az átlagosnál jobb vízellátottságú évjáratoknak minősíthetjük (1. ábra).

A lehullott csapadékmennyiség mellett a növények vízellátottsági állapotát egyéb tényezők is befolyásolják, például hőmérséklet, levegő párahiánya, stb, ezért a rendelkezésre álló meteorológiai adatok felhasználásával napi számítással meghatároztuk a potenciális (PET) és tényleges (TET) párolgási értékeket, majd ezek arányát. A becsült párolgási adatok és azok aránya alapján, igen száraznak tekinthetők a következő évek: 2000, 2002, 2007, 2009, 2012, 2015, 2017, 2022 amikor a tényleges párolgás a potenciális érték 50%-át nem haladta meg. Külön kiemelandó a 2007. évi tenyészidőszak a 24,3%-os TET:PET arányával, ez extrém száraz évjáratnak tekinthető (2. ábra). A kukorica és napraforgó számára (és más növényfajok számára is) súlyosan aszályos 2022-ben a TET:PET arány 49,9% volt a tenyészidőszakban, de július-augusztus hónapokban az arány mindössze 29,5% volt, nagyon magas hőmérséklettel párosulva. Vízellátottság szempontjából kedvező évjáratok: 2004, 2005, 2008, 2010 voltak, a TET:PET arány meghaladta a 80%-ot ezekben az években, a legmagasabb 2005-ben volt, 89%. Öt év, 1999, 2001, 2003, 2006, 2011 átlagosnak minősíthető évjáratok voltak, bár a csapadék eloszlásában jelentős különbségek jelentkeztek a tenyészidőszakban.

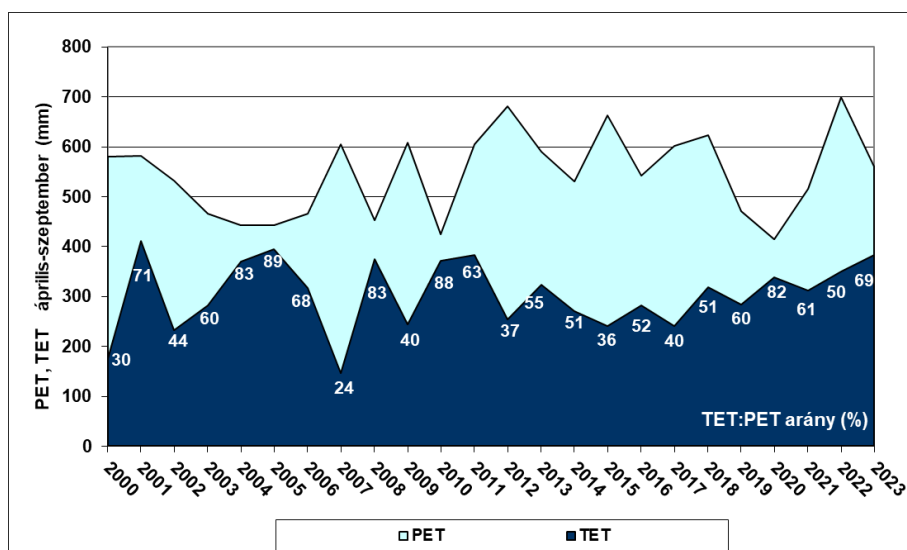
A 2013-as kukorica tenyészidőszak különlegesnek tekinthető, mivel az első felét jellemző kedvező vízellátottság után hosszú, extrém száraz periódus következett. Augusztusban a tényleges párolgás becsült értéke mindössze 27,5%-a volt a potenciális értéknek a kiszáradt talaj következtében.

Az évjáratok vízellátottságának értékeléséhez a TET:PET arány mellett felhasználtam az ariditási indexet és a módosított Pálfai-féle aszályindexet is. Az ariditási index azt fejezi ki, hogy a lehullott csapadék milyen arányban áll az adott időszak potenciális párolgási értékével, vagyis a levegő a lehullott csapadékmennyiségnek hány-szorosát lenne képes elpárologtatni. Jól használható indikátor adott terület és időszak klimatikus szárazságának értékelésére, számszerűsíti a növények növekedéséhez rendelkezésre álló vízmennyiséget, összehasonlítva az input (csapadék) és a potenciális output (PET) mennyiségeket.

Az ariditási indexet két formában is használják, CS/PET vagy PET/CS formulával számolva, én az utóbbit alkalmaztam az évjáratok értékelésénél (2. táblázat). Azokat az éveket vettem száraznak, ahol az ariditási index 2 fölötti értékű volt, vagyis a potenciális párolgás több mint kétszeres volt az adott időszak csapadékmennyiségéhez képest (2000, 2002, 2003, 2007, 2009, 2012, 2013, 2015, 2021, 2022). Jó vízellátottságúnak azokat az éveket értékeltem, ahol az ariditási index 1-nél kisebb értékű volt, vagyis a lehullott csapadék mennyisége a tenyészidőszakban meghaladta a PET értékét (2005, 2008, 2010, 2020).



1. ábra A tenyészidőszak (április-szeptember) csapadékmennyisége a vizsgált évjáratokban és a harmincéves (1991-2020) átlag (Látókép, 2000-2023)



2. ábra A potenciális és tényleges párolgás becslési értékei a tenyészidőszakban (április-szeptember), valamint a TET:PET aránya (Látókép, 1999-2023)

A módosított Pálfai-féle aszályindex (PaDI) hidrológiai évekkel (októbertől szeptemberig) számol, és figyelembe veszi a hőmérsékletet is, illetve a havi csapadékösszegeket súlyozottan veszi be a számításba. Az aszály szempontjából nem csak az adott év csapadékviszonyai meghatározók, hanem a megelőző időszaké is, ezért korrekciós tényezőként figyelembe veszi a megelőző évek (36 hónap) csapadékmennyiségét is. A PaDI értéke alapján mérsékelt aszályosnak minősíthetők a következő évek: 2002, 2012, 2013. Közepes erősségű aszályal súlytottak voltak: 2000, 2003, 2007, 2009, 2021. A 2022-es év tenyészidőszaka a $11,8\text{ }^{\circ}\text{C } 100\text{ mm}^{-1}$ értékével kiugrónak számít, és súlyos aszályt jelez. Aszálymentes évjáratoknak azok tekinthetők, ahol a PaDI értéke $4\text{ }^{\circ}\text{C } 100\text{ mm}^{-1}$ alatti. Ezek a vizsgált évek közül 2004, 2005, 2008, 2010, 2011, 2016 és 2020 voltak.

Ahogy a 2. táblázatban láthatjuk, az évjáratoknak a háromféle módszerrel, a vízellátottság alapján történt értékelése nagymértékű átfedést mutat, ami arra enged következtetni, hogy

mindegyik módszer jól alkalmazható, bár a 2022-es év igen súlyos aszályosságát csak a PaDI értéke mutatta meg (11,8 °C 100 mm⁻¹).

2. táblázat Az ariditási index, a módosított Pálfai-féle aszályindex (PaDI) értékei és a TET:PET arány 2000-2023 között, áprilistól szeptemberig (Látókép)

Évek	ARI	PaDI (°C 100 mm ⁻¹)	TET:PET (%)
2000	3,01	8,1	30,3
2001	1,45	4,1	70,8
2002	2,11	6,6	43,6
2003	2,12	8,1	60,5
2004	1,29	3,7	83,3
2005	0,88	2,9	89,0
2006	1,43	4,1	68,2
2007	2,13	8,3	24,3
2008	0,92	3,1	83,0
2009	3,60	9,1	40,1
2010	0,72	2,3	87,7
2011	1,93	3,7	63,4
2012	2,59	6,3	37,4
2013	2,33	6,1	54,8
2014	1,38	4,8	51,0
2015	2,18	5,9	36,4
2016	1,20	2,9	52,0
2017	1,69	4,7	40,0
2018	1,96	4,3	51,3
2019	1,29	4,6	60,4
2020	0,94	2,2	81,5
2021	2,91	9,0	60,5
2022	2,38	11,8	49,9
2023	1,55	4,6	68,5

PaDI: Módosított Pálfai-féle aszályindex; a színkód jelentése: ■ aszálymentes év; ■ enyhe aszály; ■ mérsékelt aszály; ■ közepes erősségű aszály; ■ súlyos aszály

ARI: ariditási index; a ■ szín az aszályos éveket jelöli, ahol az index értéke 2 fölötti; a ■ szín azokat az éveket jelöli, ahol az index értéke 1 alatti, ezek jó vízellátottságú évek

TET:PET arány; a ■ szín az aszályos éveket jelöli, ahol az arány 50% alatti; a ■ szín azokat az éveket jelöli, ahol az arány értéke 80% fölötti, ezek jó vízellátottságú évek a növények szempontjából

3.1.2. A levegő CO₂ koncentrációjának mérési eredményei (1999-2023)

Debrecenben 25 éves adatsorral rendelkezünk a levegő széndioxid tartalmával kapcsolatban. A mérési eredményeket összevetve a publikált globális légköri széndioxid-koncentrációval megállapítható, hogy a globális adatokhoz nagyon hasonló értékeket lehetett mérni Debrecenben is, de az emelkedés valamivel gyorsabb. A lineáris regresszióanalízis egyértelmű emelkedést mutat a vizsgált évek alatt (1999-2023), összesen 0,01077 %-kal növekedett a széndioxid szint Debrecenben, míg a globális érték 0,00528%-kal. Az 1999-es CO₂ szinthez képest ez 31,8%-os növekedést jelent 25 év alatt Debrecenben. A regressziós együttható alapján a növekedés évi 0,0004 %-os Debrecenben, globálisan pedig évi 0,0002%-os (Dlugokencky és Tans, 2024, Lan et al. 2024). Az egyenes illeszkedése igen jó (R²=0,9233),

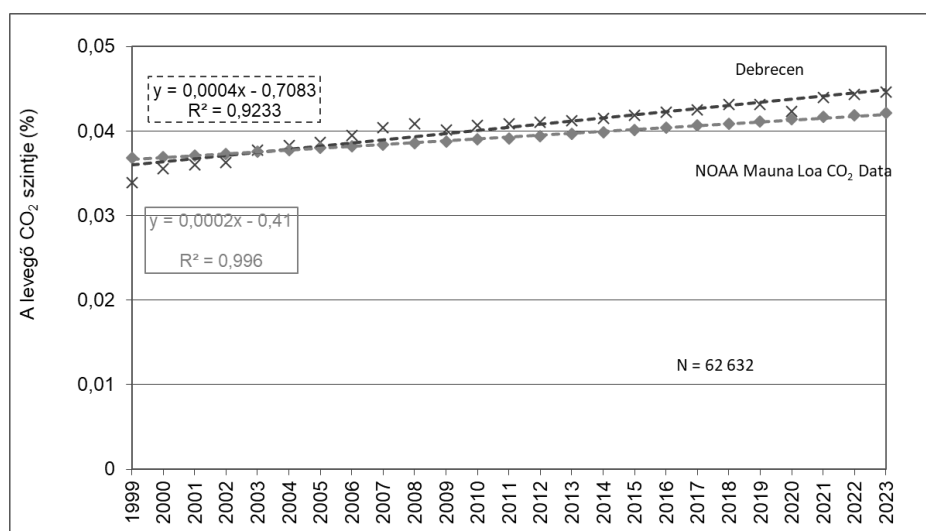
az eredmények megbízhatósága magas a nagyszámú mérés következtében (összesen 62 632 adat, szórás: 0,000141-0,000221).

A 0,04%-os CO₂ szintet meghaladó átlagot (0,04041%) Debrecenben 2007-ben regisztráltunk, míg a NOAA adatai alapján a globális átlag csak 2015-ben haladta meg ezt az értéket (0,04008%). 2023-ra a globális CO₂-szint 0,042108%-ra (421,08 ppm), míg Debrecenben 0,044649%-ra (446,49 ppm) emelkedett (3. ábra).

Az ábrán az is megfigyelhető, hogy 2020-ban visszaesett az általunk mért CO₂ szint a levegőben, aminek magyarázata valószínűleg a COVID-19 járvány miatti korlátozásokban keresendő.

Az általános vélekedés szerint az emelkedő légköri CO₂ szint tulajdonképpen kedvező hatással van a növények asszimilációs folyamataira (Tian et al., 2015, Farkas et al., 2021). Swann (2018) azonban felhívja a figyelmet arra, hogy a magasabb CO₂ szint következtében gyorsabban növekedő növények nagyobb levélterületet nevelnek és ez területre vetítve emelkedett transzspirációt eredményez. A vízhiányos térségekben ez nyilvánvalóan fokozza az aszálykár bekövetkezésének valószínűségét, még akkor is, ha a WUE javul.

Berzsenyi (2024) megállapításával egyetértve, a vízfelhasználás hatékonyságának javulása valószínűleg annak köszönhető, hogy a levegő nagyobb CO₂ koncentrációja következtében a növények kisebb sztómanyitottság mellett is hozzájutnak a hatékony fotoszintézishez szükséges széndioxid mennyiséghez, így csökken a levélterület-egységre eső transzspiráció mértéke.



3. ábra A levegő CO₂ szintjének változása Debrecenben, a referencia mérőállomás (NOAA, Mauna Loa, USA) adataihoz viszonyítva (1999-2023) (A mérések évi átlagai)

3.2. Egyes ökológiai tényezők hatásának vizsgálata a napraforgó és a kukorica asszimilációjára és vízfogyasztására

3.2.1. A fényintenzitás változásának hatása a napraforgó, kukorica, őszi búza és néhány gyomnövény fotoszintézis paramétereire és vízhasznosítására.

A kedvező vízellátottságú 2004-es évben végeztem méréseket a különböző fényintenzitás hatásának elemzéséhez három kultúrnövény és néhány jellemző gyomnövény esetében, melyek között C₃-as és C₄-es fotoszintézis utat követő fajok is voltak. Az éves csapadék mennyisége 603,8 mm volt, a tenyészidőszakban (04-09) 342,5 mm csapadék hullott Látóképen, a kísérleti területen. A PET:TET arány 83,3% volt, a növények nem voltak vízstressz állapotában a mérés időpontjában. A méréskor a levelek hőmérséklete 0,04-2,06 °C-kal alacsonyabb volt, mint a

levegőé, ami azt mutatja, hogy a transzspiráció hűtő hatása érvényesült. A sztóma konduktancia értékek is a gázcsere nyitottságát jelezték.

A nettó fotoszintézis intenzitásának elemzése során megállapítható, hogy a C3-as és C4-es utat követő növények CO₂ megkötése a magasabb megvilágítási szinteken (500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ foton fölött) élesen szétválak, a C4-es növények jelentős előnyt mutattak (4. ábra). A természetes megvilágítás egy derűs nyári napon, délben, 1500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ körül alakul a fotoszintetikusan aktív sugárzást (PAR) figyelembe véve.

A megvilágítás intenzitásának változtatása szinte minden esetben szignifikáns eltérést okozott a vizsgálatba vont növényfajok nettó asszimilációs rátájában.

Az *Echinocloa crus-galli* fotoszintézis intenzitása a többi vizsgált fajénál szignifikánsan nagyobb volt a 20-500 $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ megvilágítási szintek között. Nagyobb fényintenzitásnál (1000, 1500, 2000 $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$) az *Amaranthus retroflexus* és *Datura stramonium* esetében nagyobb értékeket mértünk. A PAR>1000 $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ megvilágítási tartományban a *Datura stramonium* nettó asszimilációs rátája szignifikánsan meghaladta a többi fajt.

Az eredményekből látható, hogy a kukorica nettó fotoszintézis intenzitása bármelyik megvilágítási szintnél a három vizsgált C₄-es gyomfajé alatt maradt. Igen alacsony fényintenzitásnál (PAR<200 $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a kukorica mutatta a legalacsonyabb fotoszintetikus aktivitást, ez jól jelzi a kukorica fényigényét.

Az igen alacsony és igen nagy fényintenzitás esetén mért nettó fotoszintézis közötti legnagyobb különbség, vagyis a legnagyobb növekedés, a C₄-es növényeknél volt megfigyelhető, így a *Datura stramonium*, az *Amaranthus retroflexus*, a kukorica és az *Echinocloa crus-galli* esetében. Ezeket fényigényes fajoknak lehet minősíteni.

Az *Echinocloa crus-galli* 500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ fényintenzitás alatt bármelyik vizsgált növénnyel szemben előnyben volt, és még az igen alacsony, 20 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ megvilágításnál is olyan jelentős nettó fotoszintézist produkált, melyet a kukorica és búza csak 200 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ mellett. A vizsgált gyomnövények közül kiemelkedett a *Datura stramonium*, és az *Echinocloa crus-galli* mind a leárnyékolt, alacsony megvilágítású, mind a teljes napfénynek megfelelő fényintenzitás mellett.

A három C₄-es gyomfaj még 1500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ fényintenzitás felett is jelentősen növelte a fotoszintézis intenzitását. A *Datura stramonium* és az *Amaranthus retroflexus* CO₂ megkötése 1500 és 2000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ megvilágításnál szignifikánsan meghaladta a többi vizsgált növényét.

A fotoszintézis fénygörbéjének meghatározása során, a szakirodalmi adatokkal egybevetve, jól elkülönültek a C₄-es fotoszintézist folytató növények, különösen a három C₄-es gyomfaj, a *Datura stramonium*, az *Amaranthus retroflexus* és az *Echinocloa crus-galli*.

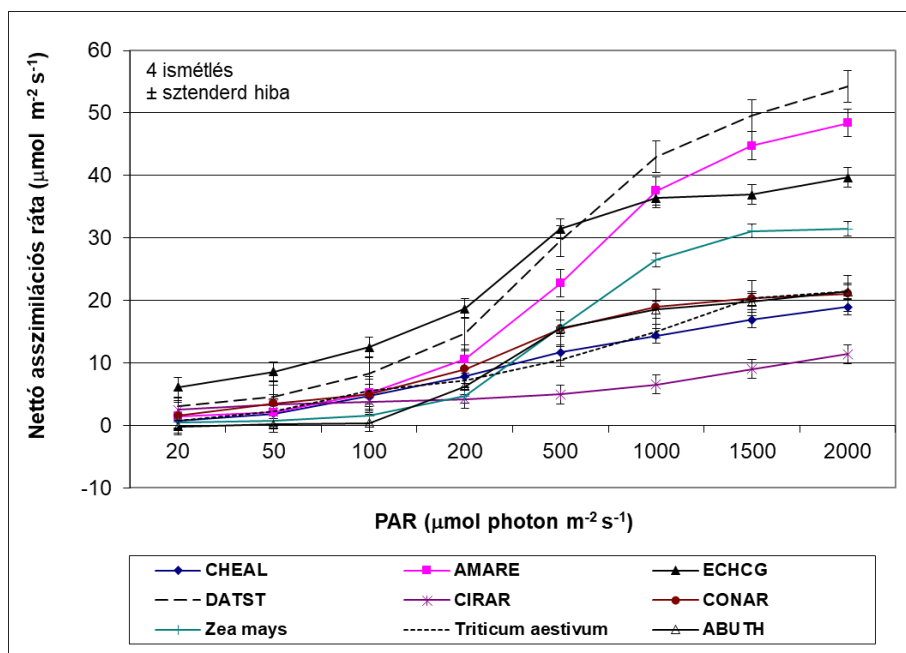
Megállapítható, hogy a *Datura stramonium*, az *Amaranthus retroflexus*, az *Echinocloa crus-galli* és a *Zea mays* jól hasznosítja a nagy megvilágítási szinteket.

Az általunk vizsgált növényfajok gázcsere nyitottságainak áteresztőképességét a növekvő fényintenzitás kevésbé befolyásolta. Kivételt a *Datura stramonium* jelentett, a növekvő megvilágítás hatására 0,78±0,09 mol m⁻²s⁻¹ értékről 1,16±0,17 mol m⁻²s⁻¹ értékre növekedett. A *Datura stramonium* kiemelkedő fotoszintetikus aktivitása kiemelkedő sztómanyitottsággal párosult. Rendkívül jó kompetíciós képességgel rendelkezik, melyhez valószínűsíthetően hozzájárul a C₄-es fotoszintézis út is.

A vizsgált növényfajok közül ki lehet emelni a *Cirsium arvense*-t, az igen alacsony szintű fotoszintézis (2,48±0,07 – 11,39±0,14 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$) igen alacsony sztóma nyitottsággal (0,001±0,0003 – 0,104±0,008 mol m⁻² s⁻¹) párosult, a transzspiráció 0,01±0,006 és 2,51±0,015 mmol H₂O m⁻²s⁻¹ között változott.

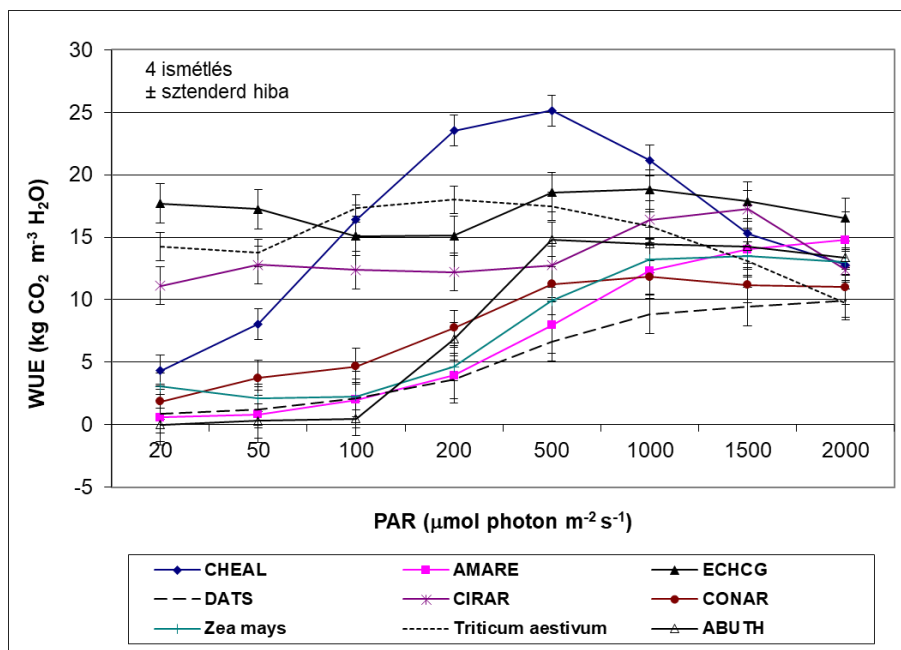
A *Datura stramonium* az igen intenzív fotoszintézis mellett igen intenzív párologtatást is végzett, a transzspiráció értéke $8,51 \pm 1,15$ és $13,4 \pm 1,71$ mmol H₂O m⁻²s⁻¹ között változott a megvilágítás hatására.

A vízfelhasználás hatékonyságának elemzésekor megállapíthatjuk, hogy a 200 és 1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PAR megvilágítás intenzitás közötti tartományban szignifikánsan a *Chenopodium album* vízhasznosítása (WUE) volt a legjobb, $21,15 \pm 1,69$ és $25,13 \pm 2,01$ kg CO₂ m⁻³ H₂O közötti értékekkel. A fotoszintézishez rendelkezésre álló fénykvantum mennyiség változásával jelentősen változott a WUE értéke, a legkisebb és legnagyobb érték közötti különbség $20,81$ kg CO₂ m⁻³ H₂O volt, ami meghaladta a többi vizsgált faj értékét. Legkevesbé az *Echinochloa crus-galli* WUE értéke változott a megvilágítás változás hatására, a legkisebb és legnagyobb érték között mindössze $3,74$ kg CO₂ m⁻³ H₂O eltérés volt. Az 5. ábra mutatja, hogy kis fényintenzitásnál (20-50 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) és nagy fényintenzitásnál (1500-2000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) egyaránt jobb volt a vízfelhasználás hatékonysága, mint a többi növényfajé. A kukorica, *Amaranthus retroflexus*, *Convolvulus arvensis*, *Abutilon theophrasti* és *Datura stramonium* WUE fénygörbéi hasonló lefutást mutatnak, alacsony megvilágítási szinteken kisebb, magasabb fényintenzitásnál nagyobb WUE értékekkel. Az *Abutilon theophrasti* esetében 100 és 500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PAR érték között nagyon meredeken javult a vízhasznosítás, $0,50 \pm 0,07$ kg CO₂ m⁻³ H₂O-ról $14,83 \pm 1,48$ kg CO₂ m⁻³ H₂O-ra (5. ábra).



4. ábra A megvilágítás hatása a nettó fotoszintézis intenzitására a kukorica, őszi búza és néhány fontos gyomfaj esetében (Látókép, 2004.06.17.)

CHEAL: *Chenopodium album*; AMARE: *Amaranthus retroflexus*; ECHG: *Echinochloa crus-galli*; DATST: *Datura stramonium*; CIRAR: *Cirsium arvense*; CONAR: *Convolvulus arvensis*; ABUTH: *Abutilon theophrasti*.
 $\pm$ sztenderd hiba



5. ábra A vízfelhasználás hatékonyságának (WUE) változása a megvilágítás függvényében a kukorica, őszi búza és néhány fontos gyomfaj esetében (Látókép, 2004.06.17.)

CHEAL: *Chenopodium album*; AMARE: *Amaranthus retroflexus*; ECHCG: *Echinochloa crus-galli*; DATST: *Datura stramonium*; CIRAR: *Cirsium arvense*; CONAR: *Convolvulus arvensis*; ABUTH: *Abutilon theophrasti*.
± sztenderd hiba

A vizsgált növényfajok vízhasznosítás értékeit külön értékelve alacsony ($100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) és nagy ($2000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) fényintenzitáson láthatjuk, hogy a legnagyobb változást az *Amaranthus retroflexus*, *Datura stramonium*, *Convolvulus arvensis*, *Abuthilon theophrasti* és kukorica mutatta, ezeknél a fajoknál jelentősen javult a vízfelhasználás hatékonysága a fényintenzitás növekedésével. A *Cirsium arvense* WUE értékei teljesen megegyeznek a két megvilágítási szinten ($12,39 \pm 1,35$, illetve $12,38 \pm 1,51 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ H}_2\text{O}$). A *Chenopodium album* és az őszi búza esetében a nagy fényintenzitás kisebb vízfelhasználási hatékonyságot eredményezett a méréseink szerint, és a búzánál a csökkenés jelentős mértékű, $17,31 \pm 1,71 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ H}_2\text{O}$ -ról $9,71 \pm 0,84 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^{-3} \text{ H}_2\text{O}$ -ra.

A gyomok kompetíciós képességét számos tényező befolyásolja. A kultúrnövényekkel szembeni előnyüket a vizsgálatunkba bevont két szántóföldi kultúrnövény és hét gyomfaj nettó fotoszintézis intenzitásának mérésével is igazolni lehetett.

3.2.2. A kukorica és a napraforgó fotoszintézis paraméterei, transzspirációja és a vízfelhasználás hatékonysága, extrém száraz évjáratban (2007. évi mérések)

A 2007-es év extrém száraz volt, a kukorica tenyészidejében, áprilistól szeptemberig $283,8 \text{ mm}$ csapadék hullott. A tavasz és a nyár nagyon meleg és száraz volt, a tenyészidőszak átlaghőmérséklete $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal meghaladta a 30 éves (1991-2020) átlagot. A tényleges evapotranszpiráció értéke a potenciális párolgás 29-33%-át érte csak el, az április második dekádjától május első dekádjáig tartó időszakban, és csak 25-26%-át augusztus első és második dekádjában. A tenyészidőszakban a PET, TET különbsége elérte a 363 mm-t , a klimatikus vízmérleg a -308 mm-t . A mérési időpontok egy részében a növények láthatóan vízstressz állapotban voltak, melyet a mérések is igazoltak.

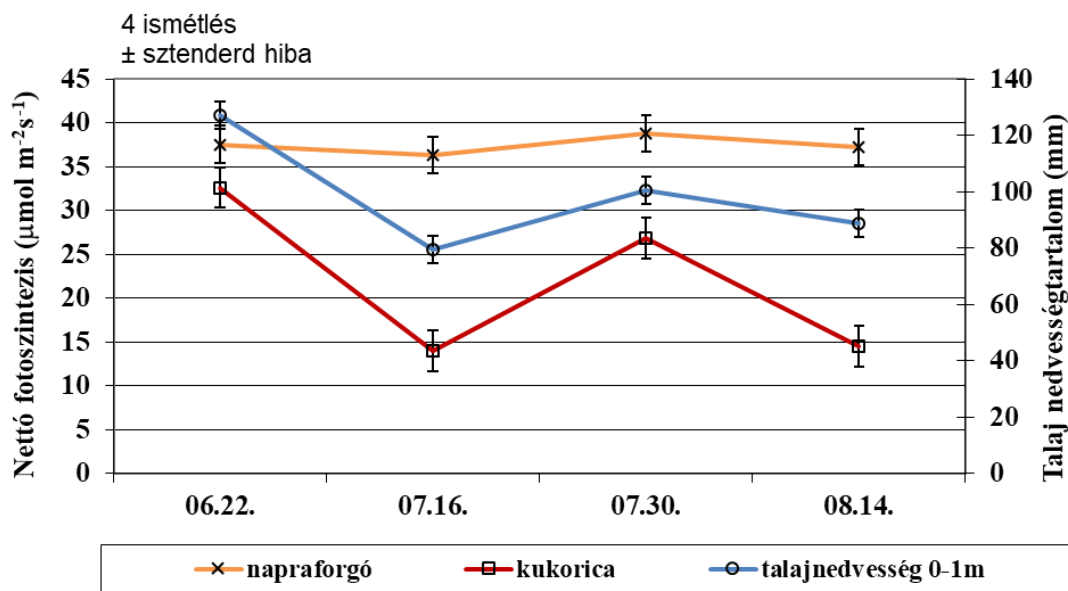
Az egyes időpontokban a növényfajok között szignifikáns eltéréseket mértünk a fotoszintézis intenzitásában, a sztómák átjárhatóságában és a transzspirációban, 5% hibahatár mellett.

A fotoszintézis intenzitás adatainak elemzése során megállapítható, hogy a napraforgó nagyobb fotoszintetikus aktivitást mutatott a kukoricához képest, mindegyik mérési időpontban (6. ábra). Ez ellentmond korábbi tapasztalatainknak, az előző évek hasonló mérési eredményei a kukorica előnyét igazolták. A 2007-es év eltérő jellemzőit az extrém száraz időjárás okozhatta. A kukorica nettó fotoszintézise július közepén és augusztus közepén, amikor a tényleges párolgás a PET 25-33%-át érte csak el, különösen alacsony volt, nem haladta meg $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ értéket. Ezekben az időszakokban a talaj nedvességekészlete az 1 méteres szelvényben 80 mm alá csökkent. A kukorica nettó fotoszintézis intenzitása jó vízellátottság mellett $40\text{-}60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ között változik méréseink szerint.

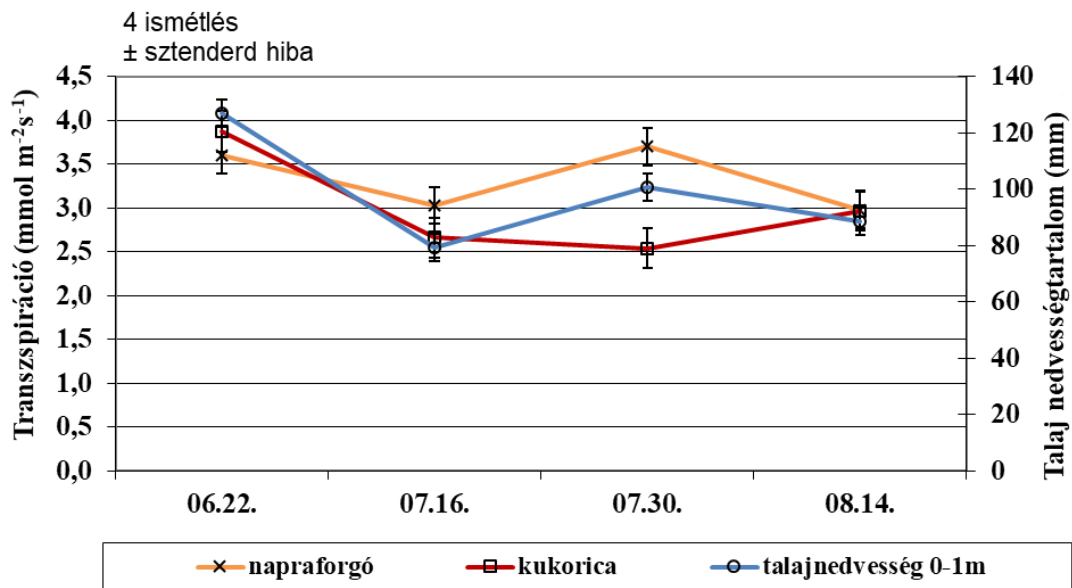
A kukorica és napraforgó transzspiráció értékei között nem állapítható meg szignifikáns különbség. Egy mérés alkalmával, július 30-án találtunk 5%-os hibahatár mellett szignifikáns eltérést (7. ábra).

A transzspiráció és a talaj nedvességekészlete közötti lineáris kapcsolat elemzése során szoros korrelációt találtunk. A korrelációs együttható értéke kukoricában 0,68, napraforgóban 0,848 volt.

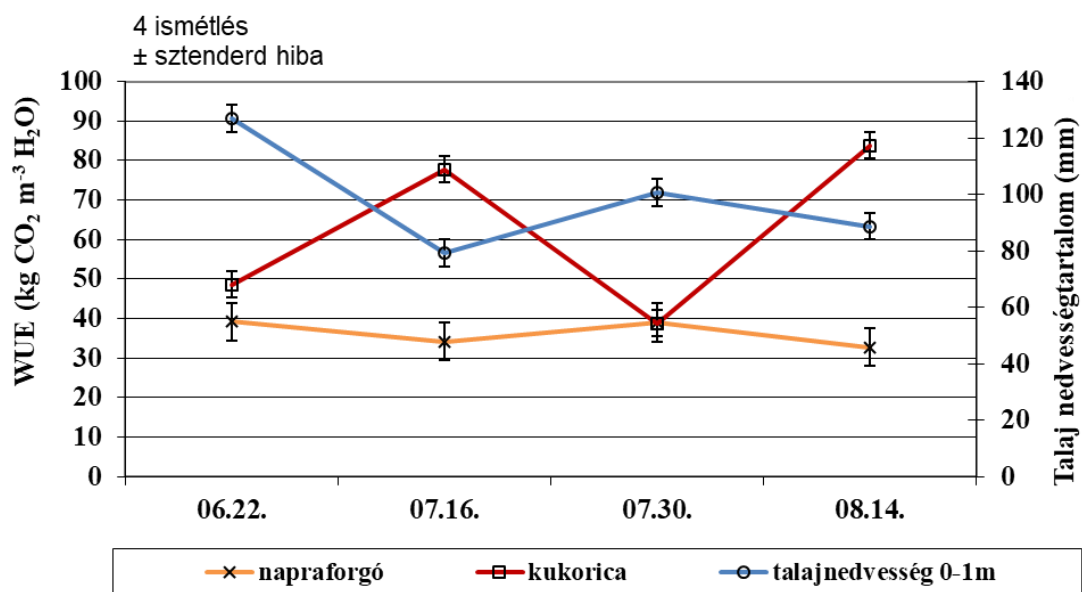
A napraforgó állományban a transzspiráció hűtő hatása, a viszonylag alacsony értékek ellenére minden mérési időpontban átlagosan 2°C -kal csökkentette a levelek hőmérsékletét a környező levegőhöz képest. A kukoricában a hűtő hatás kevésbé érvényesült, a levelek átlagosan $1,9^\circ\text{C}$ -kal melegebbek voltak a levegőnél, ezt valószínűleg a csekély mértékben nyitott sztómák okozták. A kukorica vízhasznosítása (8. ábra) a talajnedvesség változásával éppen ellentétesen alakult. Kisebb talajnedvesség értéknél a WUE nagyobb, míg nedvesebb talajon kisebb volt.



6. ábra A kukorica és napraforgó fotoszintézis intenzitása és a talaj nedvességekészletének alakulása (Debrecen, 2007)



7. ábra A kukorica és napraforgó transzspirációja és a talaj nedvességekészletének alakulása (Debrecen, 2007)



8. ábra A vízhasznosítás (WUE) kukorica és napraforgó állományokban és a talaj nedvességekészletének alakulása (Debrecen, 2007)

Különböző kukorica genotípusokban is végeztünk méréseket a fotoszintézis paraméterek és vízhasznosítás vizsgálatára, illetve az ezek közötti összefüggések, kapcsolatok elemzése érdekében. A 2007-es évben kilenc genotípust vontunk be a vizsgálatokba. A statisztikai elemzés szignifikáns eltérést igazolt a nettó asszimilációs ráta, a sztóma-konduktancia, az intercelluláris CO₂ szint, illetve a transzspiráció esetében a genotípusok között mindegyik mérési időpontban (9. ábra). Az egyes időpontokban végzett páronkénti összehasonlításban nem minden esetben tudtunk szignifikáns különbséget kimutatni.

A varianciaanalízis alapján szignifikáns különbség volt a kukorica genotípusok között a transzspiráció tekintetében, minden mérési időpontban. A tenyészidőszak előrehaladtával a genotípusok transzspirációja jelentősen csökkent, kivételt a PR38W85 és a PR37Y12 jelentett,

melynek nem lehetett változást kimutatni. A csökkenés valószínű oka a fokozódó vízhiányos állapot, mely jellemezte a kukorica tenyészidejét 2007-ben.

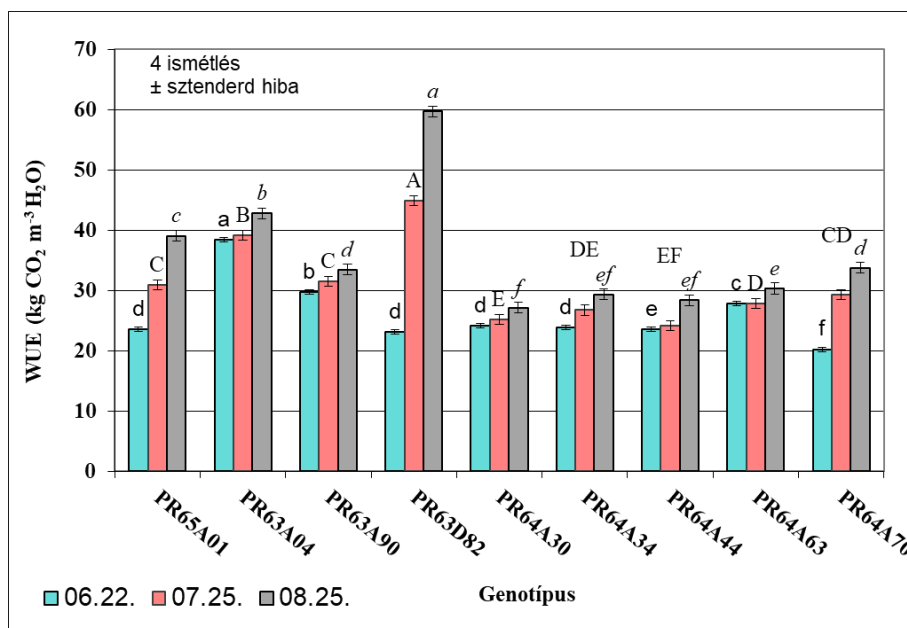
A kukorica genotípusok vízhasznosítását megvizsgálva megállapítható, hogy szignifikáns különbségeket lehetett kimutatni a genotípusok között $p=5\%$ szinten. A WUE értéke a július 26-án mért adatok alapján $44,11 \pm 4,18$ és $119,45 \pm 5,60$ kg CO₂ m⁻³ H₂O között változott, a genotípusok átlaga $64,38 \pm 6,28$ kg CO₂ m⁻³ H₂O volt. A legnagyobb értéket a PR38W85 hibridben, míg a legkisebbet a PR38H67 hibridben mértük. Mindegyik genotípus nagy hatásfokkal használta fel a vizet, és a hatékonyság javult a tenyészidőszak előrehaladtával. Az augusztus 15-én végzett méréskor a WUE értéke már átlagosan $106,92 \pm 9,72$ kg CO₂ m⁻³ H₂O volt. A legkisebb értéket ($75,51 \pm 6,13$ kg CO₂ m⁻³ H₂O) a PR37Y12 hibridben, a legnagyobbat ($155,45 \pm 8,03$ kg CO₂ m⁻³ H₂O) a PR37F73 hibridben mértük.

A Pearson-féle korrelációanalízis alapján a fotoszintézis intenzitása igen szoros pozitív kapcsolatban volt a sztóma-konduktanciával ($r=0,922$), a transzspirációval ($r=0,936$), a levegő és levél hőmérséklet-különbségével ($r=0,914$), ezek a korrelációk $p=1\%$ -os szinten szignifikánsak. Egyértelmű az összefüggés a transzspiráció és a sztóma-konduktancia illetve a transzspiráció és a levegő és levél hőmérséklet-különbsége között, melyet a vizsgálataink is igazoltak ($r=0,989$, illetve $r=0,970$).

A napraforgó nettó asszimilációs paramétereinek elemzése során megállapítható, hogy a 2007-es száraz évben, minden méréskor a kukoricáét meghaladó fotoszintézis intenzitást rögzítettünk Látóképen. A genotípusok közötti különbség kisebb volt, mint a kukoricában, de $p=5\%$ szinten szignifikáns volt minden mérési időpontban. A genotípusok átlagában a kukorica nettó fotoszintézis intenzitása csökkent a tenyészidőszak során (július 09.: $33,36 \pm 6,55$; július 26.: $29,42 \pm 4,15$; augusztus 15.: $24,74 \pm 2,80$ μmol m⁻² s⁻¹). A napraforgó esetében viszont nem tapasztaltunk ilyen csökkenést a genotípusok átlagában (június 22.: $37,56 \pm 3,53$; július 25.: $36,49 \pm 4,48$; augusztus 25.: $37,48 \pm 5,30$ μmol m⁻² s⁻¹). Két genotípus, a PR63D82 és PR65A01 nettó asszimilációs rátája csökkent a tenyészidő előrehaladtával. Legnagyobb értéket a június 22-i méréskor a PR64A63 genotípusban ($40,78 \pm 2,03$ μmol m⁻² s⁻¹), a július 25-i méréskor a PR65A04 genotípusban ($41,68 \pm 2,52$ μmol m⁻² s⁻¹), az augusztus 25-i méréskor, a PR64A30 genotípusban ($42,39 \pm 2,85$ μmol m⁻² s⁻¹) rögzítettük. A nettó asszimilációs ráta tekintetében a napraforgó nem reagált érzékenyen a 2007-es tenyészidőszak vízhiányára. A sztóma-konduktancia értékei azt mutatták, hogy a napraforgó sztómái jelentősen nyitottabbak voltak a kukoricához viszonyítva, a genotípusok átlagában, 2007-ben.

A napraforgóban a nagyobb transzspiráció és a kukoricához hasonló szintű nettó asszimilációs ráta azt eredményezte, hogy a vízfelhasználás hatékonysága rosszabb volt, mint a kukoricáé.

A 2007. évi kukoricában és napraforgóban végzett mérések eredményei alapján megállapítható, hogy a kukorica fotoszintézis rendszerének működése jelentősen érzékenyebben reagált a tenyészidőszak vízellátottságának változására, mint a napraforgóé, valamint a víz felhasználásának hatékonysága is nagyobb mértékben változott. A fotoszintézis paraméterekben, vízfogyasztásban és a WUE értékében szignifikáns eltéréseket igazoltunk a genotípusok között. A kukoricában a genotípusok közötti különbségek nagyobbak voltak minden mért és számított paraméter esetében, mint a napraforgóban. A kukorica vízfelhasználásának hatékonysága (július 09.: $40,94 \pm 3,41$; július 26.: $64,38 \pm 6,28$; augusztus 15.: $106,92 \pm 9,72$ kg CO₂ m⁻³ H₂O) jelentősen meghaladta a napraforgóét (június 22.: $26,42 \pm 4,07$; július 25.: $31,32 \pm 4,22$; augusztus 25.: $34,35 \pm 4,86$ kg CO₂ m⁻³ H₂O) a tenyészidőszak során a genotípusok átlagában.



9. ábra Különböző napraforgó genotípusok vízhasznosításának hatékonysága (WUE) (Debrecen, 2007) Az eltérő betűk szignifikánsan eltérő értékeket jelölnek $p = 5\%$ szinten a genotípusok között.

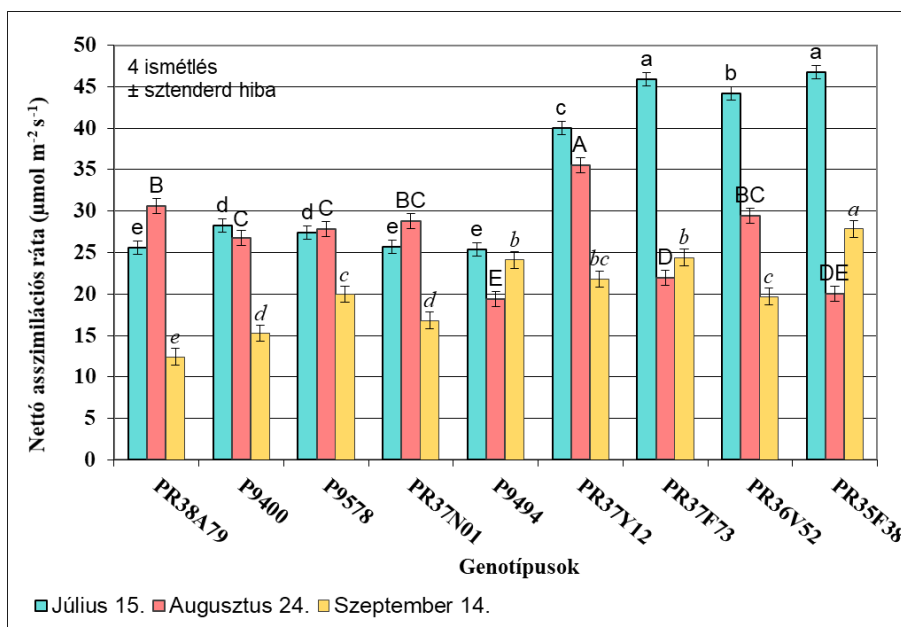
3.2.3. A kukorica fotoszintézis paraméterei, transzspirációja, és a vízfelhasználás hatékonysága csapadékos évjáratban (2010. évi mérések)

A 2010. évi kukorica, illetve napraforgó tenyésztő jó vízellátottságúnak, aszálymentesnek tekinthető, a TET:PET arány 87,7%, az ariditási index 0,72, a módosított Pálfai-féle aszályindex $2,3\text{ }^{\circ}\text{C } 100\text{ mm}^{-1}$ volt. A csapadékos időjárás miatt – a csapadékos periódusok lehűléssel járnak együtt – az április-szeptember közötti időszak átlaghőmérséklete $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal kisebb volt a 30 éves átlagnál, sem a kukorica, sem a napraforgó számára nem kedvező évjárat, mivel melegigényes növények.

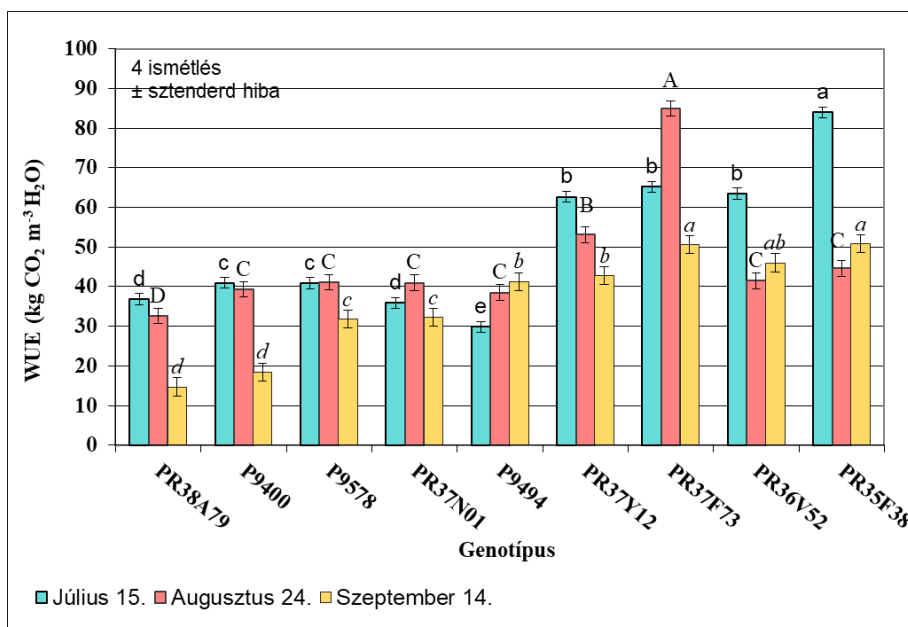
A nettó asszimilációs ráta alakulásának vizsgálatakor megállapítottuk, hogy a kukorica genotípusok között $p=5\%$ szinten szignifikáns különbségek voltak minden mérési időpontban, a genotípusok eltérően reagáltak az agroökológiai körülményekre a fotoszintézis tekintetében. A 2010. július 15-én végzett méréskor a nettó asszimilációs ráta jelentősen nagyobb volt négy genotípus (PR37Y12, PR37F73, PR36V52, PR35F38) esetében, mint későbbi mérések alkalmával (10. ábra). A különbség a három genotípus (PR37F73, PR36V52, PR35F38) esetében jelentős volt, átlagosan 97,6 és 93,5%-kal nagyobb a későbbi mérésekhez képest. Az első és harmadik időpontban a PR35F38 levelein mértük a legintenzívebb fotoszintézist, $45,90 \pm 4,22$ és $27,86 \pm 1,21\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ értékkel. Augusztus 24-én a PR37Y12 genotípus nettó asszimilációs rátája volt a legnagyobb, $35,50 \pm 1,27\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$.

A transzspiráció adatainak elemzéskor is megállapítható volt, hogy mindhárom mérési időpontban szignifikáns különbségek voltak a genotípusok között $p=5\%$ hiba valószínűségi szinten. A genotípusok átlagában a mérési időpontok között nem lehetett megállapítani eltérést, $1,46$ és $1,69\text{ mmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ között változott a különbség. Ez, a többi adattal együtt, arra enged következtetni, hogy a kukorica transzspirációját nem korlátozta vízhiány a tenyésztőidőszak során. Ezekkel a megállapításokkal nagymértékben egyező következtetésekre jutottak más kutatók is, kukorica kísérleteikben (Abbas, et al., 2015, Gheysari et al., 2015, Bassi et al., 2018, Álvarez-Iglesias et al., 2022).

A vízfelhasználás hatékonyságának adatai azt mutatták, hogy azoknak a genotípusoknak volt jó a WUE értéke, ahol a fotoszintézis intenzitása is nagy volt (PR37Y12, PR37F73, PR36V52, PR35F38), ez különösen megmutatkozott a július 15-i méréskor (11. ábra). A WUE értékei a genotípusok átlagában is sokkal kisebbek voltak 2010-ben (július 15.: $51,10 \pm 6,31$, augusztus 24.: $46,30 \pm 5,63$, szeptember 14.: $36,50 \pm 4,11$ kg CO₂ m⁻³ H₂O), a 2007-es eredményekhez képest (július 26.: $64,38 \pm 6,28$; augusztus 15.: $106,92 \pm 9,72$ kg CO₂ m⁻³ H₂O).



10. ábra Elterő kukorica genotípusok nettó asszimilációs rátájának alakulása jó vízellátottság mellett (Látólép, 2010)



11. ábra Elterő kukorica genotípusok vízfelhasználás hatékonyságának (WUE) alakulása jó vízellátottság mellett (Látólép, 2010)

3.2.4. Gombaölő szerek hatása a kukorica asszimilációjára és vízhasznosítására.

Csapadékos évjáratban, 2010-ben vizsgáltuk a pikoxistrobin (200 g l^{-1}) gombaölőszer hatóanyag hatását a kukorica asszimilációs folyamataira és vízhasznosítására. A dózis 1 l ha^{-1} volt, 400 l ha^{-1} vízmennyiséggel kijuttatva.

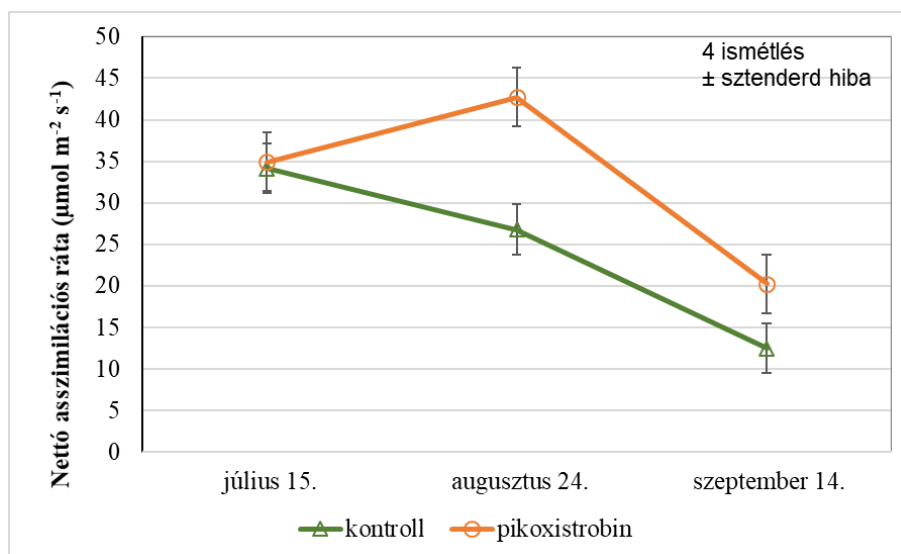
A pikoxistrobin egy strobilurin típusú gombaölő szer, amely lombkezeléssel alkalmazható számos szántóföldi kultúrában, többek között gabonafélék, csemegekukorica, repce, szója és egyéb hüvelyesek esetében. A többi strobilurin-analóghoz hasonlóan a pikoxistrobin gátolja a gombák légzését, és mind preventív, mind kuratív tulajdonságokkal rendelkezik.

A TET:PET arány $87,7\%$, az ariditási index $0,72$, a módosított PaDI $2,3 \text{ }^{\circ}\text{C } 100 \text{ mm}^{-1}$ volt 2010-ben, mindhárom aszálymentes évet jelöl. A gombaölőszeres kezelésre július 15-én került sor, az aznapi méréskor nem tapasztaltunk eltérést a kezeletlen és kezelt parcellák között a nettó asszimilációs ráta, transzspiráció, sztóma-konduktancia, vízhasznosítás tekintetében. Az augusztus 24-én (DAT40) és szeptember 14-én (DAT61) elvégzett mérések, a genotípusok átlagában már $p=5\%$ szinten szignifikáns különbséget jeleztek a kukorica fotoszintézis intenzitásában (12. ábra), transzspirációjában (13. ábra), és a vízfelhasználás hatékonyságában (14. ábra). A pikoxistrobin kezelés hatására megnőtt a nettó asszimilációs ráta, augusztus 24-én (DAT40) a kezelt parcellákban, a genotípusok átlagában $59,3\%$ -kal nagyobb volt, mint a kontrollban, ($26,80 \pm 0,99$ és $42,71 \pm 4,27 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Szeptember 14-re (DAT61) a növények természetes öregedési folyamatai miatt csökkent a fotoszintézis intenzitása minden parcellában, de a pikoxistrobinnal kezelt növények asszimilációja $62,2\%$ -kal magasabb szinten maradt a kontrollhoz képest (12. ábra). A különbség szignifikáns volt.

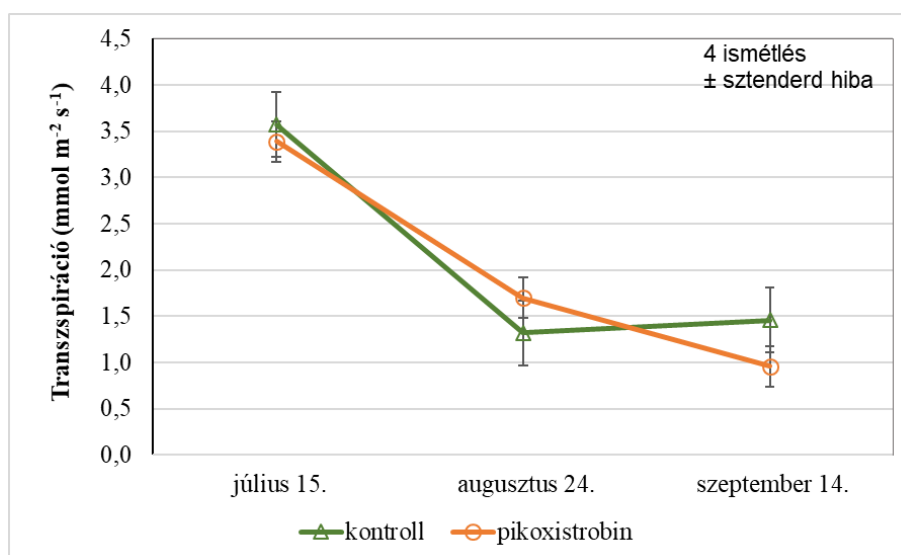
A transzspiráció tekintetében nem találtunk szignifikáns eltérést a kontroll és kezelt parcellák között az első méréskor (07.15.), viszont a második (08.24.) és harmadik (09.14.) mérési időpontban statisztikailag igazolt különbséget mértünk $p=5\%$ szinten, bár a két mérés között a különbség megfordult (13. ábra). Az augusztus 24-én (DAT40) végzett méréskor a gombaölőszerrel kezelt parcellák transzspirációja volt nagyobb, $28,8\%$ -kal, míg a harmadik méréskor (DAT61) a kontroll parcellákban kaptunk $52,1\%$ -kal nagyobb értéket. A genotípusok eltérően reagáltak a pikoxistrobin kezelésre. Jelentős, statisztikailag is igazolt különbségeket tapasztaltunk a vízhasznosításban, a genotípusok között (14-15. ábra).

A pikoxistrobin hatóanyag vízhasznosításra gyakorolt hatásának vizsgálatakor megállapíthattuk, hogy a genotípusok átlagában, a második (DAT40) és harmadik (DAT61) méréskor a kezelt növények esetében szignifikánsan jobb volt a vízfelhasználás hatékonysága, mint a kontroll parcellákban. A különbség $23,7\%$ és $146,4\%$ volt. Az eltérés igen jelentősnek tekinthető, különösen, ha figyelembe vesszük a csapadékos időjárást.

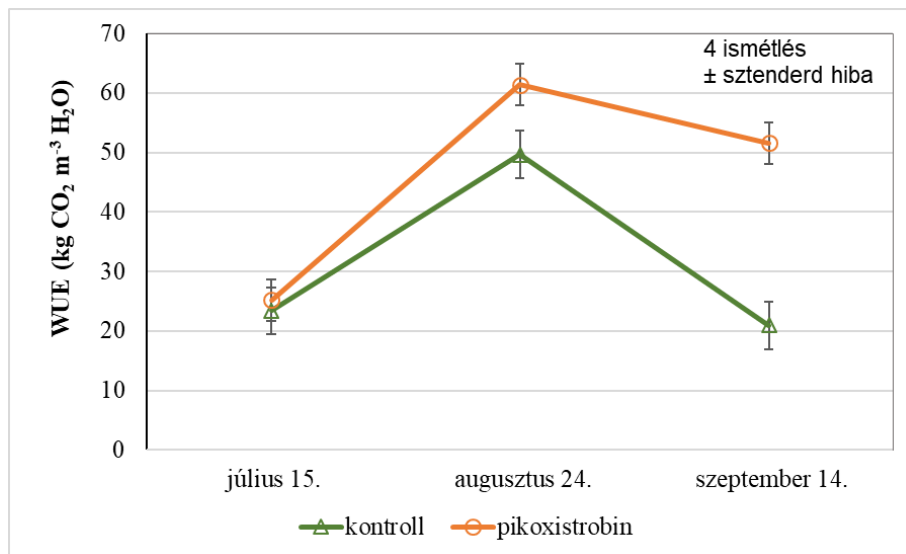
A pikoxistrobin kezelés a kukorica esetében nemcsak a fotoszintézis paraméterekre, a transzspirációra és vízhasznosításra volt hatással, hanem a 14% nedvességtartalomra átszámolt termésben is megmutatkozott, a genotípusok átlagában a kontroll parcellák termése $10,73 \pm 0,98 \text{ t ha}^{-1}$, míg a kezelt parcelláké $12,01 \pm 0,86 \text{ t ha}^{-1}$ volt. A genotípusok termését külön-külön elemezve azt láthattuk, hogy a gombaölőszeres kezelés hatására nagyobb volt a termés mindegyik genotípus esetében (16. ábra).



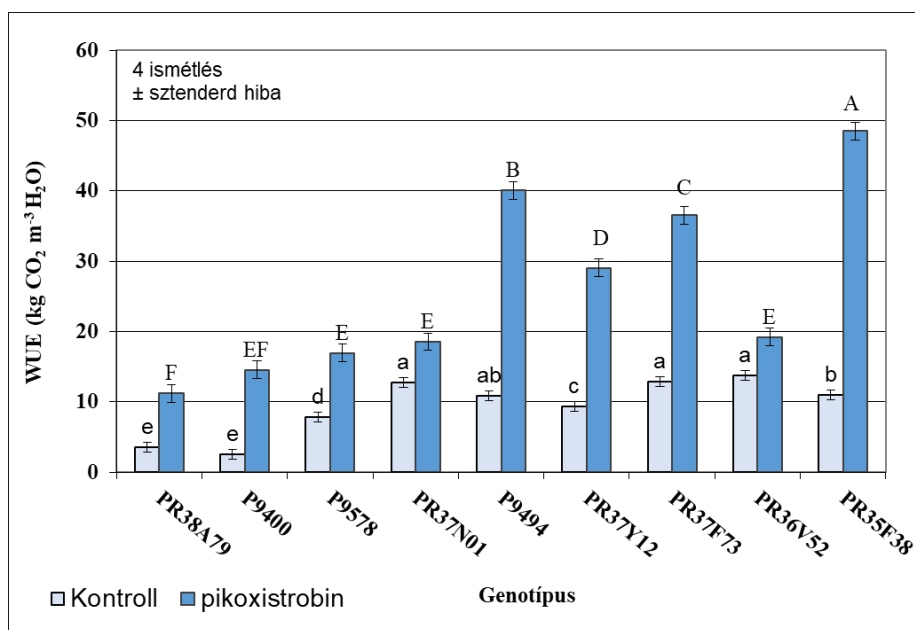
12. ábra A kukorica nettó asszimilációs rátájának alakulása gombaölőszeres kezelés hatására, jó vízellátottság mellett a genotípusok átlagában (Látókép, 2010)



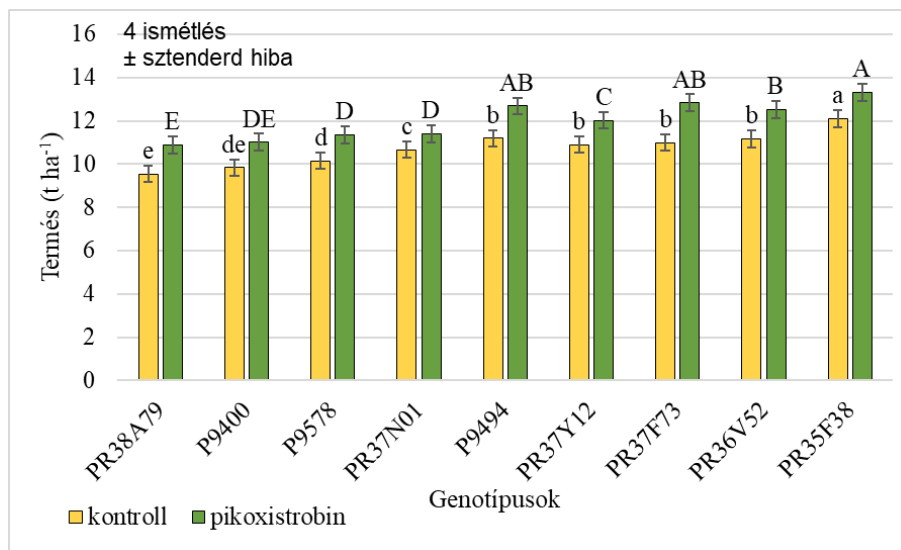
13. ábra A kukorica transzspirációjának alakulása gombaölőszeres kezelés hatására, jó vízellátottság mellett a genotípusok átlagában (Látókép, 2010)



14. ábra A kukorica vízfelhasználás hatékonyságának (WUE) alakulása gombaölőszeres kezelés hatására, jó vízellátottság mellett a genotípusok átlagában (Látókép, 2010)



15. ábra Eltérő kukorica genotípusok vízfelhasználás hatékonyságának (WUE) alakulása gombaölőszeres kezelés hatására, jó vízellátottság mellett (Látólép, 2010. augusztus 24.)



16. ábra Kukorica genotípusok termése gombaölőszeres kezelés hatására, jó vízellátottság mellett (Látólép, 2010)

Egészen más vízellátottság jellemezte 2010-hez képest a 2013-as évet a kukorica szempontjából. Aszályosnak minősíthető a 2013-as tenyészidőszak, a TET:PET arány 54,8%, az ariditási index 2,33, a módosított Pálfa-féle aszályindex 6,1 °C 100 mm⁻¹ volt. Különösen a tenyészidőszak második fele volt súlyosan vízhiányos a kukorica számára, a június 15-augusztus 10. közötti 56 napos időszakban mindössze 15,6 mm csapadék hullott. Megvizsgáltuk, hogy a pikoxistrobin (200 g l⁻¹) + ciprokonazol (80 g l⁻¹) gombaölőszerek hatóanyagok együttes alkalmazásának van-e hatása a fotoszintézis rendszer működésére és a vízfogyasztásra, annak hatékonyságára kukoricában. A kezelés 2013. július 8-án történt, a dózis 1 l ha⁻¹ volt, 400 l ha⁻¹ vízmennyiséggel kijuttatva.

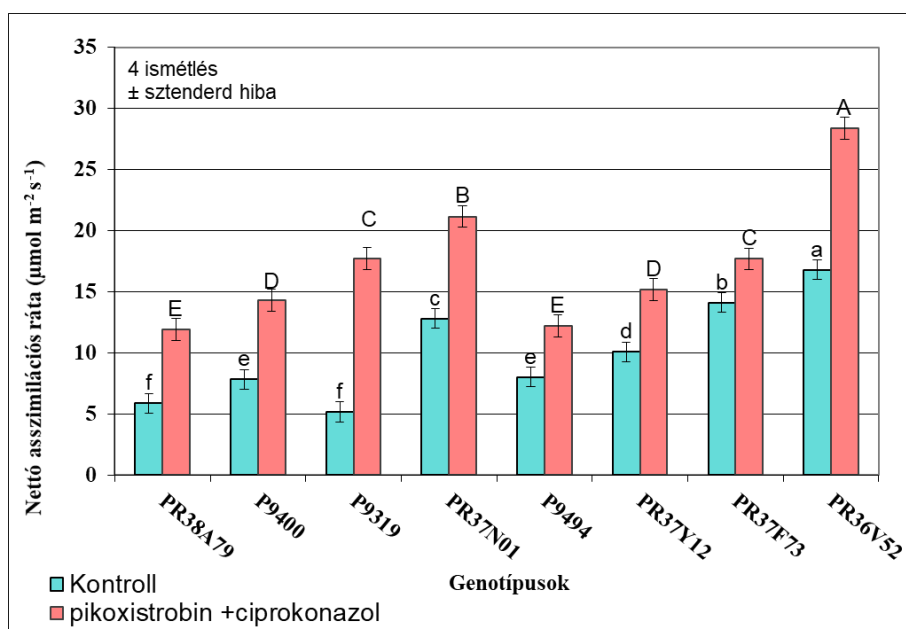
A kukorica genotípusok között szignifikáns különbségek alakultak ki a nettó asszimilációs ráta nagyságában az augusztus 9-én (DAT32) végzett mérések alapján, mind a kontroll, mind a kezelt parcellákban (17. ábra).

A gombaölőszeres kezelés hatására jelentősen nagyobb fotoszintézis intenzitást mértünk a kukorica levelein, mindegyik genotípus esetében, a kontrollhoz képest. A különbség a P9319 (243,6%) és a PR38A79 (103,6%) genotípusnál volt a legnagyobb. Legkevesbé a PR37F73 genotípus reagált a kezelésre, de az eltérés itt is 25,3%-os volt. A nettó asszimilációs ráta értékei viszonylag alacsonyak a kukoricában, különösen a kontroll parcellákban, aminek valószínű oka az ebben az időpontban már erőteljesen érezhető vízhiány lehetett.

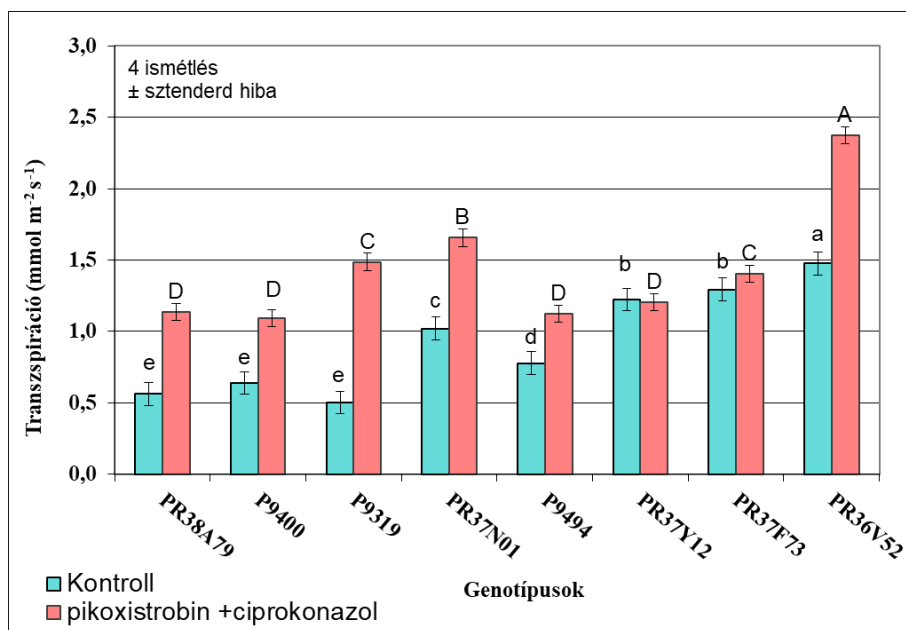
A pikoxistrobin + ciprokonazol kezelés növelte a transzspiráció intenzitását is augusztus 9-re (DAT32) mindegyik genotípusban, a PR37Y12 kivételével, ahol nem változott (18. ábra). Érdekes volt megfigyelni, hogy a genotípusok közötti eltérések nagyon hasonlóan alakultak a nettó asszimilációs ráta esetében talált különbségekkel. A PR36V52 genotípus levelein mértük a legintenzívebb fotoszintézist, és a legnagyobb transzspirációt is, egyaránt a kontroll és kezelt parcellákban. A genotípusok között $p=5\%$ szinten szignifikáns különbséget találtunk, de a páronkénti összehasonlításban megállapítható volt, hogy nem volt igazolt eltérés a kezeletlen parcellákban a PR38A79, P9400, P9318 genotípusok, valamint a PR37Y12 és PR37F73 genotípusok között. A pikoxistrobin + ciprokonazol kezelést kapott parcellákban nem találtunk szignifikáns különbséget a PR38A79, P9400, P9494, PR37Y12 genotípusok, valamint a P9319 és PR37F73 genotípusok között.

A genotípusok átlagában 11,59%-kal javította a vízfelhasználás hatékonyságát a gombaölőszeres kezelés a kukoricában (kontroll: $26,36 \pm 1,82$, kezelt: $29,42 \pm 1,63$ kg CO₂ m⁻³ H₂O). A genotípusokat külön-külön megvizsgálva megállapítható volt, hogy a pikoxistrobin + ciprokonazol kezelés mindegyiknél növelte a WUE értékét, bár a PR38A79, PR37N01 és P9494 genotípus esetében a különbség nem volt szignifikáns $p=5\%$ hiba valószínűségi szinten. A kezelésnek a PR37Y12 genotípusban volt legnagyobb hatása, 53,08%, legkisebb a PR38A79 esetében, 0,75% (19. ábra).

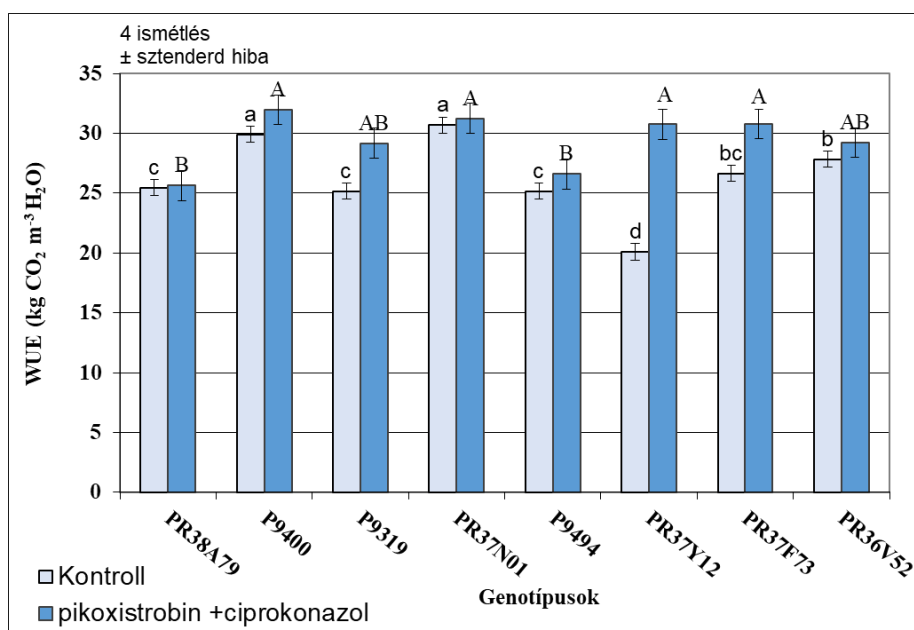
A két év eredményeit összehasonlítva megállapíthattuk, hogy a kezelésnek a transzspirációra gyakorolt hatása a genotípusok átlagában mérsékelt volt mindkét vizsgált évben. A vízhasznosítás tekintetében viszont a csapadékos 2010-es tenyészidőben a gombaölőszeres kezelés hatása sokkal kifejezettebb volt a kukoricában, mint az aszályos 2013-as évben. A kezelés hatása 23,72%, és 146,41% (DAT40 és DAT61) volt 2010-ben, míg 2013-ban 11,59% és 18,67% (DAT32 és DAT64). A gombaölőszeres kezelés a vízhasznosítás javulását elsősorban a nettó asszimilációs ráta növelésén keresztül érte el mindkét évben, kevésbé a transzspiráció csökkentésével.



17. ábra Elterő kukorica genotípusok nettó asszimilációs rátájának alakulása gombaölőszeres kezelés hatására, aszályos évben (Látólép, 2013. augusztus 9.)



18. ábra Elterő kukorica genotípusok transzspirációjának alakulása gombaölőszeres kezelés hatására, aszályos évben (Látólép, 2013. augusztus 9.)



19. ábra Elterő kukorica genotípusok vízfelhasználás hatékonyságának (WUE) alakulása gombaölőszeres kezelés hatására, aszályos évben mellett (Látólép, 2013. augusztus 9.)

4. A tudományos eredmények összefoglalása

- Mérésekkel igazoltam a levegő széndioxid koncentrációjának emelkedését 1999-2023 között Debrecenben. Az 1999-es CO₂ szinthez képest ez 31,8%-os növekedést jelent 25 év alatt Debrecenben. A regressziós együttható alapján a növekedés évi 0,0004 %-os Debrecenben, globálisan pedig évi 0,0002%-os. A globális adatokhoz hasonló értékeket mértem Debrecenben, de az emelkedés üteme nagyobb.
- Az extrém száraz évjáratban a kukorica vízfelhasználás hatékonysága (WUE) mindegyik mért paraméterrel negatív korrelációban volt. Az intercelluláris CO₂ szintjével igen szoros ($r=-0,965$), a transzspirációval ($r=-0,629$) és sztóma-konduktanciával ($r=-0,608$) szoros, a fotoszintézis intenzitásával ($r=-0,511$), levegő és levél hőmérséklet-különbségével ($r=-0,577$) közepes, de $p=1\%$ -os szinten szignifikáns kapcsolatot azonosítottunk. Napraforgóban a WUE értéke közepes pozitív kapcsolatban volt a nettó fotoszintézis intenzitással ($r=0,422$), szoros negatív kapcsolatban a sztóma-konduktanciával ($r=-0,845$), az intercelluláris CO₂ szinttel ($r=-0,869$), a transzspirációval ($r=-0,891$), és a levegő-levél hőmérséklet különbségével ($r=-0,865$).
- A napraforgó fotoszintézis rendszere, extrém száraz (2007) évjáratban, mészlepedékes csernozjom talajon, a kukoricához képest kevésbé reagált érzékenyen a vízhiányra, a fotoszintézis intenzitása meghaladta a kukoricáét mindegyik mérési időpontban. A kukorica nettó fotoszintézise július közepén és augusztus közepén, amikor a tényleges párolgás a PET 25-33%-át érte csak el, különösen alacsony volt, nem haladta meg 15 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ értéket, míg jó vízellátottság mellett 40-60 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ között változik méréseink szerint.
- Az eltérő tápanyagellátás szignifikáns különbségeket okozott a kukorica hibridek CO₂ asszimilációjában. Jó vízellátás mellett a növekvő műtrágyaadagok jelentősen növelték a fotoszintézis intenzitását. A vízstressz, a sztómák átjárhatóságának csökkenésén keresztül jelentősen csökkenti a fotoszintézist. A tenyészidőszak elején az emelkedő tápanyagszintek növekvő fotoszintézis intenzitást eredményeztek, legjobb volt az N₂₄₀+PK kezelés. A későbbi méréseknél az N₆₀+PK műtrágyadózist kapott parcellák CO₂ asszimilációja volt a legnagyobb, nagyobb műtrágyaadagok (N₁₂₀+PK, N₂₄₀+PK) csökkenő fotoszintézist eredményeztek. Az eltérés valószínű oka a nagyobb trágyaadagok hatására fellépő vízhiány, mely a sztómák záródását okozza. A sztóma-konduktancia és transzspiráció értékei alátámasztják a feltételezést. A kukorica asszimilációs állapota jól becsülhető a levelek és a levegő hőmérséklet-különbségének ismeretében.
- A gyomok kompetíciós képességét a fotoszintézisük és a vízhasznosításuk hatékonysága is befolyásolja. Súlyosan vízhiányos körülmények mellett a C₄-es növények fotoszintézise hatékonyabban működik a C₃-asokénál, ezért a C₄-es gyomnövények (pl. *Datura stramonium*) is nagyobb veszélyt jelentenek, azonban a jó szárazságtűrésű C₃-as fajok (pl. *Xanthium italicum*) is jól fejlődhetnek. A vizsgált fajok közül legkevésbé szárazságtűrőnek a *Polygonum persicaria* bizonyult.
- A C₃-as és C₄-es utat követő növények CO₂ megkötése a magasabb megvilágítási szinteken (500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PPFD fölött) élesen szétvált, a C₄-es növények a fotoszintézis intenzitás tekintetében jelentős előnyt mutattak a szántóföldi kísérletekben végzett mérések alapján. Az *Echinochloa crus-galli* és *Datura stramonium* nettó asszimilációs ráta tekintetében, kis megvilágítási szinten, 500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ PPFD alatt, kiemelkedik a többi vizsgált növényfaj közül. Ez arra utal, hogy ennek a két fajnak jó az árnyékolás-tűrése.

- Az igen alacsony ($100 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{PPFD}$) és igen magas ($2000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{PPFD}$) fényintenzitás hatását elemezve megállapítható, hogy a legnagyobb növekedés a *C₄*-es növényeknél volt megfigyelhető, így a *Datura stramonium*, az *Amaranthus retroflexus*, az *Echinochloa crus-galli*, illetve a *Zea mays* esetében. A kukorica nettó fotoszintézis intenzitása bármelyik megvilágítási szintnél a három vizsgált *C₄*-es gyomfajé alatt maradt. A három *C₄*-es gyomfaj még $1500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ fényintenzitás felett is jelentősen növelte a fotoszintézis intenzitását.
- A vizsgált növényfajok vízfelhasználásának hatékonysága jelentősen változott a megvilágítás függvényében, a növekvő fényintenzitás hatására javult. A *Cirsium arvense* és *Echinochloa crus-galli* WUE értéke változott legkevésbé a fényintenzitás növekedésével. A kukorica vízfelhasználás hatékonysága $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{PPFD}$ fényintenzitás felett volt a legjobb.
- A megvilágítás mellett a vízellátottság is jelentős hatással van a növények vízhasznosítására. Az igen eltérő csapadéku évjáratokban végzett mérések alapján megállapítható, hogy a kukorica száraz körülmények között igen hatékonyan használja fel a vizet, míg jó vízellátottsági helyzetben a hatékonyság jelentősen romlik. Csapadékos években 150-200%-kal több vizet párologtat el 1 gramm CO_2 asszimilációja során, mint száraz években, illetve vízstressz állapotban.
- A fotoszintézis intenzitása és a talaj felső 1 méteres szelvényének nedvességekészlete között igen szoros, szignifikáns kapcsolatot találtam a tenyészidőben, mind a kukorica, mind a napraforgó esetében. A transzspiráció és a talaj nedvességekészlete között pozitív lineáris kapcsolatot igazoltam mindkét növénynél (napraforgó: $r=0,848$; kukorica: $r=0,680$).
- Mind a kukorica, mind a napraforgó genotípusok között szignifikáns eltérést igazoltam a mért és számított fotoszintézis paraméterek illetve a vízfelhasználás hatékonyságát elemezve. A kukoricában a genotípusok közötti különbségek nagyobbak voltak minden esetben, mint a napraforgóban.
- Jó vízellátottság mellett (2010), a pikoxistrobin kezelés hatására kukoricában a nettó asszimilációs ráta a genotípusok átlagában 59,3%-kal (DAT40), illetve 62,2%-kal (DAT61) nagyobb volt, mint a kontroll parcellákban. Száraz évjáratban (2013) a fungicides kezelés (pikoxistrobin + ciprokonazol) a kukorica asszimilációs rátáját 70,9%-kal növelte. Az eltérés igen jelentősnek tekinthető.
- A vízhasznosítás tekintetében a csapadékos 2010-es tenyészidőben a gombaölőszeres kezelés hatása sokkal kifejezettebb volt a kukoricában, mint az aszályos 2013-as évben. A kezelés hatása 23,72%, és 146,41% (DAT40 és DAT61) volt 2010-ben, míg 2013-ban 11,59% és 18,67% (DAT32 és DAT64). A gombaölőszeres kezelés hatására a kukorica vízhasznosítása javult, ami elsősorban a nettó asszimilációs ráta növelésének, kisebb mértékben a transzspiráció csökkentésének volt köszönhető.
- Az imazamox, imazamox2 és halauxifen-metil herbicid kezelés mindegyike jelentősen rontotta a napraforgó fotoszintézis paramétereit minden fényintenzitáción a kontroll növényekhez képest. A biostimuláns kezelés hatására az értékek szignifikánsan eltértek a kontrolltól és a csak herbiciddel kezelt napraforgóétól. Az eltérés legkifejezettebben a $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}\text{PPFD}$ megvilágítási szint fölött látható a fotoszintézis intenzitása, a transzspiráció, az elektrontranszport ráta tekintetében, és a tenyészidőszak során egyre jobban elkülönülnek a különböző kezelések. A biostimuláns kijuttatása nem tudta teljesen kompenzálni a herbicidek negatív hatását, de az értékek a kontrollban mértékhez közelítettek.

Felhasznált irodalom

- Abbas, G., Hussain, A., Wajid, S.A. Water use efficiency of maize as affected by irrigation schedules and nitrogen rates. *Journal of Agriculture and Social Sciences*. **2005**, Vol. 1(4), 339–342.
- Álvarez-Iglesias, L., Vales, M.I., De Ron, A.M., Rodino, A.P., Tejada-Hinojoza, J.L., Taboada, A., Revilla, P. Variability of photosynthetic and related traits in maize and other summer crops in a temperate humid area. *Plant Physiology Reports*. **2022**, 27, 596–602
- Antal, E. Az öntözés előrejelzése meteorológiai adatok alapján. Kandidátusi értekezés, Budapest, **1969**
- Bassi, D., Menossi, M., Mattiello, L. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. *Scientific Reports*, 8, 2327, **2018**. DOI: 10.1038/s41598-018-20653-1
- Ben-Asher, J., Garcia, A.Y., Hoogenboom, G. Effect of high temperature on photosynthesis and transpiration of sweet corn (*Zea mays* L. var. *rugosa*) *Photosynthetica*, **2008**, 46(4) 595-603.
- Berzsenyi, Z. Fenntartható növénytermesztés: Környezeti és termésreakciók, precíziós alkalmazások. MATE, Gödöllő, 2024, p 533, ISBN 978-963-623-095-1
- Condon, A.G., Richards, R.A., Rebetzke, G J., and Farquhar, G.D. Breeding for high water-use efficiency. *J. Exp. Bot.*, **2004**, 2447–2460. DOI: 10.1093/jxb/erh277
- Csajbók, J., Kutasy E. A transzspiráció és a fotoszintetikus aktivitás összefüggései kukoricában. Talaj-víz-növény kapcsolatrendszer a növénytermesztési térben (Szerk. Lehoczy É.) MTA AK TAKI, Budapest, **2012**, ISBN: 97896389041-6-4, 151-154.
- Csajbók, J., Kutasy E. A transzspiráció és a fotoszintetikus aktivitás összefüggései kukoricában Talaj-víz-növény kapcsolatrendszer a növénytermesztési térben (Szerk. Lehoczy É.) MTA AK TAKI, Budapest, **2012**, ISBN: 97896389041-6-4, 151-154.
- Csajbók, J., Kutasy, E. A transzspiráció és a fotoszintetikus aktivitás összefüggései kukoricában. In: Lehoczy, É. (ed.) I. Talajtani, Vízgazdálkodási és Növénytermesztési Tudományos Nap. Budapest, MTA ATK TAKI, **2012**, 151-154.
- Csajbók, J., Kutasy, E., Hunyadi Borbélyné É., Lesznyák M., Futó Z., Jakab P. Effects of nutrient supply on the photosynthesis of maize hybrids, *Cereal Research Communications*, **2005**, 33(1), 169-172
- Csajbók, J., Kutasy, E., Pepó, P. The water use efficiency of maize depending on abiotic stress factors in field experiments. *Columella*, **2014**, 1(1) 23-28.
- Csajbók, J.; Pepó, P.; Kutasy, E. Photosynthetic and Agronomic Traits of Winter Barley (*Hordeum vulgare* L.) Varieties. *Agronomy*, **2020**, 10, 1999, DOI: 10.3390/agronomy10121999
- Du, Q.S.; Fan, X.W.; Wang, C.H.; Huang, R.B. A Possible CO₂ Conducting and Concentrating Mechanism in Plant Stomata SLAC1 Channel. *PLoS ONE*, **2011**, 6(9), e24264.
- Gheysari, M., Loescher, H.W., Sadeghi, S.H., Mirlatifi, S.M., Zareian, M.J., Hoogenboom, G. Chapter Three - Water-Yield Relations and Water Use Efficiency of Maize Under Nitrogen Fertilization for Semiarid Environments: Experiment and Synthesis, Editor: Sparks, D.L. *Advances in Agronomy*, Academic Press, **2015**, 130, 175–229, DOI: 10.1016/bs.agron.2014.12.001.
- Kutasy, E., Csajbók, J., Borbély, É.H. Relations between yield and photosynthetic activity of winter wheat varieties. *Cereal Research Communications*, **2005**, 33, 173–176.
- Meier, U. Growth Stages of Mono and Dicotyledonous Plants. BBCH Monograph, Julius Kühn-Institut (JKI) Quedlinburg **2018**, DOI: 10.5073/20180906-074619 ISBN: 978-3-95547-071-5
- Osborne, C.P., Sack, L. Evolution of C4 plants: a new hypothesis for an interaction of CO₂ and water relations mediated by plant hydraulics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences*, **2012**, 367, 583–600.
- Pálfai, I. Belvizek és aszályok Magyarországon. Hidrológiai Tanulmányok Közlekedési Dokumentációs Kft. Budapest, **2004**, ISBN 9635523823
- Szász, G. A víz a légkörben, a talajban és a növényben. Meteorológia mezőgazdáknek, kertészeknek, erdészeknek. szerk. Szász G.-Tőkei L. Mezőgazda Kiadó, **1997**, Budapest, 111–172.

Köszönetnyilvánítás

Köszönet illeti a Debreceni Egyetem vezetőségét, hogy megteremtették a feltételeket a munka elvégzéséhez.

Szeretném megköszönni Prof. Dr. Pepó Péternek, hogy tanszékvezetőként majd intézetvezetőként támogatott szakmailag, lehetőséget biztosított kutatómunkám elvégzésére, és tanácsaival segített a helyes út megtalálásában.

Köszönöm minden közvetlen kollégámnak, hogy támogattak, és segítettek a kutatási feladatok elvégzése során.

Köszönet illeti a szak- és diplomadolgozó hallgatóimat, akik hozzájárultak a bemutatott eredményekhez.

Köszönetemet fejezem ki mindazoknak a munkatársaknak, külföldi és hazai együttműködő partnereknek, akiket bár név szerint nem említek, bármilyen formában segítették a munkámat.

Köszönöm szüleimnek, hogy lehetővé tették számomra a tanulást, és a mai napig folyamatosan és odaadóan támogatnak céljaim elérésében.

Köszönöm családom, kiemelten feleségem, Dr. Kutasy Erika türelmét, szüntelen, odaadó biztatását, támogatását, hogy lökést adott, mikor arra volt szükségem a munka során.