



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Növénytudományi Doktori Iskola

**A SÓSTRESSZ ÉS AZ ALACSONY HŐMÉRSÉKLET HATÁSAINAK
VIZSGÁLATA A RIZS (ORYZA SATIVA L.) FEJLŐDÉSÉRE**

című Phd értekezés téziszülete

DOI: 10.54598/004000

Székeley Árpád

Gödöllő

2023

A doktori iskola:

Megnevezése: Növénytudományi Doktori Iskola

Tudományága: Növénytermesztési és Kertészeti tudomány

Vezetője: Dr. Helyes Lajos
egyetemi tanár, MTA levelező tagja
MATE, Kertészettudományi Intézet

Témavezető: Dr. Lantos Csaba
laborvezető, Biotechnológiai Laboratórium
Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft.

A doktori iskola- és a témavezető jóváhagyó aláírása:

A jelölt a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tett, a műhelyvita során elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés védési eljárásra bocsátható.

.....

Az iskolavezető jóváhagyása

.....

A témavezető jóváhagyása

A munka előzményei, célkitűzések

A magyarországi rizsnemesítés az 1930-as években indult útnak, 103 külföldi rizsfajta tesztelésével. E munka eredménye a 'Dunghan Shali' fajta volt, aminek a népszerűsége töretlen volt egészen az 1950-es évekig. Ekkor derült fény a fajta *Piricularia oryzae* (*Magnaporthe oryzae*) gombabetegséggel szembeni érzékenységére. Így további nemesítés indult el, újabb fajták jelentek meg a köztermesztésben. A nemesítés mindig igyekezett a kor legmodernebb eszközeit felhasználni, hogy rövidebb idő alatt jobb, versenyképesebb tulajdonságokkal rendelkező fajtákat állítson elő. A 60-as 70-es években ez a technológia az indukált mutagenézis volt, amelyeknek legszebb példája a 'Nucleoryza'. A Nucleoryza hazai sikerét jól tükrözi, hogy 1981-ben a hazai rizs termőterület 40 százalékán termesztették a fajtát. Ezt követően haploid szomaklón nemesítési módszerrel állították elő Magyarországon az első biotechnológiai eredetű növényfajtát rizsben, a 'Dámát', ami 1992-ben állami elismerést, később szabadalmi védelmet kapott. A 'Dáma' 1992 és 2013 között 20 éven keresztül a legnagyobb területen termesztett rizsfajta volt hazánkban. A kiragadott példákon túl számos olyan fajta került előállításra, melynek sikere túlmutat határainkon. Az 'Ábel' rendkívül rövid tenyészidőszakú fajta, a 'Sandora' fajta 'HSC 55' néven hidegtűrési sztenderdként a világ 20 leghidegtoleránsabb fajtájaként ismert, melyet több ország is felhasznált (Törökország, Ausztrália) a nemesítési programjában, ráadásul Chilében a mai napig használják köztermesztésben. A 'Rotundus' egykori vonal az *indica* csoportozhoz közeli sótoleranciát mutatott.

Magyarország az európai rizstermesztés északi határán fekszik, így az olyan biotikus károsító tényezők, amelyek rendszerint előfordulnak a melegebb éghajlatú területeken, azok többsége hazánkban nem fordul elő. Egyetlen károsítója a fentebb említett gombabetegség. A jelenlegi termesztetőséget elsősorban két fő abiotikus tényező határozza meg. Az alacsony hőmérséklet elsősorban a tenyészidőszak elején, csírázaskor és a korai vegetatív fázisban, valamint a virágzás környékén gyakori. A második tényező a sótartalom jelenléte a talajban. Ugyan a mai jelentősége a trópusi, tengerparti területekhez képest kisebb, de a jövőben ennek jelentősége vélhetően növekedni fog. A jelenlegi rizstermesztés szinte kizárólag szikes, vagy szikes jellegű területeken történik hazánkban. Továbbá a jövőben kevésbé jó minőségű öntözővíz állhat majd rendelkezésre, ami a másodlagos

szikesedés további emelkedésével járhat. Harmadrészt az az alacsony-közepes sótartalom, ami jelenleg a rizstermesztő területek jellemzői, a közvetlen földbevetés miatt már a csírázástól kezdve kifejtheti gátló hatását, szemben a trópusi területek palántázási módszerével, amivel a korai fejlődési érzékenység elkerülhető.

E tényezők miatt kutatásom a hidegstressz vizsgálatára összpontosít a korai fejlődési állapotban, valamint a magas sókoncentráció hatásainak vizsgálatára a csírázástól kezdve a termésérésig. A fő célkitűzések az alábbiak voltak:

I. Sótolerancia vizsgálatok:

- 1) Kísérletekkel meghatározni a *japonica* és az *indica* csoportokba tartozó genotípusok sótoleranciájának paramétereit.
- 2) Hazai marginális élőhelyen szelektált rizsfajták sótoleranciájának összehasonlító vizsgálata egyéb *japonica* fajtákkal.
- 3) A sóstressz káros hatásainak megállapítása három fejlődési állapotban (csírázás, 3-4 leveles csíranövény és reprodukciós fázis).
- 4) A rövid és a hosszútávú stresszválaszok azonosítása, elsősorban a nátrium és a kálium különböző növényi részekben (gyökér, zászlóslevél, szem) lévő koncentrációja alapján.
- 5) Annak megállapítása, hogy a korai fejlődési állapotban érzékelt tolerancia hatással van-e a későbbi fejlődési állapotban meghatározott paraméterekkel.

II. Hidegtűrés tesztelése:

- 1) Szarvasi rizs fajtagyűjtemény csírázóképeségének meghatározása alacsony hőmérsékleten, és a hazai nemesítésű fajták összehasonlítása a nemzetközi standard fajtákkal.
- 2) Fajtagyűjteményünk csíranövénykori (3-4 leveles) hidegtűrésének megállapítása, az alacsony hőmérséklet okozta klorofilldegradáció vizsgálatával.

Anyag és módszer

Sótűrési vizsgálatok

Felhasznált növényanyag

A kísérletekhez a növényi anyagokat a MATE, KÖTI-ÖVKI Galambosi Rizskísérleti Telepe által fenntartott rizsfajtagyűjtemény szolgáltatta. Hét *japonica* fajtát ('Dunghan Shali', 'Risabell', 'M 488', 'Janka', 'Dáma', 'Nembo' és 'Sprint') és egy *indica*-t ('Dular') választottunk ki a tesztelésre (1. táblázat).

1. táblázat: A sótűrési vizsgálatokban felhasznált fajták fajtacsoportja, sótoleranciája forrásmunkákkal

Fajta	Eredet	Fajtacsoport	Sótűrés	Megjegyzés	Forrás
D. Shali	Magyarország	<i>japonica_1</i>	n.a	Erőteljes vigor	Abe et al. 2012
Dular	India	<i>indica</i>	n.a	-	
Dáma	Magyarország	<i>japonica_1</i>	n.a	DH fajta	Heszky et al. 1996
Janka	Magyarország	<i>japonica_1</i>	n.a	Jelenleg köztermesztésben	
M 488	Magyarország	<i>japonica_1</i>	n.a	Jelenleg köztermesztésben	-
Nembo	Olaszország	<i>japonica_2</i>	érzékeny	Jelenleg köztermesztésben	Frouin et al. 2018
Risabell	Magyarország	<i>japonica_1</i>	n.a	-	
Sprint	Olaszország	<i>japonica_2</i>	toleráns	-	Frouin et al. 2018

Csírázáskori sótűrés

Vizsgálatunkban 6 kezelést és 3 ismétlést használtunk. A csírázási tesztet klímakamrában (Binder Climatic/Photostability Test Chamber KBWF 240, Németország) végeztük. Előzetesen a magvak kétnapos előkezelését alkalmaztuk 50°C-on, hogy megtörjük a magvak nyugalmi állapotát (Gregorio *et al.* 1997). A szemeket 10%-os NaCl-os oldatban szétválasztottuk egészséges és léha szemekre, majd ezután az egészséges szemek felületét fertőtlenítettük 5%-os NaClO oldattal 10 percig. A csíráztatást Petri csészében végeztük el, 2 db szűrőpapír segítségével. A klímakamrát 30°C-os nappali, és 25°C-os éjszakai hőmérsékletre állítottunk be 12 órás ciklusokban. A sós kezelést desztillált vízzel és NaCl-dal végeztük el a következő koncentrációkban: 0

mM, 30 mM, 60 mM, 90 mM, 120 mM és 150 mM. Az elkészült oldatok pH-ját, elektromos vezetőképességét (EC) és hőmérsékletét az 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A kezelésként használt oldatok fizikai paraméterei: az oldat vezetőképessége (EC), pH, hőmérséklet (T).

	EC (dS/m)	pH	T (°C)
0mM	0,19	6,76	21,9
30mM	3,33	6,83	21,5
60mM	6,26	6,58	21,2
90mM	9,08	6,51	21,9
120mM	11,82	6,49	21,8
150mM	14,52	6,51	21,8

A vizsgálat során az alábbi paramétereket használtunk fel a kiválasztott rizsfajták csírázási dinamikájának leírására:

- Csírázási százalék (GP): a negyedik napon kicsírázott magvak száma/összes magszám *100
- A nyugalmi időszak hossza (DT): a magvak nyugalmi időszaka, a napok száma a csírázás elindulásáig
- Medián csírázási idő (MGT): a csírázás 50%-ához szükséges idő (Ranal 1999): $MGT = t_i + (N/2 - n_i) - (t_j - t_i) / (n_j - n_i)$
- Csírázás sebessége: $R_{50} = 1/MGT$ (Labouriau 1983)
- A csírázás sebességének gátlásának küszöbértéke: $IC_{10,50} = R_{50} * 0,9; 0,5$. Az a koncentráció, ahol az R_{50} a kontrollhoz képest 10%-kal és 50%-kal csökken (Bertazzini *et al.* 2018).
- Gyökér- és hajtáshosszmérés (RL, CL): a csíranövényeket a 7. napon, vonalzó segítségével mértük meg.

Csíranövénykori tesztelés

A csíranövény kori sótürési tesztet az IRRI módszere alapján végeztük el (Gregorio *et al.* 1997). A növényeket Yoshida tápoldatban (Yoshida *et al.* 1976) neveltük 4 leveles állapotáig, majd ezt követően 12 dS/m NaCl-os tápoldatra cseréltük a tápoldatot. A kiértékelés a kezelést követő 10. napon

történt meg. A vizsgálat során 17 paramétert használtunk a kiválasztott rizsfajták fiziológiai változásának leírására: Biomassza paraméterek: hajtás (SDW), gyökér (RDW) és teljes (TDW) biomassza száraz tömeg. A levelek membrán károsodásának megállapításához a membránstabilitási indexet (MSI), a gyökerek sérülésének mértékét gyökér életképesség tesztel állapítottuk meg (RV). A pigmenttartalom meghatározása Sims és Gamon (2002) módszere szerint történt, míg a nátrium- és káliumtartalmat Thermo Scientific Solaar M6 atomabszorpciós spektrofotométerrel mértük.

A sótűrés vizsgálata a reprodukciós fázisban

A reprodukciós fázis alatti sótolerancia mértékét egy tenyészedényes üvegházi kísérlettel határoztuk meg. A kísérlet előkészítése során Gregorio *et al.* 1997 módszerét követtük, mellyel a fajták hosszú (S1) és rövidtávú (S2) stresszválaszait vizsgáltuk. A kísérletben 90 literes műanyag ládákat használtunk, melybe 50 kg kezeletlen talajt töltöttünk, ami reprezentálja a mai Magyarországi rizsföldek minőségét. Ezt a talajt kontrollként használtuk, hogy szimuláljuk a fajták szántóföldi teljesítményét. A sókezelést húsz liter 12 dS/m NaCl-os vízzel hajtottuk végre. Az első kezelést (S1) a folyamatos sóstressz érdekében 4 leveles állapotban indítottuk el, a másodikat (S2) pedig reprodukciós fázis alatt (BBCH 37-43) A vízszintet a tenyészidőszak alatt a talajfelszín felett 1 cm-rel tartottuk (Gregorio *et al.* 1997). A talaj elektromos vezetőképességet hetente ellenőriztük 1:5 arányú talaj : víz mintákban. A talajkivonat 25°C-on mért vezetőképességét (EC₂₅) használtuk a talaj sótartalmának kifejezésére (Bado *et al.* 2016). A kísérlet során a vegetatív és a termés hozamhoz kapcsolódó paramétereket határoztunk meg, valamint a tolerancia meghatározásához leggyakrabban használt nátrium és kálium koncentrációkat és a belőlük számolt arányokat.

Hidegtűrés vizsgálatok

Felhasznált növényanyag

Az előkísérlethez 7 fajtát választottunk ki ('Dunghan Shali', 'Dular', 'IRAT 109', 'Janka', 'Nembo', 'Sandora', 'Sprint') hogy a hidegstresszre

adott válaszok széles skáláját képviseljék. Különösen a következő kiválasztási ismérveket vettük figyelembe: hidegtűrés/érzékenység, származási ország és alfajok (*indica*, *japonica*, *tropical japonica*).

Az előkísérlet után a MATE-ÖVKI 164 darab genotípust tartalmazó fajtagyűjteményét teszteltük alacsony hőmérsékleti csírázóképessegre és csíranövénykori klorofill degradációra.

Csírázáskori tesztelés

Az előkísérlet során különböző hőmérsékleteket állítottunk be: 10°C, 12°C, 13°C és 15°C-on, majd a kísérlet során 3 ismétlésben 40 sterilizett magot két szűrőpapír között Petri csészében csíráztattunk 28 napig egy Lovibond TC 256 G típusú 0,1°C-os pontosságú hűthető termosztátban. A megfelelő nedvességet desztillált vízzel biztosítottuk. Az összehasonlításhoz a medián csírázási időt (MGT) vettük alapul.

Az előkísérlet után 13°C-on csíráztattuk a genotípusokat, ugyanolyan körülmények között. A szemek hasonló előkezelésen estek át, mint a sőtűrésnél említettek és az összehasonlítás is hasonló paraméterek alapján zajlott: medián csírázási idő (MGT), csírázási százalék (GP), csírázási index (GI): $GI = (N_{14} + N_{21} / 2) / 40 \times 100$ (Cruz és Milach 2004) és gyökér- és hajtáshosszmérés (R%, C%).

Csíranövénykori tesztelés

A hidegtolerancia mértékét egy természetes lehűlési periódus ideje alatt fellépő klorofilltartalom változásával követtük nyomon szántóföldi körülmények között, összesen négy év alatt. A mérésekhez egy Konika Minolta SPAD 502 eszközt (2018, 2019 és 2020-ban), és CID Bio-Science levél spektrométert (2021-ben) használtunk. A hidegtűrés vizsgálatok során genotípusonként 60-60 db szem került elvetésre egy-egy 1 méteres sorba. Ahhoz, hogy a természetes lehűlési periódus a megfelelő érzékenységgű növényállománnyal találkozzon három különböző vetésidőt alkalmaztunk: egy korai (április 10), egy normál (április vége) és egy kései (május eleje-közepe) A méréseket a növények 2-3 leveles állapotában végeztük el. Minden genotípus esetén 10 biológiai ismétléssel dolgoztunk. A kísérlet 10 napig

tartott, a nulladik időpont a természetes lehülési periódus kezdete, egyben a kísérlet kezdetét is jelentette, az 5. napon történt az első mérés, közvetlenül a lehülési periódus után, míg újabb öt nap után a 10. napon. Levélspektrométerrel a klorofilltartalom mennyiségét az alábbi képlet segítségével számoltuk ki Parry és mtsai. (2014) nyomán:

$$\text{CPHLT} - \text{Chlorophyll TOTAL } (\mu\text{g}/\text{cm}^2): \text{CPHLT} = (8,2 * A663) + (20,2 * A645)$$

A fajtákat a klorofillváltozás mértéke alapján öt kategóriába soroltuk (3. táblázat). Az esetleges mérési bizonytalanság elkerülése végett 1 egységnyi változást nem tekintettünk jelentős különbségnek. Az így nyert reakciókat és eloszlásokat a kísérletünkben is szereplő, a szakirodalom által is bizonyított, hideg toleráns fajták ('M202', 'Sandora') értékeihez viszonyítottuk.

3. táblázat: A relatív klorofill tartalom (SPAD, 2018,2019, 2020) és a klorofilltartalom ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$; 2021) változása alapján felállított kategóriák az egyes genotípusok reakcióinak elkülönítésére

Kategória	Változás	Magyarázat
1.	>+1	Klorofilltartalom emelkedés legalább 1 egységgel
2.	+1(-1)	Nem tapasztalható jelentős változás
3.	-1(-2)	Klorofilltartalom csökkenés 1-2 egységgel
4.	-3(-5)	Klorofilltartalom csökkenés 3-5 egységgel
5.	>-5	Klorofilltartalom csökkenés > 5 egységgel

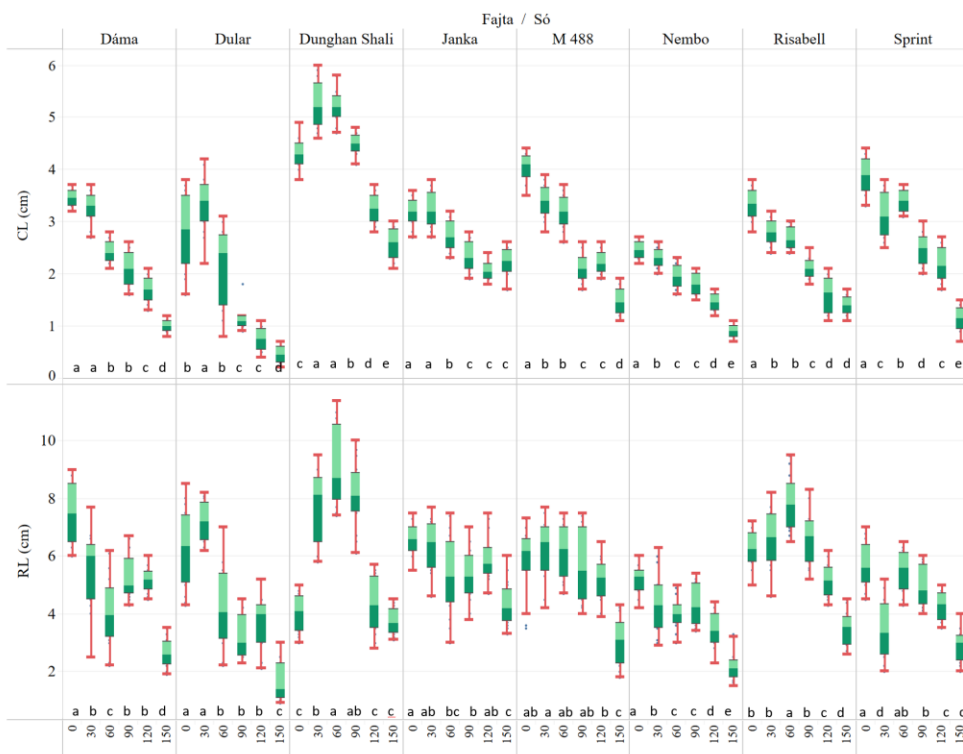
Statisztikai értékelés

A kezelések (só, hideg) hatásait MANOVA módszerrel vizsgáltunk meg. Szignifikáns kezeléshatás detektálása után a genotípus, a kezelés és a genotípus x kezelés interakciós hatásait kéttényezős varianciaanalízissel, ANOVA-val teszteltük, majd Tukey, vagy Games-Howell módszert alkalmaztunk. A paraméterek közötti korrelációt Pearson módszerrel számoltuk ki. A csíranövénykori hidegtűrés esetén a kezelés szignifikáns különbözőségét a kontroll időponthoz viszonyítva a Dunnett próbával állapítottuk meg. A kezelések, a fajták és a vizsgált évek további összehasonlításához főkomponens-analízist alkalmaztunk, az adatok standardizálása után.

Eredmények és azok megbeszélése

A csírázási paraméterek (DT, MGT, GP, GR) egyértelműen mutatták a magas sókoncentrációk károsító hatásait a fajták átlagában. Jelentősebb gátlás azonban csak 120 mM-os Na⁺ koncentrációnál következett be. A csírázást követően azonban a vizsgált fajták eltérő mértékben reagáltak a különböző sókoncentrációra (1. ábra).

Az 'M 488' és a 'Janka' fajtáknál koncentráció független gyökérnövekedés volt tapasztalható, míg a 'Risabell' és 'Dunghan Shali' esetében az emelkedő sókoncentráció növelte a gyökerek hosszát. Ráadásul az utóbbinál a hajtások is hasonlóképpen reagáltak (1. ábra). Korábbi publikált adatok szerint a növekvő Na⁺ koncentráció egyértelműen a koleoptil és radícula hosszúságának csökkenését okozta (Girma et al. 2016).



1. ábra: A különböző fajták koleoptil (CL) és radícula (RL) hossza (cm) a növekvő sókoncentráció függvényében (0mM-150mM). A különböző betűk szignifikáns különbséget jelentenek a koncentrációk között.

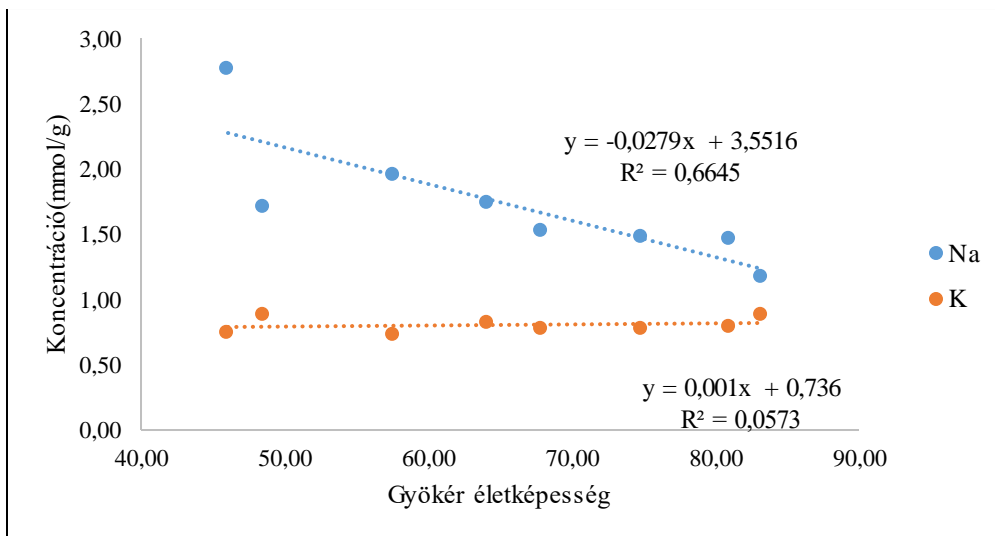
Csíránövénykorban 12 dS/m-es sóterhelés hatására mind a biomassa produkcióban, mind gyökerek és hajtások sérülésének mértékében szignifikáns

hatásokat mutattunk ki, mind a fajták, mind a fajtacsoportok között. A nátrium és kálium koncentrációjának alapján (4. táblázat) megállapítható, hogy a gyökér Na⁺ koncentrációban nincs akkora különbség (0,99-1,37), mint a gyökér K tartalmában (0,38-0,71). Pires és mtsai. (2015) 56 genotípus átlagaként 12 dS/m kezelés után 0,3 mmol/g kálium koncentráció határozott meg, ami a kísérleti méréseink átlagának (0,6 ± 0,06 mmol/g) mindösszesen a fele. Legnagyobb kálium felvételi képességet a 'Risabell' fajtánál mutattunk ki (K/Na szelektivitás, 4. táblázat). A hajtás esetében viszont a kálium koncentráció volt kevésbé változékony. Vizsgálataink alapján a legmagasabb Na/K arányt a 'Nembo' és a 'Sprint' fajtákban detektáltunk, míg legalacsonyabbat a 'Dunghan Shali'-nál. A 'Nembo' és a 'Sprint' nátrium koncentráció (2,77 és 1,96 mmol/g) azért is kiemelkedőnek számít, mert Pires és mtsai. (2015), ugyanekkora sóstressz mellett az érzékeny fajtáknál sem tapasztalt 1,8 mmol/g-nál nagyobb nátrium koncentrációt.

4. táblázat: A hajtás és a gyökér nátrium és kálium koncentrációja (mmol/g), és a belőlük számolt paraméterek egymáshoz viszonyított értékei. A kisbetűk szignifikáns különbséget jeleznek a fajták, míg a nagybetűka fajtacsoportok között p < 0,05.

Fajta	Hajtás				Gyökér				
	Na	K	Na/K	K/Na szelektivitás	Na	K	Na/K	K/Na szelektivitás	SNa/RNa
Dáma	1,53b	0,77a	1,99b	30,65bc	1,06ab	0,65cde	1,64ab	36,07bc	1,44
Dular	1,71bc	0,88a	1,96b	30,66bc	1,37c	0,38a	3,60c	16,43a	1,25
D. Shali	1,17a	0,89a	1,31a	45,29d	1,17bc	0,67de	1,76ab	33,73bc	1,00
Janka	1,49b	0,77a	1,93b	52,05bc	0,96a	0,58bcd	1,65ab	35,96bc	1,55
M 488	1,74bc	0,82a	2,13bc	27,78bc	1,06ab	0,55b	1,91b	31,11b	1,64
Nembo	2,77d	0,75a	3,68d	16,09a	1,09ab	0,64cde	1,70ab	34,88bc	2,54
Risabell	1,46b	0,80a	1,82ab	32,61c	0,99ab	0,71e	1,39a	42,83c	1,47
Sprint	1,96c	0,73a	2,69c	22,02ab	1,17b	0,56bc	2,07b	28,53b	1,68
Japonica_1	1,48A	0,81A	1,84A	37,68B	1,05A	0,63B	1,67A	35,94B	1,42
Japonica_2	2,37B	0,74A	3,18B	19,06A	1,13A	0,60B	1,89A	31,71B	2,11
Indica	1,71A	0,88A	1,96A	30,66AB	1,37B	0,38A	3,60B	16,43A	1,25

Megvizsgáltuk továbbá, hogy a hajtásban mért Na⁺ és K⁺ koncentrációt befolyásolja-e valamilyen gyökérparaméter. Azt tapasztaltuk, hogy a gyökerek életképességének növekedése csökkent hajtásbeli Na⁺ koncentrációt eredményezett (2. ábra).



2. ábra: A levél Na⁺ és K⁺ koncentrációja a gyökér életképességének függvényében

Az üvegházi tenyészedényes kísérletben S2 kezelés hatására szignifikánsan növekedett a gyökér nátrium koncentrációja (396,55 $\mu\text{mol/g}$; $p < 0,001$), ezt korábbi tanulmány is igazolta (Pires et al. 2015). Azonban ez a szint a hosszabb távú stressz (S1) esetén lecsökkent (12. táblázat). A kálium szint a rövid távú kezelés hatására a 'Dáma' kivételével csökkent, ami a hosszú távú alkalmazkodás miatt a 'Janka', 'Risabell' és 'Sprint' fajtáknál ismét kontroll szintre emelkedett (5. táblázat).

5. táblázat: A gyökér Na és K mennyisége $\mu\text{mol/g}$ -ban két kezelésben (S1 és S2) fajtánként és fajtacsoportonként. Az S1 a folyamatos sóterhelés mellett mért értékeket, az S2 a reprodukciós fázisban tapasztaltakat mutatja. Az ezekből számolt, Na/K értékek. A kisbetűk szignifikáns különbséget jeleznek a fajták, míg a nagybetűk a fajta-csoportok között, míg a * a kezelés és a kontroll közötti különbséget (* - $p < 0,05$; ** - $p < 0,01$; *** - $p < 0,001$).

Fajta	Na ($\mu\text{mol/g}$)			K ($\mu\text{mol/g}$)		
	Kontroll	S1	S2	Kontroll	S1	S2
Dáma	227,93ab	212,70cd	287,74a	168,16abc	142,58d	122,33b*
Dular	289,40bcd	234,88d*	483,25d***	145,10ab	108,82bc**	166,07c*
D. Shali	235,10ab	205,89cd*	366,25ab***	141,82ab	124,30cd*	91,05a**
Janka	192,98a	144,63ab*	418,88bcd***	183,89c	81,97b**	165,09c
M 488	226,33ab	135,49a**	315,35a***	135,04a	48,08a**	79,2a**
Nembo	338,84d	244,16d*	471,08cd*	309,08d	183,76e*	163,43c**
Risabell	270,77bc	195,01c*	396,48bc**	154,99abc	92,84b***	158,91c

Sprint	304,05cd	176,16bc*	448,16cd**	172,76bc	107,54bc**	161,64c
Átlag	255,37	198,89**	396,55***	173,98	112,00***	139,41*
Japonica_1	227,19A	182,36A*	353,16A***	158,89A	100,35A***	122,58A*
Japonica_2	321,45B	216,96A**	457,33B***	240,92B	145,65A*	162,53B
Indica	289,40B	234,89B*	483,25B***	145,10A	108,83A**	166,07B*

A zászlólevelek átlagos nátriumtartalmát mindkét stresszkezelés (S1 és S2) a kontroll mennyiség kétszeresére emelte (6. táblázat). A megemelkedett Na⁺ mellett a K koncentráció is szignifikánsan növekedett. Az S2 kezelés mindösszesen csak két fajtánál az 'M 488' és a 'Dular' esetében nem emelte meg a zászlólevelek Na tartalmát, noha a gyökerekben jelentős mértékűek voltak. Az 'M 488' esetében kiemelendő az extrém magas Na koncentráció, függetlenül a kezeléstől. A 234-272 µmol/g-os érték Ahmadizadeh és mtsai. (2016) mérései szerint jellemzően a harmadik és a negyedik levélre jellemzőek. A 'Dáma' fajta nátrium és kálium koncentrációja, valamint azok a növényi szervek közötti megoszlásának alapján az *indica* csoporttal egyenértékű toleranciát mutat. Ezen kívül a 'Janka', 'M 488' és a 'Risabell' fajták magas szinten képesek a K koncentrációt tartani. Ez ellentmond Lee és mtsai. (2003) vizsgálatainak, akik szerint a *japonica* nem rendelkezik magas K felvétellel, így stressz hatására nem emelkedhetne a koncentrációjuk a kontroll fölé.

6. táblázat: A zászlólevél Na és K koncentrációja µmol/g - ban két kezelésben (S1 és S2) fajtánként és fajtacsoportonként. Az S1 a folyamatos sóterhelés mellett mért értékeket, az S2 a reprodukciós fázisban alkalmazott stresszhatását mutatja. A kisbetűk szignifikáns különbséget jeleznek a fajták, míg a nagybetűk a fajtacsoportok között, míg a * a kezelés és a kontroll közötti különbséget mutatja (* - p < 0,05; ** - p < 0,01; *** - p < 0,001).

Fajta	Na (µmol/g)			K (µmol/g)		
	Kontroll	S1	S2	Kontroll	S1	S2
Dáma	21,03c	29,73ab	86,56b**	411,42de	433,25cd	404,73bc
Dular	11,59abc	14,81a	11,75a	267,52a	288,41a	347,57ab**
D.Shali	17,31abc	39,60ab*	83,3b**	434,10e	344,76ab**	520,21d*
Janka	19,53bc	89,60b**	90,91b**	452,17e	520,97e**	481,72cd
M 488	271,86e	250,54c	233,8c	362,79bc	454,39de*	428,39c
Nembo	6,71ab	54,37ab**	22,00a**	317,73b	280,48a*	316,71a
Risabell	11,44abc	93,95b***	55,25a**	370,16cd	503,32de**	517,4d**
Sprint	4,41a	41,13ab*	25,00a*	375,45cd	367,26bc	414,15bc

paraméterben azonban nincs szignifikáns különbség, noha például a koleoptilek hossza csaknem kétszeres különbséget mutat. A csírázási index tekintetében viszont már szignifikáns különbséget mutattunk ki. Cruz és Milach (2004) vizsgálata alapján is ez a paraméter a legmegbízhatóbb a csírázási paraméterek közül.

7. táblázat: Az öt különböző fajtacsoport csírázási paramétereit. Az N a forrásadatok alapján az adott csoportba sorolható genotípusok számát jelenti. A különböző betűk szignifikáns különbséget jelentenek a csoportok között. MGT = medián csírázási idő, FGP = végső csírázási százalék, GI = csírázási index, C% = > 5mm koleoptilek %-os aránya, R% = > 5mm radícula-k %-os aránya.

Fajtacsoport	N	MGT	FGP	GI	C%	R%
aromatic	3	22,73c	52,22a	20,69a	8,56a	2,72a
aus	2	19,20ab	86,67b	40,83ab	1,83a	2,67a
indica	37	20,73ab	56,27ab	39,78ab	9,60a	3,33a
temp. japonica	94	12,86a	85,34ab	74,96c	57,39b	52,04b
trop.japonica	12	17,23ab	77,08ab	54,51ab	24,96ab	14,54ab

A korai vegetatív fejlődés során mért klorofill degradáció négy éves adatai alapján kijelenthető, hogy a *japonica* csoport erőteljesebb hidegtoleranciával rendelkezik, mint az *indica* fajtacsoport. Ezt a tudományos irodalom is alátámasztja (Mackill és Lei 1997). Hidegtűrő *indica* vonalat eddig csak Biswas publikált (Biswas et al. 2017). A *tropical japonica* csoport hidegtoleranciája gyengébbnek mutatkozott a *temperate japonica* csoporthoz képest két évben (2019 és 2021) is, habár szignifikáns különbséget csak a stressz előrehaladottabb állapotában, a 10. napon detektáltunk (8. táblázat). Megfigyelésünk részben alátámasztja Mackill és Lei (1997) eredményeit, akik azt tapasztalták, hogy a *tropical japonica* genotípusok az *indica* és a *temperate japonica* genotípusok közötti értékeket vesz fel, de szignifikánsan nem különböznek egymástól. Eredményeink alapján ez az állítás elfogadható azzal a kiegészítéssel, hogy erőteljesebb stressz esetében, viszont már szignifikánsan különbözik a két csoport. Az *indica* csoporton belül a 'Teqing' és 'CO 39' fajtáknál tapasztaltuk a legnagyobb hidegtoleranciát, az 5. napon mért klorofill csökkenést a regeneráció alatt képesek voltak a kezelés előtti szintre emelni. Habár a 'Teqing' rendszerint negatív kontrollként, érzékeny genotípusként szerepel (Zhi-Hong et al. 2005). Ráadásul a 'CO 39' a sztenderdek ('M202' és 'Sandora') teljesítményét is elérte, így ez a fajta az egyetlen *indica* csoportba

tartozó genotípus a fajtagyűjteményünkben, amely jelentős hidegtoleranciát mutatott.

8. táblázat. Az átlagos relatív klorofill tartalom (SPAD, 2018,2019) és a klorofilltartalom ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$; 2021) változása a kontroll időponthoz képest fajtacsoportonként, 2018, 2019 és 2021-ben. A különböző betűk szignifikáns különbséget jelentenek a fajtacsoportok között.

	2018			2019			2021		
	Kontroll	5. nap	10. nap	Kontroll	5. nap	10. nap	Kontroll	5. nap	10. nap
<i>aromatic</i>	34,85ab	31,85ab	33,00ab	23,70a	18,50ab	18,10a	19,85a	16,35a	15,85a
<i>aus</i>	32,60a	29,00a	31,80a	21,20a	17,30a	17,10a	18,35a	1,80ab	15,85a
<i>indica</i>	34,91ab	31,24a	33,59abc	20,83a	16,95a	17,76a	18,86a	17,04ab	15,78a
<i>temp.japonica</i>	35,25ab	36,29bc	37,98bc	24,04a	22,02b	24,72c	22,54a	21,79b	21,14b
<i>trop.japonica</i>	36,83b	36,70c	38,37c	22,69a	19,29ab	21,38b	20,05a	18,18ab	16,47a

Következtetések és a javaslatok

Eredményeim alátámasztották, hogy a Magyarországon nemesített fajták általában jó hideg és sótűrő képességgel rendelkeznek. Számos hazai fajta/genotípus teljesítménye jelentősen felülmúlta a nemzetközi sztenderdekét. Mivel a hazánkban előállított rizsek nemzetközi felhasználására csak elvétve akad példa (Sandora), így ezek a vonalak további nemesítési programokban való felhasználása javasolt. Manapság a klímaváltozás miatt egyre nagyobb az érdeklődés az olyan génforrások iránt, amelyek hozzájárulhatnak az abiotikus stressztűrő képesség fokozásához. Ehhez az igényhez szeretne hozzájárulni ez a kutatási program is, amely támpontot nyújthat további nemesítési programok számára, illetve olyan genetikai vizsgálatokhoz, amelyek mélyebben kívánják vizsgálni ezen vonalak stressztűrőképességét.

A dolgozatban felhasznált genotípusokat több fejlődési állapotban vizsgáltuk a magas sókoncentráció és az alacsony hőmérséklet által kiváltott stresszhatásokra adott válaszok alapján. Vizsgálataink kimutatták, hogy a jelenleg is köztermesztésben lévő két fajta az 'M 488' és a 'Janka' csírázáskori gyökérnövekedése tartós maradt egészen a 90 mM-os Na⁺ koncentrációig. A 'Risabell' és a 'Dunghan Shali' fajták esetében pedig pozitív hatást is kimutattunk. E két fajta gyökérnövekedése erőteljesebb volt Na⁺ jelenlétében. Az utóbbi fajtánál ez a növekedési erély a hajtás esetében is fennállt. A vegetatív fejlődés alatt a Magyarországon nemesített fajták (*japonica_1*) vizuális megfigyelés alapján világosabb levelűek. A kísérletek alátámasztották, hogy ez alacsonyabb klorofill, karotinoid és antocianin tartalmat jelent. Stressz hatására az antioxidánsként is funkciónáló karotinoidok és antocianinok szintje jelentősen megemelkedik. A *japonica_2* és az *indica* esetében viszont stressz hatására nem változik az antocianinok szintje, a karotinoidok koncentrációja kismértékben emelkedik. Ezen eredmények a *japonica_1* nem enzimatis antioxiáns rendszerének gyors válaszát igazolják. Továbbiakban egyéb, ide tartozó anyag, aszkorbinsav, glutation mennyiségét is érdemes lenne megvizsgálni.

A csíranövénykori tesztelés során kimutattuk, hogy a gyökérparaméterek, elsősorban annak tömege és kálium koncentrációja szignifikáns hatással van a későbbi fejlődési állapotra. A kálium koncentráció

a 'Janka', 'M 488' és a 'Risabell' fajták képesek magas szinten tartani a zászlólevelében, még erőteljes sóstressz alatt is. A szakirodalom szerint a *japonica* csoport nem rendelkezik magas K^+ felvételi képességgel stressz alatt. Ezt igazolja a fajták többsége, hiszen az S2 kezelés hatására a kálium koncentráció nem tud a kontroll szintre visszaállni. A 'Janka' és az 'M 488' esetében a mért magas K szintet a gyökér K tartalmának remobilizációjával éri el. Viszont a 'Risabell' esetében teljesen helyreáll a hosszú távú stressz alkalmazásakor.

Az 'M 488' gyors K mobilizációja még kontroll körülmények között is megvalósul, magas Na^+ terheléskor pedig extrém magas Na koncentrációt mérünk. A 234-272 $\mu\text{mol/g}$ -os érték jellemzően a harmadik és a negyedik levélnél figyelhető meg. A Na gyors transzportja akadálytalanul valósul meg ennél a fajtánál, hiszen a szemek Na^+ koncentrációja is kiemelkedően magas. A magas Na^+ koncentráció ellenére fiziológiai károsodást nem mutattunk ki a kontroll esetében, annak ellenére, hogy közel azonos Na^+ koncentrációt figyeltünk meg. Az erőteljesebb kompartmentalizáció meglétét a négy vakuoláris *NHX* gén (*OsNHX1*, *OsNHX2*, *OsNHX3* és *OsNHX5*) expressziójának vizsgálatával lehetne biztosan eldönteni.

A dolgozatban továbbá azonosítottuk azokat a genotípusokat, amelyeknek az alacsony hőmérsékleti csírázóképesége kiemelkedő. Ez a tulajdonság a mérsékelt övi rizstermesztés esetében kiemelkedő fontosságú, hiszen ezen a területeken a közvetlen földbevetés az alkalmazott technika. A szakirodalmi adatok alapján a *tropical japonica* vonalak hidegtűrése jelentősen nem különbözik a *temperate japonica*-tól. Méréseink négy éve alatt azonban kimutatható, hogy mérsékelt stressz esetén ez valóban így van, de jelentős hőmérséklet csökkenés esetében a különbség statisztikailag is igazolható. A csoportok közötti különbség feltárását nehezíti, hogy a fajták között olykor jelentős különbségek figyelhetők meg, különösen a *temperate japonica* vonaloknál. Ezen csoportnál megfigyelhető, hogy a hosszúszemű genotípusok ('Risabell'; 'Ringola'; 'Oryzella' és a 'Risabell B-3/13') gyengébb teljesítményt mutatnak csírázáskor. Ugyanakkor az *indica* csoportba tartozó vonalak közül a leghidegtűróbbnek bizonyult 'CO 39' kerek szemű. Úgy tűnik tehát, hogy a szemhosszúság és a hidegtűrés között erőteljes kapcsolat van. Így a jövőben a hosszúszemű vonalak előállításakor különösen fontos a hidegtűrés tesztelése.

Új tudományos eredmények

- 1) Két fajta ('Janka', 'M 488') a növekvő sókoncentráció ellenére stabil gyökérnövekedést mutatott egészen 120mM-ig, további kettő ('Risabell' és 'Dunghan Shali') erőteljesebb gyökérnövekedést produkált, mint a kontroll, egészen 90mM-ig.
- 2) A *japonica_1* csoport klorofill tartalma folyamatos sóstressz mellett szignifikánsan alacsonyabb, mint a másik két csoporté. Antocianin és karotinoid tartalma stresszmentes körülmények között szintén alacsonyabb, koncentrációjuk sóterhelésre megemelkedik, az antocianinok szintje az *indica* szintjével megegyező szintre.
- 3) A csíranövény korban mért gyökérparaméterek, elsősorban annak tömege és K koncentrációja szignifikánsan korrelál a reprodukciós fázis alatti biomasszával és a későbbi termés mennyiségével az S1 kezelés esetében.
- 4) A 'Dáma' fajta a *japonica* csoporton belül egyedülálló módon az *indica*-val egyenértékű sótoleranciát mutat. Kiemelkedő toleranciájú fajta ritka a *japonica*-k között, mivel bizonyos toleranciamechanizmusok hiányoznak a csoportból.
- 5) A 'Risabell' fajta magas kálium koncentrációt mutat, mind gyökérben, mind zászlólevélben, ami nem magyarázható csak a remobilizációval.
- 6) Csírázáskor és csíranövénykorban erőteljesebb hidegstressz esetén a *tropical japonica* csoport hidegtoleranciája gyengébb a *temperate japonica* csoporthoz képest, mint ahogy a szakirodalom alapján várható.
- 7) Az általánosan hidegérzékenyként leírt *indica* csoportból korábban egy hidegtűrő genotípust azonosítottak. Vizsgálataink alapján hidegtűrőként azonosítottuk a 'CO 39' fajtát. E genotípus minden vizsgált évben elérte a sztenderdek ('M202' és 'Sandora') teljesítményét mind csírázáskor, mind csíranövény korban.

Irodalomjegyzék

- ABE, A. *et al.*, (2012): OsGA20ox1, a candidate gene for a major QTL controlling seedling vigor in rice. *TAG. Theoretical and applied genetics. Theoretische und angewandte Genetik*, 125 (4), 647–657 p.
- AHMADIZADEH, M. *et al.*, (2016): Reproductive stage salinity tolerance in rice: a complex trait to phenotype. *Indian Journal of Plant Physiology*, 21 (4), 528–536 p.
- BADO, S. *et al.*, (2016): Prediction of Salt Tolerance in Rice (*Oryza Sativa*) Based on Shoot Ion Content under Non-Stressed Conditions. *Journal of Materials Science and Engineering*, 6 (1–2), 1–16 p.
- BISWAS, P.S. *et al.*, (2017): Mapping and validation of QTLs for cold tolerance at seedling stage in rice from an indica cultivar Habiganj Boro VI (Hbj.BVI). *3 Biotech*, 7 (6), 359.
- BERTAZZINI, M., *et al.*, (2018): A differential tolerance to mild salt stress conditions among six Italian rice genotypes does not rely on Na⁺ exclusion from shoots. *Journal of Plant Physiology*, 226, 145–153 p.
- CRUZ, R.P. da és S.C.K. MILACH, (2004): Cold tolerance at the germination stage of rice: methods of evaluation and characterization of genotypes. *Scientia Agricola*, 61 (1), 1–8 p.
- HESZKY, L.E., *et al.*, (1996): Release of the Rice Variety Dama Developed by Haploid Somaclone Breeding. In: Y.P.S. BAJAJ, ed. *Somaclonal Variation in Crop Improvement II*. Berlin, Heidelberg: Springer, 46–54 p.
- FROUIN, J. *et al.*, (2018): Tolerance to mild salinity stress in japonica rice: A genome-wide association mapping study highlights calcium signaling and metabolism genes. *Plos One*, 13 (1), e0190964 p.
- GIRMA, B., *et al.*, (2016): The effect of salinity on germination, vegetative and final growth stage of different rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Journal of Animal and Plant Sciences*, 29 (3), 4651–64 p.
- GREGORIO, G., *et al.*, (1997): Screening rice for salinity tolerance, *IRRI discussion paper series vol 22*. International Rice Research Institute, Los Banos, Fülöp-szigetek
- LABOURIAU, L.G., (1983): A Germinação das sementes. *Secretaria-Geral da Organização dos Estados Americanos, Programa Regional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico*, Washington, D.C., 174 p.
- LEE, K.-S. *et al.*, (2003): Salinity tolerance of Japonica and indica rice (*Oryza sativa* L.) at the seedling stage. *Planta*, 216, 1043–6 p.
- MACKILL, D.J. és X. LEI, (1997): Genetic Variation for Traits Related to Temperate Adaptation of Rice Cultivars. *Crop Science*, 37 (4), cropscl1997.0011183X003700040051x p.

- PARRY, C., *et al.*, (2014): In situ measurement of leaf chlorophyll concentration: analysis of the optical/absolute relationship. *Plant, Cell & Environment*, 37 (11), 2508–2520 p.
- PIRES, I. *et al.*, (2015): Comprehensive phenotypic analysis of rice (*Oryza sativa*) response to salinity stress. *Physiologia plantarum*, 155 (1), 43–54 p.
- RANAL, M.A., (1999): Effects of Temperature on Spore Germination in Some Fern Species from Semideciduous Mesophytic Forest. *American Fern Journal*, 89 (2), 149–158 p.
- SIMS, D.A. és J.A. GAMON, (2002): Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81 (2), 337–354 p.
- YOSHIDA, S. *et al.*, (1976): Routine procedures for growing rice plants in culture solution. *Laboratory Manual for Physiological Studies of Rice*
- ZHI-HONG, Z. *et al.*, (2005): A major QTL conferring cold tolerance at the early seedling stage using recombinant inbred lines of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Science*, 168 (2), 527–534 p.

A jelölt az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációi

Tudományos közlemények

Székely, Á., Szalóki, T., Jancsó, M., Pauk, J., Lantos, C. (2023). Temporal Changes of Leaf Spectral Properties and Rapid Chlorophyll—A Fluorescence under Natural Cold Stress in Rice Seedlings. *PLANTS-BASEL*, 12(13), 2415. **IF– 4,5**

Székely, Á., Szalóki, T., Lantos, C., Pauk, J., Jancsó, M. (2023). Data of germination ability of tetraploid rice lines under multiple stress factors. *DATA IN BRIEF*, 48. **IF– 1,2**

Székely, Á., Szalóki T., Pauk, J., Lantos, C., Ibadzade M., Jancsó, M. (2022). Salinity Tolerance Characteristics of Marginally Located Rice Varieties in the Northernmost Rice-Growing Area in Europe. *AGRONOMY (BASEL)*, 12(3). **IF– 3,7**

Székely, Á., Szalóki, T., Lantos, C., Pauk, J., Venkatanagappa, S., Jancsó, M. (2022). Data of selected set of rice accessions at the germination stage under cold stress. *DATA IN BRIEF*, 41. **IF– 1,2**

Székely, Á., Szalóki, T., Ibadzade, M., Pauk, J., Lantos, C., Jancsó, M. 2021b. Magyarországi rizs (*Oryza sativa* L.) fajtagyűjtemény hidegtűrésének vizsgálata természetes körülmények között. *Növénytermelés*, 70(1), pp.125–142.

Székely Á.; T. Szalóki; M.Ibadzade; J. Pauk; Cs. Lantos; M. Jancsó 2021a. Germination Dynamics of European Rice Varieties under Salinity Stress. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 58(1), pp.1–5. **IF– 0,856**

Konferencia részvétel

Jancsó, M., Szalóki, T., **Székely, Á.**, Bartolák, Z., et al., 2021. Új hosszú szemű rizsfajta: SZV Szellő. In *XXVII. Növénynevelési Tudományos Napok*. pp. 42–42.

Székely, Á., Szalóki, T., Vitányi, B., et al., 2019. Evaluation of cold damage in a Hungarian rice variety collection. In *18th Alps-Adria Scientific Workshop : Alimentation and Agri-environment : Abstract book*. pp. 180–181.

Székely, Á., Szalóki, T., Vitányi, B., Jancsó, M., Pauk, J., et al., 2019. How and why to use low temperature treatment in the rice breeding? In *18th Alps-Adria Scientific Workshop : Alimentation and Agri-environment : Abstract book*. pp. 148–149.

Székely, Á., Szalóki, T., Vitányi, B., Jancsó, M., Lantos, C., et al., 2019. Dihaploid rizs vonalak hidegtűrésének vizsgálata. In *Növénynevelés a 21. század elején: kihívások és válaszok*. pp. 460–463.

Szalóki, T.; Jancsó, M.; **Székely, Á.**; Vitányi, B. 2018a. Cold tolerance evaluation of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes at the germination – and the seedling stage. In *17th Alps-Adria Scientific Workshop*. pp. 56–57.

Szalóki, T.; Jancsó, M.; **Székely, Á.**; Vitányi, B. 2018b. Különböző rizsfajták hidegstressz tolerancia vizsgálata a vegetatív fejlődés korai szakaszában. In *XXIV. Növénynevelési Tudományos Nap*. pp. 56–57.

Oltalmi formák

Jancsó, M., Szalóki, T., **Székely, Á.**, Lantos, C., et al., 2021b. SZV Tünde államilag elismert rizsfajta.

Tudományos ismeretterjesztő kiadványok

Székely, Á., Szalóki, T.; Jancsó, M., 2019. Rizsszemek a világból - a hazai rizstermesztés versenyképességének javítása a nemesítés eszközeivel. In: *Lendületben az agrárinnováció*. pp. 81–94.