



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**TALAJBAKTÉRIUMOK SZEREPE A HIBRIDKUKORICA
SZÁRAZSÁGTŰRÉSÉNEK ÉS ALKALMAZKODÓKÉPESSÉGÉNEK
JAVÍTÁSÁBAN**

Doktori (PhD.) értekezés

Kálmán Csaba Dániel

Gödöllő

2024

A doktori iskola

megnevezése: Növénytudományi Doktori Iskola
tudományága: Növénytermesztési és Kertészeti tudományok
vezetője: Dr. Helyes Lajos
Egyetemi tanár, az MTA doktora
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar
Kertészeti Technológiai Intézet

Témavezető(k): Dr. Kiss Erzsébet
Egyetemi tanár, Professor emerita
Genetika és Biotechnológia Intézet
Dr. Posta Katalin
Egyetemi tanár, Intézetigazgató
Genetika és Biotechnológia Intézet

.....
Dr. Helyes Lajos

Iskolavezető jóváhagyása

.....
Dr. Kiss Erzsébet

Témavezető jóváhagyása

.....
Dr. Posta Katalin

Témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1	BEVEZETÉS.....	6
2	IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	9
2.1	A kukoricatermesztés jelentősége a világon.....	9
2.1.1	Kukoricatermesztés az Európai Unióban	11
2.1.2	A kukoricatermesztés helyzete Magyarországon	14
2.2	A szárazságstressz hatása a kukoricára.....	16
2.3	A PGPR-ok szerepe a növénytermesztésben.....	18
2.3.1	A PGPR-ok hatásmechanizmusai.....	19
2.3.2	A PGPR-ok szerepe a tápanyagellátásban.....	22
2.3.3	A foszfor és foszfor-mobilizálás	25
2.3.4	A PGPR-ok szerepe a növényi növekedés serkentésében.....	30
2.3.5	A PGPR-ok szerepe a kórokozók elleni védelemben.....	32
2.3.6	A PGPR-ok szerepe a szárazságstressz enyhítésében	33
2.4	Kihívások a PGPR alapú biotrágyákkal szemben	37
3	ANYAG ÉS MÓDSZER.....	40
3.1	Kísérleti növények és PGPR-ok	40
3.1.1	Tiszta tenyészetek és glicerines törzsek készítése.....	40
3.2	PGPR aktivitás vizsgálata.....	41
3.2.1	Foszfát-mobilizáló képesség vizsgálata	41
3.2.2	Növényi növekedést serkentő hatás vizsgálata	42
3.2.3	Szárazságstressz faktor elleni tolerancia fokozásának vizsgálata	44
3.3	A hibridek alkalmazkodóképességének vizsgálata talajoltás hatására szántóföldi körülmények között	45
3.3.1	Kísérleti környezet és kísérleti paraméterek	45
3.3.2	Az átlaghőmérséklet és a csapadék mennyisége a kukorica tenésziidejében	48
3.4	Statisztikai analízis	49

4	EREDMÉNYEK	50
4.1	PGPR aktivitás vizsgálata.....	50
4.1.1	Foszfát-mobilizáló képesség vizsgálata	50
4.1.2	Növényi növekedést serkentő hatás vizsgálata	52
4.1.3	Szárazságstressz faktor elleni tolerancia fokozásának vizsgálata	58
4.2	A hibridek alkalmazkodóképességének vizsgálata talajoltás hatására szántóföldi körülmények között	70
5	KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	86
5.1	A PGPR-ok foszfát-mobilizáló képessége.....	86
5.2	A PGPR-ok növényi növekedést serkentő hatása.....	87
5.3	Szárazságstressz faktor elleni tolerancia fokozása	89
5.4	A hibridek alkalmazkodóképességének változása talajoltás hatására szántóföldi körülmények között	91
6	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	94
7	ÖSSZEFOGLALÁS	96
8	SUMMARY	97
9	MELLÉKLETEK.....	98
9.1	M1. Irodalomjegyzék.....	98
9.2	M2. Ábrák jegyzéke.....	130
9.3	M3. Táblázatok jegyzéke.....	132
9.4	M4. A szántóföldi kísérlet lokációja és paraméterei	134
9.5	M5. Publikációk jegyzéke	136
10	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	137

RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

ADP:	adenozin-difoszfát
ANOVA:	analysis of variance
ATP:	adenozin-trifoszfát
CL:	koleoptil hossza
DMC:	szárazanyag-tartalom
DF:	szabadság fok
DNS:	deoxiribonukleinsav
DW:	száraz tömeg
EPS:	exopoliszacharid
FAO:	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FW:	nedves tömeg
HSP:	hősokkfehérje
ISR:	indukált szisztematikus rezisztencia
KSH:	Központi Statisztikai Hivatal
LSD:	legkisebb szignifikáns különbség
MATE:	Magyar Agrár és Élettudományi Egyetem
MWP:	tápközeg vízkapacitása
OA:	ozmotikus kiigazítás
PCA:	főkomponens analízis
PGPR:	Plant Growth Promoting Rhizobacteria
PGR:	Plant Growth Regulator
pH:	pondus hidrogenii
PHPR:	Plant Health Promoting Rhizobacteria
PSB:	Phosphate-Solubilizing Bacteria
RL:	radikula hossza
RNS:	ribonukleinsav
RO:	reverz ozmózis
SI:	oldódási index
SVI:	csírázási vigor index
SzD:	szignifikáns differencia
VOC:	illékony szerves vegyületek
W:	vízigény
WUE:	vízhasznosítási együttható

1 BEVEZETÉS

A zöld forradalom megjelenésével a huszadik század második felében világméretű fellendülés indult útjára a mezőgazdaságban. Új, magas terméshozamú fajták és hibridek nemesítésével, valamint a műtrágyák, növényvédő szerek és egyéb mezőgazdasági kemikáliák használatának fokozásával a „Green Revolution” jelentősen hozzájárult a növények termelékenységéhez és a terméshozamok növekedéséhez, mellyel emberek millióit kímélte meg az éhezéstől. A terméshozam maximalizálása érdekében a szintetikus inputok túlzott mértékű használata rontotta a szántóföld biológiai, fizikai és kémiai állapotát, ami világszinten a mezőgazdasági termelékenység csökkenő tendenciájához vezetett az elmúlt évtizedekben. Ezen túlmenően a túlzott vegyszerhasználat a talajban olyan ásványi anyagok és tápanyagok felhalmozódásához vezetett, amelyeket a növények nem, vagy csak nehezen képesek hasznosítani, és ez végső soron talajszennyezést és toxicitást eredményezett.

A foszfor a növények számára nélkülözhetetlen tápanyag. Kémiai és biológiai folyamatok révén a talaj összes foszfortartamának csak kis része hasznosítható közvetlenül, és ez a mennyiség nem fedezi a növények teljes foszforigényét. Magyarországon műtrágyázással, szervestrágyázással és egyéb módokon (például szaporítóanyagok kijuttatásával) végzik a talajok foszfor ellátását, melynek eloszlását tekintve a 2019-2021 évek során a műtrágya kijuttatás került túlsúlyba. Az elmúlt 10 évben átlag 93000 tonna, míg a 2019-2021 évek átlagát tekintve 113000 tonna foszfor hatóanyagot értékesítettek a KSH adatai alapján. A kiadagolt foszforműtrágya hatóanyagának kis százalékát tudja a növény közvetlenül hasznosítani, a többi lekötődik a talajban különböző foszfátok formájában, emiatt a talajok foszformérlege a kiviteli oldal felé billen. Magyarországon az elmúlt 10 év átlagát tekintve -4102 tonna volt a talajok foszfor tápanyagmérlege. Az egységnyi mezőgazdasági területre jutó tápanyagmennyiség átlaga -0,8 kg/ha (KSH 2022).

A népességnövekedés és klímaváltozás kapcsán egyre relevánsabb a jó termőképességű, biotikus és abiotikus stresszekkel szemben ellenálló fajták és hibridek előállítása. A szárazság és a hőség jelentős környezeti stressz, amely folyamatosan befolyásolja a növények növekedését és fejlődését. A kukorica (*Zea mays* L.) az abiotikus stresszekkel szembeni érzékenységéről ismert, ami gyakran jelentős veszteséget okoz a terméshozamban. 2019 és 2020-ban Magyarországon a kukorica átlagtermése elérte a 8,1 t/ha és 8,6 t/ha-t. 2021-ben a terméshozamok

átlagosan 6,0 t/ha-t mutattak, amely az előző két évhez mérten 26-30%-os terméskiesést jelentett a kukorica ágazatban (KSH 2022). Számos alkalmazkodási és enyhítési stratégiára van szükség a szárazságstresszel szemben. A szárazságtűrés megnyilvánulásához a környezeti tényezők és több gén együttes hatása szükséges. Kialakításához komplex perspektíva indokolt, melyben a biológiai, a genetikai, a nemesítési és az agrotechnikai ismeretek kollektív alkalmazása lehet kifizetődő.

A fenntartható mezőgazdaság előmozdítása a szintetikus mezőgazdasági kemikáliák használatának fokozatos csökkentésére és azok káros hatásainak mérséklésére irányuló környezetbarát technológiák keresése a biotrágyák és más mikrobiális alapú készítmények felfedezéséhez és későbbi használatához vezetett. A hatékony növényi növekedést serkentő rizobaktériumok (PGPR) aktívan kolonizálják a növények gyökereit, és kölcsönösen hasznos asszociációkat hoznak létre a gazdanövényekkel. A PGPR növényre gyakorolt kedvező hatásai ismertek. Fokozzák a víz és a tápanyagok felvételét és a növény biotikus és abiotikus stressz hatásokkal szembeni védelmét. A PGPR alkalmazása biotrágyaként a szintetikus mezőgazdasági inputok opcionális helyettesítő és kiegészítő környezetkímélő biotechnológiai alternatívája lehet a növénytermesztésben.

Mindezek alapján kutatómunkám kezdetén az alábbi célokat tűztem ki:

1. PGPR-ok foszfát-mobilizáló képességének *in-vitro* tesztelése a feltisztulási zónák átmérője, a foszfát-mobilizáló index és az oldott foszfor koncentráció értékének mérésével.
2. PGPR oltás hatásának vizsgálata a korai növényi növekedés serkentésére koleoptil és radikula változásának nyomon követésével hibridkukorica (GKT 3213, GKT 3385, GKT 376, GK Silostar) csíranövényen.
3. Hogyan befolyásolja a PGPR oltás a hibridkukorica (GKT 3385) fenológiai paramétereinek (növénymagasság, gyökér nedves tömeg, hajtás nedves és száraz tömeg, vízhasznosítási együttható, nedves tömeg/száraz tömeg aránya, szárazanyag-tartalom) alakulását abiotikus stressz (szárazságstressz) hatására 50%-os nővirágzás és tejes érés fenofázisában?
4. PGPR talajoltás hatására néhány szegedi nemesítésű hibridkukorica (GKT 3213, GKT 3385, GKT 376, GK Silostar) alkalmazkodóképességének vizsgálata néhány, a termést meghatározó tulajdonság (szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvesség, szem szárazanyag-tartalom) és beltartalmi érték (fehérjetartalom, keményítőtartalom és olajtartalom) nyomon követésével szántóföldi körülmények között.

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 A kukoricatermesztés jelentősége a világon

A gabonafélék fontos szerepet játszanak a világ gyarapodó népességének ételmezésében. A rizs és a búza után a harmadik legjelentősebb növény a kukorica, amely egyrészt az egyik legfontosabb közvetlen élelmiszer alapanyag, másrészt az állati takarmányoknak is releváns összetevője. Az egyre növekvő kereslet a különféle ipari felhasználási lehetőségek iránt - mint például: keményítő, édesítőszer, etanol - előreláthatóan még fontosabb és előkelőbb pozícióba helyezi a termesztett növények között. Termelési területe a világon 2021-ben eléri a 206 millió hektárt, míg az 1960-as években ez mindössze 105 millió hektárt jelentett. A világ fő kukorica termelő országai az Egyesült Államok, Kína és Brazília, valamint az Európai Unióban Franciaország, Olaszország, Lengyelország, Magyarország és Románia. A 10 legfontosabb kukorica termelő ország a világ teljes kukorica termőterületének 64-66%-át teszi ki (1. táblázat).

1. táblázat: A világ 10 legnagyobb kukorica termelő országának termőterülete 1000 ha-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
USA	35355	35390	33644	32678	35106	33481	32891	32916	33311	34555
Kína	35046	36339	37150	44995	44208	42429	42158	41309	41292	43355
Brazília	14198	15279	15432	15407	14970	17427	16126	17515	18253	19024
Argentína	3696	4863	4836	4626	5346	6530	7138	7232	7730	8146
Ukrajna	4371	4826	4626	4083	4252	4480	4564	4986	5392	5481
India	8710	9430	9430	9258	8690	9633	9380	9027	9569	9860
Mexikó	6923	7095	7060	7099	7598	7327	7122	6690	7156	7139
Indonézia	3957	3821	3837	3787	4444	5533	5680	3606	4330	3495
Dél Afrika	2699	2781	2688	3048	2212	2995	2633	2596	2908	3118
Franciaország	1709	1843	1825	1637	1442	1435	1426	1506	1691	1549
Magyarország	1191	1242	1191	1146	1011	988	939	1027	981	1054
Összesen	116664	121667	120528	126618	128268	131270	129118	127383	131632	135722
Világ összesen	180367	187557	186492	191056	194262	198506	195423	194555	199994	206000
Arány (%)	64,7	64,9	64,6	66,3	66,0	66,1	66,1	65,5	65,8	65,9

A 20. század második felében a kukoricatermesztés jelentősen előre mozdult a hektáronkénti hozam tekintetében. Míg az 1950-es években a termésátlagok 2-3 t/ha körül alakultak, addig a hibridek megjelenése, a szintetikus inputok (műtrágyák és növényvédő szerek) alkalmazása, valamint a fejlettebb gazdálkodási technikák miatt a terméshozam megduplázódott, az 1980-as évekre 6-7 t/ha-ra növekedett. Egyes fejlett országokban (USA, Franciaország) elérte a 9-10 t/ha-t, ami az ötvenes évek termésátlagának háromszorosa. 2021-ben a globálisan előállított kukorica

produktum összmenyisége 1,21 milliárd tonna. 10 ország adja a világ kukoricatermelésének közel 80%-át (**2. táblázat**).

2. táblázat: A világ 10 legnagyobb kukorica termelő országának termésmennyisége 1000 t-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)

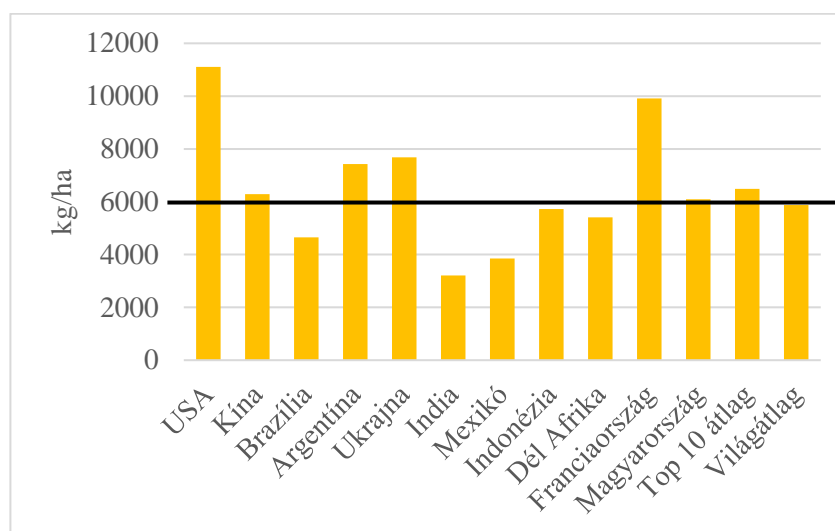
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
USA	273192	351271	361091	345486	412262	371096	364262	345962	358447	383943
Kína	205719	218621	215812	265157	263777	259256	257348	260957	260876	272762
Brazília	71072	80273	79881	85283	64188	97910	82366	101126	103963	88461
Argentína	21196	32119	33087	33817	39792	49475	43462	56860	58395	60525
Ukrajna	20961	30949	28496	23327	28074	24668	35801	35880	30290	42109
India	22260	24259	24259	24170	22570	25899	28752	27715	28765	31650
Mexikó	22069	22663	23273	24694	28250	27763	27169	27228	27424	27503
Indonézia	19387	18511	19008	19612	23578	28924	30253	19650	24687	20010
Dél Afrika	12120	11810	14250	10628	8214	17551	13103	11824	15843	16870
Franciaország	15393	15041	18343	13716	11839	14534	12580	12845	13419	15358
Magyarország	4762	6756	9315	6632	8729	6739	7930	8229	8365	6424
Összesen	410177	805517	817500	845890	902544	917076	895096	900047	922109	959191
Világ összesen	875548	1016799	1040718	1053891	1123728	1139704	1124172	1137617	1162997	1210235
Arány (%)	46,8	79,2	78,6	80,3	80,3	80,5	79,6	79,1	79,3	79,3

A világ összes kukorica termőterületéből Kína 43 millió hektárt (teljes termőterület 21%-a) és az Egyesült Államok 34 millió hektárt (teljes termőterület 17%-a) foglal el. A legnagyobb kukorica hozamot ebben a két országban termelik, de a termésmennyiség esetében az arányok megfordulnak. Az Egyesült Államok 383 millió tonnát (világtermelés 32%-át), míg Kína 272 millió tonnát (világtermelés 23%-át) produkálta. A termelékenység különbsége látványos. Az Egyesült Államok előnye az átlaghozamok terén csaknem megduplázódott (**3. táblázat**). Tehát miközben Kína saját szükségleteinek kielégítésével küzd, addig az Egyesült Államok a világ legnagyobb kukoricaexportőre. Ugyanakkor nem lehet figyelmen kívül hagyni Kína kukorica termelési potenciálját.

3. táblázat: A világ 10 legnagyobb kukorica termelő országának átlaghozama kg/ha-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
USA	7727	9925	10732	10572	11743	11083	11074	10510	10760	11110
Kína	5869	6016	5809	5892	5966	6110	6104	6317	6317	6291
Brazília	5005	5253	5176	5535	4287	5618	5107	5773	5695	4649
Argentína	5734	6603	6840	7309	7442	7575	6088	7861	7553	7429
Ukrajna	4794	6411	6158	5712	6602	5505	7843	7194	5617	7681
India	2555	2572	2572	2610	2597	2688	3065	3070	3006	3209
Mexikó	3187	3194	3296	3478	3718	3788	3814	4069	3832	3852
Indonézia	4898	4844	4954	5178	5305	5227	5326	5448	5700	5723
Dél Afrika	4490	4246	5300	3487	3712	5859	4975	4553	5447	5410
Franciaország	9002	8159	10050	8378	8206	10123	8820	8528	7935	9911
Magyarország	3997	5437	7818	5787	8630	6815	8445	8008	8527	6092
Top 10 átlag	5205	5696	6246	5813	6201	6399	6424	6485	6399	6487
Világátlag	4854	5421	5580	5516	5784	5741	5752	5847	5815	5878
Arány (%)	107,2	105,1	111,9	105,4	107,2	111,5	111,7	110,9	110,0	110,4

Az 1. ábra szerinti átlaghozamok mutatják, hogy milyen eltérő színvonalon termelnek az egyes országok.



1. ábra: A világ 10 legnagyobb kukorica termelő országának átlaghozama 2021-ben (FAOSTAT 2022)

Indiában és Mexikóban az átlaghozamok 2021-ben nem érték el a 4 t/ha-t. Ezzel szemben az USA 11 t/ha és Franciaország 10 t/ha átlaghozammal bírt. Magyarország a hozamokat tekintve 2021-ben a 6. helyre került a legjelentősebb 10 ország között.

2.1.1 Kukoricatermesztés az Európai Unióban

Az EU-27 legnagyobb kukorica termelője 2021-ben Franciaország, Olaszország, Magyarország, Lengyelország és Románia. Az EU-27 kukorica hozama 50 millió tonna. Az EU-25 között Magyarország a termelési terület tekintetében

Franciaország után a második, az előállított kukorica mennyiségét tekintve pedig Franciaország és Olaszország után a harmadik helyen állt. 2007. január 1. után, Románia és Bulgária csatlakozásával már Románia rendelkezett a legnagyobb termőterülettel az EU-27-ben, 2021-ben 1 millió hektárral több kukoricát vetettek, mint Franciaországban. Az EU-27 részesedése a világ összes kukorica termőterületéből 2021-ben 4,5%. Csökkenés mérhető a korábbi évek 4,8-5,5%-hoz képest (4. táblázat).

4. táblázat: Az EU-27 5 legnagyobb kukorica termelő országának termőterülete 1000 ha-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Franciaország	1709	1843	1825	1637	1442	1435	1426	1506	1691	1549
Magyarország	1191	1242	1191	1146	1011	988	939	1027	981	1054
Olaszország	978	908	869	727	660	645	591	628	602	588
Lengyelország	543	614	678	670	593	562	645	664	946	998
Románia	2722	2515	2504	2598	2578	2403	2443	2681	2540	2554
Összesen	7143	7122	7067	6778	6284	6033	6044	6506	6760	6743
EU-27 összesen	9843	9787	9580	9228	8524	8253	8252	8910	9215	9247
Világ összesen	180367	187557	186492	191056	194262	198506	195423	194555	199994	206000
Arány (%)	5,5	5,2	5,1	4,8	4,4	4,2	4,2	4,6	4,6	4,5

A termésmennyiség tekintetében viszont még így is Franciaország az első, míg Románia a második 2021-ben. Magyarország visszaesett a negyedik helyre Lengyelország után. Az összes termésmennyiségben belül az Unió részaránya 5,6-7,5% (5. táblázat).

5. táblázat: Az EU-27 5 legnagyobb kukorica termelő országának termésmennyisége 1000 t-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Franciaország	15393	15041	18343	13716	11839	14534	12580	12845	13419	15358
Magyarország	4762	6756	9315	6632	8729	6739	7930	8229	8365	6424
Olaszország	7860	7899	9239	7073	6839	6048	6199	6279	6793	6079
Lengyelország	3995	4039	4468	3156	4342	4021	3792	3664	6694	7321
Románia	5953	11305	11988	9021	10746	14326	18663	17432	10096	14820
Összesen	37963	45040	53353	39598	42495	45668	49164	48449	45367	50002
EU-27 összesen	59608	67013	77575	59264	62960	65146	69004	70099	66998	72987
Világ összesen	875548	1016799	1040718	1053891	1123728	1139704	1124172	1137617	1162997	1210235
Arány (%)	6,8	6,6	7,5	5,6	5,6	5,7	6,1	6,2	5,8	6,0

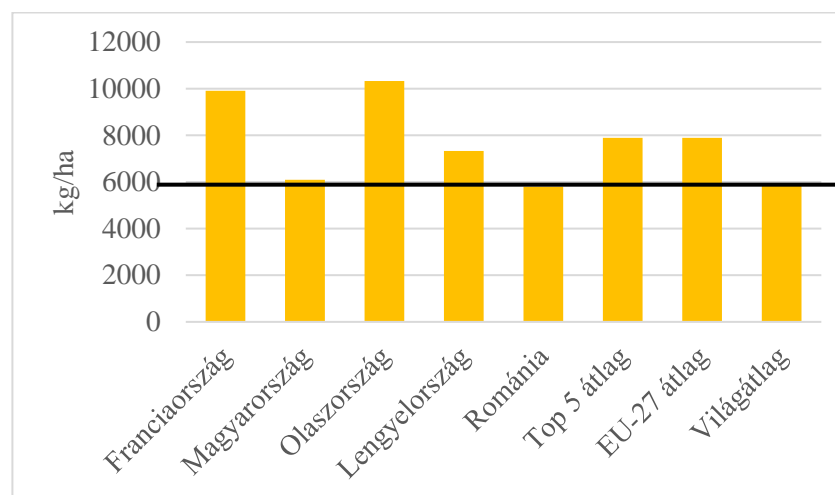
A hozamokat tekintve Románia egyelőre az utolsó helyen van az EU-ban, viszont ez jelzi egyúttal a fejlődési potenciált is. Ha Románia termelése megduplázódna, akkor nagy terméstöbblet keletkezne a kukoricából, ami az olcsó szállítási lehetőségek miatt versenyt jelentene Magyarország számára. Amennyiben a bioetanol program továbbra is lendületesen fejlődik, Európának erre a potenciális

többet is szüksége lesz. Termelékenységben az EU az élen jár. Az EU-27 termésátlaga megközelítőleg 2 millió tonnával haladja meg a világot (6. táblázat). A legmagasabb hozamokkal Olaszország, Franciaország és Lengyelország rendelkezik (2. ábra). Azonban itt érdemes megemlíteni, hogy nagyobb mennyiségű kemikália felhasználás is ezekben az országokban tapasztalható.

6. táblázat: Az EU-27 5 legnagyobb kukorica termelő országának átlaghozama kg/ha-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Franciaország	9002	8159	10050	8378	8206	10123	8820	8528	7935	9911
Magyarország	3997	5437	7818	5787	8630	6815	8445	8008	8527	6092
Olaszország	8032	8698	10620	9725	10351	9366	10485	9985	11268	10329
Lengyelország	7348	6576	6588	4708	7317	7154	5875	5511	7076	7333
Románia	2187	4494	4787	3471	4167	5961	7636	6499	3974	5801
Top 5 átlag	6113	6673	7973	6414	7734	7884	8252	7706	7756	7893
EU-27 átlag	6055	6847	8097	6421	7385	7893	8361	7866	7270	7893
Világátlag	4854	5421	5580	5516	5784	5741	5752	5847	5815	5878
Arány (%)	124,7	126,3	145,1	116,4	127,7	137,5	145,4	134,5	125,0	134,3

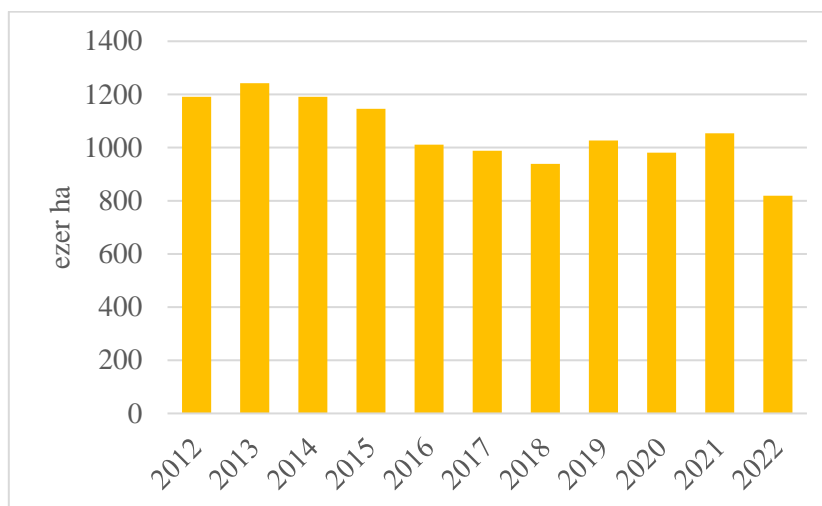
Magyarország az erős középmezőny felső régiójában helyezkedik el. Ez 2021-ben az aszályos évjáratnak köszönhetően a korábbi intenzív évek 8-8,5 t/ha-os átlagához képest 6 t/ha-ra csökkent.



2. ábra: Az EU-27 5 legnagyobb kukorica termelő országának átlaghozama 2021-ben (FAOSTAT 2022)

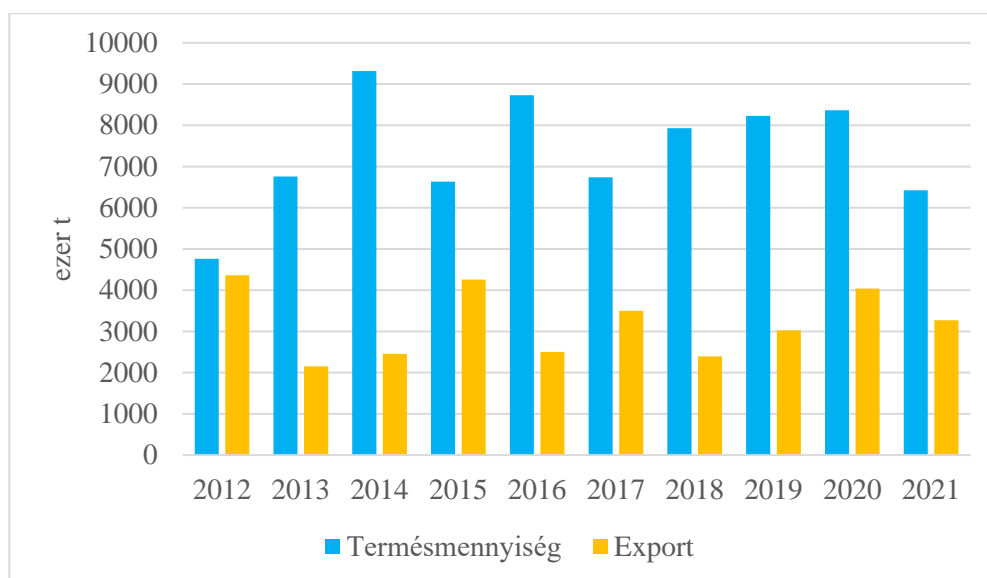
2.1.2 A kukoricatermesztés helyzete Magyarországon

Az elmúlt 10 évben a kukorica vetésterülete 1 és 1,2 millió hektár között mozog (**3. ábra**), ami a hozzávetőleg 5 millió hektáros országos szántóterület 20-24%-a. A kalászos gabonák után a kukorica a második legfontosabb termesztett kultúrnövényünk.



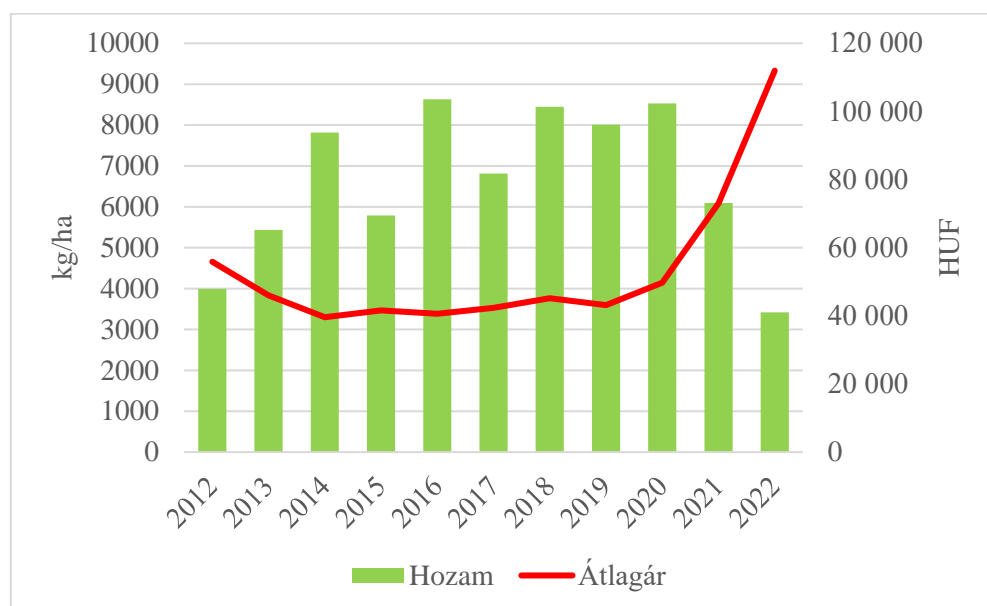
3. ábra: A kukorica termőterülete 2012-2022-ig (FAOSTAT 2022, KSH 2023)

Terméshozamait tekintve a gabonafélék között a kukorica képes a legnagyobb termésmennyiséget produkálni egy hektár termőterületen. Az országos átlaghozamok alapján a termésmennyiség az 1980-as években érte el az ágazat csúcspontját. Világviszonylatban Magyarország a második helyen állt az USA mögött. Az ingadozó termésmennyiség jelentősen megnehezíti a hosszabbtávú export szerződések megkötését, hiszen elsőbbséget élvez a belső igények kielégítése. Ennek megfelelően a 2014-es, a 2016-os, valamint a 2018-2020-as években jelentkezett rekordtermések ellenére sem tudott nőni az export (**4. ábra**).



4. ábra: A kukorica termelt mennyisége és exportja 2012-2021-ig (FAOSTAT 2022)

Az árakat illetően a különböző években jelentős ingadozás tapasztalható. Ez elsősorban az időjárással, azon belül a csapadékkal mutat szoros összefüggést. A csapadékhányos években (például: 2012, 2021 és 2022) számottevően csökkentek az átlaghozamok, ezzel párhuzamosan pedig az árukészlet, ami az árak emelkedéséhez vezetett. Ezzel szemben az intenzívebb, csapadékos években az árak visszaestek a megnövekedett terméshozamok miatt (5. ábra).



5. ábra: A terméshozamok és az eladási átlagárak 2012-2022-ig (FAOSTAT 2022, KSH 2023)

2.2 A szárazságstressz hatása a kukoricára

Az aszály az egyik legnagyobb gazdasági veszteséget okozó stresszor. Az aszály hatása a növények növekedésére és fejlődésére a stressz időzítésétől és intenzitásától függ (Nakashima és mtsai. 2012). A stressz a különféle fiziológiai és biokémiai folyamatokat (például: fotoszintézis, légzés, transzlokáció, ionfelvétel, szénhidrátok felvétele, tápanyagcsere) is negatívan befolyásolja (Aslam és mtsai. 2015).

A szárazságstressz többek között a nedvességtartalom és a vízpotenciál csökkenését, a turgornyomás változását, a sztómák záródását és a növény növekedésének elmaradását okozza. Vízhányos körülmények között ROS (reaktív oxigénformák), például szuperoxid, hidrogén-peroxid és más szabad gyökök szabadulnak fel, amelyek károsítják a növényi anyagcsereutakat. A ROS túlzott jelenléte a levelekben fontos sejt molekulák, köztük fehérjék, lipidek, nukleinsavak és klorofilok kémiai oxidációját okozza, ami sejthalálhoz vezet (Moreno-Galván és mtsai. 2020, Li és mtsai. 2021). A növény enzimatikus vagy nem enzimatikus mechanizmuson alapuló antioxidáns rendszere összehangoltan működik az oxidatív stressz normalizálásában a toxikus ROS semlegesítésével (Ullah és mtsai. 2019). Mindkét mechanizmus magába foglalja a ROS eltávolítását a növényi sejt oxidatív károsodásának csökkentése érdekében. Az alacsony molekulatömegű szerves vegyületek (pl.: számos cukor, aminosav, prolin) segítik a növényi sejteket a folyadékszint normalizálásában (Azeem és mtsai. 2022).

A növények szárazságstresszhez való alkalmazkodóképességének javítása régóta a nemesítés fontos törekvése, amelyet nehéz megvalósítani részben azért, mert ezek kvantitatív tulajdonságok, melyek kifejeződéséhez több különböző gén összehangolt működése felelős (Lopes és mtsai. 2011). A termésbecslések szerint a kukorica szemtermésének 15-20%-a veszik el évente az aszálykár miatt. A veszteségek tovább növekedhetnek, mivel az éghajlatváltozás miatt az aszályok is gyakoribbá és súlyosabbá válnak (FAOSTAT 2010). Az öntözés lehetősége sok gazdálkodó számára nem biztosított, valamint korlátozott annak bővítése és modernizálása a fejlődő országokban (World Bank 2005). A genetikai potenciál és a jó biológiai alapok alkalmazása a szárazságtűrés, valamint a termésbiztonság javítására, a globális termelés stabilizálásának fontos része. Éppen ezért a szárazságstresszel szembeni fokozott tűrőképességű és nagyobb vízhasznosítási hatékonyságú kukorica fajták nemesítése kiemelt célkitűzéssé vált a nemesítési

programok során mind a magán, mind az állami szektorban (Bruce és mtsai. 2002). A szárazságtűrés kvantitatív jellege miatt a növények fenotipizálása idő és erőforrásigényes folyamat. Több éven át több termőhelyen végzett tesztelést igényel a kapcsolt tulajdonságok meghatározása (Khadka és mtsai. 2020, Sheoran és mtsai. 2022). A nemesítési programok különféle stratégiákkal javítják a növények szárazságtűrését, mint például az ismétlődő szelekció, az elkülönülő populáció értékelése, a több helyszínen tartó provokációs és teljesítménykísérletek stresszelt környezetben, a genom szintű szelekciós megközelítés és a transzgenikus és genomszerkesztés technológia (Mickelbart és mtsai. 2015, Chowdhury és mtsai. 2021).

A kukorica növények V2-V4 fázisban (2-4 leveles korban) a szárazságra a fejletlen gyökérrendszerük miatt igen érzékenyen reagálnak. A stressz a növényállományt megritkíthatja, fejlődésében visszavetheti. A kukorica szárazságstresszének tipikus vizuális tünetei: színváltozás zöldről zöldsészürkére, valamint az alsó, majd a felső levelek pöndörödése („furulyázása”). A sztómák bezárulnak, a fotoszintézis élesen lecsökken és a növénynövekedés lelassul (Edmeades 2013). V6-V14 fázisban (6-14 leveles korban) a szárazság miatt a növények generikus fizikai leromlása és fejlődésbeli elmaradása jellemző. A proterandria gyakori tünet, és a stressz hatására a termés mennyisége csökken. A kukorica a virágzás idején (VT) a legérzékenyebb a vízhiányra (Shahzad és mtsai. 2023). Szárazságstressz hatására a virágzatok fejlődése késik vagy előrehalad, virágzási aszinkron lép fel. A hímvirágzat elég, mely címerdurranást (top fire) eredményez, a pollen termékenyítő- és életképessége csökken, esetleg teljes sterilitás lép fel. A bibeszálak receptivitása redukálódik és meddőség következik be. Aszályos évjáratban a virágzás után jelentkező embrióabortálás a terméskiesés fő magyarázata. A vízhiány jelentősen csökkenti a csövenkénti szemszámot (Edmeades és mtsai. 2000). A termesztési környezetben a szárazságstressz súlyossága növekszik a tenyészidőszak végén. Ilyen helyzetben a kukorica szárában felhalmozódott asszimilátum újra mobilizálódik (Jurgens és mtsai. 1978). A gyökértől felfelé indulva a légszövetekig, az abszcizinsav kölcsönhatásba lép más növekedést szabályozó anyagokkal, különösen az etilénnel és a reaktív oxigénformákkal (Ribaut és mtsai. 2009). A gyökérzet morfológiai változtatása a talaj mélyebb rétegeiben található víz eléréséhez egy nagyon értékes tulajdonság az aszály sújtotta környezetben (Robertson és mtsai. 1993). Sok növényfaj, köztük a kukorica is a vízhiányra úgy

reagál, hogy a növekedést és a szárazanyag felhalmozódást a hajtástól a gyökér felé irányítja át (Hsiao és mtsai. 2000). Egy másik potenciálisan értékes stressztűrő mechanizmus az ozmotikus kiigazítás (OA), ami magába foglalja az oldott anyagok aktív felhalmozódását a sejtben. Ez lehetővé teszi a nedvesség megtartását az alacsony külső vízpotenciál esetén, így korlátozva a turgorvesztést és a sejtzsugorodás okozta károsodást. Tartós és súlyos aszály esetén ezek az oldott anyagok a különböző makromolekuláris szerkezetek stabilizálásában is szerepet játszanak (Tardieu és mtsai. 1998). A sztomák dinamikusan reagálnak a környezet változásaira és létfontosságú szerepet játszanak az aszály alatti nedvességvesztés korlátozásában. A kukorica jelző- és válaszrendszere érzékeny a vízpotenciál csökkenésére és korlátozza a vízvesztést az aszály korai szakaszában (Cochard 2002).

2.3 A PGPR-ok szerepe a növénytermesztésben

A növényi rizoszféra - a fejlődő növények gyökérrendszerét körülvevő szűk talajzóna - a talaj mikrobiális tevékenységének központja (De la Fuente Cantó és mtsai. 2020). A rizoszférában megtalálható a mikrobiális taxonok széles köre, beleértve a prokariótákat (archaea, baktériumok és vírusok) és az eukariótákat (gombák, oomyceták, fonálférgék, protozoák, algák és ízeltlábúak) is, amelyek közül a baktériumok és a gombák vannak jelen a legnagyobb számban (Kalam és mtsai. 2017, Buée és mtsai. 2009).

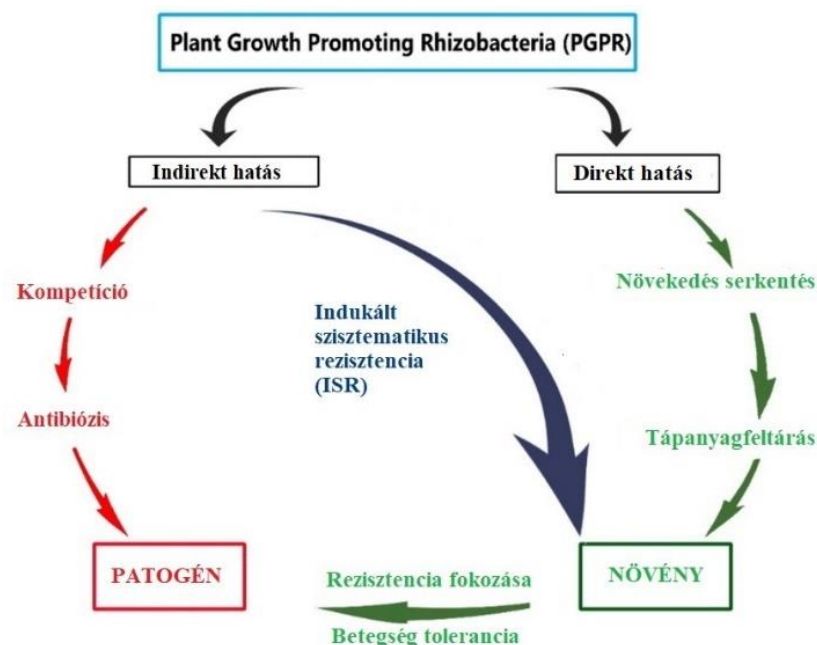
A talajban található élő mikrobák élettevékenységük révén hozzájárulnak a talaj biológiai, fizikai és kémiai jellegének alakításához. A mikroorganizmusok a növényi tápanyagfelvételt segítő képességük által fokozzák a tápanyagfeltáródást, azok mobilitását, illetve direkt módon serkentik a növények tápanyagfelvételét. A növény - mikroba szimbiózisok legfőbb, de nem kizárólagos élettani jellemzője, hogy valamilyen esetleges tápanyaghiányra történő alkalmazkodást jelentenek. Mindezek mellett számos egyéb ponton is kapcsolódnak a növények élettani folyamataihoz a vízháztartáson és hormonháztartáson keresztül egészen a védekezési rendszerig. A partnerek szempontjából nagyon változatosak a növények és a mikroszervezetek közötti mutualista szimbiózisok, amelyek arra utalnak, hogy az evolúció során ugyanarra a feladatra egymástól függetlenül jöttek létre (Parádi 2013, Goss és mtsai. 2017, Bastías és mtsai. 2022).

A gazdanövények és mikrobák kapcsolatát illetően a talajbaktériumok szerepe igen sokrétű. Azon szabadon élő talajbaktériumokat, amelyek a rizoszférában szaporodnak, kolonizálják a növények gyökereit és serkentik azok növekedését: növényi növekedést serkentő rizobaktériumoknak nevezik. Ezt a kifejezést Kloepper és Schroth vezette be 1978-ban (Dutta és Podile 2010, Hartman és Tringe 2019). A PGPR-ok a rizoszférában élő baktériumok csupán 2-5%-át teszik ki (Kloepper és mtsai. 1980). Ez a heterogén baktériumtársulás a talaj mikrobiom létfontosságú komponensét képviseli. Olyan szabadon élő, illetve gyökérfelszín vagy intercelluláris tereket kolonizáló (gyökéraszociált) baktériumokat foglal magába, amelyek befolyásolják a növények általános egészségi állapotát. Ezt a tápanyagfelvétel fokozásával, a fitopatogén mikrobák elleni védelemmel és a különböző abiotikus stresszekkel szembeni rezisztencia erősítésével éri el (Vessey 2003, Backer és mtsai. 2018, Parray és mtsai. 2016, Jafari és mtsai. 2022). Egy rizobaktérium törzs feltételezett PGPR-nak tekinthető, ha specifikus növényi növekedést serkentő tulajdonságokkal rendelkezik és oltás után képes stimulálni a növény fejlődését. Egy ideális PGPR törzsnek a következő kritériumoknak kell megfelelnie: rizoszféra kompetensnek és környezetbarátnak kell lennie, a kijuttatás után jelentős számban kell megtelepednie a növény gyökereiben, képesnek kell lennie a növényi növekedés serkentésére, széles hatásspektrummal kell rendelkezzen, kompatibilitást kell mutatnia a rizoszférában lévő más baktériumokkal, toleránsnak kell lennie számos fizikai-kémiai tényezővel szemben (hő, kiszáradás, sugárzás, oxidálószer) és jobb versenyképességet kell mutatnia a fennálló rizobaktérium közösségekhez képest (Vejan és mtsai. 2016, Vasseur-Coronado és mtsai. 2021).

2.3.1 A PGPR-ok hatásmechanizmusai

A PGPR közvetítette előnyök igen sokrétűek, melyeket hagyományosan a növényen belül és kívül előforduló direkt és indirekt mechanizmusokra osztottak (Goswami és mtsai. 2016, Glick 2012). Biofertilizátorként funkcionálnak a nitrogénfixálással történő tápanyag ellátottság javítása, vagy a talajból oldott ásványi anyagok (pl.: P, K, Zn, Fe stb.) feltárása és a tápanyagtranszport segítése révén. Közvetett hatásai közé tartozik a növény egészségi állapotának befolyásolása. Bioprotektánsként képes a növény védelmére a fitopatogének, a növényi kórokozók és a növekedést gátló mikroorganizmusok ellen, tér- és tápanyag kompetíció és antibiózis (pl.: hidrogén-cianid, sziderofórok, antibiotikumok és antimikrobiális metabolitok, kitinázok, glükánázok és proteázok termelése) révén. Biopeszticidként

képes a gátló anyagok lebontására és más káros mikroorganizmusok parazitizmuson alapuló elnyomására, valamint szisztémás rezisztencia kiváltására (ISR) a gyökér- és levélkórokozók széles spektrumával szemben (Bíró és mtsai. 1996, Bíró és mtsai. 1999, Meena és mtsai. 2020, Islam és mtsai. 2016, Berg és mtsai. 2017, Sayyed és mtsai. 2019, Ortiz-Castro és mtsai. 2020, Kour és mtsai. 2023, Upadhyay és mtsai. 2023, Guan és mtsai. 2023). Biostimulátorként a növény növekedésének és fejlődésének serkentése fitohormonok előállításával, mint az auxinok, a citokininek, a gibberellinek, az abszcizinsav és az etilén, vagy vitaminok termelése által fejthetnek ki pozitív élettani hatást. Rizomediátorokként a xenobiotikumok lebontását serkenthetik és védelmet nyújthatnak bizonyos abiotikus stresszfaktorokkal szemben (pl.: szárazság, magas hőmérséklet, áradás, oxidatív stressz, UV sugárzás) (Gupta és Pandey 2023) (6. ábra).



6. ábra: A PGPR, a növények és a kórokozók közötti kölcsönhatások (Basu és mtsai. 2021)

A különböző PGPR törzsek képesek növelni a termés mennyiségét és fokozni a növényi kórokozókkal szembeni ellenállóképességet. Elősegítik a hüvelyesekben a gümőképződést és javítják a növények csírázókéességét (Vejan és mtsai. 2016, Kalam és mtsai. 2020, Swarnalakshmi és mtsai. 2020, Gopalakrishnan és mtsai. 2015, Bhattacharyya és Jha 2012, Vaikuntapu és mtsai. 2014). A PGPR-ok a gazdanövényeken kiváltott közvetlen és közvetett hatások miatt ideális jelölteknek bizonyulnak biostimulátorként és növényvédő mikrobiológiai készítményként történő formulázásra és kereskedelmi forgalomba hozatalra. Ismert PGPR-ok közé

tartoznak: *Acinetobacter*, *Aeromonas*, *Agrobacterium*, *Allorhizobium*, *Arthrobacter*, *Azoarcus*, *Azorhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Bradyrhizobium*, *Burkholderia*, *Flacetobacterium*, *Coobacetabacterium*, *Coobacterium*, *Cloobacterium*, *Klebsiella*, *Mesorhizobium*, *Micrococcus*, *Paenibacillus*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Serratia*, *Streptomyces* és *Thiobacillus* (Vessey 2003, Ahemad és Kibret 2014, Parray és mtsai. 2016, Kalam és mtsai. 2020, Goswami és mtsai. 2016, Cordero és mtsai. 2023).

A PGPR-ok hatásfoka a gazdanövénytől függően változik (García-Fraile és mtsai. 2015). Ezen kívül a hatékonyságukat egyéb más fontos szempontok is befolyásolják: biotikus tényezők, a növény genotípusa és fejlődési stádiumai, a növény védelmi mechanizmusai, valamint a mikrobiális közösség más tagjainak jelenléte. Az abiotikus tényezők, mint a talaj típusa, annak összetétele, a talajápolás, az uralkodó környezeti feltételek szintén befolyásolják a mikrobák hatékonyságát (Gouda és mtsai. 2018, Vacheron és mtsai. 2013). Esetenként egy-egy PGPR faj többféle módon is előnyére válhat a növénynek. Például képes egyszerre serkenteni a növény hormontermelését és a védekezési rendszerét. Az endoszimbiózis kialakításának képessége mellett, a nitrogénfixáló endoszimbionta fajok - mint a *Rhizobium* - rendelkeznek számos PGPR tulajdonsággal (például: hormon- és vitamintermelés, foszfát-szolubilizáló képesség és patogének elleni védelem). Bizonyos esetekben egyes *Rhizobium* fajok a nem pillangós növényeket (pl.: rizs, búza vagy kukorica) is tudják kolonizálni (Parádi 2013). A *Frankia* fajok képesek a szimbiózis kialakítására nem hüvelyes növényekkel, mint a mogyoró, a homoktövis vagy az akác (Matics és Bíró 2015).

A PGPR-ok jelenléte a rizoszférában elsősorban a gazdanövénytől függ, mert ezeknek a baktériumoknak a gyökér által kibocsátott fehérjékben, aminosavakban és cukrokban gazdag folyadékok (exudátumok) az alapvető szénforrásai. Az exudátumok a környezeti körülményektől és a növényfajoktól függő minősége és mennyisége a baktériumok biomasszáját és diverzitását is meghatározza (Parádi 2013, Weemstra és mtsai. 2022). A PGPR-ok jótékony hatásainak áttekintését a **7. táblázat** tartalmazza.

7. táblázat: Biotrágya alapját képezhető mikroorganizmusokkal végzett vizsgálatok (Basu és mtsai. 2021)

A PGPR előnyei a növények számára	PGPR törzs(ek)	Vizsgált növény(ek)	Irodalom
Tolerancia a szárazság stresszel szemben	<i>Pseudomonas fluorescens</i> DR11, <i>Enterobacter hormaechei</i> DR16, <i>Pseudomonas migulae</i> DR35, <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Achromobacter piechaudii</i> ARV8, <i>Phyllobacterium brassicacearum</i> , <i>Paenibacillus polymyxa</i> , <i>Rhizobium tropici brasil</i> , <i>Azosespirillum brasil</i>	Rókfarkú köles (<i>Setaria italica</i> L.), kukorica (<i>Zea mays</i> L.), bab (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.), <i>Arabidopsis thaliana</i> , paradicsom (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill cv. F144), bors (<i>Capsicum annuum</i> L. cv. Maor), búza (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Timmusk <i>et al.</i> , 2014; Niu <i>et al.</i> , 2018; De Lima <i>et al.</i> , 2019; Bresson <i>et al.</i> , 2013; Figueiredo <i>et al.</i> , 2008; Yang <i>et al.</i> , 2009; Ilyas <i>et al.</i> , 2020
Tolerancia a sóstresszel szemben	<i>Bacillus pumilus</i> , <i>Exiguobacterium oxidotolerans</i> , <i>Bacillus megaterium</i> , <i>Azospirillum</i> sp., <i>Achromobacter piechaudii</i> , <i>Enterobacter</i> sp. PR14	Brahmi (<i>Bacopa monnieri</i> L.), kukorica (<i>Zea mays</i> L.), saláta (<i>Lactuca sativa</i> L.), paradicsom (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.), rizs (<i>Oryza sativa</i> cv. Sahbhagi), cirok (<i>Sorghum bicolor</i>), ujjasköles (<i>Eleusine coracana</i>)	Mayak <i>et al.</i> , 2004; Bharti <i>et al.</i> , 2013; Marulanda <i>et al.</i> , 2010; Fasciglione <i>et al.</i> , 2015; Sagar <i>et al.</i> , 2020
Tolerancia a biotikus stresszel szemben (biokontroll)	<i>Paenibacillus xylanexedens</i> , <i>Bacillus amyloliquefaciens</i> , <i>Streptomyces</i> sp., <i>Ochrobactrum intermedium</i> , <i>Paenibacillus lentimorbus</i> , <i>Pseudomonas</i> spp.	búza (<i>Triticum aestivum</i> L.), rizs (<i>Oryza sativa</i>), fenyő (<i>Pinus taeda</i> L.), paradicsom (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	Verma <i>et al.</i> , 2016; Srivastava <i>et al.</i> , 2016; De Vasconcellos et Cardoso, 2009; Gowtham <i>et al.</i> , 2016; Khan <i>et al.</i> , 2012; Reshma <i>et al.</i> 2018
Fokozott tápanyag felszívódás	<i>Pantoea</i> sp. S32, <i>Paenibacillus polymyxa</i>	Rizs (<i>Oryza sativa</i> L.), Kínai paprika (<i>Capsicum chinense</i>)	Chen <i>et al.</i> , 2019; Pii <i>et al.</i> , 2015; Castillo-Aguilar <i>et al.</i> 2017
A vetőmag csírázásának fokozása	<i>Serratia marcescens</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Azospirillum lipoferum</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Providencia</i> sp., <i>Brevundimonas diminuta</i>	Kukorica (<i>Zea mays</i> L.), búza (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Almaghrabi <i>et al.</i> , 2014; Nezarat et Gholami, 2009; Rana <i>et al.</i> , 2011
Biostimuláció fitohormon(ok) termelésével	<i>Azospirillum lipoferum</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Arthrobacter protophormiae</i> , <i>Dietzia natronolimnaea</i> , <i>Bacillus</i> sp.	Rizs (<i>Oryza sativa</i> L.), Paradicsom (<i>Solanum lycopersicum</i> L.), Búza (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Kalam <i>et al.</i> , 2020; Cassán <i>et al.</i> , 2001; Tahir <i>et al.</i> , 2017; Barnawal <i>et al.</i> , 2017
A talaj termékenységének fokozása	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Rhizobium</i> spp.	Nyárfa (<i>Populus</i> sp.), mungóbab (<i>Vigna radiata</i> L.)	Jang <i>et al.</i> , 2017; Islam <i>et al.</i> , 2017; Ahmad <i>et al.</i> , 2011
Nehézfémek és szennyező anyagok bioremediációja	<i>Ochrobactrum</i> sp., <i>Bacillus</i> spp., <i>Pseudomonas</i> spp., <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Alcaligenes faecalis</i> RZS2, <i>Pseudomonas aeruginosa</i> RZS3, <i>Enterobacter</i> sp. RZS5	Rizs (<i>Oryza sativa</i> L.), Földimogyoró (<i>Arachis hypogaea</i>), Kukorica (<i>Zea mays</i> L.), Álombogyó (<i>Withania somnifera</i>)	Pandey <i>et al.</i> , 2013; Khan et Bano, 2016; Das et Kumar, 2016; Kalam <i>et al.</i> , 2017; Patel <i>et al.</i> , 2016; Sayyed <i>et al.</i> , 2015
A növényi másodlagos metabolitok modulálása	<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Azotobacter chroococcum</i> , <i>Pseudomonas putida</i> , <i>Bacillus pumilus</i> , <i>Exiguobacterium oxidotolerans</i>	Bazsalikom (<i>Ocimum basilicum</i>), brahmi (<i>Bacopa monnieri</i> L.)	Banchio <i>et al.</i> , 2009; Ordookhani <i>et al.</i> , 2009

2.3.2 A PGPR-ok szerepe a tápanyagellátásban

A PGPR-ok tápanyagellátottságra gyakorolt aktivitása befolyásolhatja a növények tápanyagfelvételét és a fejlődésük gyorsaságát (Etesami és Adl 2020, Jalal és mtsai. 2023). A talaj – mikroorganizmus – növény interakció a növények tápanyagellátásában kulcsfontosságú, és a mikrobáknak ebben komplex hatásuk van. Számos funkció, mint például a gyökér növekedésének serkentése, a nitrogénfixáció, a foszfát-mobilizáció, a sziderofór szintézis, hozzájárul a növények

tápanyagfelvételének megkönnyítéséhez (Farhat és mtsai. 2023, Kumar és mtsai. 2022, Uzma és mtsai. 2022).

Saghafi és mtsai. (2019) megállapították, hogy a gyökérszövet növekedésének serkentése a PGPR alkalmazásával fokozott tápanyagfelszívódást eredményezett. A gyökerekben lévő iontranszportereket olyan szabályozó mechanizmusok irányítják, amelyek a növény tápanyagigényétől függően változtatják működésüket. A növekedés és a tápanyag felszívódás serkentéséhez a PGPR-nak be kell avatkoznia a növények növekedését és tápanyagfelvételét koordináló útvonalakba (Guan és mtsai. 2023, Ortiz-Castro és mtsai. 2020). Carreiras és mtsai. (2023) szerint a PGPR-ok képesek aktiválni a gyökéren belüli iontranszport rendszereket és közvetlenül javítani a tápanyagok elérhetőségét a rizoszférában.

A tápanyagellátás fokozása során a baktériumok aktivitásának két alapvető formája közül az első, hogy oldhatóvá teszik és mineralizálják az elemeket, különös tekintettel a foszforra (Richardson 2001, Mpanga és mtsai. 2019). A második, hogy növekedést serkentő szerepük van a szimbiotikus nitrogénfixáláson keresztül (Kennedy és mtsai. 2004, Raj és mtsai. 2021). A PGPR közvetített nitrogén kötést számos tanulmányban vizsgálták (Gerretsen 1984, Katznelson és Bose 1959, Kloepper és mtsai. 1988, Sudhakar és mtsai. 2000, Tóth és mtsai. 2015, Veres és mtsai. 2009). Az eredmények alapján a baktériumok által szimbiotikusan fixált nitrogén a biológiailag kötött nitrogén 80%-át biztosítja szántóföldi körülmények között (Hamzei 2012). Kétféle nitrogénfixáló (diazotróf) baktérium csoportot lehet elkülöníteni. Az első csoportba a szimbióta nitrogénkötő baktériumok tartoznak, a másodikba pedig a szabadon élő nitrogénkötő baktériumok (Káta 2011). A szabadon élő nitrogénfixáló növekedést serkentő baktériumok egész sora található meg a természetes rizoszférákban, de izolálhatóak a legfontosabb mezőgazdasági növények (pl.: rizs, búza, kukorica, cukornád, gyapot) gyökereiről is. Különösen nagy jelentőségük van oxigénhiányos talajokban, ahol lecsökken a nitrát mennyiség a denitrifikáció miatt (Parádi 2013). Az *Azospirillum*, *Acetobacter* és *Azotobacter*, a *Klebsiella* és *Rhodospirillum* teljesen szabadon élnek a talajban. Kiemelkedőek az *Azotobacter* fajok, vagy az elsősorban fűféléket kolonizáló, de gazdaspecifitással nem rendelkező *Azospirillum* fajok (Bíró és mtsai. 1999, Patra és Mandal 2022, Picoli és mtsai. 2022). A két legismertebb szimbiotikus társulás közül az egyik, a *Rhizobium* genusz, mely sok gazdanövényre specializált fajjal rendelkezik (Khumairah és mtsai. 2022, Mahmud és mtsai. 2020). A másik pedig a *Frankia*

genusz, amely nem hüvelyes növényekkel is képes szimbiózis kialakítására (Matics és Bíró 2015).

A tápanyagok mobilizálásában a talajélet meghatározó jelentőséggel bír, azok hozzáférhetősége és felvehetősége nagymértékben függ a növényi szerkezetet körülvevő mikrobiomtól. Az állattartás csökkenésével a növény növekedését elősegítő mikrobák - mint biotrágyák - használata előtérbe került, mert mérséklődött a kijutatott szerves trágya mennyisége, amelyet a talajok hasznos mikroorganizmusokban való szegényedése követett. Fusseder (1984) és Rovira és mtsai. (1983) komplex rizoszféra mikroflórával inokulált talajon az elsődleges gyökérnövekedés, valamint a hajszálgökér képződés gátlását észlelték a kontroll steril talajon nevelt növényekhez képest. A hasznos talajbaktériumok hozzájárulnak a talaj szerves anyagainak bontásával a talómaradványok gyorsabb lebomlásához (Bíró 2015).

A mikroorganizmusok a foszfor körforgalmának alapvető fontosságú aktivátorai, amely nagy mennyiségben a kőzetekben és talajokban alumínium-, vas- és kalcium-foszfát formájában fordul elő. A szerves kötésben lévő foszfort heterotróf mineralizáció keretében főleg a baktériumok és a gombák szabadítják fel. A heterotróf és fotoautotróf mikroorganizmusok a szaporodásuk során a szerves foszfort immobilizálják. Szerves savakat termelhetnek (pl.: salétromsav, kénsav), így a szerves foszfátot képesek oldani (Gruiz 2019). Korábbi kutatások eredményei megerősítik, hogy a PGPR-ok elősegítették az oldhatatlan szerves foszfátok feltárásával és a szerves foszfátok mineralizációjának fokozásával a foszfor felvehetőségét a talajból (Gerretsen 1948, Katznelson és Bose 1959). Az *Azospirillum brasilense*-vel történt talajoltás hatására a kukorica, a cirok és a búza esetében emelkedett a nitrogén, a foszfor és a kálium felvétele (Morgenstein és Okon 1987). Számos PGPR, például a *Pseudomonas*, a *Bacillus* és a *Rhizobium* kis molekulatömegű szerves savak, például glükonsav felszabadulása révén savanyítja a környezetet. Ezek a savak kelatizálják a foszfáthoz kötött kationokat (Dhole és mtsai. 2023, Díaz és mtsai. 2022). A foszforhoz hasonlóan más esszenciális tápanyagok, például a vas és a cink bőségesen előfordulhatnak a talajban, de a növények számára hozzáférhetetlenek, ami miatt a termés hozam csökkenhet (Moon és Ali 2022). Vashiányos környezetben számos baktérium (*Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Bacillus*, *Rhodococcus*) termel siderofórokat, például enterobaktint, növelve a vas elérhetőségét a talajban (Ghosh és mtsai. 2016, Sarma és mtsai. 2016, Roskova és

mtsai. 2022, Yankey és mtsai. 2022). A sziderofórok olyan vaskelátképző anyagok, amelyekkel a PGPR-ok kompetíciós előnyökhöz juthatnak más mikrobákkal szemben a tápanyagokért folytatott küzdelemben (Parádi 2013, Matics és Bíró 2015, Pal és mtsai. 2001, Glick és Pasternak 2003). A talaj többféle szerves és szervetlen szubsztrátot tartalmaz, amely foszfor forrás lehet a növények növekedéséhez. A legtöbb szerves foszforvegyület mineralizálása hidrolízis útján megy végbe foszfatáz enzimek segítségével. Ilyen funkcionális fehérjéket termelő baktériumok a *Rhizobium*, az *Enterobacter*, a *Serratia*, a *Citrobacter*, a *Proteus* és a *Klebsiella*, valamint a *Pseudomonas* és *Bacillus* fajok (Alori és mtsai. 2017).

2.3.3 A foszfor és foszfor-mobilizálás

A foszfor az élő szervezetek fontos makroeleme. Olyan élettani folyamatokban szerepel, mint a légzés, a fotoszintézis, valamint az energiaközvetítő- és átalakító anyagcsere-folyamatok. A DNS és RNS alkotóelemeként közreműködik az életfolyamatok szabályozásában, a foszfolipidek felépítésében (Han és mtsai. 2022). Az ATP és ADP koenzimek alkotórészeként részt vesz a foszforilálási folyamatokban és a növények energiaháztartásának működésében (Debreczeni és Sárdi 1999a). Nélkülözhetetlen a növények számára, azonban a nitrogénhez képest kevésbé növeli a termés mennyiségét, mert nem gyarapítja a vegetatív szerveket (Debreczeniné és Sárdi 1999b). Szoros kapcsolatban van a nitrogénnel és a fehérjékkel. A generatív szervek foszfortartalma 3-6-szor magasabb a vegetatív szervekhez képest (Nagy 2007). A kezdeti fejlődésben a növényeknek nagy szükségük van a foszforra, és ezt a hiányt már nem lehet később pótolni (Debreczeniné és Sárdi 1999b). Hiánybetegségben a növény növekedése lassul, levelei bíborlilák lesznek, a termés mennyisége jelentősen csökken (Sárdi 1999). Majdnem minden növényi anyagcsere-folyamatban szerepel, hiányára a növény anyagcserezavarral reagál, késlelteti a virágzást és az érési folyamatot (Loch és Nosticzius 1983, Debreczeniné és Sárdi 1999b). A foszforral jól ellátott növények szárazságtűrése hatékonyabb, hiányában nő az érzékenység (Loch és Nosticzius 1983). A kukorica foszfor ellátottságától függ a virágzás ideje és a szemtermés mennyisége (Debreczeniné és Sárdi 1999b). A gazdaságos kukoricatermesztéshez szükséges P_2O_5 mennyisége 22 kg/ha (Csathó 2004). A szántóföldi növények a kijuttatott foszfor 5-10%-át veszik fel, a tápanyagfelvétel 90%-a a talajban megtalálható reziduális (visszamaradó) foszforból származik. A műtrágya nem tudja ellensúlyozni a talaj alacsony foszfor ellátottságát, tehát a tavaszi sekély foszfor

bejuttatástól nem várható megfelelő hatás (Greenwood és mtsai. 1980, Nyiri 1997, Lambers 2022, Gatiboni és mtsai. 2020).

A talaj összes foszfor tartalma 500-800 mg/kg száraz talajra vonatkoztatva (Mengel és Kirkby 1987), ebből a talajoldat összesen 10^{-2} - 10^{-3} mol foszfort tartalmaz, ami a szántóföldi vízkapacitás 60%-nál 0,14-0,014 kg/ha foszfor mennyiségnek felel meg (Hossner és mtsai. 1973). Talajaink foszfortartalma (0,02-0,10%) szerves és szervetlen kötésben fordul elő, melyek aránya megközelítőleg 50-50% (Wang és mtsai. 2021). A szerves kötésű foszfor fitin, nukleinsavak, foszfolipidek és cukorfoszfátok; a szervetlen foszfor pedig fluor-, klór- és hidroxipatitok, kalcium-foszfátok, variscit, strengit és vivanit formájában vannak jelen a talajban. Ennek aránya a pH tartomány változásával és a CaCO_3 tartalom függvényében alakul (Hsu és Jackson 1960, Füleky 1979, Loch 2000, Szűcs és Szűcsné 2003). A növény a foszfor felvételére H_2PO_4^- és HPO_4^{2-} ionok formájában képes, amit befolyásol a pH. Savas közegben a H_2PO_4^- , lúgos közegben a HPO_4^{2-} felvétele a jellemző (Loch és Nosticzius 2004).

A foszfor a talajokban főként a felső rétegekben fordul elő, az adszorpciónak köszönhetően megkötődik a talajkolloidok felületén, emiatt nehezen felvehetővé vagy felvehetetlenné válik a növények számára (Gatiboni és mtsai. 2020). A foszfor nem tud kimosódni a talajból, így abban tartalék tápanyagként lassú feltáródási folyamatok során válik a növények számára elérhetővé. A talajok nitrogén tartalma befolyásolja a foszfor felvételét. A nagy mennyiségű nitrogén gátló hatású az anion antagonizmus miatt (Debreczeni és Sárdi 1999a, Loch 2000, Whitehead és Crossman 2012, Schlesinger és Bernhardt 2013). A szerves foszfor vegyületek lebomlása a talajban enzimes hidrolitikus úton történik, amely során foszforsav keletkezik. A kedvező nitrogén - szén arány befolyásolja a foszfor megkötődését és átalakulását. A legkedvezőbb arány C/N/P=100/10/1 (Füleky és Rajkainé 1999). A foszfát műtrágya környezetkímélő helyettesítésének megtalálása felé vezető úton egyfajta PGPR, az úgynevezett foszfát-szolubilizáló baktérium (PSB) vált kiemelt kutatási témává. A PSB oldható foszfátot szabadít fel az oldhatatlan foszfátból, beleértve a szervetlen és a szerves foszfátot (De-Bashan és mtsai. 2021). Számos tanulmányban vizsgált PSB törzsek az *Aerococcus*, az *Alteromonas*, az *Arthrobacter*, az *Asaia*, az *Azotobacter*, a *Bacillus*, a *Burkholderia*, a *Chryseobacterium*, a *Curtobacterium*, a *Delftia*, az *Enterobacter*, az *Erwinia*, a *Gordonia*, a *Klebsiella*, a *Lysinibacillus*, a *Pantoea*, a *Phyllobacterium*, a *Pseudomonas*, a *Rhizobium*, a *Serratia* és a

Xanthomonas (Vazquez és mtsai. 2000, Pandey és mtsai. 2006, Magallon és Servínet 2020, Silva és mtsai. 2021, Özdoğan és mtsai. 2022). A foszforszubsztrát különbségei szerint a PSB törzseket szervetlen és szerves foszfát-szolubilizáló baktériumokra osztják (Berde és mtsai. 2021). Egyes gombafajok is képesek szerves savképzésük által szervetlen foszfor formák felszabadítására (Papp 2011). A PSB-vel történő foszfát-szolubilizálás összetett folyamat, melyet a **7. ábra** szemléltet.



7. ábra: A PGPR-ok foszfát-szolubilizáló mechanizmusa (Zeng és mtsai. 2022)

A szervetlen PSB esetében az alacsony molekulájú szerves savszekréciót tekintik a foszfát-szolubilizáció fő mechanizmusának (Goldstein 1994). A szerves savak glükometabolikus úton szabadulnak fel a környezetbe, amit a pH-érték csökkenése kísér (Illmer és Schinner 1995, Zeng és mtsai. 2022). A korábbi kutatási eredményeket a különböző PSB törzsek által szekretált különféle szerves savakról a **8. táblázat** mutatja be. A tanulmányok főként a glükonsavat említik a foszfát-feltárásban jelentős szerves savként (Zeng és mtsai. 2016, Xie és mtsai. 2021), és funkcióját géntechnológiai eljárással igazolták, a kinoprotein glükóz-dehidrogenáz gén (*gcd*) és a pirrolokinolin-kinon koenzim szintetáz génje (*pqq*) vizsgálata során (Krishnaraj és Goldstein 2001, Xie és mtsai. 2021). A *gcd* és *pqq* gének szekvenciájának ismeretében metagenomika alkalmazásával képesek vagyunk a PSB-k azonosítására és kimutatására (Liang és mtsai. 2020, Silva és mtsai. 2021).

8. táblázat: A foszfát-mobilizálásban részt vevő szerves savak, amelyeket PSB-k állítanak elő (Zeng és mtsai. 2022)

Baktérium	Szerves sav	Irodalom
<i>Asaia lannaesis</i> , <i>Pseudomonas</i> sp.	Glükonsav és 2-ketoglükonsav	(Magallon-Servín et al. 2020)
<i>Acinetobacter</i> sp.	Hangyasav és oxálsav	(Li et al. 2019)
<i>Bacillus megaterium</i>	Borostyánkősav, oxálsav és citromsav	(Zheng et al. 2018)
<i>Pseudomonas frederiksbergensis</i>	Glükonsav, 2-ketoglükonsav, piroszőlősav, maleinsav, almasav, tejsav, malonsav, ecetsav, metanolsav, borkősav és oxálsav	(Zeng et al. 2017)
<i>Brevibacillus borstelensis</i>	Ecetsav, citromsav, hangyasav, almasav és oxálsav	(Yadav et al. 2015)
<i>Enterobacter ludwigii</i> , <i>Pantoea ananatis</i> , <i>Pseudomonas psychrotolerans</i> , <i>Gluconobacter frateurii</i>	Glükonsav	(Han et al. 2012)
<i>Bacillus</i> sp.	Propionsav, oxálsav, borostyánkősav és almasav	(Panhwar et al. 2011)
<i>Burkholderia cepacia</i>	Glükonsav	(Song et al. 2008)
<i>Pseudomonas corrugata</i>	Glükonsav és 2-ketoglutaraminsav	(Trivedi and Sa 2008)
<i>Citrobacter</i> sp.	Glükonsav és ecetsav	(Patel et al. 2008)
<i>Enterobacter intermedium</i>	2-ketoglutaraminsav	(Hwangbo et al. 2003)
<i>Pseudomonas cepacia</i>	Glükonsav és 2-ketoglutaraminsav	(Bar-Yosef et al. 1999)
<i>B. polymyxa</i> , <i>B. licheniformis</i> , <i>B. spp.</i>	Oxálsav és citromsav	(Gupta et al. 1994)

A szerves savakból felszabaduló hidrogén helyettesíti a trikálcium-foszfát fémionjait, ezáltal felszabadítja az oldható foszfátot (Goldstein 1994, Zhang és mtsai. 2023a). Továbbá, oldható foszfátion szabadul fel a fémion kelatizálásának, következtében (Ghosh és mtsai. 2016, Sarma és mtsai. 2016, Wang és mtsai. 2023). A PSB törzsek a szerves savakon kívül más módon is oldhatják a szerves foszfátot. A *Pseudomonas*-ok például nem választanak ki szerves savakat, hanem légzéssel vagy NH_4^+ asszimilációval szabadítanak fel oldható foszfátot (Illmer és Schinner 1995, Shah és mtsai. 2023). A *Nitrobacter* és *Thiobacillus* törzsek esetében a hidrogén-szulfid termelés felelős a foszfát-szolubilizáló hatásért (Shrivastava és mtsai. 2018). A PSB által termelt exopoliszacharidok (EPS) nagymértékben hozzájárulnak a foszfát-szolubilizáló aktivitáshoz azáltal, hogy megtartják a szabad foszfort és a mobilizáció homeosztázisát az oldott foszfát felé mozdítják (Yi és mtsai. 2007). Összefoglalva: a foszfát feltárásában több és különféle mechanizmus vesz részt. Érdeemes megjegyezni, hogy a PSB foszfát-szolubilizáló hatását a foszfátion alacsony szintje indukálja, a magas szintje pedig deduktálja. A foszfátion

szabályozza a *gcd* gén transzkripcióját és kiváltja a glükonsav szekrécióját, így a glükonsav által mediált foszfát-mobilizációt (Zeng és mtsai. 2016). Ezek az eredmények génszerkesztési stratégiát sejtetnek a baktériumok foszfácion érzékenységének csökkentésében a glükóz oxidatív útvonal módosításával, ami javítaná a PSB foszfát-szolubilizáló aktivitását.

A foszfát-szolubilizáló baktériumok a szerves foszfátból oldják a foszfort, a szerves foszfátvegyületekből pedig foszfort szabadítanak fel (Ponmurugan és Gopi 2006, Jiang és mtsai. 2021). Ismert, hogy a szerves foszfátvegyületeket foszfáttal, fitázzal vagy szén-foszfor-liázzal kell oldani, mielőtt a növény hasznosítja őket (Zaidi és mtsai. 2009. Quinn és mtsai. 2020). A foszfát-szolubilizáló baktériumok a mikrobiális foszfátázok kiválasztásával feloldják a szerves foszfátvegyületeket, így a foszfort a növények számára elérhetővé teszik (Li és mtsai. 2019, Zhai és mtsai. 2023). A foszfátázok szerepét a szerves foszfát feltárásában molekuláris biológiai módszerekkel igazolták. *Morganella morganii*-ből származó savas foszfátáz kódoló *phoC* gén plazmidvektoron keresztül történő expressziója *E. coli*-ban savas foszfátáz aktivitást eredményezett (Fraga-Vidal és mtsai. 2007). A foszfácion hiány miatt aktiválódott a *phoA* gén, amely alkalikus foszfátáz kódol és a gén expresszióját egy *phoBR* operon mediálja (Agrawal és Wanner 1990). A *Salmonella typhimurium*-ban lévő *phn* gén felelős mind a foszfát transzportért, mind a C-P kötés hasításának katalizálásáért (Jiang és mtsai. 1995). A foszfátázok mellett a szerves PSB *Klebsiella variicola* fitázaktivitást is mutat (Kusale és mtsai. 2021). A rizoszférikus baktériumok (például: *Rahnella aquatilis*, *Pseudomonas fluorescens*) feloldják a fitátot, és a fitáz enzim kiválasztásával növelik a rendelkezésre álló foszfát mennyiségét, ezzel támogatva a növények tápanyagellátását (Li és mtsai. 2013). A *phyL* fitáz gént *Bacillus subtilis*-ből és *Bacillus licheniformis*-ből klónozták és egy fágvektorral transzformált *Bacillus subtilis* rekombinánsban túlexpresszálták (Tye és mtsai. 2002).

A foszfát-szolubilizáló baktériumok és a növények a kölcsönös hasznos együttélés (szimbiózis) kapcsolatát mutatják (Berde és mtsai. 2021). A különböző növényfajokból származó PSB-k sokfélesége és a foszfát-szolubilizáló aktivitása széles tartományban ingadozik (Amy és mtsai. 2022). Egyes baktériumfajok - mint az *Azotobacter* vagy az *Azospirillum* - elősegítik a foszfor mobilizációját. Jelentős szerepe van a foszfát feltárásban a *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum*-nak, a *Bacillus polymyxa*-nak, a *Pseudomonas fluorescens*-nek és a *Streptomyces albus*-

nak. Kiemelkedő az arbuszkuláris mikorrhiza gombák foszfát felvételben betöltött szerepe (Wang és mtsai. 2016, Sharma és mtsai. 2020). A gombafonalak és a növényi gyökérzet között kialakuló kapcsolat révén szimbiózison alapuló anyagcsere történik (Zhang és mtsai. 2023b). A hifák vizet és abban oldott tápelemeket (különösen foszfort és mikroelemeket), míg a növény szénhidrátokat és a fotoszintézis során termelt anyagokat bocsát a gomba rendelkezésére (Szegei és Vörös 1993, Pethő 1998, Deacon 2006, Szabó 2008).

2.3.4 A PGPR-ok szerepe a növényi növekedés serkentésében

A PGPR csoportba tartozó szervezetek növényi növekedést szabályozó PGR (plant growth regulator) anyagok szintézise és exportja révén képesek közvetlenül befolyásolni a növényi növekedést és fejlődést (Godó 2011). Khan (2005) szerint két csoportot különböztetnek meg: a szabadon és a szimbiózisban élő talajbaktériumokat. Ezek a mikrobák fitohormonokat termelnek: auxinokat, citokinineket, giberellineket, abszcizinsavat és lényegében ezek hatnak serkentőleg a gyökér sejteire (Patten és Glick 2002). Képesek vitaminok előállítására, például vízoldható B-vitaminokat szintetizálnak (Revilla és mtsai. 2000).

Indolecetsavat termelő törzsekből találtak eddig a legtöbbet, például a *Rhizobium leguminosarum* (Biswas és mtsai. 2000), az *Azospirillum brasilense*, a *Bacillus circulans*, a *Bacillus megaterium*, a *Streptomyces anthocysnicus* (Thankuria és mtsai. 2004), az *Azospirillum lipoferum*, a *Mesorhizobium loti* (Chandra és mtsai. 2007, Park és mtsai. 2017, Bag és mtsai. 2022). Citokinin termelésre példa a *Bacillus subtilis* (Liu és mtsai. 2013), a *Bacillus megaterium* (Ortíz-Castro és mtsai. 2008, Ali és mtsai. 2009), az *Arthrobacter*, a *Bradyrhizobium*, a *Bacillus*, a *Pseudomonas* és a *Paenibacillus* (Kaur és Pandove 2023, Vaghela és Gohel 2023). *Bacillus megaterium* esetében etilén és auxin termelést is azonosítottak (López-Bucio és mtsai. 2007). Giberellineket termel a *Pseudomonas monteilii* (Pandya és mtsai. 2014). A *Pseudomonas fluorescens* és a *Bacillus subtilis* szintén képes giberellinek szintetizálására (Shivasakthi és mtsai. 2013). Azóta a kutatások feltárták, hogy az *Acetobacter diazotrophicus*, a *Herbaspirillum seropedicae*, a *Bacillus spp.* és az *Azospirillum spp.* is giberellinsavat termelnek (Hershey és mtsai. 2014, Mia 2022).

A rizoszférából izolálható PGPR-ok legnagyobb része képes indolecetsav (IAA), citokinin és etilén termelésére, de esetükben gibberellinsav (GA) és abszcizinsav (ABA) szintézisét is kimutatták (Singh és mtsai. 2022, Upadhyay és mtsai. 2022). Ezek a növényi fitohormonok rendszert alkotnak, működésük

összefügg: segítik vagy gátolják egymás hatását. Az auxin termelés, például a baktériumok kolonizációjához és a növényi védekezőrendszer kikerüléséhez járul hozzá, illetve gyakori, hogy éppen a stresszhelyzetben megemelkedett etiléntermelés gátlásával serkentik a gyökér növekedését, amit az ACC deamináz enzim valósít meg, az etilén prekursor ACC semlegesítésével (Spaepen és mtsai. 2008, Parádi 2013, Paço és mtsai. 2022). A *Pseudomonas*-ok képesek indolecetsavat (IAA) termelni. Az auxin általában a hajtás merisztémákban képződik és innen a megvilágítással ellentétes, sötét oldalon halad lefelé a szárban. A gyökerek hosszanti növekedését és a gyökérszőrök növekedését serkenti (Garg és mtsai. 2022, Hassan és mtsai. 2022, Singh és mtsai. 2023).

A gibberellinek tetraciklikus diterpénsavak. A leggyakoribb gibberellin a GA₃, amely egy a *Gibberella fujikuroi* gomba terméke. A növényekben található legtevékenyebb gibberellin a GA₁, amely a hajtás megnyúlásáért felelős. Számos gibberellin a hajszálgökök növekedését stimulálja. Jelenleg 136 különböző kémiai vegyület tartozik a természetben előforduló gibberellinek kategóriájába. A gibberellinek nem csak a növekedést serkentik, hanem szabályozzák a csírázást, gyorsítják a virágfejlődést és növelik a gyökérszőrök sűrűségét (Nagel és mtsai. 2018). Magas szintjük megzavarja a virágok ivarának kialakulását, és gyorsítja a magvak csírázását (Godó 2011).

A citokininek olyan purinvázis vegyületek, melyek a sejtmegnyúlást serkentik, szabályozzák az organogenezist, stimulálják a kloroplasztiszok érését, jelzik a növény nitrogén ellátottságát és szabályozzák az öregedést (Osugi és Sakakibara 2015). A citokininek szerepet játszanak a szignálmolekulák továbbításában a gyökerektől a hajtásokig, a környezeti feltételekkel összefüggésben (Burr és mtsai. 2020). Különösen a citokinin az egyik olyan PGR, amely által a PGPR-ok, képesek a növényi növekedés serkentésére. A citokinint termelő baktériumokkal kezelt növényekben a hajtásfejlődés felgyorsul, és a gyökér/hajtás aránya csökken (Chetverikov és mtsai. 2023).

Az abszcizinsav (ABA) szeszkviterpén szerkezetű molekula, amely a növény minden részében előfordul. A mag és a rügyek nyugalmi állapotának kialakításában játszik kiemelkedő szerepet, valamint befolyásolja a mag érését (Pal és mtsai. 2023). Segíti a kiszáradás elleni tolerancia kialakulását, vezérli a fejlődő magvak tápanyag felhalmozását, megakadályozza a GA indukált enzimtermelődést, zárja a sztómákat a szárazságstresszre adott reakcióban, gyökernövekedést vált ki és akadályozza a

szármegnyúlást alacsony vízpotenciál esetén (Kang és mtsai. 2014, Mariotti és mtsai. 2021, Karnwal és mtsai. 2023). Fokozza a járulékos gyökérképzést, hozzájárul a levél öregedéséhez, előidéz a szervenek leválását, és virágzást okoz néhány növénynél nem induktív feltételek között (Godó 2011).

2.3.5 A PGPR-ok szerepe a kórokozók elleni védelemben

A PHPR elnevezés is használatos a növényi növekedést serkentő baktériumokra, ezek az egészséges növényi fejlődést serkentik (Burr és Caesar 1984). A növények számára sajátos vegyületeket szintetizálnak (Zahir és mtsai. 2004), és megvédik a növényt a megbetegedésektől (Guo és mtsai. 2004).

A PGPR-ok jelentős szerepet játszanak a fitopatogén organizmusok elleni védelemben. Sziderofórok termelése révén megkötik a talaj vastartalmát, amely így elérhetetlenné válik a patogének számára (szubsztrát kompetíció) (Parádi 2013, Pal és mtsai. 2001, Glick és Pasternak 2003). A rizoszférában a vas központi jelentőséggel bír az obligát aerob és fakultatív aerob mikroszervezetek anyagcseréjében. Természetes körülmények között ezzel szemben a szabad vasionok hozzáférhetősége erősen korlátozott. Az úgynevezett „fluoreszcens-putida” típusú PGPR *Pseudomonas*-ok a rizoszféra általánosan és legnagyobb tömegben előforduló élőlényei. A sziderofór termelő tulajdonság következtében a *Pseudomonas fluorescens* és *Pseudomonas putida* fajok sárgászöld színű, ultraibolya fényben fluoreszkáló pyoverdin vagy pszeudobaktin típusú, extracelluláris színanyagokat bocsátanak ki. Néhány fluoreszkáló *Pseudomonas* törzs ezek mellett pyochelint és szalicilsavat is termel. A különböző színű és típusú sziderofórok közös tulajdonsága ugyanakkor a Fe^{3+} -nal való erős kötődési képességük, amellyel megakadályozzák, hogy a gyökérrendszer más képviselői a vashoz hozzájussanak (Matics és Bíró 2015, Sarkar és mtsai. 2022, Wang és mtsai. 2022).

Az antibiotikumok a mikroorganizmusok által termelt másodlagos metabolitok, melyek képesek más mikrobákat elpusztítani, vagy fejlődésüket gátolni (Fadiji és Babalola 2020, Martinez-Klimova és mtsai. 2020). Antibiotikum termelést a baktériumok között leginkább a különböző *Bacillus* és *Pseudomonas* fajoknál figyeltek meg (Godó 2011). PGPR antibiotikum például a hidrogén-cianid vagy a gomba sejtfalbontó enzimek (például: kitináz és a β -1,3 glükánáz), melyek szintézise révén közvetlenül képesek gátló hatást kifejteni. Egyes fajok képesek a *Fusarium* gombák által termelt toxinok lebontására, csökkentve a fertőzés okozta tüneteket. A PGPR szerepet vállal az indukált szisztémás rezisztencia (ISR) kialakításában

(Nishad és mtsai. 2020). Az ISR egy lokális patogén fertőzést követően szalicilsav közvetítésével az egész növényre kiterjedő immunválasz, amely a későbbi fertőzés elleni védekezést fokozza, annak tüneteit csökkenti. A PGPR által indukált ISR elicitorai mások, mint a patogének esetén, mivel itt sejtlízis nem történik. Ez esetben a szalicilsav helyett a jázmonsav és az etilén kap szerepet a jelátadásban (Parádi 2013).

2.3.6 A PGPR-ok szerepe a szárazságstressz enyhítésében

A PGPR-ok szerepét a tápanyaggazdálkodásban, a növényi növekedés serkentésében, valamint a biokontroll tevékenység tekintetében is számos tanulmány vizsgálta (Gouda és mtsai. 2018, Fabiańska és mtsai. 2019). Napjainkban egyre fontosabb a biotikus és az abiotikus stressz tolerálásában betöltött szerepükkel kapcsolatos kutatás (Meenakshi és mtsai. 2019, Woo és mtsai. 2020). Feltételezhető, hogy a PGPR a növényekben számos szárazságstressz rezisztencia folyamatot indukál.

Az ozmotikus stressz erősen befolyásolja a növények növekedését, fejlődését és a talaj mikrobiális aktivitását (Gowtham és mtsai. 2020). A rizoszféra mikrobák által közvetített ozmotikus stressztűrés aktív kutatás tárgya (Gouda és mtsai. 2018, Fabiańska és mtsai. 2019). A PGPR mediált folyamatok magukban foglalják a gyökér architektúrájában, a fitohormon aktivitásban, az ozmolit felhalmozódásában, az antioxidáns védekezésben és a védelmi transzkripciós válaszokban bekövetkező változásokat (Khalid és mtsai. 2006, Hartman és Tringe 2019).

A talajmikrobákat intenzíven integrálják a mezőgazdasági termelési rendszerekbe, köszönhetően annak, hogy serkentik a növények növekedését, stimulálják az abiotikus stresszrezisztencia kialakulását és erősítik a növényi betegségekkel szembeni ellenállóságot (Goswami és mtsai. 2016). Ezek a mikroorganizmusok fontos szerepet játszanak a növények növekedésében. Növelik a tápanyag hozzáférhetőséget a rizoszférában és megvédik a növényeket az abiotikus stressztől azáltal, hogy bakteriális fitohormonokat; exopoliszacharidokat (EPS) és rokon metabolitokat szekretálnak, biofilmet képeznek, valamint enzimatis és nem enzimatis antioxidánsokat termelnek (Vanderlinde és mtsai. 2010, Naseem és mtsai. 2018, Goswami és Deka 2020, Kaur és mtsai. 2023). A szárazságstresszre adott bakteriális válaszok a stressz időtartamától, intenzitásától, a növény fenofázisától és növényfajtól függően változnak (Naseem és mtsai. 2018). A szárazságstressz többféle módon közvetlenül befolyásolja a talaj folyamatait,

beleértve a mikrobiomot is (Goswami és Deka 2020). A vízmegvonás gyakran vezet különféle ozmolitok termelődéséhez és felhalmozódásához a növényekben, amelyek közül sok fehérje, szénhidrát, cukoralkohol, glicin-betain, poliaminok és prolin (Li és mtsai. 2020). A PGPR-ok a - környezeti terhelésekre válaszul - képesek ozmolitokat termelni (például: prolin, trehalóz, poliamin). Ezek az ozmolitok a növény által kiválasztott ozmolitokkal együtt serkentik a növény növekedését és fejlődését. Különböző rizs genotípusok *Bacillus altitudinis* és *Bacillus methylophilus* oltása megnövelte a prolin termelést a nem oltott kontroll növényekhez képest szárazságstressz során (Shirinbayan és mtsai. 2019, Kaur és mtsai. 2023, Li és mtsai. 2020). A növényi növekedést serkentő baktériumok részt vesznek a virágzás gyorsításában, a korai öregedés indukálásában és a termésképzés előremozdításában (Gowtham és mtsai. 2020). A korai virágzási stratégiák pedig aszálykerülő mechanizmusokhoz kapcsolódnak (Meenakshi és mtsai. 2019). A diazotróf baktériumok vízmegvonás hatására az agave gyökereihez kötődnek, és aszályos körülmények között fokozhatják a növények növekedését (Zarei és mtsai. 2019, Abbasi és mtsai. 2020).

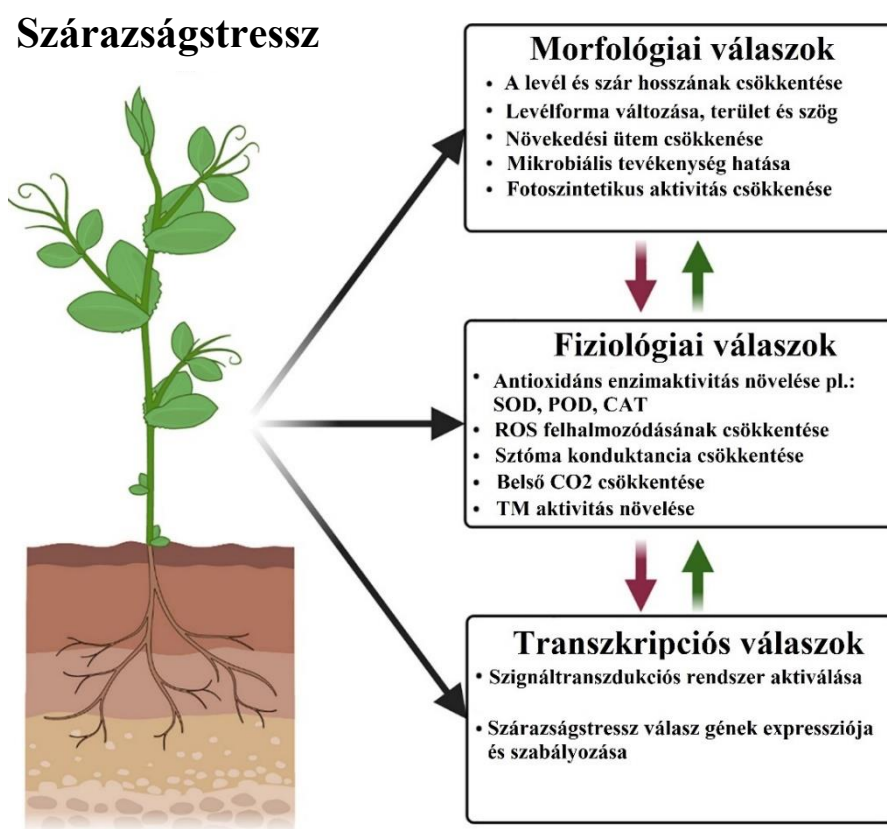
Korábbi tanulmányok igazolták a baktériumok szerepét a növények növekedésében alacsony vízellátottságú körülmények között (Meenakshi és mtsai. 2019). A bakteriális oltás javította a vízfelhasználás hatékonyságát, a gyökér- és hajtásbiomasszát és a membránstabilitási indexet, ezáltal csökkentette a szárazságstressz káros hatásait a búza és paradicsom növényekben (Meenakshi és mtsai. 2019, Abbasi és mtsai. 2020). A róka farkú kölesben a *Pseudomonas fluorescens* DR7 a talaj nedvességtartalmának növelésével fokozta a növények növekedését aszályos körülmények között (Niu és mtsai. 2018). Növekedés serkentésről számoltak be a kukoricában *Pseudomonas putida*, *Azospirillum lipoferum*, *Pseudomonas fluorescens* P1 és *Pseudomonas fluorescens* P8 oltási kezelés után, amikor a szárazságstressznek kitett növényeket a kezeletlen kontrollal hasonlították össze (Sandhya 2010, Khan és Bano 2019, Zarei és mtsai. 2019) **(9. táblázat)**.

9. táblázat: A PGPR hatására a gyökér morfológiájának, a növények növekedésének és fejlődésének változása szárazságstressz alatt (Ahmad és mtsai. 2022)

Baktérium	Növényfajták	Hatás szárazság alatt	Irodalom
<i>Azospirillum brasilense</i>	Paradicsom	Fokozott oldalgyökér- és szőrfejlődés	Molina-Favero et al., 2008
<i>Azospirillum brasilense</i> Az39	Rizs	Jobb gyökérnövekedés és mérséklődik az ozmotikus stressz	Cassán et al., 2009
<i>Paenibacillus polymyxa</i>	Búza	Fokozza a növények túlélését és a biomassza-termelést ozmotikus stressz alatt	Arzanesht et al., 2011
<i>Azospirillum brasilense</i> Sp245	Búza	A xilem fokozott növekedése és terjeszkedése a növény koleoptiljában a víz könnyű vezetése érdekében	Timmusk és társai, 2014
<i>Paenibacillus polymyxa</i> B2	Arabidopsis	A dehidratációs stresszre adott korai válasz indukálása	Timmusk és társai, 2014
<i>B. thuringiensis</i> NEB17	Szójabab	Gyökérszerkezet, gyökérhossz, gyökér ABA módosítása	Prudent et al., 2015
<i>Bacillus megaterium</i> BOFC15	Arabidopsis	A gyökér architektúra rendszer megváltoztatása	Zhou és társai, 2016
<i>P. putida</i> FBKV2	Kukorica	Elősegíti a gyökér- és hajtásnövekedést, növeli a száraz biomassza tömegét	Vurukonda et al., 2016
<i>Azospirillum brasilense</i> SP-7	Kukorica	Magasabb szárazságtűrés, magasabb biomassza-termelés és klorofiltartalom	Curá et al., 2017
<i>H. seropedicae</i> Z-152	Kukorica	Magasabb szárazságtűrés, magasabb biomassza-termelés és klorofiltartalom	Curá et al., 2017
<i>Azospirillum</i> sp. Az19	Kukorica	Javítja a növény növekedését és termőképességét vízhiány alatt	García és társai, 2017
<i>O. pseudogrignonense</i> RJ12, <i>Pseudomonas</i> sp. RJ15, <i>B. subtilis</i> RJ46	Mungóbab	Növeli a gyökérhosszt, a hajtáshosszt, a növény száraz tömegét	Saikia et al., 2018a
<i>B. subtilis</i>	Kukorica	Fokozott vízhasználati hatékonyság és növekedés	de Lima és társai, 2019
<i>M. luteus</i> 3,13 és 4,43	Napraforgó	Megnövelt súly, terület, térfogat, hosszúság, átmérő és felület	Namwongsa és társai, 2019
<i>V. paradoxus</i> RAA3 <i>O. antropikus</i> DPC9 <i>P. palleroniana</i> DPB13 <i>P. fluorescens</i> DPB15 <i>P. palleroniana</i> DPB16	Köles	Javítja a növekedést és a tápanyag-koncentrációt a növényi levelekben aszályos körülmények között	Chandra és társai, 2019
<i>B. subtilis</i> GOT9	Arabidopsis, repce	Szárazságstressztűrés, növekedés és oldalgyökerek fejlődése	Woo és társai, 2020
<i>Pseudomonas lini</i> és <i>Serratia Bizio plymuthica</i>	Zsidótövisbogyó	Növeli a növény magasságát, gyökér- és hajtás száraz tömegét	Zhang Y. et al., 2020
<i>Bacillus licheniformis</i> FMCH001	Kukorica	Jobb vízfelhasználás és megnövekedett gyökér száraz tömeg	Akhtar et al., 2020

A PGPR-ok csoportokban élnek, és olyan hősokkfehérjéket (HSP) (Berjak 2006), dehidrineket (Timmusk és Wagner 1999) és illékony szerves vegyületeket (VOC) (Ryu 2004) választanak ki, amelyek szárazságtűrést biztosítanak a növényeknek (Bhadrecha és mtsai. 2023, Vlot és Rosenkranz 2022).

A gyökérrel kapcsolatban álló baktériumközösségek segítségével a növények különféle folyamatokon keresztül tolerálják a szárazságstresszt. A PGPR által a vízhiány leküzdésére alkalmazott főbb mechanizmusok: gyökér morfológiájának megváltoztatása, valamint az ozmolitok; az antioxidánsok; a fitohormonok; az extracelluláris polimer anyagok (EPS); az illékony szerves vegyületek (VOC); a sziderofórok és az 1-amilociklopropán-1-karboxiláz-deamináz-ACC előállítása (8. ábra). Ezek a folyamatok lehetnek közvetlenek vagy közvetettek a gazdanövénytől, valamint a biotikus és az abiotikus stressztényezőktől függően (Gouda és mtsai. 2018). A PGPR közvetített direkt mechanizmusok a növényen belül fellépő folyamatok, amelyek közvetlenül befolyásolják a növény anyagcseréjét, míg az indirekt mechanizmusok a növényeken kívül mennek végbe (Vurukonda és mtsai. 2016).



8. ábra: A PGPR-ok által közvetített mechanizmusok a szárazságstressz enyhítésére (Ahmad és mtsai. 2022)

2.4 Kihívások a PGPR alapú biotrágyákkal szemben

Napjainkban egyre nagyobb mértékű érdeklődés tapasztalható a mikrobiális alapú termékek oltóanyagként történő felhasználása iránt, azonban hasznos tudatában lennünk az általuk adott kihívásoknak. Egy új PGPR törzs hatékony oltóanyagként történő kifejlesztésének első lépése a laboratóriumi szűrés (screen), amely a PGPR-ok növényi növekedést elősegítő specifikus közvetlen és közvetett mechanizmusaitól függ. Az axenikus tenyészet izolátumainak elsődleges szűrése (a PGPR tulajdonságokra) nem garantálja a növények hatékony növekedésének elősegítését szántóföldi körülmények között. Ezzel párhuzamosan azok az izolátumok, amelyek *in vitro* kevesebb növekedést serkentő aktivitást mutatnak, eltérő növényi növekedést elősegítő stratégiákkal rendelkezhetnek szántóföldi körülmények között. Mivel ezek a folyamatok nem teljesen ismertek, az ilyen típusú izolátumok standard körülmények között nehezen szűrhetők és a hasznos törzseket néha eldobják a gyenge *in vitro* teljesítményük miatt (Cardinale és mtsai. 2015).

A PGPR-ok nagyarányú hasznosításához és megfelelő alkalmazásához több fontos kérdés megoldását, valamint számos kihívást és korlátot kell leküzdeni. Egy adott PGPR törzs kiválasztása biotrágya fejlesztéshez önmagában is kihívást jelent. A törzsek nem lehetnek specifikusak egy adott növényre, széles gazdakörrel kell rendelkezniük. Az egyik fő korlátozó tényező a szelektivitásuk. Míg a hagyományos mezőgazdasági inputok a teljes talaj-mikrobiótára hatnak, a PGPR-ok továbbra is erősen célzottak és specifikusak. A PGPR-oknak a minősége és hatékonysága mindig változó szántóföldi körülmények között, az őshonos mikroorganizmusok jelenléte miatt. A potenciális izolátumokat a szántóföldi körülmények között nyújtott teljesítményük alapján kell kiválasztani, többféle növényfajjal, különféle talajtípusok és környezeti feltételek között (Meena és mtsai. 2020). A törzseknek hatékonyaknak kell lenniük a natív, nem hatékony törzsek helyettesítésében, és nem szabad, hogy antagonizáljanak a rizoszférában található egyéb jótékony mikrobákkal (Mahajan és Gupta 2009). Biotrágyaként a PGPR-oknak képesnek kell lenniük a gazdanövény gyökereinek kellő mértékű kolonizációjára, a megfelelő rizoszféra kialakítására, valamint a nitrogén; a foszfor és a kálium biológiai hozzáférhetőségének és antagonista tulajdonságainak javítására (Vessey 2003).

A PGPR gyökér kolonizációjának mértéke függ: a gazdanövénytől, a hosszú és középtávú hatásoktól, a vetésforgótól és a termőhely állapotának változásától. Egy másik kihívás a PGPR-ok használatának változatos hatásmechanizmusa, mivel nem minden rizobaktérium rendelkezik azonos tulajdonságokkal a növényi növekedés serkentésének elősegítésére (Amara és mtsai. 2015). Számos Gram-negatív rizobaktériumról ismert, hogy biokontroll potenciált mutat. Nehéz megfelelő kombinált oltóanyagot előállítani, ezen túlmenően a készítményeknek nincs hosszabb eltarthatósági ideje, kiszáradáskor a baktériumok elpusztulnak (Goswami és mtsai. 2016, Thomas és Singh 2019).

A növények válaszreakciója a kijuttatott biotrágyákra nagyon lassú, mivel az oltóanyagok időbe telik, amíg kialakítja a megfelelő mértékű gyökérkolonizációt és koncentrációt. A gazdálkodók nehezen fogadják el a biotrágyákat. Az oltószerek minőségi és mennyiségi tulajdonságai, valamint az oltási technikák, létfontosságú szerepet játszanak a szántóföldi alkalmazásban. A biotrágyák hatékonysága csökken a szintetikus inputok káros szermaradvány hatásai és a fennálló kedvezőtlen abiotikus körülmények miatt (Mahajan és Gupta 2009, Parnell és mtsai. 2016). A környezeti terhelések, mint a só és a szárazság, szintén fontos szerepet játszanak a biológiai aktivitás csökkentésében.

Az oltóanyagok biotikus és abiotikus stressznek vannak kitéve (Arora és mtsai. 2010). Többek között a talaj pH-ja, a peszticidek és a magas nitrátkoncentráció, amelyek korlátozzák az oltószerek nitrogénkötő képességét. A talajokban magas koncentrációban fordulhatnak elő nehézfémek (pl.: kadmium, higany, króm) és hiányozhatnak más fontos tápanyagok (pl.: foszfor, réz, molibdén és kobalt), amik csökkenthetik a PGPR alapú készítmények biológiai potenciálját (Bhardwaj és mtsai. 2014).

A PGPR-ok különböző módon működnek. A növények növekedésének előmozdításában a legfontosabb lépés a növényi gyökerek kolonizációja, ami egy bonyolult folyamat és megköveteli, hogy a baktériumok versenyezzenek a rizoszféra talajában a pozitív növény - mikroba kölcsönhatás kialakításáért (Kumar és mtsai. 2017). Ezen kívül az abiotikus tényezők: a talaj típusa, hőmérséklete, pH-ja, valamint tápanyagtartalma; a sugárzás; az oxigén koncentrációja és az őshonos mikrobiótával való kölcsönhatás mértéke drasztikusan befolyásolja a növény - mikroba interakciókat a közegben. A PGPR-ok szántóföldi alkalmazásának sikere azoktól az éghajlati tényezőktől függ, amelyek egy adott természetű növényfajta

szükségesek (Mahanty és mtsai. 2017). A régióspecifikus törzsek azonosítása erősen ajánlott, hogy az alkalmazott PGPR törzs megfelelő hatékonyságot érjen el. A PGPR-okat gyakran közvetlenül használják növények oltóanyagaként anélkül, hogy azt megfelelő hordozóanyaggal juttatnák ki. Ezen túlmenően, mennyiségük nem elegendő a szaporító terület talajában meglévő rizoszféra hatékony kolonizációjához, a már meglévő mikro- és makrobiótával való versengés miatt (Malusà és mtsai. 2016). A széles spektrumú biocid fertőtlenítőszeret általában a nagy értékű növényekhez kapcsolódó talajok fertőtlenítésére használják. Ezek a szerek megváltoztatják a talajok mikrobiális közösségét. Ezen kívül negatívan befolyásolják azokat a jótékony hatásokat, amelyek elősegítik a tápanyagok mobilizációját, a növények tápanyagfelvételét. Továbbá, csökkentik a PGPR oltóanyag törzseinek gyökér kolonizációs hatékonyságát (Dangi és mtsai. 2017).

3 ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 Kísérleti növények és PGPR-ok

A kísérletek során használt kukorica (*Zea mays*, L., F1) genotípusokat a szegedi Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft. Kukoricanevelési Osztálya szolgáltatta. A kísérletekhez szükséges vetőmagmennyiséget évente állítottuk elő tömegkeresztezéses (Top cross) hibridelőállítási program keretein belül Kiszomboron. A kísérletekben szereplő baktérium törzseket a szolnoki Toximent Bt. és a Magyar Agrár és Élettudományi Egyetem (MATE) biztosította számunkra. Lehetőségünk nyílt szántóföldi körülmények között tesztelni a szolnoki Micro-Logi Tech Kft. kísérleti mikrobiológiai készítményét, melyet kutatási célra a rendelkezésünkre bocsátottak.

Az üvegházi vizsgálatok során modell növényként a GKT 3385 F1 (korai FAO 390) szemes fajtajelölt kukoricát alkalmaztuk. A laboratóriumi és szántóföldi kísérletek során a GKT 3385 mellett, még három genotípust teszteltünk. A GKT 3213 F1 (szuperkorai FAO 230) szemes kukoricát (állami elismerés, 2015.03.09.), a GKT 376 F1 (korai FAO 380) szemes kukoricát, (állami elismerés, 2014.03.12.) és a GK Silostar F1 (középérésű FAO 490) siló kukoricát (állami elismerés, 2017.03.08.).

A laboratóriumi kísérletekben az oltási kezeléseket *Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens* és *Pseudomonas putida* izolátumokkal végeztük. A foszfát-mobilizáló képesség vizsgálata során kontrollként *Escherichia coli* használtunk.

A szántóföldi tesztek során három oltási kezelést és egy kezeletlen kontrollt alkalmaztunk. Az első oltóanyag *Bacillus megaterium* és *Pseudomonas fluorescens*, a második *Bacillus pumilus* és *Pseudomonas putida*, a harmadik pedig *Rhodopseudomonas palustris* és *Lactobacillus plantarum* és *Lactobacillus casei* és *Saccharomyces cerevisiae* (Micro-Logi Tech Kft., Szolnok, Magyarország) törzskeverékét tartalmazta.

3.1.1 Tiszta tenyészetek és glicerines törzsek készítése

A laboratóriumi kísérleteket a szegedi Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft. Kukorica laboratóriumában végeztük. A tenyésztéshez folyékony Luria Bertani táptalajt (5 g/l élesztő kivonat, 10 g/l NaCl, pH 7.5±0.2) használtunk. A tápoldatot a felhasználás előtt sterilizáltuk, 121 °C-on 15 percig. 1000 ml Luria Bertani táptalajból lamináris boxban (Laminar air flow BL – 1200 F) 5x200 ml-t mértünk ki 500 ml-es

bő nyakú Erlenmeyer-lombikokba. A tápközegekbe pipettával 200 µl baktériumszuszpenziót oltottunk, majd a lombikokat folpack fóliával lezártuk. A beoltást követően 24 órán keresztül rázótermosztátban (G24 Environmental Incubator Shaker) 28 °C -on 180 rpm sebességgel inkubáltuk.

A tiszta tenyészetekből glicerines törzseket készítettünk a későbbi felhasználás céljából. 0,5 ml-es Eppendorf csőbe pipettával 800 µl baktériumszuszpenzióhoz 200 µl glicerint adagoltunk, majd -70 °C-on tároltuk. A fagyasztott sejtekből bármikor van lehetőség tiszta tenyészetek előállítására.

3.2 PGPR aktivitás vizsgálata

3.2.1 Foszfát-mobilizáló képesség vizsgálata

A foszfát-mobilizáló képesség vizsgálatához módosított szilárd Pikovskaya táptalajt (0,5 g/l élesztő kivonat, 10 g/l szacharóz, 5 g/l $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 0,5 g/l $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0,2 g/l KCl, 0,1 g/l MgSO_4 , 0,0001 g/l MnSO_4 , 0,0001 g/l FeSO_4 , 15 g bakteriológiai agar, pH 7.0±0.2) készítettünk. A tápoldatot a felhasználás előtt sterilizáltuk, 121 °C-on 15 percig. 500 ml táptalajból lamináris boxban (Laminar air flow BL – 1200 F) 10x50 ml-t mértünk ki 9 cm átmérőjű Petri-csészékbe, majd hagytuk megszilárdulni. A tiszta tenyészetekből a Petri-csészékbe oltókaccsal pontoltással 4 ponton oltottuk le a baktériumokat. A kísérletben az alábbi kezeléseket, baktériumonként 8 ismétlést alkalmazva, állítottuk be:

- BM: *Bacillus megaterium*
- BP: *Bacillus pumilus*
- PF: *Pseudomonas fluorescens*
- PP: *Pseudomonas putida*
- K: *Escherichia coli* (kontroll)

A tenyészeteket termosztátban (G24 Environmental Incubator Shaker) 30 °C-on 7 napig inkubáltuk. Az inkubációs idő leteltével a tenyészetekről fényképes dokumentációt készítettünk és Fiji ImageJ (License: GPLv3+, www.github.com) fényképelemző szoftverrel analizáltuk. A kísérlet során vizsgált tulajdonságok:

- CD: kolónia átmérője
- HD: feltisztulási zóna átmérője
- SI: foszfát-mobilizáló index, $(\text{SI} = (\text{CD} + \text{HD}) / \text{CD})$

A trikálcium-foszfát ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) kvantitatív elemzéséhez módosított folyékony Pikovskaya táptalajt (0,5 g/l élesztő kivonat, 10 g/l szacharóz, 5 g/l $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, 0,5 g/l $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0,2 g/l KCl, 0,1 g/l MgSO_4 , 0,0001 g/l MnSO_4 , 0,0001 g/l FeSO_4 , pH 7.0±0.2) készítettünk. A tápoldatot a felhasználás előtt sterilizáltuk, 121 °C-on 15 percig. 500 ml táptalajból lamináris boxban (Laminar air flow BL – 1200 F) 5x100 ml-t mértünk ki 500 ml-es bő nyakú Erlenmeyer-lombikokba. A kísérletben öt kezelést állítottunk be. Négy baktériumkezelt és egy kezeletlen kontroll. A tiszta tenyészetekből oltókacsal oltottuk le a baktériumokat, majd a lombikokat folpack fóliával lezártuk. A kontroll csoportot nem oltottuk. A kísérletben az alábbi kezeléseket, baktériumonként 4 ismétlést alkalmazva, állítottuk be:

- BM: *Bacillus megaterium*
- BP: *Bacillus pumilus*
- PF: *Pseudomonas fluorescens*
- PP: *Pseudomonas putida*
- K: oltás nélküli módosított folyékony Pikovskaya táptalaj (kontroll)

A tenyészeteket rázótermosztátban (G24 Environmental Incubator Shaker) 28 °C-on 180 rpm sebességgel 7 napig inkubáltuk. Az inkubációs idő végén a tenyészeteket 13000 rpm sebességgel centrifugáltuk 10 percig. A felülúszó oldható szerves foszfát koncentrációját molibdénkéék módszerrel (Murphy és Riley 1962), spektrofotométerrel (Shimadzu UV mini 1240) határoztuk meg. A kísérlet során vizsgált tulajdonság:

- PC: szerves foszfát koncentráció

3.2.2 Növényi növekedést serkentő hatás vizsgálata

A kísérlet során a magok (GKT 3213 F1, GKT 3385 F1, GKT 376 F1, GK Silostar F1) felszínét 70%-os etanolban 15 percig fertőtlenítettük, majd steril reverz ozmózis (RO) rendszerrel tisztított vízzel háromszor lemostuk. A felületi sterilizálás után termosztátban (G24 Environmental Incubator Shaker) 9 cm átmérőjű Petri-csészékben nedves szűrőpapíron csíráztattuk 48 órán keresztül 21 °C-on. A beteg és nem csírázott magokat szelektáltuk, a megmaradt egészséges csírákat 9 cm átmérőjű Petri-csészékbe szűrőpapírra tettünk.

A kísérlet során a baktériumokat (*Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*) folyékony Luria Bertani táptalajban (5 g/l élesztő kivonat, 10 g/l NaCl, pH 7.5±0.2) tenyésztettük. A tápoldatot a felhasználás előtt sterilizáltuk, 121 °C-on 15 percig. 1000 ml Luria Bertani táptalajból lamináris boxban (Laminar air flow BL – 1200 F) 5x100 ml-t mértünk ki 500 ml-es bő nyakú Erlenmeyer-lombikokba. A tiszta tenyészetekből a tápközegbe a baktériumokat oltókaccsal oltottunk, majd a lombikokat folpack fóliával lezártuk. A beoltást követően öt napon keresztül rázótermosztátban (G24 Environmental Incubator Shaker) 28 °C-on 180 rpm sebességgel inkubáltuk. Az inkubációs idő végén a tenyészeteket 13000 rpm sebességgel centrifugáltuk 10 percig. A felülúszót leöntöttük, és a pelletet steril reverz ozmózis (RO) rendszerrel tisztított vízben 100 ml-ig hígítottuk. A bakteriális oldat optikai sűrűségét spektrofotométerrel (Shimadzu UV mini 1240) ellenőriztük. A kísérletben öt kezelést állítottunk be. Négy baktériumkezelt és egy kezeletlen kontroll. A baktériumkezelt csírákat pipettával 5 ml baktériumszuszpenzióval oltottuk, majd 4 napig termosztátban (G24 Environmental Incubator Shaker) 21 °C-on inkubáltuk. A kontroll csoportot nem oltottuk. A csírákat hibridenként az alábbi kezelésekkkel 8 ismétléssel vizsgáltuk:

- BM: *Bacillus megaterium*
- BP: *Bacillus pumilus*
- PF: *Pseudomonas fluorescens*
- PP: *Pseudomonas putida*
- K: oltás nélküli csírák (kontroll)

Az inkubációs idő leteltével a magokról leválasztottuk a csíranövényeket. Külön preparáltuk a koleoptilokat és a radikulákat, azokról fényképes dokumentációt készítettünk, majd Fiji ImageJ (License: GPLv3+, www.github.com) fényképelemző szoftverrel analizáltuk. A kísérlet során rögzített tulajdonságok:

- CL: koleoptil hossza
- RL: radikula hossza
- SVI: csírázási vigor index, $SVI = (CL+RL) / GP$

A kísérlethez válogatott egészséges csírákat használtunk, így a csírázási százalékot (GP) 100 %-nak tekintjük. A koleoptilok és radikulák hosszának meghatározásával kiszámítottuk a csírázási vigor indexet (SVI, Seedling Vigor Index).

3.2.3 Szárazságstressz faktor elleni tolerancia fokozásának vizsgálata

A tenyészedényes kísérlet során a magok (GKT 3213 F1, GKT 3385 F1, GKT 376 F1, GK Silostar F1) felszínét 70%-os etanolban 15 percig fertőtlenítettük, majd steril reverz ozmózis (RO) rendszerrel tisztított vízzel háromszor lemostuk. A magokat 4 kg sterilizett (121 °C-on 45 perc) közegben (1:1 arányban homok és Garri darált fekete tőzeg keverék (szervesanyag tartalom: >40% m/m%, pH: 7.0±0.5) + 20 g/cserép Compo Trio (NPK 12:8:16(+3) EK, 90 napos folyamatosan felszívódó műtrágya) neveltük.

A kísérlet során a baktériumokat (*Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*) folyékony Luria Bertani táptalajban (5 g/l élesztő kivonat, 10 g/l NaCl, pH 7.5±0.2) tenyésztettük. A tápoldatot a felhasználás előtt sterilizáltuk, 121 °C-on 15 percig. 1000 ml Luria Bertani táptalajból lamináris boxban (Laminar air flow BL – 1200 F) 5x100 ml-t mértünk ki 500 ml-es bő nyakú Erlenmeyer-lombikokba. A tiszta tenyészetekből a tápközegbe a baktériumokat oltókaccsal oltottunk, majd a lombikokat folpack fóliával lezártuk. A beoltást követően 5 napon keresztül rázótermosztátban (G24 Environmental Incubator Shaker) 28 °C-on 180 rpm sebességgel inkubáltuk. Az inkubációs idő végén a tenyészeteket 13000 rpm sebességgel centrifugáltuk 10 percig. A felülúszót leöntöttük, és a pelletet steril reverz ozmózis (RO) rendszerrel tisztított vízben 100 ml-ig hígítottuk. A bakteriális oldat optikai sűrűségét spektrofotométerrel (Shimadzu UV mini 1240) ellenőriztük. A kísérletben öt oltási kezelést állítottunk be. Négy baktériumkezelt és egy kezeletlen kontroll. A kezelt növények tápközegéhez a vetéssel egy időben 5 cm mélyen, közvetlenül a mag környezetébe, 10 ml baktériumszuszpenziót oltottunk.

A kísérlet során a közeg nedves tömegét (WW) megmértük, majd súlyállandóságig szárítottuk 70 °C-on, és a száraztömegét (DW) is megmértük. A tápközeg nedves- és száraztömegének ismeretében meghatároztuk annak nedvességtartalmát tömegszázalékban ($MWP = (WW - DW) / DW \times 100$). Vetéskor a közeg nedvességtartalmát a tápközeg vízkapacitásának 70 %-ára állítottuk be. Két öntözési kezelést határoztunk meg: optimális vízellátottság (O) mellett 4840 g-ra, vízmegvonás mellett (S) 4240 g-ra öntöttük a növényeket. Az öntözést csapvízzel kétnaponta végeztük egyéni súlymérés alapján. A növényeket a Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft. üvegházában fűthető kabinban 22-24 °C hőmérsékleten 5⁰⁰-7⁰⁰ óráig tartó pótmegevilágítással neveltük.

Mindezek alapján az alábbi kezeléseket 4-4 ismétlést alkalmazva állítottuk be:

- BM: *Bacillus megaterium*
 - BP: *Bacillus pumilus*
 - PF: *Pseudomonas fluorescens*
 - PP: *Pseudomonas putida*
 - K: oltás nélküli növények (kontroll)
-
- O: optimális vízellátottság
 - S: vízmegvonás

A kísérlet során két alkalommal történt adatfelvételezés. Az első mintavétel a növények R1 fenofázisában (50% nővirágzás) történt, a második mintavételt a növények R3 állapotában (tejes érés) tartottuk meg. A kísérlet során rögzített tulajdonságok:

- PH: növénymagasság
- FWR: gyökér nedves tömeg
- FWB: hajtás nedves tömeg
- DWB: hajtás száraz tömeg
- WUE: vízhasznosítási együttható, $WUE = DW/W$
- FW/DW: nedves tömeg/száraz tömeg aránya, $FW/DW = FW/DW$
- DMC: szárazanyag-tartalom, $DMC = (DW/FW) * 100$

3.3 A hibridek alkalmazkodóképességének vizsgálata talajoltás hatására szántóföldi körülmények között

3.3.1 Kísérleti környezet és kísérleti paraméterek

A kísérletet három egymást követő évben (2019, 2020, és 2021) állítottuk be a Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft. kiszombori kukorica tenyészkertjében (GPS koordináta: 46°11'16"N20°23'43"E).

Az oltóanyagokhoz a baktériumokat (*Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*) folyékony Luria Bertani táptalajban (5 g/l élesztő kivonat, 10 g/l NaCl, pH 7.5±0.2) tenyésztettük. A tápoldatot a felhasználás előtt sterilizáltuk, 121 °C-on 15 percig. 1000 ml Luria Bertani táptalajból lamináris boxban (Laminar air flow BL – 1200 F) 4x100 ml-t mértünk ki 500 ml-es

bő nyakú Erlenmeyer-lombikokba. A tiszta tenyészetekből a tápközegekbe a baktériumokat oltókaccsal oltottuk, majd a lombikokat folpack fóliával lezártuk. A beoltást követően 5 napon keresztül rázótermosztátban (G24 Environmental Incubator Shaker) 28 °C -on 180 rpm sebességgel inkubáltuk. Az inkubációs idő végén a tenyészeteket 13000 rpm sebességgel centrifugáltuk 10 percig. A felülúszót leöntöttük, és a pelletet steril reverz ozmózis (RO) rendszerrel tisztított vízben 500 ml-ig hígítottuk. A bakteriális oldat optikai sűrűségét spektrofotométerrel (Shimadzu UV mini 1240) ellenőriztük.

A hibrideket (GKT 3213 F1, GKT 3385 F1, GKT 376 F1, GK Silostar F1) három ismétléses véletlen blokk elrendezésű 4 soros kisparcellás kísérleti rendszerben vizsgáltuk. A kísérlet során 3 m széles és 6 m hosszú, 18 m² alapterületű parcellákat használtunk.

10. táblázat: A kísérleti terület talajának jellemzői 2019-2021-ig

Év	pH (KCl)	KA	Össz. só (%)	Na (mg/kg)	CaCO ₃ (%)	NO ₃ -N (mg/kg)	Humusz (%)	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Zn	Cu	Mn	SO ₄
								(mg/kg)						
2019	7,12	54	0,08	53	2,6	15,3	2,37	316	455	511	1,3	8,6	184	12,5
2020	7,16	50	0,07	66	4,9	11,2	2,54	634	437	347	1,3	6,0	99	17,0
2021	7,14	53	0,08	75	1,9	13,4	2,30	288	335	303	1,3	7,2	148	18,3

Őszi búza (*Triticum aestivum*) elővetemény után a kísérleti területeket novemberben 28-32 cm mélyen szántottuk (John Deer 8310 R traktor + váltvaforgató 6 fejes réselt kormányú eke). A szántást követően őszi alaptrágyaként 250 kg/ha Genezis NPK-8:21:21 kompakt műtrágyát (Ammonia nitrogén: 4,8%, Karbamid nitrogén: 3,2%, P₂O₅: 21,0%, K₂O: 21,0%, CaO: 5,0%, MgO: 3,5%) juttattunk ki Rauch Axis műtrágyaszórával. Tavaszi alaptrágyázásként márciusban 300 kg/ha Genezis pétisót (N: 27%, CaO: 7%, MgO: 5%) adtunk ki. A magágykészítést áprilisban függesztett kombinátorral végeztük. A talajt májusban vetés előtt három oltóanyaggal oltottuk. Az első oltóanyag *Bacillus megaterium* és *Pseudomonas fluorescens* (KD1), a második *Bacillus pumilus* és *Pseudomonas putida* (KD2), a harmadik pedig *Rhodopseudomonas palustris* és *Lactobacillus plantarum* és *Lactobacillus casei* és *Saccharomyces cerevisiae* (MLT) (Micro-Logi Tech Kft., Szolnok, Magyarország) törzskeverékét tartalmazta. Kontrollként (K) oltatlan területet használtunk. Az oltáshoz 1 l baktériumszuszpenzió + 13 l csapvíz keverékét önjáró szántóföldi permetezővel permeteztük kezelésként 252 m² területen a talaj

felületére. Az oltóanyagot kijuttatás után 10 cm mélyen a talajba dolgoztuk (Deutz-Fahr Agrokid traktor + függesztett rotátor). A magokat 5 cm mélységbe 70 cm sortávolsággal és 22,3 cm tőtávolsággal vetettük önjáró parcellavetőgéppel (Wintersteiger Plotseed TC). A növények tőszámát 60000 tő/ha-ra állítottuk be. Vetés után korai posztemergens gyomírtást végeztünk önjáró szántóföldi permetezővel (John Deer 4730). 2019-ben 0,4 l/ha széles hatásspektrumú gyomirtószert alkalmaztunk (Adengo, Bayer Crop Science, 225 g/l izoxaflutol, 90 g/l tienkarbazonmetil, 150 g/l ciprozulfamid). 2020-ban és 2021-ben 400 g/ha teljes hatásspektrumú gyomirtószert alkalmaztunk (Principal Plus + Successor T, Corteva Agriscience, 40,5 g nikoszulfuron, 10,1 g rimszulfuron, 242 g dikamba, 300 g petoxamid, 187,5 g terbutilazin). A sorközöket kultivátorral műveltük. A betakarítást októberben parcellakombájnnal (Wintersteiger Quantum Plotech) végeztük. A fent említettek alapján a kísérletben 4 hibridkukorica genotípusra az alábbi kezeléseket, 3 ismétlést alkalmazva állítottuk be:

- KD1: *Bacillus megaterium* + *Pseudomonas fluorescens*
- KD2: *Bacillus pumilus* + *Pseudomonas putida*
- MLT: *Rhodopseudomonas palustris* + *Lactobacillus plantarum* + *Lactobacillus casei* + *Saccharomyces cerevisiae*
- K: oltás nélküli (kontroll)

Az adatfelvételezések betakarításkor, illetve a feldolgozás során történtek. A termést meghatározó tulajdonságok közül az alábbiakat rögzítettük:

- GY: szemtermés mennyisége
- WC: betakarításkori szemnedvesség
- DMC: szem szárazanyag-tartalma $DM=(100-WC)/2$

A beltartalmi értéket meghatározó tulajdonságok közül az alábbiakat mértük:

- PC: szem fehérjetartalma
- SC: szem keményítőtartalma
- OC: szem olajtartalma

3.3.2 Az átlaghőmérséklet és a csapadék mennyisége a kukorica tenyészidejében

A **11. táblázat** mutatja be a 2019-es, a 2020-as és a 2021-es év átlaghőmérsékletének és csapadék mennyiségének adatait a kukorica tenyészidejében Kiszomboron.

11. táblázat: **Az átlaghőmérséklet és a csapadék mennyisége a kukorica tenyészidejében 2019-2021-ig**

Hónap	Áh (°C) 2019	Cs (mm) 2019	Áh (°C) 2020	Cs (mm) 2020	Áh (°C) 2021	Cs (mm) 2021
Április	13,14	29,5	11,91	5	9,03	25,2
Május	14,85	125,6	15,12	26	15,26	55
Június	22,81	117,9	20,30	150,4	22,62	21,8
Július	22,23	63,2	22,25	79,8	25,33	28,3
Augusztus	23,95	17	23,64	46,5	22,45	23,4
Szeptember	18,10	62,5	19,44	22,5	17,96	25,8
Átlag	19,18	415,7	18,78	330,2	18,78	179,5
TX30GE (db)	58		42		54	
TX35GE (db)	2		0		16	

Áh: átlaghőmérséklet (°C), Cs: csapadékmennyiség (mm), TX30GE: hőségnapok (nap), TX35GE: forró napok (nap)

2019-ben a kukorica tenyészidejében az átlaghőmérséklet 19,18 °C volt. A legmagasabb hőmérsékletet a június, a július és az augusztus hónapban tapasztaltuk. Összesen 415,7 mm csapadék hullott, a legtöbb májusban, júniusban és júliusban. 2019-ben összesen 58 db hőségnapot (amikor az átlaghőmérséklet tartósan 30 °C fölött van) és 2 db forró napot (amikor az átlaghőmérséklet tartósan 35 °C fölött van) számoltunk. A 2019-es év kukoricatermesztés szempontjából intenzív évnak tekinthető a meleg és csapadékos időjárás miatt.

2020-ban a kukorica tenyészidejében az átlaghőmérséklet 18,78 °C volt, ez 0,4 °C-al alacsonyabb hőmérsékletet jelentett, mint 2019-ben. A legmagasabb értékeket a június, július és augusztus hónapban tapasztaltuk. Összesen 330,2 mm csapadék hullott, ez 85,5 mm-el kevesebb mennyiség, mint 2019-ben. A legtöbb csapadék júniusban esett. 2020-ban összesen 42 db hőségnapot és összesen 0 db forró napot számoltunk. 2020-ban a hőségnapok száma 16 nappal kevesebb, a forró napok száma pedig 2 nappal kevesebb, mint 2019-ben. A 2020-as év a kukoricatermesztés szempontjából szintén intenzív évnak tekinthető.

2021-ben a kukorica tenyészidejében az átlaghőmérséklet 18,78 °C volt, ez megegyezik a 2020-as évvel. A legmagasabb hőmérsékletet a június, július és augusztus hónapban tapasztaltuk. Összesen 179,5 mm csapadék hullott. Ez a mennyiség 236,2 mm-el kevesebb a 2019-es évhez képest és 150,7 mm-el kevesebb a 2020-as évhez mérten. A legtöbb csapadék májusban esett. 2021-ben összesen 54

db hőség napot és összesen 16 db forró napot számoltunk. 2021-ben a hőségnapok száma 4 nappal kevesebb, mint 2019-ben és 12 nappal több, mint 2020-ban. A forró napok számát tekintve pedig 14 nappal több, mint 2019-ben és 16 nappal több, mint 2020-ban. A 2021-es év kukoricatermesztés szempontjából kedvezőtlennek tekinthető. A magas hőmérséklet, a tartós csapadékhiány és a virágzáskori légköri aszály a növények termésátlagát is negatívan befolyásolta.

3.4 Statisztikai analízis

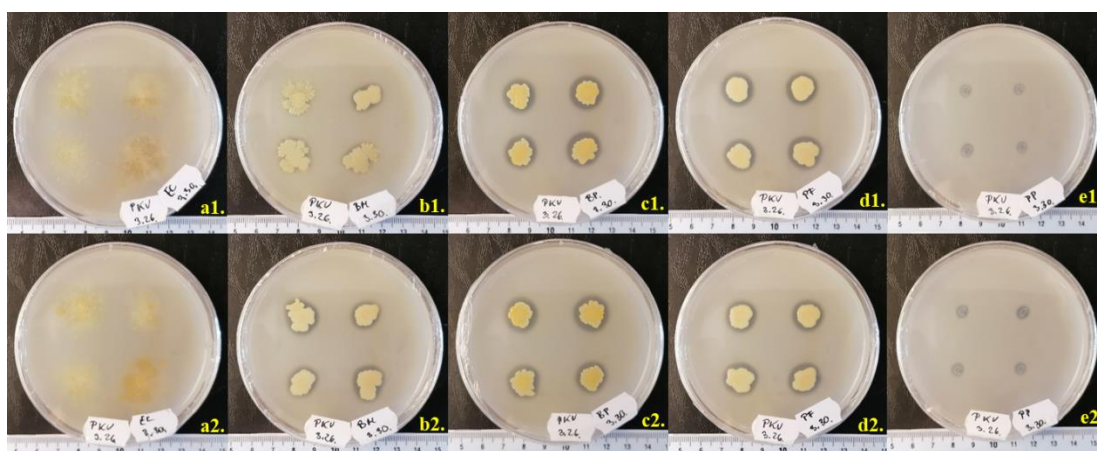
Az összegyűjtött adatok elemzése Microsoft Excel 2019 XLSTAT szoftverrel történt. Egytényezős (One way Analysis of Variance, ANOVA) és kéttényezős varianciaanalízist (Two way Analysis of Variance, ANOVA) használtunk az egyes tényezők és a tényezők közötti interakciók vizsgálatára. A legkisebb szignifikáns különbséget Fisher's Least Significant Difference (LSD) test módszerével számoltuk ki. Az összefüggések vizsgálatára korreláció analízist és főkomponens analízist (Principal Component Analysis, PCA) alkalmaztunk.

4 EREDMÉNYEK

4.1 PGPR aktivitás vizsgálata

4.1.1 Foszfát-mobilizáló képesség vizsgálata

A 3.2.1 pont alapján beállított PGPR-ok foszfát-mobilizáló képességének mértékét a **12. táblázat** mutatja be. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a kontroll (K) kezelés esetében nem történt foszfát feltárás. A PGPR (BM, BP, PF, PP) kezeléseknél foszfát-mobilizációt tapasztaltunk. Az oltást követő hetedik napon a baktérium telepek körül feltisztulási zónákat figyeltünk meg (**9. ábra**). A feltisztulási zónák kialakulása és mérete mutatta, hogy a baktériumok eltérő mértékben mobilizálják a táptalajhoz adott trikálcium-foszfátot ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$).



9. ábra: Foszfát-mobilizációra utaló feltisztulási zónák a 7 napos PGPR baktérium telepek körül

K: (a1., a2.), BM: (b1., b2.), BP: (c1., c2.), PF: (d1., d2.), PP: (e1., e2.)

A 7 napos inkubációt követően szignifikánsan magasabb foszfát-mobilizáló indexet számoltunk a BM, BP, PF, PP kezeléseknél a K (***) $p < 0,0001$ kezeléssel szemben. Eredményeink alapján a PP kezelés a leghatékonyabb a szerves foszfát feltárásában, szignifikánsan (***) $p < 0,0001$ magasabb mobilizáló indexszel, a BM, BP, PF kezelésekhöz viszonyítva.

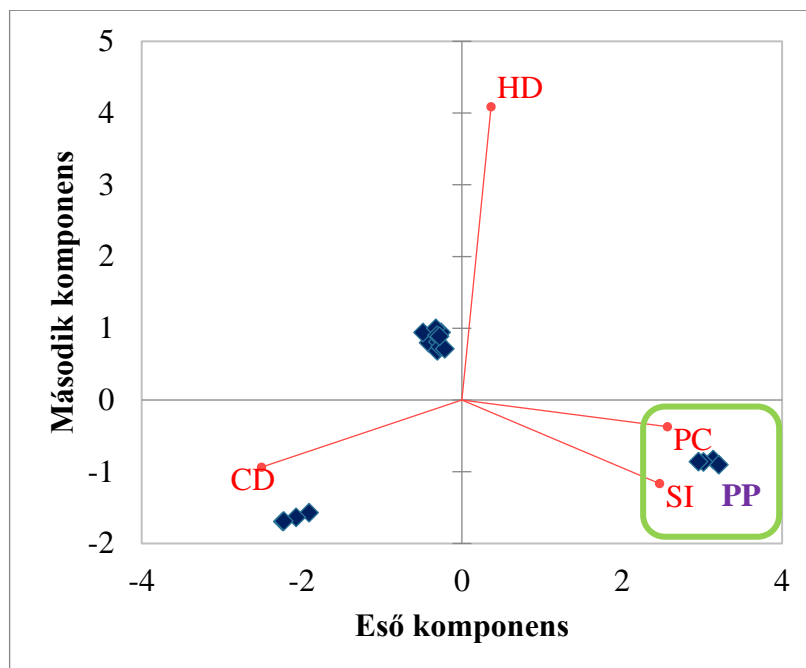
A 7 napos inkubációt követően a folyékony tápközegbe oltott BM, BP, PF, PP baktériumkezeléseknél szignifikánsan magasabb oldható szerves foszfát koncentrációt mértünk, mint a K (***) $p < 0,0001$ kezelés esetében. A kísérlet eredményei szerint a PP kezelés szignifikánsan magasabb oldható szerves foszfát koncentrációt eredményezett a BM, BP, PF (***) $p < 0,0001$ oltásokkal szemben.

12. táblázat: A baktériumok kolónia átmérője, feltisztulási zóna átmérője, foszfát-mobilizáló indexe és az oldható szerves foszfát koncentrációja

	CD		HD		SI		PC
Baktérium							
LSD							
K	25,051 a	BP	17,033 a	PP	18,318 a	PP	51,636 a
BM	13,690 b	BM	16,992 a	PF	2,376 b	BP	15,601 b
BP	12,796 bc	PF	16,497 a	BP	2,330 b	PF	14,817 bc
PF	11,982 c	PP	7,960 b	BM	2,244 b	BM	14,621 c
PP	0,461 d	K	0,000 c	K	0,000 c	K	0,758 d
SzD _{5%}	1,629		0,1502		0,039		0,913
F	259,934		445,875		424,539		3934,572
df	4		4		4		4
p	<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001

K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida* CD: kolónia átmérője (mm), HD: feltisztulási zóna átmérője (mm), SI: foszfát-mobilizáló index, PC: szerves foszfát koncentráció ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$), LSD: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Egytényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A **10. ábra** a főkomponens analízis eredményét mutatja be. A főkomponens vizsgálatot a kolónia átmérője (CD), feltisztulási zóna átmérője (HD), foszfát-mobilizáló index (SI), szerves foszfát koncentráció (PC) adatai alapján végeztük. Pozitív összefüggést találtunk a baktériumok foszfát-mobilizáló indexe és a szerves foszfát koncentráció mértéke között. Az ábrán PP-vel jelölt baktériumkezelés volt a leghatékonyabb foszfát feltáró a kísérlet során vizsgált törzsek közül. Az első két komponens az összes összefüggés 71,49%-át magyarázza, foszfát-mobilizáló potenciálnak tekinthetjük.



10. ábra: A főkomponens analízis eredménye a vizsgált tulajdonságok adatai alapján

CD: kolónia átmérő, HD: feltisztulási zóna átmérő, SI: foszfát-mobilizáló index, PC: foszfát koncentráció, PP: *Pseudomonas putida*.

4.1.2 Növényi növekedést serkentő hatás vizsgálata

A 3.2.2 pont alapján beállított különböző baktériumkezelésben részesített kukorica genotípusok koleoptil és radikula hosszának és a csírázási vigor indexének eredményeit a **13. táblázat** mutatja be. A koleoptil hossza a GKT 3385-ös hibrid esetében szignifikánsan magasabb volt a GKT 376-nál, a GKT 3213-nál és a GK Silostarnál (** $p < 0,0001$), mely szignifikáns eltérés a radikula hossza és a csírázási vigor index esetében is megmutatkozott.

13. táblázat: A csíranövények koleoptil hossza, radikula hossza és csírázási vigor indexe a genotípus tényező hatására

	CL		RL		SVI
Genotípus					
LSD					
GKT 3385	50,812 a	GKT 3385	53,219 a	GKT 3385	10403,153 a
GKT 376	40,585 b	GKT 3213	30,879 b	GKT 3213	6889,791 b
GKT 3213	38,179 bc	GKT 376	27,628 bc	GKT 376	6821,289 b
GK Silostar	36,525 c	GK Silostar	23,818 c	GK Silostar	6034,247 c
SzD _{5%}	3,435		3,921		602,966
F	24,914		80,723		74,419
df	3		3		3
p	<0,0001		<0,0001		<0,0001

CL: koleoptil hossza (mm), RL: radikula hossza (mm), SVI: csírázási vigor index, LSD: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, *p*: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A PGPR oltások hatására 4 nap után a kukorica növények koleoptil hossza nem mutatott szignifikáns eltérést a BM, BP, PF, PP kezelés esetében a K kezeléssel szemben. A BP kezelést kapott növények koleoptil hossza szignifikánsan alacsonyabb volt, mint a PF, BM, PP (***) $p < 0,0001$ oltott növények (14. táblázat).

4 nap után az oltást követően a radikula hosszában a baktérium oltás hatására szignifikáns különbség mutatkozott a kezeléseket során (***) $p < 0,0001$). A radikulákat összehasonlítva a PP oltott növényeknél szignifikánsan magasabb hosszúságot mértünk, mint a K (* $p = 0,048$) és a BM, PF, BP (***) $p < 0,0001$ oltott növényeknél. A BM, PF, BP kezelést kapott növények radikula hosszúsága között nem mutatkozott szignifikáns különbség, azonban a K (***) $p < 0,0001$ kezeléshez hasonlítva szignifikánsan alacsonyabb értéket mértünk.

4 napos inkubációs idő után a PF, BM, BP oltást kapott növények csírázási vigor indexét összehasonlítva szignifikánsan alacsonyabb értéket számoltunk, mint a K (***) $p < 0,0001$ és a PP (***) $p < 0,0001$ kezelésben részesült növények esetében, amelyek csírázási vigor indexében nem találtunk szignifikáns eltérést.

14. táblázat: A csíranövények koleoptil hossza, radikula hossza és csírázási vigor indexe a baktérium tényező hatására

	CL		RL		SVI
Baktérium					
LSD					
PF	44,375 a	PP	53,568 a	PP	9579,572 a
BM	42,368 a	K	48,848 b	K	9016,350 a
PP	42,227 a	BM	23,176 c	PF	6720,336 b
K	41,316 ab	PF	22,828 c	BM	6534,362 bc
BP	37,340 b	BP	21,010 c	BP	5834,979 c
SzD _{5%}	3,84		4,383		674,137
F	2,88		90,361		40,897
df	4		4		4
p	<0,0001		<0,0001		<0,0001

K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida* CL: koleoptil hossz (mm), RL: radikula hossz (mm), SVI: csírázási vigor index, LSD: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

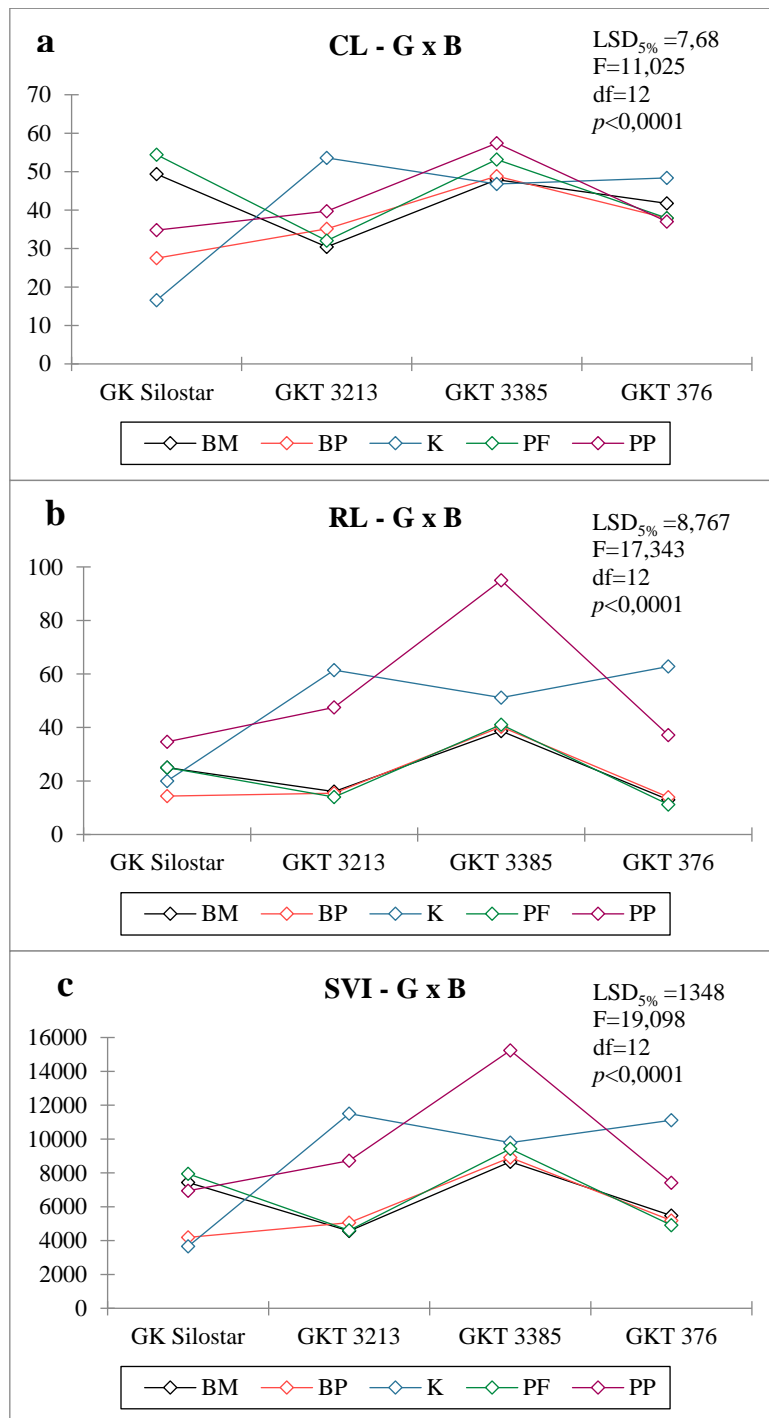
A genotípus - baktérium interakció hatására a PGPR-ral oltott és oltatlan hibridek koleoptil hosszát, radikula hosszát és csírázási vigor indexét a **11. ábra** mutatja be.

A 4 napos inkubációt követően a GK Silostar hibrid koleoptil hossza a K kezeléshez viszonyítva a BM (*** $p < 0,0001$), BP (* $p = 0,048$), PF (*** $p < 0,0001$), PP (*** $p = 0,0002$) oltások hatására szignifikánsan magasabb értéket mutatott. A GKT 3213-as hibrid esetében megfigyeltük, hogy a BM, BP, PF (*** $p < 0,0001$), PP (*** $p = 0,001$) oltott növények koleoptil hossza szignifikánsan alacsonyabb a K növényekkel szemben. Hasonló hatást tapasztaltunk a GKT 376-os hibridnél, ugyanis a BP (* $p = 0,013$), PF (* $p = 0,017$), PP (** $p = 0,006$) oltott növények szignifikánsan alacsonyabb értéket mutattak a K kezeléshez hasonlítva (**11.a ábra**).

A 4 napos baktérium oltások hatására a GK Silostar hibrid radikula hossza a PP kezelés esetében szignifikánsan magasabb értéket mutatott a K (*** $p = 0,001$) kezelés növényeivel szemben, de nem tapasztaltunk szignifikáns eltérést BM, BP, PF oltások hatására. A GKT 3213-as hibrid koleoptil hosszában szignifikánsan alacsonyabb értéket idézett elő a BM, BP, PF (*** $p < 0,0001$), PP (** $p = 0,005$) kezelés a K növényekhez viszonyítva, és ez a hatás megmutatkozott a GKT 376-os

hibrid esetében is (***) $p < 0,0001$). A BM (* $p = 0,011$), BP (* $p = 0,026$), PF (* $p = 0,039$) kezelés szignifikánsan alacsonyabb értéket eredményezett a GKT 3385-ös hibrid koleoptil hosszában, de a PP oltás hatására szignifikánsan magasabb értéket okozott a K (***) $p < 0,0001$) kezeléshez mérve **(11.b ábra)**.

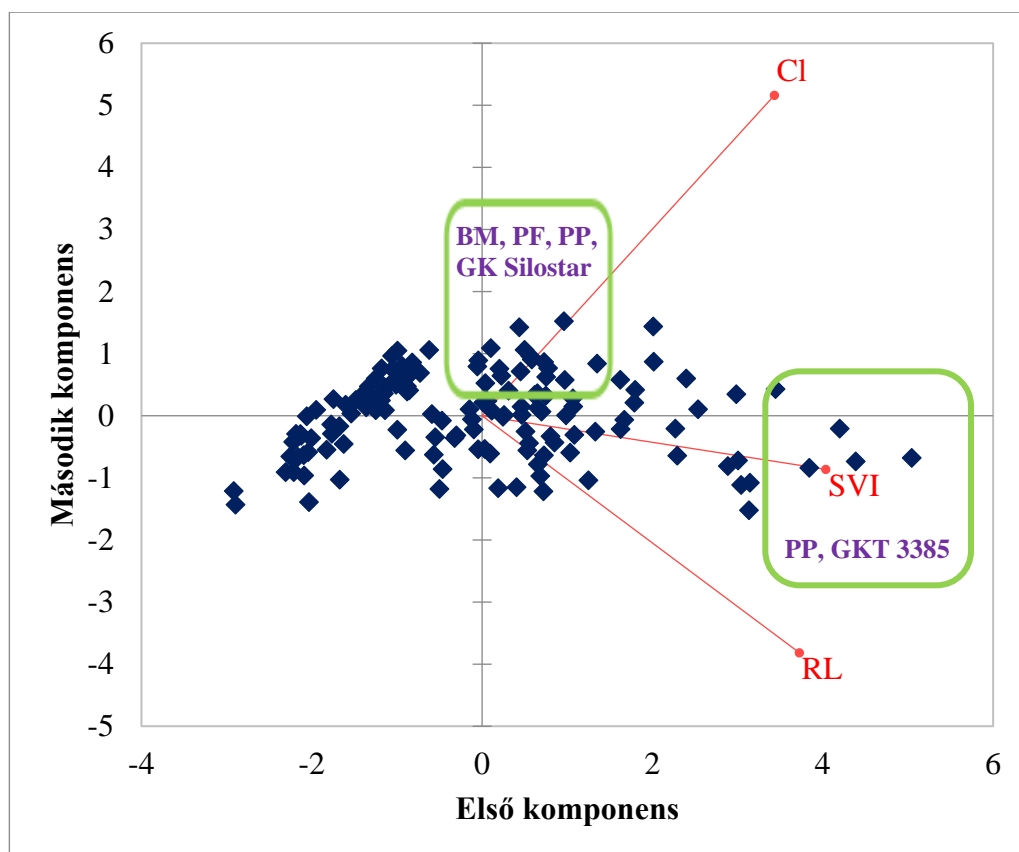
4 nap után az oltást követően a GK Silostar hibrid csírázási vigor indexében a BM, PF (***) $p < 0,0001$), PP (***) $p = 0,0001$) kezelés szignifikánsan magasabb értéket idézett elő, míg a BP kezelés hatása nem okozott szignifikáns különbséget a K növényekhez viszonyítva. A GKT 3213-as és a GKT 376-os hibridnél a BM, BP, PF, PP oltások szignifikánsan alacsonyabb értékű csírázási vigor indexet eredményeztek a K (***) $p < 0,0001$) növényekhez hasonlítva. A PP oltás hatására GKT 3385-ös hibrid csírázási vigor indexe esetében szignifikánsan magasabb értéket tapasztaltunk a K (***) $p < 0,0001$) kezeléshez viszonyítva, míg a BM, BP, PF oltás nem okozott szignifikáns különbséget **(11.c ábra)**.



11. ábra: A növények koleoptil hossza, radikula hossza és csírázási vigor indexe a genotípus - baktérium interakció hatására

K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida*, CL: koleoptil hossza (mm), RL: radikula hossza (mm), SVI: csírázási vigor index, G x B: genotípus - baktérium interakció, $LSD_{5\%}$: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A **12. ábra** a főkomponens analízis eredményét mutatja be. A főkomponens vizsgálatot a koleoptil hossza (CL), a radikula hossza (RL) és a csírázási vigor index (SVI) adatai alapján végeztük. A kísérlet során vizsgált törzsek közül az ábrán PP-vel jelölt baktérium oltás a GKT 3385-ös és a GK Silostar hibridek, valamint a BM-mel és PF-fel jelölt baktérium oltások a GK Silostar csíranövényeinek növekedését serkentette. Az első két komponens az összes összefüggés 85,15%-át magyarázza, növekedést serkentő potenciálnak tekinthetjük.

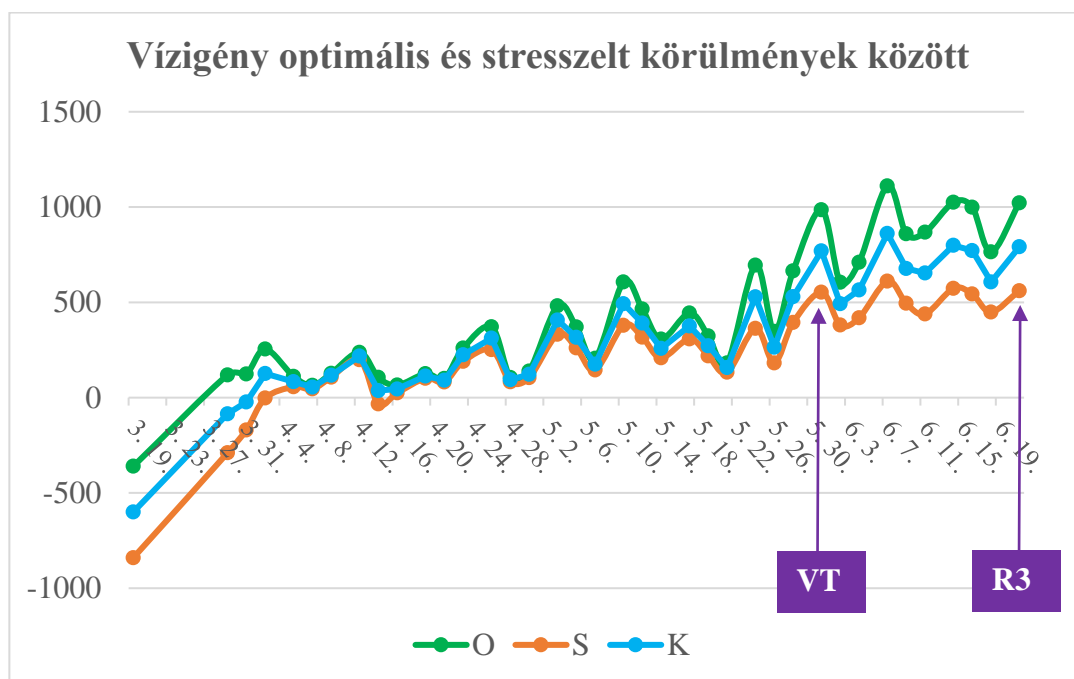


12. ábra: A főkomponens analízis eredménye a vizsgált tulajdonságok adatai alapján

KL: koleoptil hossza, RL: radikula hossza, SVI: csírázási vigor index, BM: *Bacillus megaterium*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida*.

4.1.3 Szárazságstressz faktor elleni tolerancia fokozásának vizsgálata

A növények vízigényét - optimális vízellátottság (O) és vízmegvonás (S) során -, valamint a kísérleti átlagot (K) a **13. ábra** mutatja be. A megfelelő vízellátottságú növények a kísérlet alatt átlag 421 ml vizet vettek fel, míg a stressz alatt álló növények mindössze csak 206 ml vizet kaptak. A differencia a két kezelés között átlag 215 ml, ami az optimális körülmények között fejlődő növényekhez képest egy jelentős, közel 50%-os vízmegvonást jelentett. Címerhányáskor (VT) és tejes érés fázisában (R3) mindkét kezelés esetében megnövekedett vízigényt tapasztaltunk a növényeknél.



13. ábra: A növények vízigénye optimális és stresszelt körülmények között

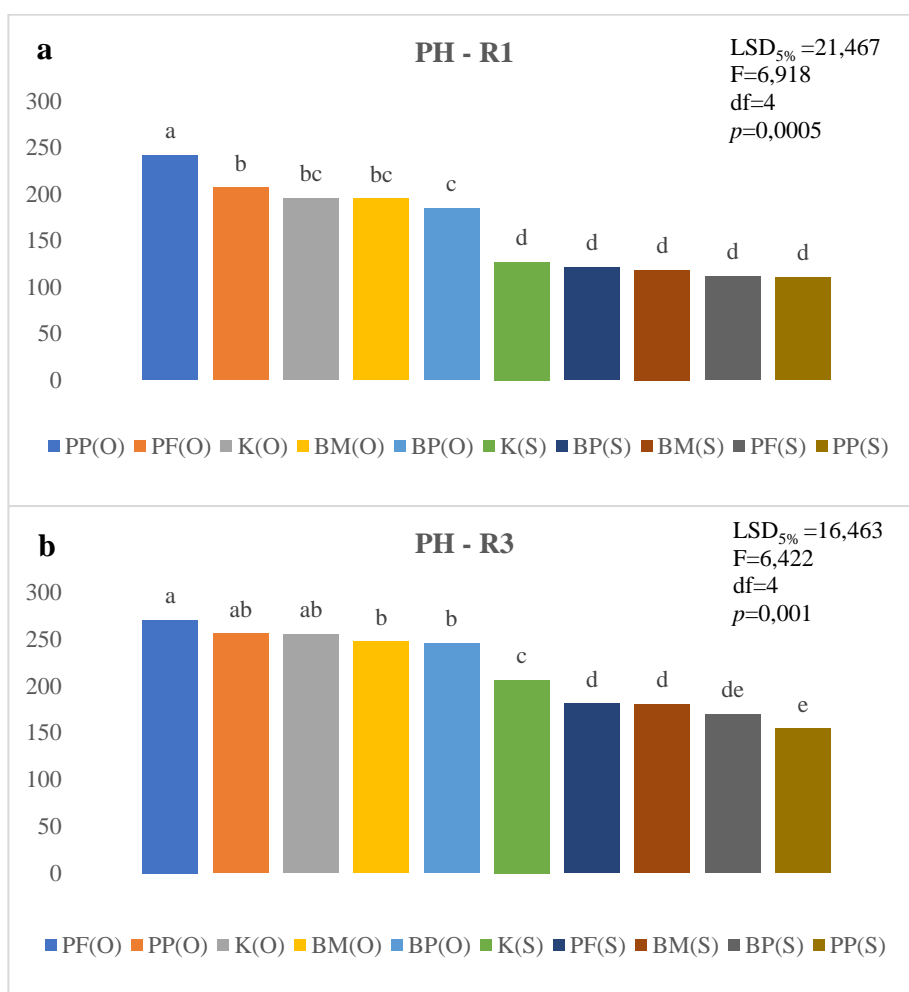
O: optimális vízellátottság, S: vízmegvonás, K: kísérleti átlag, VT: címerhányás, R3: tejes érés.

A 3.2.3 pont alapján beállított, különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények növénymagasságának mértékét optimális vízellátottság és vízmegvonás során a **15. ábra** mutatja be.

Optimális vízellátottság során 50%-os nővirágzásban a PP oltás hatására a GKT 3385-ös hibrid növénymagassága szignifikánsan magasabb értéket mutatott a K (***) $p=0,0001$) növényekhez viszonyítva, de a BM, BP és PF kezelés nem

eredményezett mérhető különbséget. Vízmegvonás mellett az oltási kezelések nem mutattak szignifikáns eltérést a K növényekkel szemben (14.a ábra).

Tejes érésben optimális vízellátottság során az oltási kezelések hatására, a hibridek növénymagassága esetében nem alakult ki mérhető különbség a K növényekhez viszonyítva. Vízmegvonás hatására a BM (** $p=0,003$), BP (***) $p=0,0001$), PF (** $p=0,004$), PP (***) $p=0,0001$) kezelést kapott növények növénymagassága szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a K növényekkel szemben (14.b ábra).



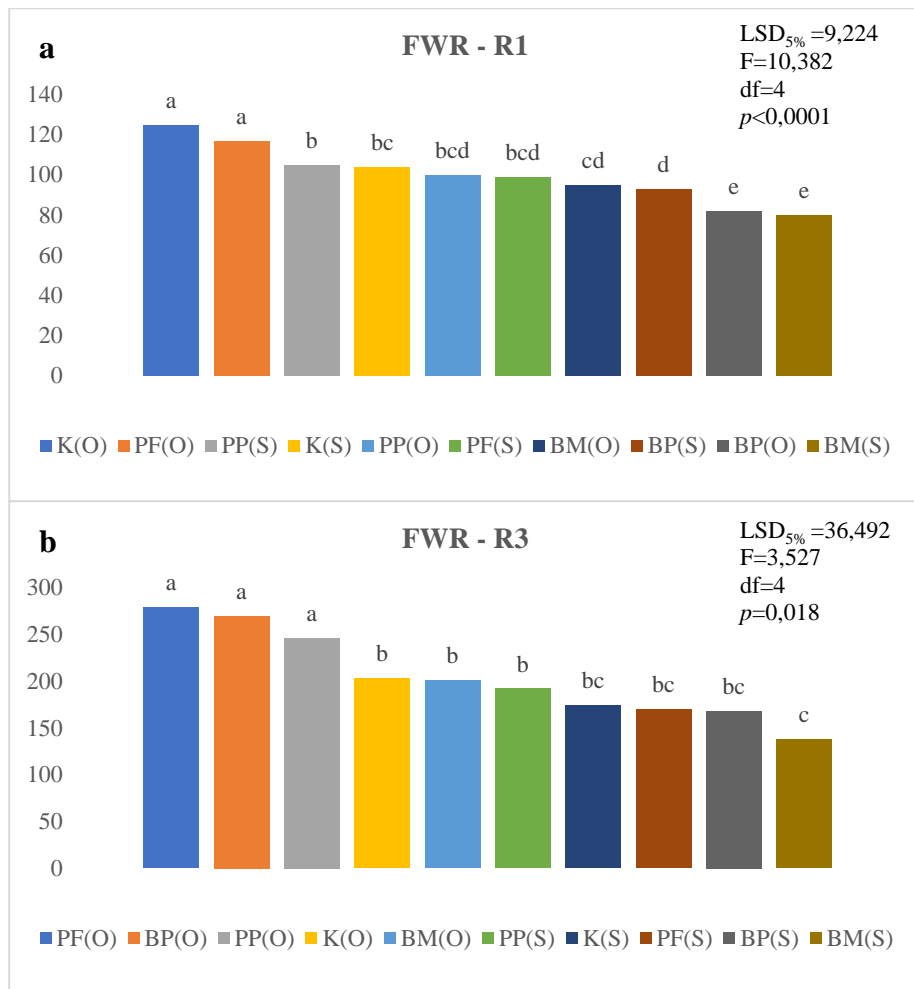
14. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények növénymagassága optimális vízellátottság és vízmegvonás során

K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida* PH: növénymagasság (cm), R1: 50%-os nővirágzás, R3: tejes érés, O: optimális vízellátottság, S: vízmegvonás, LSD_{5%}: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A 3.2.3 pont alapján beállított, különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények gyökér nedves tömegének mértékét optimális vízellátottság és vízmegvonás során a **15. ábra** mutatja be.

Optimális vízellátottság során 50%-os nővirágzásban a PP, a BM és a BP oltást kapott növények gyökerének nedves tömege szignifikánsan alacsonyabb értéket eredményezett a K (***) $p < 0,0001$) növényekhez viszonyítva. A PF kezelés esetében nem tapasztaltunk mérhető különbséget. Vízmegvonás hatására a BP (* $p = 0,021$) és BM (***) $p < 0,0001$) kezelést kapott növények szignifikánsan alacsonyabb értéket mutattak a K növényekhez képest, viszont a PP és PF oltás nem okozott szignifikáns eltérést (**15.a ábra**).

Optimális vízellátottság során tejes érésben a PF (***) $p = 0,0002$), BP (***) $p = 0,001$) és PP (* $p = 0,021$) oltás szignifikánsan magasabb értéket eredményezett a növények gyökerének nedves tömege esetében a K kezeléshez hasonlítva. A BM oltott növények gyökér nedves tömege nem mutatott eltérést. Vízmegvonás mellett az oltási kezelések hatására, nem mértünk jelentős különbséget a gyökerek nedves tömegét vizsgálva a K növényekkel szemben (**15.b ábra**).



15. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények gyökér nedves tömege optimális vízellátottság és vízmegvonás során

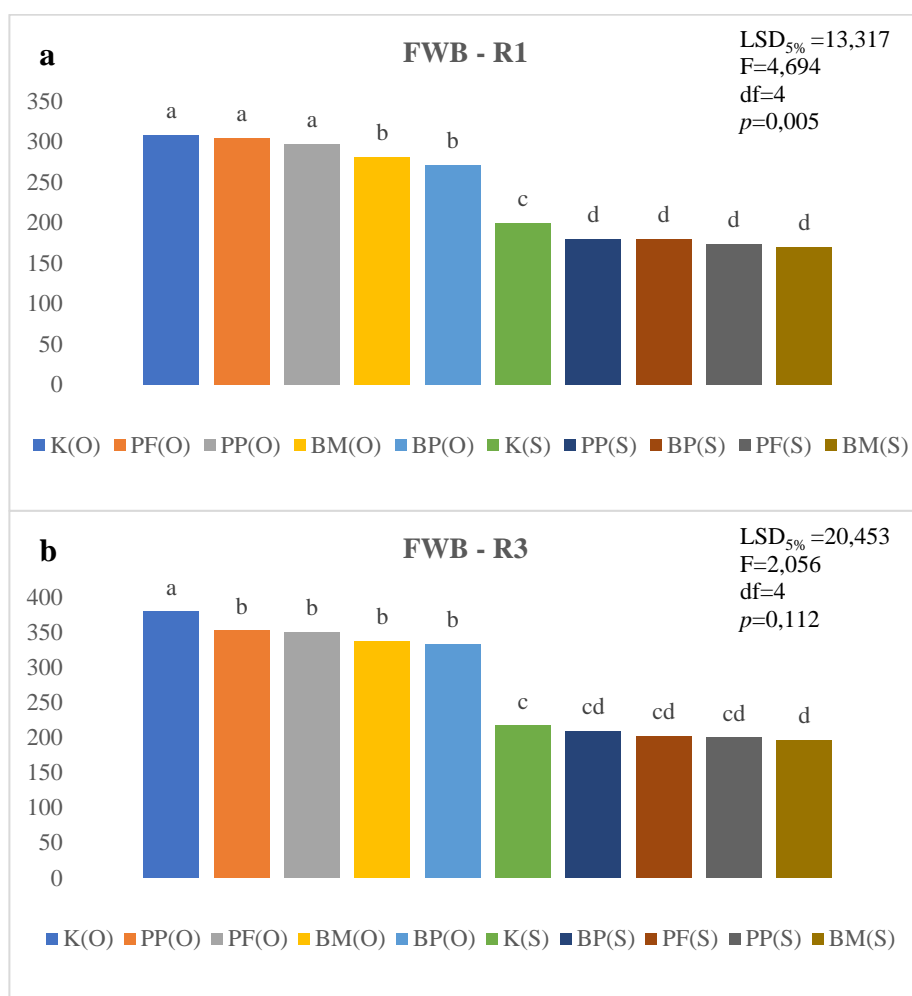
K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida* FWR: gyökér nedves tömege (g), R1: 50%-os nővirágzás, R3: tejes érés, O: optimális vízellátottság, S: vízmegvonás, LSD_{5%}: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A 3.2.3 pont alapján beállított, különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények hajtás nedves tömegének mértékét optimális vízellátottság és vízmegvonás során a **16. ábra** mutatja be.

Optimális vízellátottság során 50%-os nővirágzásban a BM (***) $p = 0,0002$), és a BP (***) $p < 0,0001$) oltást kapott növények hajtásának nedves tömege szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a K növényekkel szemben. A PF és PP kezelés nem eredményezett mérhető eltérést. A K növényekhez hasonlítva vízmegvonás során a PP (** $p = 0,007$), BP (** $p = 0,006$), PF (***) $p = 0,0005$) és BM

(*** $p=0,0001$) oltás szignifikánsan alacsonyabb értéket okozott a K növények hajtás friss tömegéhez mérten (17.a ábra).

Tejes érésben optimális vízellátottság mellett a K növényekhez hasonlítva a PP (* $p=0,011$), PF (** $p=0,006$), BM (***) $p=0,0002$) és BP (***) $p<0,0001$) oltást kapott növények hajtás nedves tömegében szignifikánsan alacsonyabb értéket tapasztaltunk. Vízmegvonás során a BP, PF és PP oltás nem eredményezett jelentős különbséget a K növények hajtás nedves tömegével szemben, de a BM (* $p=0,045$) kezelés szignifikánsan alacsonyabb értéket okozott (17.b ábra).



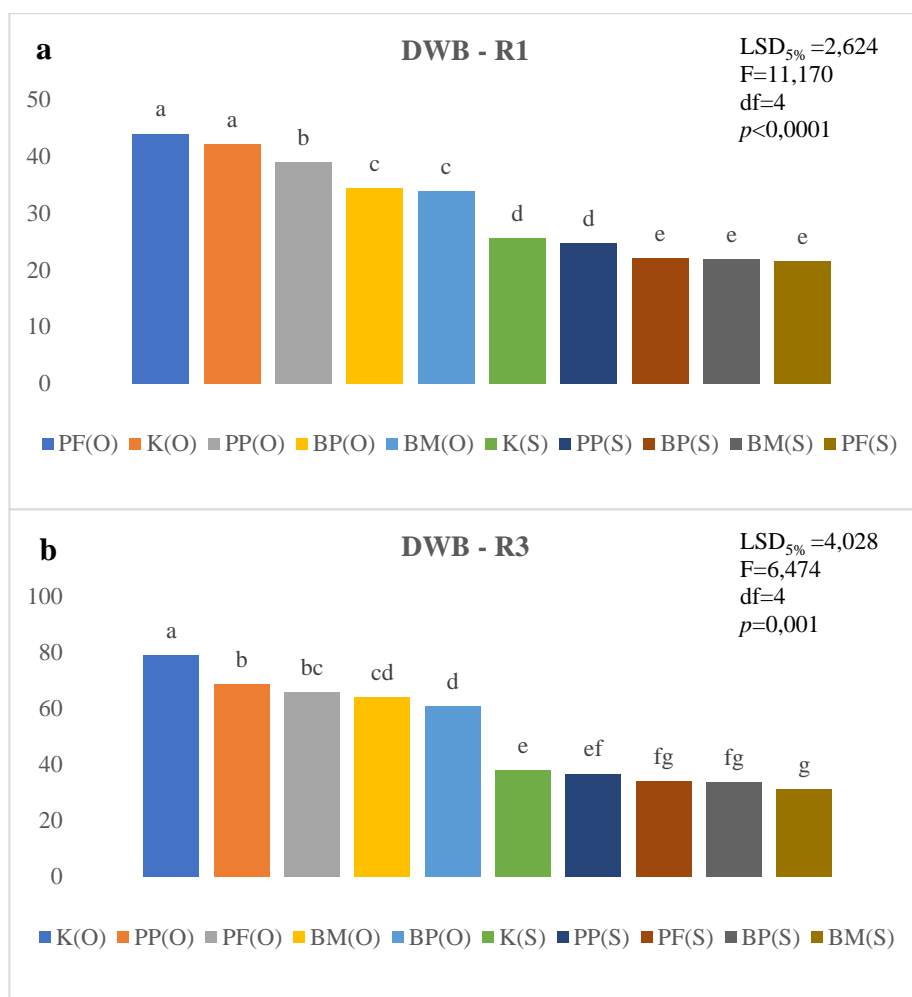
16. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények hajtás nedves tömege optimális vízellátottság és vízmegvonás során

K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida* FWB: hajtás nedves tömege (g), R1: 50%-os nővirágzás, R3: tejes érés, O: optimális vízellátottság, S: vízmegvonás, LSD_{5%}: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p>0,05$, * $p<0,05$, ** $p<0,01$, *** $p<0,001$.

A 3.2.3 pont alapján beállított, különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények hajtás száraz tömegének mértékét optimális vízellátottság és vízmegvonás során a **17. ábra** mutatja be.

50%-os nővirágzásban optimális vízellátottság során a PP (* $p=0,015$), BP (***) $p<0,0001$) és BM (***) $p<0,0001$) oltás szignifikánsan alacsonyabb értéket okozott a hajtás száraz tömeg esetében a K növényekkel szemben, viszont a PF kezelés nem eredményezett mérhető különbséget. A K növényekhez hasonlítva vízmegvonás során a BP (* $p=0,010$), BM (** $p=0,008$) és PF (** $p=0,004$) oltás szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a növények hajtás száraz tömegében, a PP oltás esetében viszont nem tapasztaltunk szignifikáns eltérést (**17.a ábra**).

Optimális vízellátottság során tejes érésben a PP, PF, BM és BP kezelt növények hajtás száraz tömege szignifikánsan alacsonyabb értéket eredményezett a K (***) $p<0,0001$) növényekhez képest. A vízmegvonás során a PF (* $p=0,050$), BP (* $p=0,032$) és a BM (***) $p=0,002$) kezelt növények esetében tapasztaltunk szignifikánsan alacsonyabb értéket a hajtás száraz tömegében a K növényekkel szemben (**17.b ábra**).



17. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények hajtás száraz tömege optimális vízellátottság és vízmegvonás során

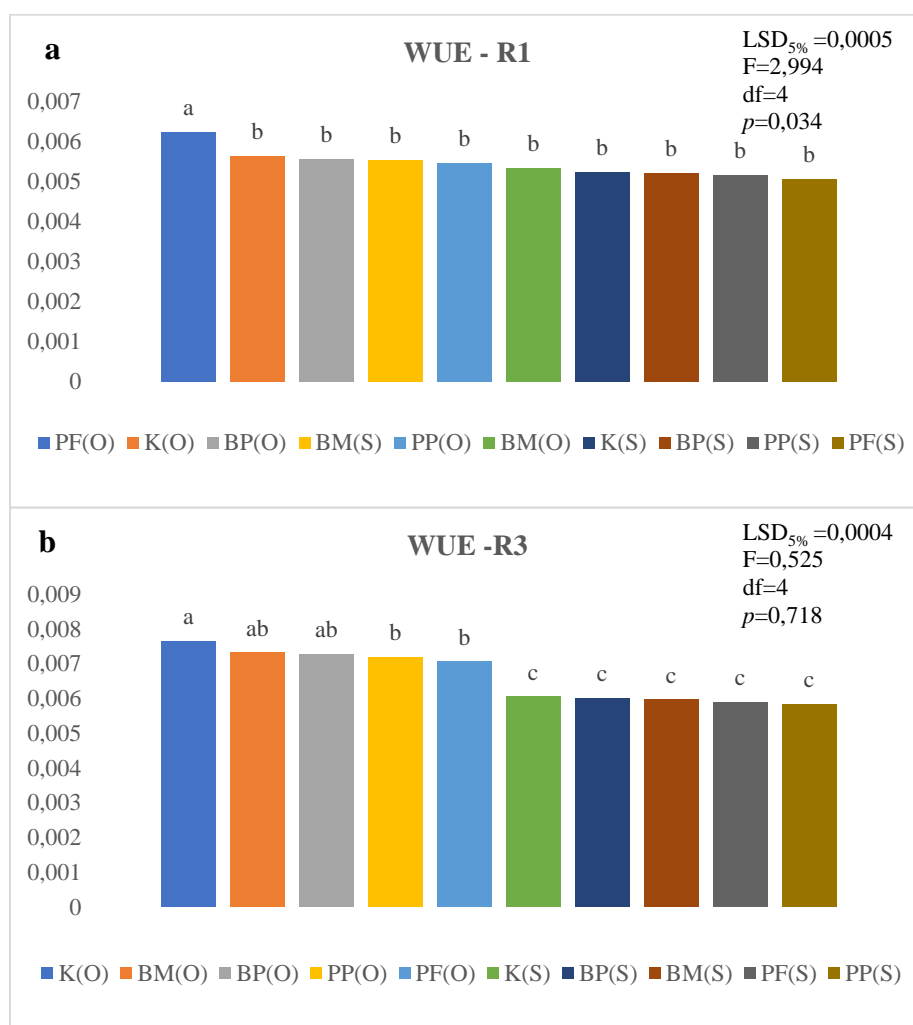
K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida* DWB: hajtás száraz tömege (g), R1: 50%-os nővirágzás, R3: tejes érés, O: optimális vízellátottság, S: vízmegvonás, LSD_{5%}: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A 3.2.3 pont alapján beállított, különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények vízhasznosítási együtthatójának mértékét optimális vízellátottság és vízmegvonás során a **18. ábra** mutatja be.

50%-os nővirágzásban optimális vízellátottság során a PF oltott növények vízhasznosítási együtthatója esetében szignifikánsan magasabb értéket tapasztaltunk a K (* $p = 0,045$) növényekhez képest, azonban a többi oltási kezelés nem okozott mérhető különbséget. A vízmegvonás során az oltási kezelések nem idéztek elő

megnövekedett vízhasznosítási együtthatót a K növényekhez viszonyítva (18.a ábra).

A tejes érésben lévő növények vízhasznosítási együtthatója optimális vízellátottság során a PP (* $p=0,049$) és BM (* $p=0,013$) oltások hatására szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a K növényekhez képest. A BM és BP kezelés esetében nem mértünk eltérést. Vízmegvonás során a tejes érésű növények vízhasznosítási együtthatójában az oltási kezelések nem okoztak szignifikáns különbséget (18.b ábra).



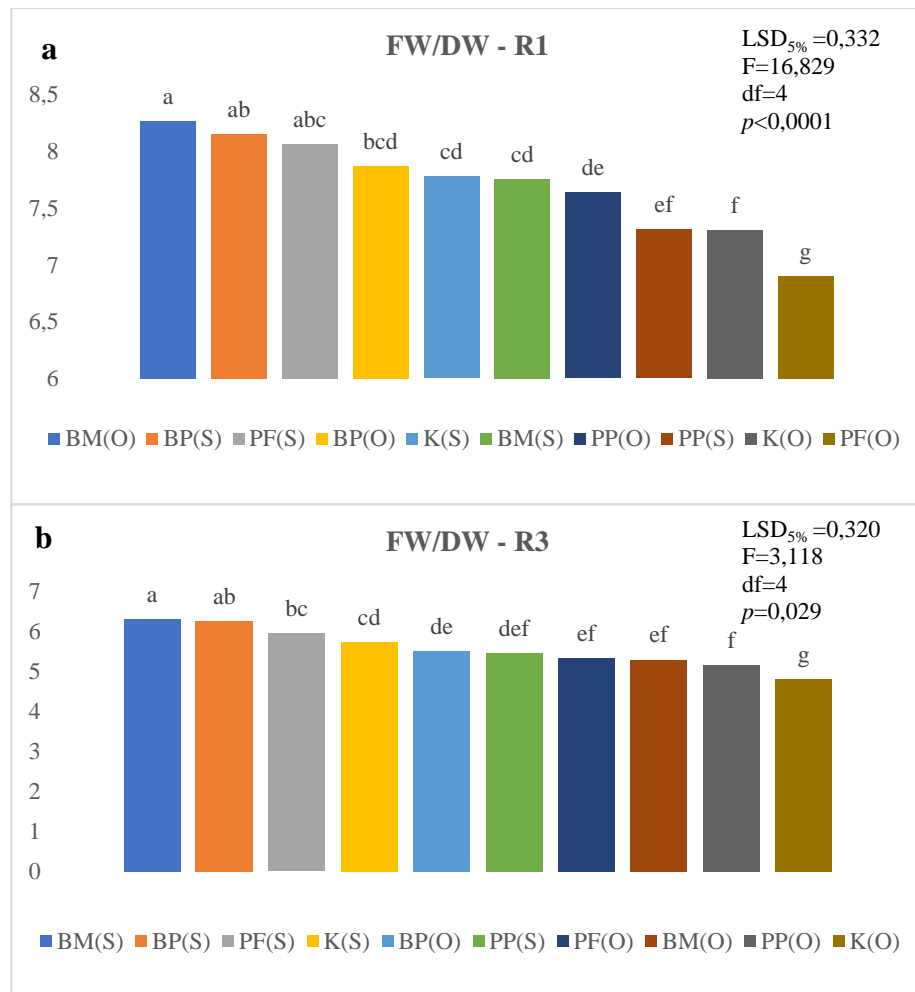
18. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények vízhasznosítási együtthatója optimális vízellátottság és vízmegvonás során

K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida* WUE: vízhasznosítási együttható (g/ml), R1: 50%-os nővirágzás, R3: tejes érés, O: optimális vízellátottság, S: vízmegvonás, LSD_{5%}: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A 3.2.3 pont alapján beállított, különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények nedves tömeg/száraz tömeg arányának mértékét optimális vízellátottság és vízmegvonás során a **19. ábra** mutatja be.

A növények nedves tömeg/száraz tömeg aránya 50%-os nővirágzásban optimális vízellátottság mellett a PF oltás hatására szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a K (* $p=0,020$) növényekhez képest. A PP (* $p=0,050$), BP (** $p=0,002$) és BM (***) $p<0,0001$) kezelés viszont szignifikánsan magasabb értéket eredményezett. Vízmegvonás hatására a PP oltás okozott szignifikáns (** $p=0,007$) eltérést a K növényekhez viszonyítva. A BM, BP, PF kezelés hatására nem tapasztaltunk mérhető különbséget a növények nedves tömeg/száraz tömeg arányában (**19.a ábra**).

Tejes érésben optimális vízellátottság során a PP (* $p=0,035$), BM, (** $p=0,004$) PF (** $p=0,003$), BP (***) $p=0,0001$) oltás szignifikánsan magasabb értéket eredményezett a növények nedves tömeg/száraz tömeg arányában a K kezeléshez képest. A növények nedves tömeg/száraz tömeg aránya vízmegvonás során a BM (***) $p=0,001$) és BP (** $p=0,002$) kezelés hatására szignifikánsan magasabb értéket mutatott, a PP és PF oltás azonban nem okozott eltérést a K növényekkel szemben (**19.b ábra**).



19. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények nedves tömeg/száraz tömeg aránya optimális vízellátottság és vízmegvonás során

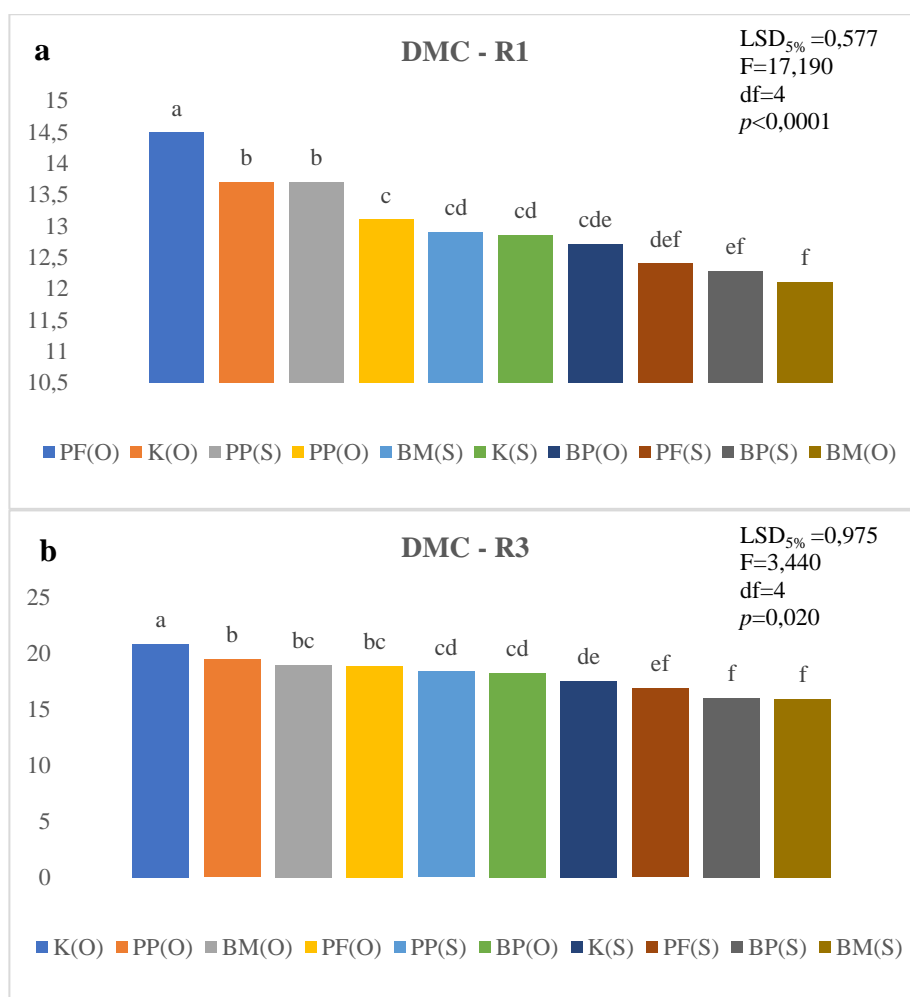
K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida* FW/DW: nedves tömeg/száraz tömeg aránya, R1: 50%-os nővirágzás, R3: tejes érés, O: optimális vízellátottság, S: vízmegvonás, LSD_{5%}: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A 3.2.3 pont alapján beállított, különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények szárazanyag-tartalmának mértékét optimális vízellátottság és vízmegvonás során a 20. ábra mutatja be.

50%-os nővirágzásban optimális vízellátottság során a PF oltás szignifikánsan magasabb értéket eredményezett a növények szárazanyag-tartalmában a K (** $p = 0,009$) növényekhez viszonyítva. A PP (* $p = 0,043$), BM (***) $p < 0,0001$) és BP (***) $p = 0,001$) oltott növények szárazanyag-tartalma szignifikánsan csökkent az oltás

hatására a K kezeléshez hasonlítva. Vízmegvonás során a PP oltás okozott szignifikánsan magasabb értéket a növények szárazanyag-tartalma esetében a K (** $p=0,006$) kezeléssel szemben. A BM, PF és BP kezelés nem eredményezett mérhető különbséget (20.a ábra).

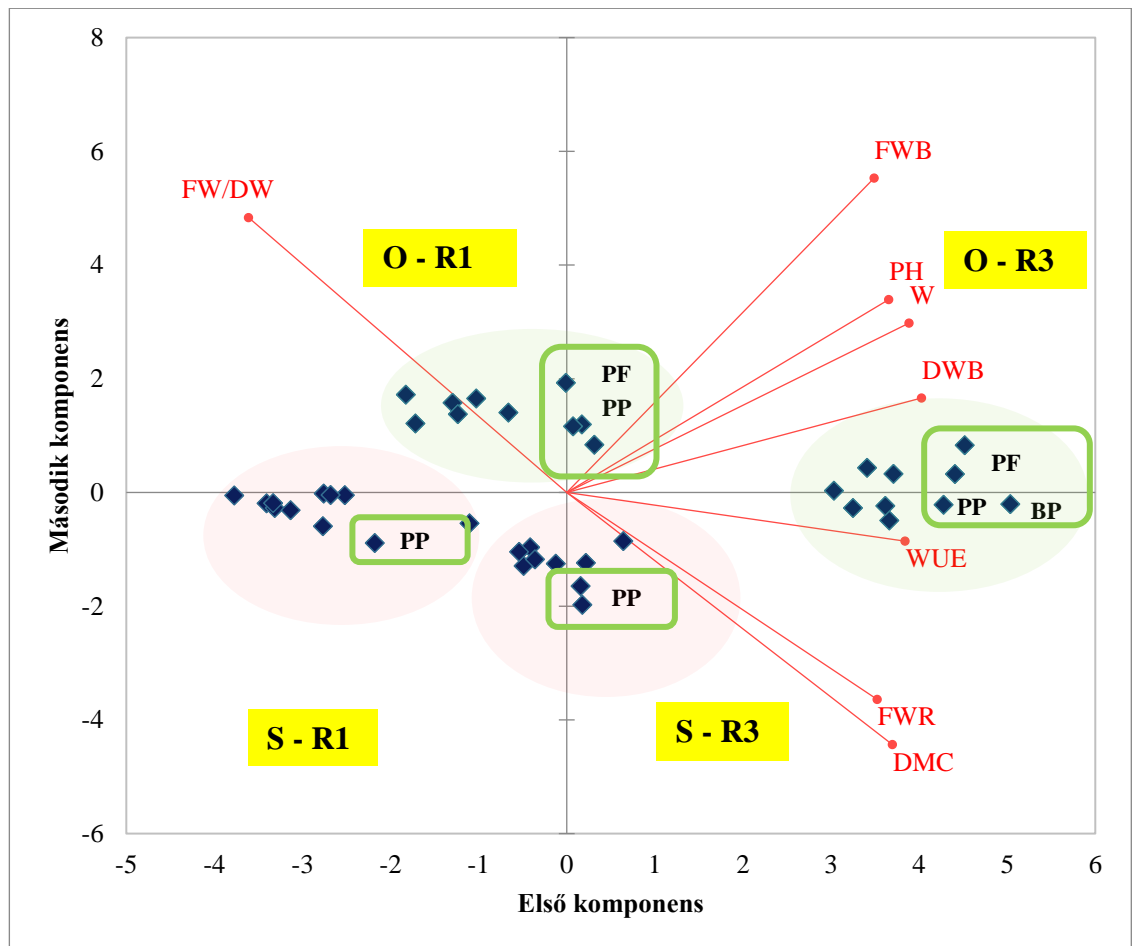
Vízmegvonás során tejes érésben a PP oltás hatására tapasztaltunk magasabb szárazanyag-tartalmat a K növényekhez viszonyítva (20.b ábra).



20. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények szárazanyag-tartalma optimális vízellátottság és vízmegvonás során

K: kontroll, BM: *Bacillus megaterium*, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida* DMC: szárazanyag-tartalom, R1: 50%-os nővirágzás, R3: tejes érés, O: optimális vízellátottság, S: vízmegvonás, LSD_{5%}: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A **21. ábra** a főkomponens analízis eredményét mutatja be. A főkomponens vizsgálatot a vízigény (W), növénymagasság (PH), gyökér nedves tömeg (FWR), hajtás nedves tömeg (FWB), hajtás száraz tömeg (DWB), vízhasznosítási együttható (WUE), nedves tömeg/száraz tömeg aránya (FW/DW), szárazanyag-tartalom (DMC) adatai alapján végeztük. A kísérlet során vizsgált törzsek közül az ábrán PP-vel jelölt baktérium oltás vízmegevonás során csökkentette a GKT 3385-ös hibrid nedves tömeg/száraz tömeg arányát a kontroll növényekhez képest az 50%-os nővirágzás szakaszában, és a szárazanyag-tartalom értékét növelte a tejes érés fázisában. Optimális vízellátottság mellett a PF-fel és PP-vel jelölt kezelés 50%-os nővirágzáskor magasabb növénymagasságot eredményezett a kontroll növényekkel szemben. Tejes érés fázisában a PP-vel, a PF-fel és a BP-vel jelölt oltási kezelés, a kontrollhoz viszonyítva, serkentette a növények gyökérfejlődését. Az első két komponens az összes összefüggés 81,30%-át magyarázza.



21. ábra: A főkomponens analízis eredménye a vizsgált tulajdonságok adatai alapján

W: vízigény, PH: növénymagasság, RFW: gyökér nedves tömeg, BFW: hajtás nedves tömeg, BDW: hajtás száraz tömeg, WUE: vízhasznosítási együttható, FW/DW: nedves tömeg/száraz tömeg aránya, DMC: szárazanyag-tartalom, R1: 50%-os nővirágzás, R3: teljes érés, O: optimális vízellátottság, S: vízmegvonás, BP: *Bacillus pumilus*, PF: *Pseudomonas fluorescens*, PP: *Pseudomonas putida*.

4.2 A hibridek alkalmazkodóképességének vizsgálata talajoltás hatására szántóföldi körülmények között

A 3.3.1 pont alapján beállított, különböző oltóanyag kezelésben részesített kukorica genotípusok szemtermés mennyiségének, betakarításkori szemnedvességének és a szem szárazanyag-tartalmának 3 éves kísérleti eredményeit a 15. táblázat mutatja be. Az eredményeink alapján megállapítható, hogy a GK Silostar szemtermés mennyisége szignifikánsan magasabb értéket mutatott a GKT 3385-ös, GKT 376-os és GKT 3213-as hibriddel (***) összehasonlítva, mely hatás a betakarításkori szemnedvesség esetében is megmutatkozott. A GKT

3385-ös hibrid szemtermés mennyisége szignifikánsan magasabb értéket mutatott a GKT 3213-as (***) $p < 0,0001$) és GKT 376-os ($p = 0,044$) hibridekéhez viszonyítva. Eredményeink szignifikánsan magasabb értéket mutattak a GKT 376-os hibrid szemtermés mennyiségére a GKT 3213-as hibridével (***) $p < 0,0001$) szemben.

A 3 éves kísérleti eredmények mutatják, hogy a GK Silostar hibridnek magasabb (***) $p < 0,0001$) a betakarítási szemnedvessége a GKT 376-os, a GKT 3385-ös és a GKT 3213-as hibridekhez viszonyítva. A GKT 376-os és GKT 3385-ös hibridek szemnedvessége között nem mutatkozott eltérés. A GKT 3213-as hibrid betakarításkori szemnedvessége alacsonyabb értéket mutatott (***) $p < 0,0001$) a GKT 3385-höz és a GKT 376-hoz hasonlítva.

A 3 éves kísérleti eredmények alapján a GKT 3212-as hibrid szem szárazanyag-tartalma szignifikánsan magasabb értéket mutatott, mint a GK Silostar (***) $p < 0,0001$) és GKT 376-os (** $p = 0,007$) hibrid szárazanyag-tartalma. A GKT 3385-ös magasabb szem szárazanyag-tartalmat eredményezett, mint a GK Silostar ($p = 0,015$) hibrid.

15. Táblázat: A hibridek szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és a szem szárazanyag-tartalma a genotípus tényező hatására

	GY		WC		DMC
Genotípus					
LSD					
Gk Silostar	10,463 a	Gk Silostar	17,796 a	GKT 3213	42,342 a
GKT 3385	8,958 b	GKT 376	15,294 b	GKT 3385	42,043 ab
GKT 376	8,730 c	GKT 3385	15,247 b	GKT 376	41,931 bc
GKT 3213	7,577 d	GKT 3213	14,767 c	Gk Silostar	41,672 c
SzD _{5%}	0,221		0,299		0,299
F	225,67		414,643		6,77
df	3		3		3
p	<0,0001		<0,0001		0,0003

GY: szemtermés mennyisége (t/ha), WC: betakarításkori szemnedvesség (%), DMC: szem szárazanyag-tartalma (%), LSD: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A 16. táblázat alapján az évhatás szignifikáns eltérést (***) $p < 0,0001$) okozott a 3.3.1 pont alapján beállított, különböző oltóanyag kezelésben részesített kukorica genotípusok szemtermés mennyiségében, betakarításkori szemnedvességében és a szem szárazanyag-tartalmában.

16. táblázat: A hibridek szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és a szem szárazanyag-tartalma az évhatás tényező hatására

	GY		WC		DMC
Évhatás					
LSD					
2019	10,442 a	2021	18,067 a	2019	43,759 a
2020	9,840 b	2020	16,756 b	2021	41,404 b
2021	6,515 c	2019	12,504 c	2020	40,827 c
SzD _{5%}	0,192		0,163		0,259
F	956,995		2500,973		283,040
df	2		2		2
p	<0,0001		<0,0001		<0,0001

GY: szemtermés mennyisége (t/ha), WC: betakarításkori szemnedvesség (%), DMC: szem szárazanyag-tartalma (%), LSD: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A 17. táblázat a 3 éves kísérletben vizsgált, különböző oltóanyag kezelésekben részesített hibridek szemtermés mennyiségének, betakarításkori szemnedvességének és a szem szárazanyag-tartalmának mértékét mutatja be az oltóanyag tényező hatására.

A 3 éves kísérleti eredmények mutatják, hogy a KD2 oltóanyaggal kezelt hibridek szemtermés mennyisége szignifikánsan magasabb értéket mutat az MLT (** $p = 0,0003$), a KD1 és K (***) $p < 0,0001$) kezelést kapott növényekhez viszonyítva. Az MLT oltóanyag kezelés a K növényekhez képest nem okozott eltérést, viszont a KD1 (** $p = 0,009$) kezeléssel szemben magasabb értéket eredményezett.

A különböző oltóanyagokkal oltott hibridek 3 éves kísérleti eredményei alapján: a KD2 kezelés okozott szignifikánsan alacsonyabb értékű betakarításkori szemnedvességet a KD1, az MLT (***) $p < 0,0001$) és a K (* $p = 0,01$) kezelt növényeihez viszonyítva.

A vizsgált hibridek szárazanyag-tartalmában az oltóanyag kezelések nem okoztak szignifikáns eltérést a K növényekkel szemben a 3 éves kísérlet során.

17. táblázat: A hibridek szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és a szem szárazanyag-tartalma az oltóanyag tényező hatására

	GY		WC		DMC
Oltóanyag					
LSD					
KD2	9,349 a	KD1	15,974 a	KD2	42,086 a
MLT	8,928 b	MLT	15,867 a	K	42,023 a
K	8,818 bc	K	15,800 a	MLT	41,987 a
KD1	8,633 c	KD2	15,463 b	KD1	41,891 a
SzD _{5%}	0,221		0,188		0,299
F	14,802		10,808		0,584
df	3		3		3
p	<0,0001		<0,0001		0,627

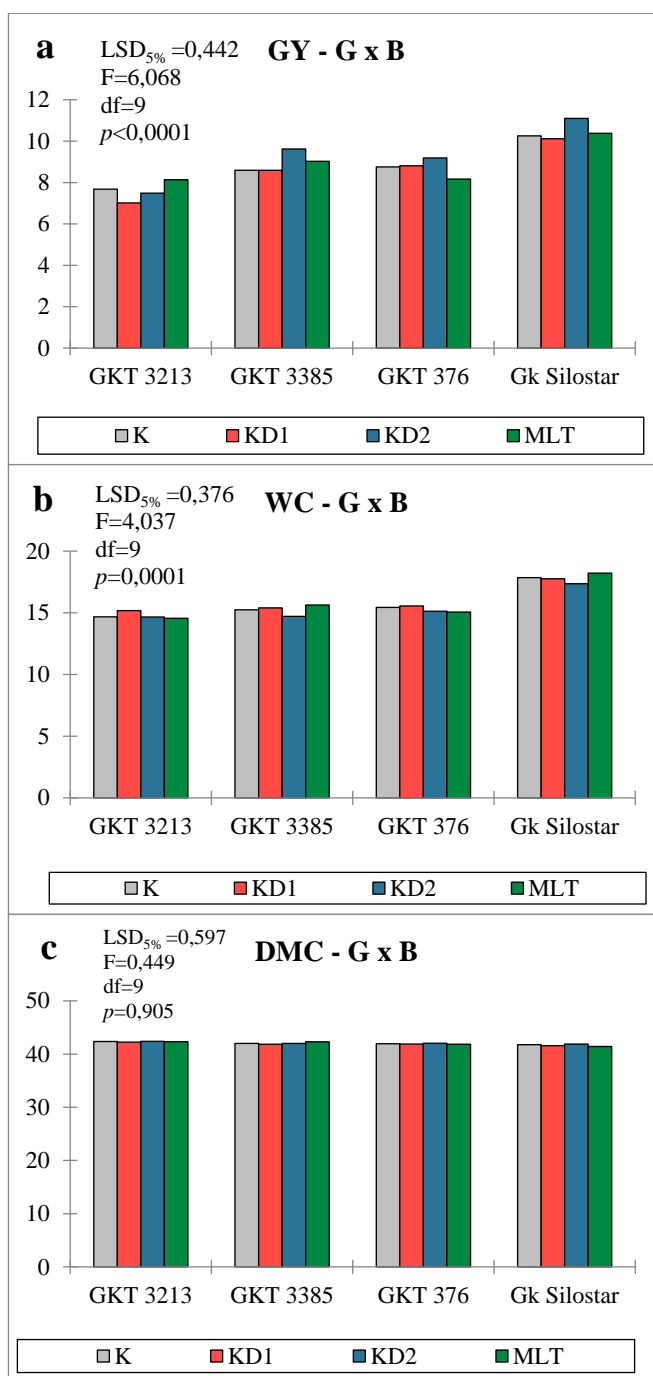
GY: szemtermés mennyisége (t/ha), WC: betakarításkori szemnedvesség (%), DMC: szem szárazanyag-tartalma (%), LSD: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A genotípus - oltóanyag kölcsönhatás vizsgálat során különböző oltóanyagokkal oltott és oltatlan hibridek szemtermés mennyiségét, betakarításkori szemnedvességét és szem szárazanyag-tartalmát a **22. ábra** mutatja be.

A 3 éves kísérlet eredményei alapján a KD1 oltott GKT 3213-as hibridek szemtermés mennyisége szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a K (** $p = 0,004$) oltatlan növényekkel szemben. A K kezelt hibridekkel összehasonlítva a KD2 oltást kapott növények szemtermés mennyiségében nem tapasztaltunk eltérést, de az MLT (* $p = 0,043$) oltás a növényeknél szignifikánsan magasabb értéket eredményezett. A GKT 3385-ös hibrid esetében a KD1 és MLT oltás hatására a szemtermés mennyiségében nem volt megfigyelhető különbség a K növényekhez mérten, de a KD2 (***) $p < 0,0001$) oltást kapott hibridek szemtermés mennyisége szignifikánsan magasabb értéket mutatott. Az MLT oltott GKT 376-os hibrid szemtermés mennyisége a kezelés hatására szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a K (* $p = 0,010$) növényekkel szemben. A KD1 és KD2 kezelés nem eredményezett eltérést a K hibridekhez viszonyítva. A GK Silostar hibrid szemtermés mennyiségére - a K növényekkel szemben - a KD1 és MLT oltás nem okozott megfigyelhető eltérést, a KD2 (***) $p = 0,0002$) kezelés viszont szignifikánsan magasabb értéket mutatott (**22.a ábra**).

A különböző oltóanyagokkal kezelt hibridek 3 éves kísérleti eredményei azt mutatják, hogy a GKT 3213-as hibrid betakarításkori szemnedvességében a KD2 és az MLT oltás nem okozott szignifikáns különbséget a K növényekhez mérten. A KD1 kezelés esetében viszont a K (***) $p=0,008$) hibridekhez képest szignifikánsan magasabb értéket tapasztaltunk. Az MLT kezelés hatása a GKT 3385-ös hibridnél szignifikánsan magasabb értéket eredményezett a betakarításkori szemnedvesség esetében a K (* $p=0,042$) növényekhez viszonyítva, de a KD1 és a KD2 oltásnál nem tapasztaltunk mérhető különbséget. A GKT 376-os hibrid esetében az MLT kezelés szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a növény betakarításkori szemnedvességében a K (* $p=0,048$) kezeléshez hasonlítva, míg a KD1 és a KD2 oltás nem eredményezett szignifikáns eltérést. A KD2 oltás hatására szignifikánsan alacsonyabb értéket mértünk a GK Silostar hibrid betakarításkori szemnedvessége esetében a K (* $p=0,012$) növényekkel összehasonlítva, míg a KD1 és MLT kezelés nem okozott mérhető eltérést (**22.b ábra**).

A 3 éves kísérlet eredményei szerint a KD2 oltás hatására a GKT 3213-as hibrid szem szárazanyag-tartalma szignifikánsan magasabb értéket mutatott a K (* $p=0,037$) növényekkel szemben, de a KD1 és az MLT kezelés nem okozott eltérést. A GKT 3385-ös hibrid esetében egyik oltás sem eredményezett szignifikáns különbséget a hibrid szem szárazanyag-tartalmában a K növényekhez viszonyítva. Ugyanezt a hatást tapasztaltuk a GKT 376-os és a GK Silostar hibridek kezeléseinél (**22.c ábra**).



22. ábra: A növények szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és szem szárazanyag-tartalma genotípus - oltóanyag interakció hatására

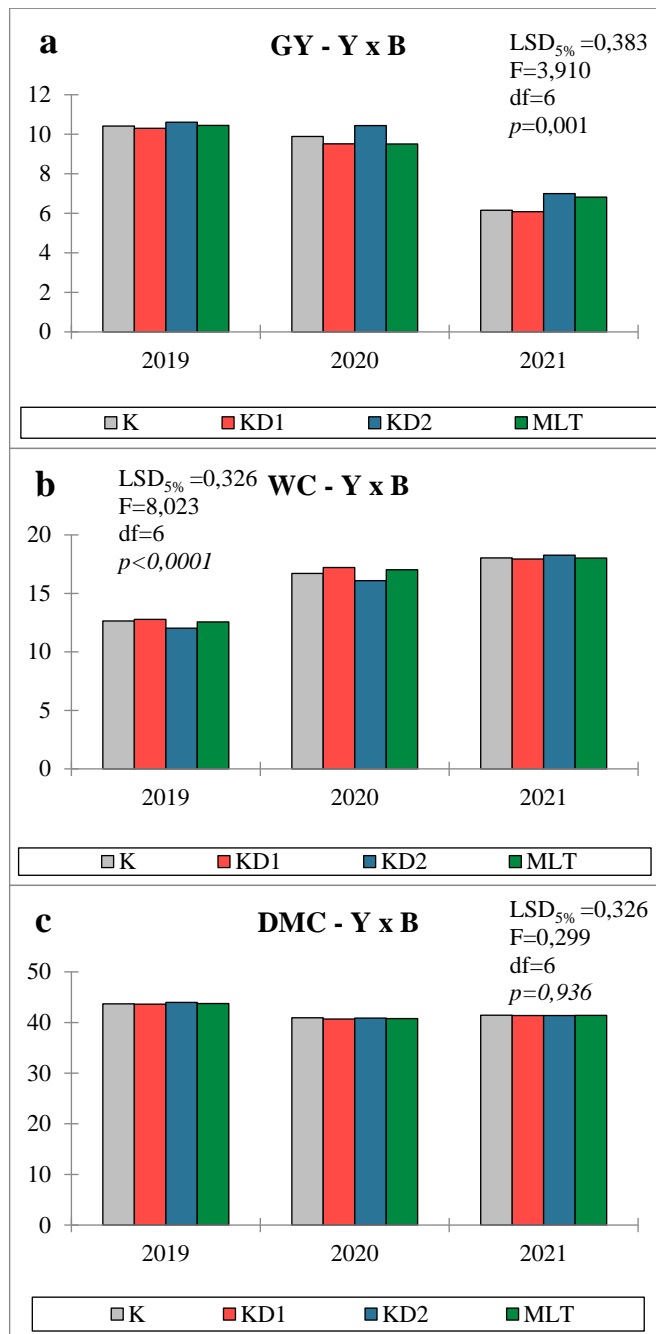
K: kontroll, KD1: *Bacillus megaterium*+*Pseudomonas fluorescens*, KD2: *Bacillus pumilus*+*Pseudomonas Putida*, MLT: *Rhodopseudomonas palustris*+*Lactobacillus plantarum*+*Lactobacillus casei*+*Saccharomyces cerevisiae*, G x B: genotípus - oltóanyag interakció GY: szemtermés mennyisége (t/ha), WC: betakarításkori szemnedvesség (%), DMC: szem szárazanyag-tartalma (%), LSD_{5%}: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik (p < 0,05). Kéttényezős ANOVA: n.s.: p > 0,05, * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001.

Az évhatás - oltóanyag kölcsönhatás vizsgálat során különböző oltóanyagokkal oltott és oltatlan hibridek szemtermés mennyiségét, betakarításkori szemnedvességét és szem szárazanyag-tartalmát a **23. ábra** mutatja be.

A különböző oltóanyagokkal kezelt hibridek 3 éves kísérleti eredményei szemléltetik, hogy a 2019-es évben a KD1, a KD2 és az MLT oltás hatására nem alakult ki szignifikáns különbség a vizsgált hibridek szemtermés mennyiségében. A 2020-as évben a KD1 és MLT oltott hibridek szemtermés mennyiségében szintén nem tapasztaltunk mérhető eltérést a K növényekhez viszonyítva, azonban a KD2 (** $p=0,005$) oltás hatására szignifikánsan magasabb értéket mértünk. A KD2 (***) $p<0,0001$) és az MLT (***) $p=0,001$) oltás szignifikánsan magasabb értéket mutatott a hibridek szemtermés mennyiségére a K növényekhez viszonyítva a 2021-es évben (**23.a ábra**).

A 3 éves kísérletben a különböző oltóanyagokkal kezelt hibridek eredményei mutatják, hogy 2019-ben a K növényekkel szemben a KD2 (***) $p=0,0001$) oltás hatására szignifikánsan alacsonyabb értéket mértünk a hibridek betakarításkori szemnedvességében, de a KD1 és az MLT kezelés nem okozott szignifikáns eltérést. A 2020-as évben a KD2 oltás szignifikánsan alacsonyabb értéket eredményezett a K (***) $p=0,0001$) növényekhez viszonyítva, a KD1 (** $p=0,003$) kezelés pedig szignifikánsan magasabb értéket okozott. Az MLT oltás esetében a hibridek betakarításkori szemnedvességében nem volt mérhető különbség a K növényekkel szemben. Nem volt szignifikáns eltérés az oltott és a K hibridek betakarításkori szemnedvességében a 2021-es évben (**23.b ábra**).

A 3 éves kísérlet eredményei alapján elmondható, hogy az oltások hatására nem tapasztaltunk szignifikáns különbséget a hibridek szárazanyag-tartalmában a K növényekkel szemben a vizsgált 3 év során (**23.c ábra**).



23. ábra: A növények szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és szem szárazanyag-tartalma évhatás - oltóanyag interakció hatására

K: kontroll, KD1: *Bacillus megaterium*+*Pseudomonas fluorescens*, KD2: *Bacillus pumilus*+*Pseudomonas Putida*, MLT: *Rhodopseudomonas palustris*+*Lactobacillus plantarum*+*Lactobacillus casei*+*Saccharomyces cerevisiae*, Y x B: évhatás - oltóanyag interakció GY: szemtermés mennyisége (t/ha), WC: betakarításkori szemnedvesség (%), DMC: szem szárazanyag-tartalma (%), $LSD_{5\%}$: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik (p < 0,05). Kéttényezős ANOVA: n.s.: p > 0,05, * p < 0,05, ** p < 0,01, *** p < 0,001.

A **18. táblázat** a 3 éves kísérletben vizsgált különböző oltóanyag kezelésekben részesített hibridek szem fehérjetartalmának, szem olajtartalmának és szem keményítőtartalmának mértékét mutatja be a genotípus tényező hatására.

A 3 éves kísérlet eredményei szerint a GKT 3213-as hibrid szem fehérjetartalma szignifikánsan magasabb értéket mutatott, a GKT 3385-ös, a GK Silostar (** $p < 0,0001$) és a GKT 376-os (** $p = 0,003$) hibridekkel szemben. A GKT 376-os hibrid szem fehérjetartalma esetében szignifikánsan magasabb értéket mértünk a GKT 3385-ös (** $p < 0,0001$) és GK Silostar (** $p = 0,001$) hibridekhez viszonyítva. A GKT 3385-ös és GK Silostar hibridek szem fehérjetartalmában nem volt szignifikáns eltérés.

A különböző oltóanyagokkal kezelt hibridek 3 éves kísérleti eredményei mutatják, hogy a GKT 3385-ös hibrid szem olajtartalma szignifikánsan magasabb értéket mutatott összehasonlítva a GKT 3213-as, GK Silostar (** $p < 0,0001$) és a GKT 376-os (* $p = 0,017$) hibridekkel. A GKT 376-os hibrid szem olajtartalma szignifikánsan magasabb értéket mutatott szemben a GKT 3213-as (** $p = 0,005$) és a GK Silostar (** $p = 0,009$) növényekkel. A GKT 3213-as és a GK Silostar között nem tapasztaltunk mérhető eltérést.

A 3 éves kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a GK Silostar hibrid szem keményítőtartalma szignifikánsan alacsonyabb értéket ért el a GKT 3213-as (** $p < 0,0001$), a GKT 376-os (** $p = 0,001$) és a GKT 3385-ös (** $p = 0,008$) hibridekhez viszonyítva.

18. táblázat: A hibridek szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma a genotípus tényező hatására

	PC		OC		SC
Hibrid					
LSD					
GKT 3213	8,748 a	GKT 3385	4,121 a	GKT 3213	63,443 a
GKT 376	8,550 b	GKT 376	4,032 b	GKT 376	63,393 a
Gk Silostar	8,331 c	Gk Silostar	3,935 c	GKT 3385	63,313 a
GKT 3385	8,204 c	GKT 3213	3,927 c	Gk Silostar	63,058 b
SzD _{5%}	0,127		0,073		0,188
F	27,972		12,460		6,476
df	3		3		3
p	<0,0001		<0,0001		0,000

PC: szem fehérjetartalma (%), OC: szem olajtartalma (%), SC: szem keményítőtartalma (%), LSD: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A 3 éves kísérletben vizsgált különböző oltóanyag kezelésekből részesített hibridek szem fehérjetartalmának, szem olajtartalmának és szem keményítőtartalmának mértékét az évhatás tényező hatására a **19. táblázat** mutatja be.

A 3 éves kísérleti eredmények elmondása alapján az évhatás szignifikáns eltérést (*** $p < 0,0001$) okozott a 3.3.1 pont alapján beállított, különböző oltóanyag kezelésben részesített kukorica genotípusok szem fehérjetartalmában, szem olajtartalmában és szem keményítőtartalmában.

19. táblázat: A hibridek szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma az évhatás tényező hatására

	PC		OC		SC
Évhatás					
LSD					
2019	9,772 a	2019	4,436 a	2021	65,685 a
2021	8,904 b	2021	3,838 b	2019	64,039 b
2020	6,699 c	2020	3,737 c	2020	60,181 c
SzD _{5%}	0,110		0,063		0,163
F	1623,578		283,624		2358,035
df	2		2		2
p	<0,0001		<0,0001		<0,0001

PC: szem fehérjetartalma (%), OC: szem olajtartalma (%), SC: szem keményítőtartalma (%), LSD: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A **20. táblázat** a 3 éves kísérletben vizsgált különböző oltóanyag kezelésekben részesített hibridek fehérjetartalmának, olajtartalmának és keményítőtartalmának mértékét mutatja be az oltóanyag tényező hatására.

A 3 éves kísérlet eredményei mutatják, hogy az MLT (* $p=0,036$) és a KD1 (** $p=0,001$) oltás hatására a hibridek fehérjetartalma szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a K kezelt növényekkel szemben. A KD2 oltott hibridek és a K növények között nem volt mérhető eltérés. Az MLT és KD1 oltott hibridek olajtartalmában sem mértünk szignifikáns különbséget.

A különböző oltóanyagokkal kezelt hibridek 3 éves kísérleti eredményei mutatják, hogy a KD1 (***) $p=0,001$) és az MLT (** $p=0,004$) oltás hatására a hibridek olajtartalma szignifikánsan alacsonyabb értéket eredményezett a K növényekhez viszonyítva. A KD2 kezelt hibridek és a K növények között nem tapasztaltunk mérhető különbséget.

A 3 éves kísérleti eredmények szerint a különböző oltóanyag kezelések hatására nem mutatkozott eltérés a hibridek szem keményítőtartalmában.

20. táblázat: A hibridek szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma az oltóanyag tényező hatására

	PC		OC		SC
Oltóanyag					
LSD					
KD2	8,618 a	K	4,075 a	MLT	63,375 a
K	8,527 a	KD2	4,027 ab	KD1	63,372 a
MLT	8,391 b	MLT	3,968 bc	K	63,255 a
KD1	8,299 b	KD1	3,945 c	KD2	63,205 a
SzD _{5%}	0,127		0,073		0,188
F	9,728		5,130		1,606
df	3		3		3
p	<0,0001		0,002		0,192

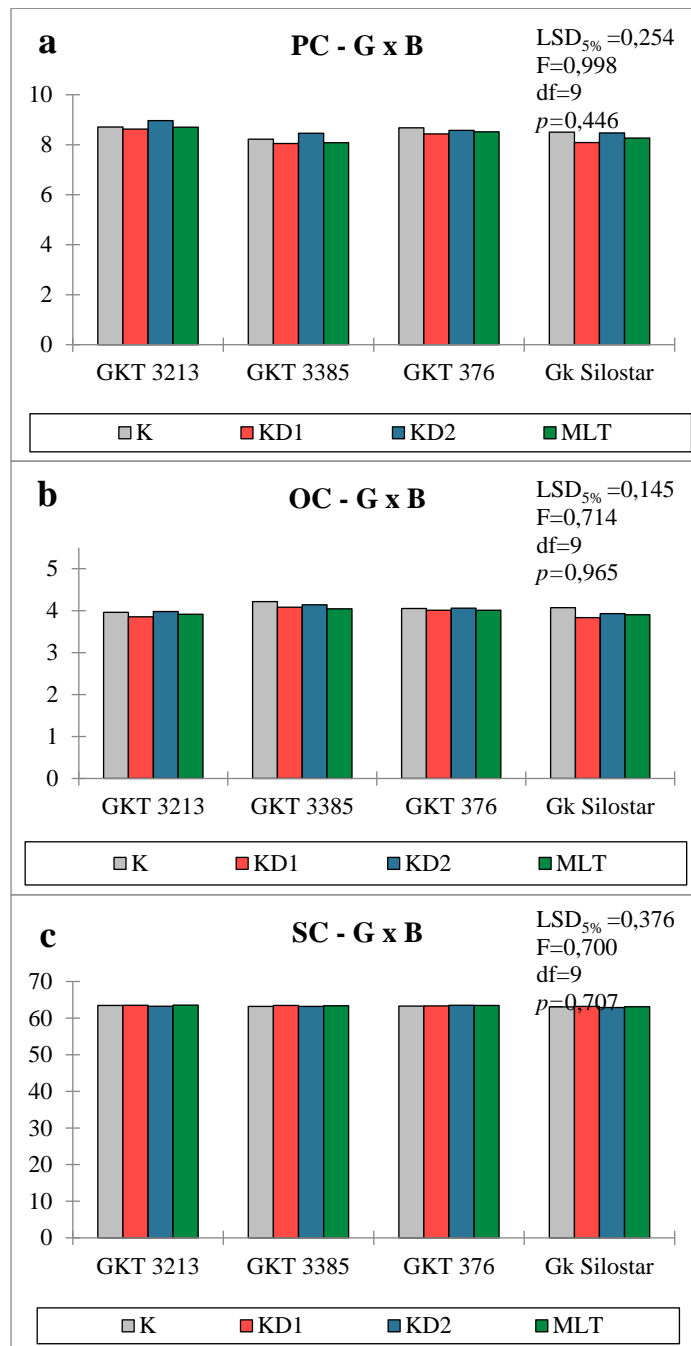
PC: szem fehérjetartalma (%), OC: szem olajtartalma (%), SC: szem keményítőtartalma (%), LSD: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A genotípus - oltóanyag kölcsönhatás vizsgálat során a különböző oltóanyagokkal oltott és oltatlan hibridek szem fehérjetartalmát, szem olajtartalmát és szem keményítőtartalmát a **24. ábra** mutatja be.

A GKT 3213-as hibrid szem fehérjetartalma esetében a KD1 és az MLT kezelés nem okozott mérhető különbséget a K növényekhez viszonyítva, a KD2 (* $p=0,048$) oltás viszont szignifikánsan magasabb értéket eredményezett. A GKT 3385-ös hibrid szem fehérjetartalmában egyik oltóanyag kezelés hatására sem mutatkozott mérhető eltérés a K növényekkel szemben, és ez a hatás a GKT 376-os hibrid esetében is megmutatkozott. A KD1 oltás a GK Silostar hibrid szem fehérjetartalmában szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott, mint a K (** $p=0,002$) növények esetében. Az MLT és a KD2 kezelés hatására nem tapasztaltunk különbséget a K kezeléssel szemben (**24.a ábra**).

A 3 éves kísérleti eredmények alapján a GKT 3213-as hibrid szem olajtartalmában nem volt szignifikáns eltérés az oltóanyag kezelésekre hatására a K növényekhez mérten, és ezt tapasztaltuk a GKT 376-os hibridnél is. A GKT 3385-ös hibrid szem olajtartalma a K növényekhez hasonlítva a KD1 (* $p=0,020$) kezelés szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott. A KD2 és az MLT oltás hatására nem találtunk szignifikáns különbséget. A KD1 (** $p=0,001$) és az MLT (* $p=0,023$) oltás esetében szignifikánsan alacsonyabb értéket tapasztaltunk a GK Silostar hibrid szem olajtartalmában a K növényekhez viszonyítva, azonban a KD2 kezelés nem okozott eltérést (**24.b ábra**).

A különböző oltóanyagok nem okoztak szignifikáns különbséget a kezelt hibridek szem keményítőtartalmában a K növényekhez viszonyítva a 3 éves kísérlet eredményei alapján (**24.c ábra**).



24. ábra: A növények szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma genotípus - oltóanyag interakció hatására

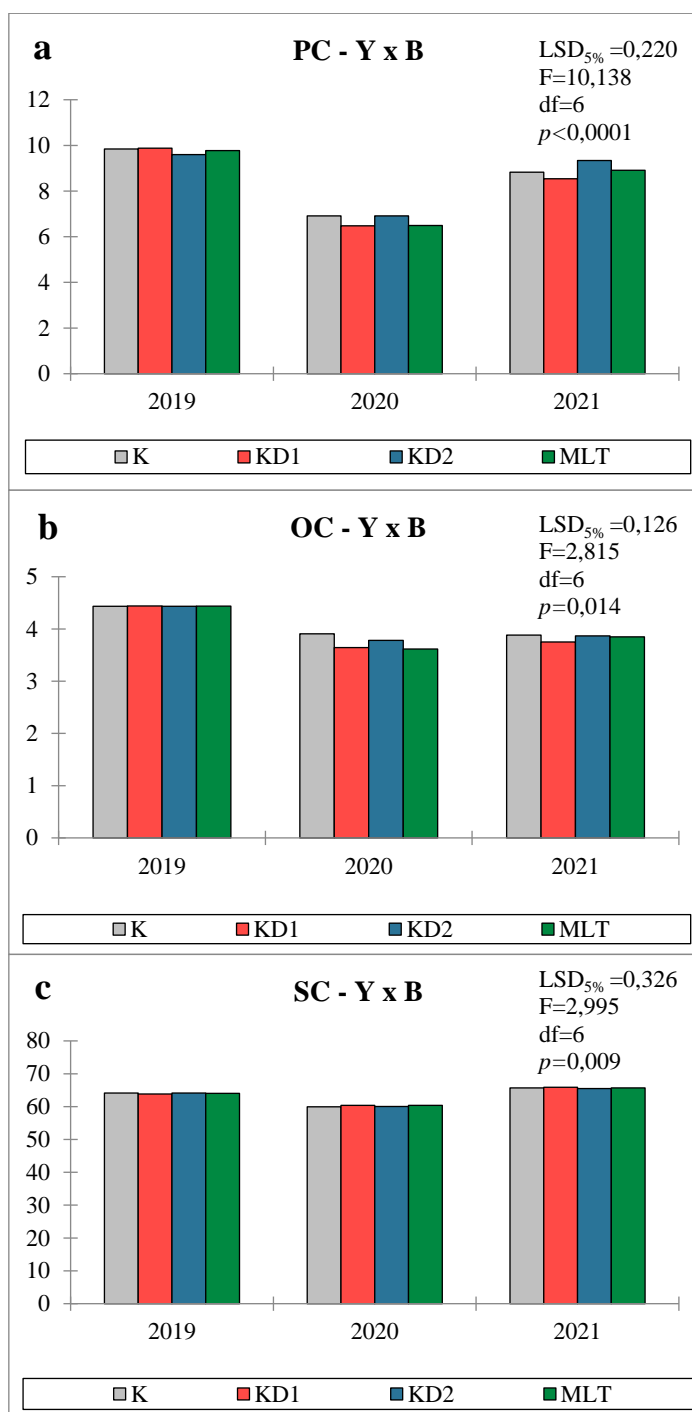
K: kontroll, KD1: *Bacillus megaterium*+*Pseudomonas fluorescens*, KD2: *Bacillus pumilus*+*Pseudomonas Putida*, MLT: *Rhodopseudomonas palustris*+*Lactobacillus plantarum*+*Lactobacillus casei*+*Saccharomyces cerevisiae*, G x B: genotípus - oltóanyag interakció PC: szem fehérjetartalma (%), OC: szem olajtartalma (%), SC: szem keményítőtartalma (%), $LSD_{5\%}$: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p : P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

Az évhatás - oltóanyag kölcsönhatás vizsgálat során a különböző oltóanyagokkal oltott és oltatlan hibridek szem fehérjetartalmát, szem olajtartalmát és szem keményítőtartalmát a **25. ábra** mutatja be.

A 3 éves kísérlet eredményei azt mutatják, hogy a 2019-es évben a KD2 oltás a hibridek szem fehérjetartalma esetében szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a K (* $p=0,032$) növényekkel szemben, de a KD1 és MLT kezelés nem okozott mérhető különbséget. A 2020-as évben ezzel szemben azonban a KD1 (***) $p=0,0002$) és MLT (***) $p=0,0002$) oltások eredményeztek alacsonyabb szem fehérjetartalmat a K hibridekhez viszonyítva, a KD2 kezelésnél pedig nem tapasztaltunk eltérést. A 2021-es évben a KD2 kezelt hibridek szem fehérjetartalma szignifikánsan magasabb értéket mutatott a K (***) $p<0,0001$) növényekkel összehasonlítva, a KD1 (* $p=0,012$) oltás esetében pedig alacsonyabb értéket mértünk. Az MLT kezelt hibrideknél nem volt jelentős eltérés (**25.a ábra**).

A 2019-es évben a különböző oltóanyag kezelések nem okoztak szignifikáns különbséget a hibridek szem olajtartalmában a K növényekkel szemben a 3 éves kísérlet során. A 2020-as évben a KD1 (***) $p<0,0001$), a KD2 (* $p=0,049$) és az MLT (***) $p<0,0001$) oltott hibridek szem olajtartalma esetében szignifikáns eltérést mértünk a K növényekhez viszonyítva. A KD1 kezelés a hibridek szem olajtartalmában szignifikánsan alacsonyabb értéket mutatott a K (* $p=0,038$) növényekkel összehasonlítva, a KD2 és az MLT oltás hatására nem volt eltérés (**25.b ábra**).

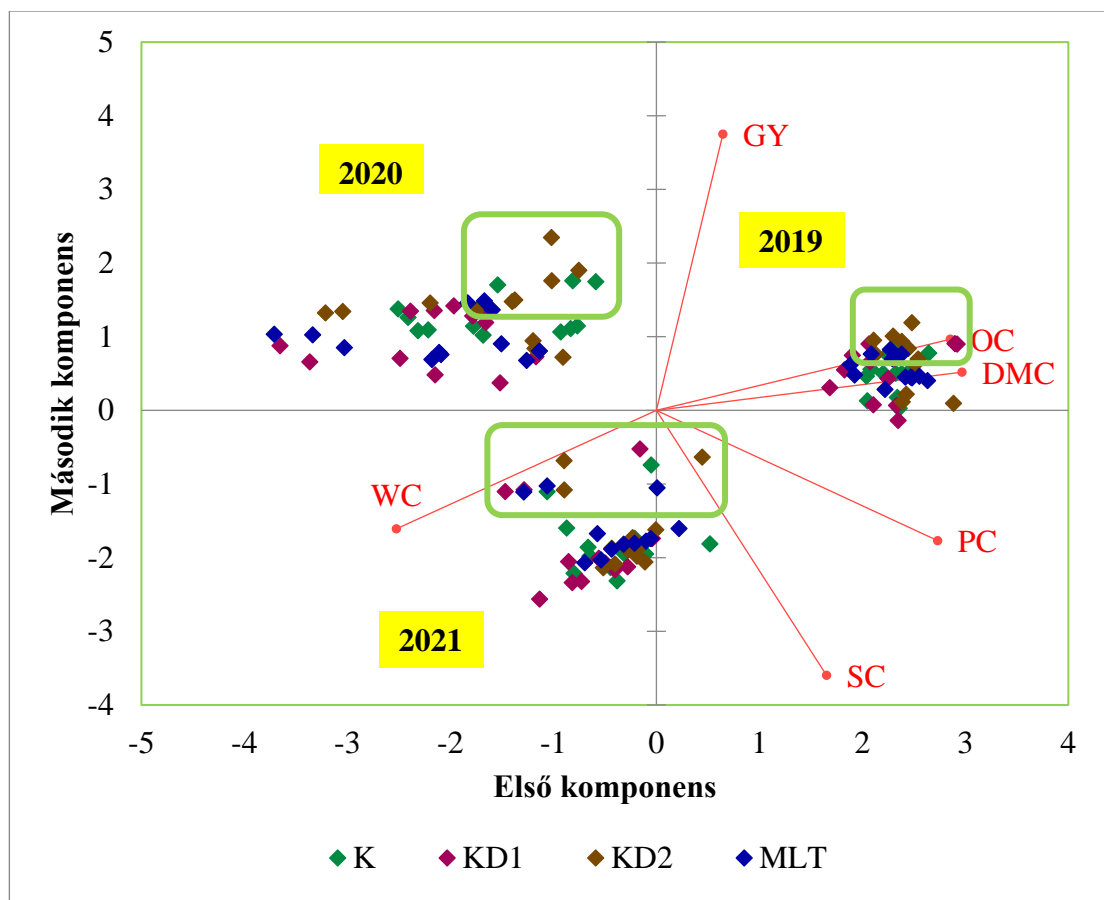
A 3 éves kísérlet eredményei szerint a 2019-es évben a különböző oltóanyagokkal kezelt hibridek szem keményítőtartalmában nem tapasztaltunk szignifikáns különbséget a K növényekhez viszonyítva. Ugyanezt a hatást tapasztaltuk a 2021-es évben is. A 2020-as évben a KD1 (** $p=0,005$) és az MLT (** $p=0,004$) oltás a szem keményítőtartalmára szignifikánsan magasabb értéket eredményezett a K növényekhez képest (**25.c ábra**).



25. ábra: A növények szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma évhatás - oltóanyag interakció hatására

K: kontroll, KD1: *Bacillus megaterium*+*Pseudomonas fluorescens*, KD2: *Bacillus pumilus*+*Pseudomonas Putida*, MLT: *Rhodopseudomonas palustris*+*Lactobacillus plantarum*+*Lactobacillus casei*+*Saccharomyces cerevisiae*, Y x B: évhatás - oltóanyag interakció PC: szem fehérjetartalma (%), OC: szem olajtartalma (%), SC: szem keményítőtartalma (%), $LSD_{5\%}$: legkisebb szignifikáns különbség, df: szabadság fok, F: f arány, p: P érték, A kis betűk a kapott értékek közötti szignifikancia viszonyokat szemléltetik ($p < 0,05$). Kéttényezős ANOVA: n.s.: $p > 0,05$, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$, *** $p < 0,001$.

A **26. ábra** a főkomponens analízis eredményét mutatja be. A főkomponens vizsgálatot a szemtermés mennyisége (GY), a betakarításkori szemnedvesség (WC), a szem szárazanyag-tartalma (DMC), szem fehérjetartalma (PC), szem olajtartalma (OC), szem keményítőtartalma (SC) adatai alapján végeztük. A kísérlet során vizsgált különböző oltóanyagokkal kezelt hibridek esetében 2019-ben, 2020-ban és 2021-ben a KD2 és MLT oltás hatására a GKT 3385-ös és GK Silostar hibridek magasabb termésátlagot produkáltak a K és a KD1 kezeléssel, valamint a GKT 3213-as és GKT 376-os hibriddel szemben. Az első két komponens az összes összefüggés 83,17%-át magyarázza, terméspotenciálnak tekinthetjük.



26. ábra: A főkomponens analízis eredménye a vizsgált tulajdonságok adatai alapján

K: kontroll, KD1: *Bacillus megaterium*+*Pseudomonas fluorescens*, KD2: *Bacillus pumilus*+*Pseudomonas Putida*, MLT: *Rhodopseudomonas palustris*+*Lactobacillus plantarum*+*Lactobacillus casei*+*Saccharomyces cerevisiae*, GY: szemtermés (t/ha), WC: betakarításkori szemnedvesség (%), DMC: szem szárazanyag-tartalma (%), PC: szem fehérjetartalma (%), OC: szem olajtartalma (%), SC: szem keményítőtartalma (%).

5 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

5.1 A PGPR-ok foszfát-mobilizáló képessége

A növények számára a nitrogén után a foszfor a legnagyobb mértékben limitáló tápanyag. Számos mikroorganizmus (baktériumok, gombák, algák) rendelkezik foszfát-mobilizáló képességgel. A talajban felhalmozódott foszfor hasznosítása érdekében a foszfát-mobilizáló baktériumok biotrágyaként funkcionálhatnak és fontos szerepet játszhatnak a növények számára nehezen elérhető foszfor hozzáférhetőségének növelésében (Alori és mtsai. 2017). Tanulmányunkban a *Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens* és *Pseudomonas putida* baktériumok foszfát feltáró képességét vizsgáltuk, és a kísérlet során szervesen foszforforrásként trikálcium-foszfátot használtunk.

A vizsgált PGPR kolóniák körül eltérő méretű feltisztulási zónákat figyeltünk meg az oltás utáni 7 napos inkubációt követően. Hasonló következtetésre jutott Nguyen és mtsai. (1992), Vazquez és mtsai. (2000), Khan és mtsai. (2022) kimutatva, hogy csak a foszfát-mobilizáló baktériumok képesek feltisztulási zónákat kialakítani trikálcium-foszfátot tartalmazó közegben. A feltisztulási zónák kialakulása a baktériumok által termelt szerves savak vagy foszfatáz enzimek aktivitásának az eredményei (Paul és Shina 2013). Song és mtsai. (2008) a *Burkholderia cepacia* foszfát feltáró hatékonyságát a magas szintű szerves savtermelésnek - nevezetesen glükonsav termelésnek - tulajdonították. A feltisztulási zónák változó átmérője szerint a trikálcium-foszfátot különböző mértékben mobilizálják a baktériumok, melyet Mei és mtsai. (2021) eredményei is megerősítenek. A zónák átmérői 7-18 mm között változtak, a baktériumok foszfát-mobilizáló index értékei pedig 14-52 között mozogtak (**12. táblázat**). Hasonló eredményeket tapasztaltak Kumar és mtsai. (2010), Tariq és mtsai. (2022), valamint Amri és mtsai. (2023).

A kísérlet során mért foszfát-mobilizáló index értékek eredményei alapján a vizsgált PGPR-ok közül a *Pseudomonas putida* foszfát feltáró képessége mutatta a legnagyobb hatékonyságot. A folyékony tápközegbe oltott baktériumok foszfát-mobilizáló képességét, a 7. nap után mért oldott foszfát koncentráció értékei is alátámasztották, melyek 14-52 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ között változtak. A *Pseudomonas putida* oltásnál mértük a legmagasabb értékű foszfor koncentrációt, amely 51,636 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ -t jelentett (**12. táblázat**). Pandey és mtsai. (2006) hasonló hatást tapasztaltak

folyékony Pikovskaya táptalajon 28 °C-on 7 napos inkubáció után. Jelen vizsgálatunk eredményei alapján megállapítható: a kísérletben tesztelt baktériumok képesek oldani a trikálcium-foszfátot, és a *Pseudomonas putida* volt a leghatékonyabb foszfát feltáró a foszfát-mobilizáló index és az oldott foszfor koncentráció értékei alapján.

5.2 A PGPR-ok növényi növekedést serkentő hatása

A baktériumok növényi növekedést serkentő potenciáljának felmérése komplex megközelítést igényel, amely többek között a növény csírázóképeségének vizsgálatát is magába foglalja. Fontos nemesítési irányelv a kukorica genotípusok csírázóképeségének és kezdeti növekedésének fokozása, amelyek egyik fő szelekciós szempontja a csírázási vigor index. A PGPR törzsek növényi növekedést serkentő hatását számos tanulmány alátámasztotta (Lugtenberg és mtsai. 2002, El-Hawary és mtsai. 2002, Wu és mtsai. 2005, Fahad és mtsai. 2015, Saleem és mtsai. 2021). Korábbi vizsgálatok kimutatták, hogy a *Bacillus spp.* és *Pseudomonas spp.* felhasználhatók növényi növekedést serkentő baktériumként, ugyanis közös jellemzőjük a gyors szaporodás és az erős környezeti kompatibilitás (Gravel és mtsai. 2007, Rehman és mtsai. 2019).

Kísérletünkben *Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens* és *Pseudomonas putida* baktérium izolátumok oltásával vizsgáltuk a lehetséges növényi növekedést serkentő hatást a GKT 3213, a GKT 376, a GKT 3385 és a GK Silostar kukorica csíranövényeken - a koleoptilok és a radikulák növekedésének, valamint a csírázási vigor index nyomon követésével. Eredményeink alapján megállapítottuk, hogy a kukorica genotípusa meghatározó tényező. A koleoptilok és a radikulák, illetve a csírázási vigor index adatai alapján a GKT 3385-ös hibrid esetében mértük a legmagasabb értékeket. A GKT 3385 korai érésű kukoricafajta, melynek csírázási eredményei magasabb értéket eredményeztek a szintén korai érésű GKT 376-nál, a superkorai GKT 3213-nál és a középérésű GK Silostarnál (**13. táblázat**).

A PGPR-ok alkalmazása mérsékelten pozitív hatást váltott ki a koleoptilok hossza esetében, a *Bacillus pumilus* oltás hatására pedig alacsonyabb értéket mértünk a kontroll kezeléssel szemben. A radikulák hosszát vizsgálva a *Pseudomonas putida* oltásnál tapasztaltunk jelentős növényi növekedést serkentő hatást, és a kezelés mérsékelten növelte a növények csírázási vigor indexét (**14. táblázat**). Nezarat és

Gholami (2009), Noumavo és mtsai. (2013) is beszámoltak a kukorica magvak csírázókéességének javulásáról a *Pseudomonas putida* oltás hatására. A genotípus és baktériumok interakciójának vizsgálata során eredményeink mutatják, hogy a különböző baktérium oltások eltérően hatottak a különböző éréscsoportú és azonos éréscsoporton belüli hibridek koleoptil és radikula hosszára, továbbá csírázási vigor indexére 4 napos inkubáció után. A szuperkorai GKT 3213-as hibrid koleoptil és radikula hosszának értékét a baktérium oltások nem növelték, inkább alacsonyabb értéket eredményeztek, így a hibrid csírázókéességét sem javították. Ugyanezt a hatást tapasztaltuk a korai GKT 376-os hibrid esetében is. A GKT 3385-ös korai érésű hibrid koleoptil hosszának vizsgálata során a *Pseudomonas fluorescens* és a *Pseudomonas putida* oltási kezelés mutatott jelentős növekedést serkentő hatást. A *Pseudomonas putida* továbbá növelte a radikulák hosszát is, javítva a hibrid csírázási vigor indexét. A GK Silostar középérésű kukorica vizsgálata során a *Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens* és *Pseudomonas putida* oltások jelentős mértékben serkentették a koleoptilok növekedését, illetve a *Pseudomonas putida* kezelés a radikulák növekedést serkentő hatását is eredményezte. A fent említett eredmények alapján elmondható, hogy a *Bacillus megaterium*, *Pseudomonas fluorescens* és *Pseudomonas putida* kezelés növelte a növények csírázási vigor indexét (**11. ábra**). Ez arra utal, hogy a vizsgált baktériumok rendelkeznek olyan növényi növekedést serkentő tulajdonságokkal, amelyek javítják a kukorica csírázókéességét, ami a kelés szempontjából meghatározó jelentőségű tulajdonság. Feltételezhetően ezek az eredmények a hidrolitikus enzimek aktivitásának köszönhetőek, amelyek intenzív szubsztrát asszimilációt biztosítanak (például a keményítő α -amilázai), és elősegítik a korai csírázást. A fokozott hormonbioszintézis kiválthatja ezen hidrolitikus enzimek aktivitását. Ezen túlmenően úgy tűnik, hogy a hormonfüggőség növeli a csírázási vigor indexet az indol-ecetsav szintézise miatt (Meliani és mtsai. 2017). Hasonló eredményeket kapott kukorica növényen a *Bacillus megaterium* oltás hatására Kifle és Laing (2016), a *Pseudomonas fluorescens* és *Pseudomonas putida* kezelés esetében Agbodjato és mtsai. (2016), valamint *Pseudomonas putida* oltás után Georgieva és mtsai. (2023).

A baktériumok hibridspecifitását magyarázhatja, hogy a növény jelentős mértékben szabályozza a rizoszféra mikrobiomjának összetételét (Zhang és mtsai. 2017, Massalha és mtsai. 2017, Turner és mtsai. 2013). Egy növényfajon belül az

egyszerű genotípus különbségeknek is jelentős hatásai lehetnek (Winston és mtsai. 2014). Smith és mtsai. (2017) szerint ennek a szabályozásnak egy része az organizmusok közötti szignálmolekulák működésének az eredménye. Kezdve a mag csírázásától, a gyökerek növekedésén keresztül, a gyökerek előregedéséig, szignálmolekulák szabadulnak fel a környező talajba. Ezek támogatják a mikrobiális növekedést és aktivitást a rizoszférában. A szignálmolekulák kiválasztása (időzítése, a mennyiségének és/vagy minőségének változása) egy olyan mechanizmus, amellyel a növények irányíthatják a gyökerükkel társított mikrobióta mennyiségét és összetételét (Bakker és mtsai. 2012). Feltételezhetően a váladékok főként cukrokból, aminosavakból és szerves savakból állnak, amelyek nagy koncentrációban vannak jelen a növény citoplazmájában. Kisebb mennyiségben tartalmaznak összetett másodlagos metabolitokat is - például flavonoidokat, terpéneket és fenolos vegyületeket -, amelyek specifikusan magukhoz vonzák a mikrobákat (Musilova és mtsai. 2016). Az is felvetődött, hogy a jázmonsav és a szalicilsav szignálmolekulák rizoszférába történő exudációja részt vehet a gyökerek és a mikrobák közötti kölcsönhatásban (Doornbos és mtsai. 2011). A gyökérváladék kibocsátása genetikailag szabályozott folyamat, így a különböző növényi genotípusok különálló rizobaktérium közösségeket alakíthatnak ki. Ez rendkívüli variabilitást eredményez a növényfajok között, ugyanazon a fajon belül az egyes növénytípusok között, a különböző fejlődési szakaszokban, eltérő körülmények között és különböző biotikus kölcsönhatásokban (Gransee és Wittenmayer 2000, Micallef és mtsai. 2009, Badri és mtsai. 2013, Kristin és Miranda 2013).

5.3 Szárazságstressz faktor elleni tolerancia fokozása

A nemesítés egyik legfontosabb feladata a szárazságstresszt jól toleráló genotípusok szelekciója. A növények szárazságstresszre adott reakciója összetett folyamat, és nemcsak a stressz intenzitásától és időtartamától, hanem a növény fejlődési szakaszától is függ (Çakir 2004, Singh és mtsai. 2008, Farooq és mtsai. 2009, Liu és mtsai. 2010). A kukorica C4-es növényként magas víz- és tápanyagigényű a gyors növény-növekedés érdekében. A szárazságstressz a kukorica szinte minden fejlődési szakaszát érinti. Azonban az olyan fenofázisok, mint a csírázás és a virágzás, a növénytermesztés fő periódusai. Ilyenkor a növények érzékenyebbek a szárazság okozta stresszre (Delachieve és Pinho 2003, Ashagre és mtsai. 2014, Khayatnezhad és mtsai. 2010, Aslam és mtsai. 2015).

A PGPR fontos szerepet játszhat a gazdanövényt ért abiotikus stressz enyhítésében, közreműködhet a stresszhatások mérséklésében (Ahluwalia és mtsai. 2021). A PGPR-ok alkalmazása által kiváltott stressz csökkentő mechanizmusok rendkívül összetettek. A növény - mikroba kölcsönhatás során fellépő jelátvitel komplex hálózata szabályozza ezeket a mechanizmusokat és a stressz mérséklését (Smith és mtsai. 2017). A PGPR-ok antioxidánsokat termelnek, javítják a gyökér és a hajtás morfológiáját, biofilmeket állítanak elő a növény vízellátásának javítása céljából, valamint másodlagos metabolitokat termelnek a növény alkalmazkodóképességének erősítése érdekében (Ahluwalia és mtsai. 2021, Ruzzi és mtsai. 2015, Kumar és mtsai. 2019, Li és mtsai. 2020). Számos tanulmány született a mikroorganizmusok által közvetített szárazságtűrésről a csírázás szakaszában (Grover és mtsai. 2013, Sandhya és mtsai. 2009), és korábbi eredményeik azt mutatták, hogy a kukorica oltása *Pseudomonas putida* FBKV2 törzsszel serkenti a növények növekedését és növeli a szárazsággal szembeni ellenállóságát.

Jelen vizsgálatunkban a *Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens* és *Pseudomonas putida* baktériummal oltottuk a GKT 3385-ös hibridet optimális vízellátás és szárazságstresszelt körülmények között, majd a kukorica fenológiai paramétereit értékeltük 50%-os nővirágzás és tejes érés fázisában. Sandhya és mtsai. (2010) tapasztalataihoz hasonlóan, a szárazságstressz hatással volt a kukorica fejlődésére. Jelen kísérletünk eredményei azt mutatták, hogy a szárazságstressz jelentősen visszavetette a kukorica fejlődését, ami a növény magasságának, a gyökér nedves tömegének, a hajtás nedves tömegének és szárazanyag-tartalmának csökkenését eredményezte az optimális vízellátottságban részesülő növényekkel szemben. Ugyanezt a hatást tapasztalta Pandey és mtsai. (2000), Suralta és mtsai. (2010), Hugh és Richard (2003), Pervez és mtsai. (2004), Çakir (2004), bizonyítva, hogy a szárazságstressz fokozásával a növények fokozatosan csökkentették a növénymagasságot és a hajtás szárazanyag-tartalmát. Jelen vizsgálatunkban 50%-os nővirágzásban, optimális vízellátottság során a *Pseudomonas putida* kezelés jelentős mértékben növelte a növénymagasságot, mely hatást a tejes érés fázisában már nem tapasztaltuk (**14. ábra**). Az 50%-os nővirágzás idején, a szárazságstressz során a *Pseudomonas putida* oltás mérsékelten növelte a gyökerek nedves tömegét, ami a tejes érés fázisában is megfigyelhető volt. Optimális vízellátottság során a tejes érés szakaszában a *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida* és *Bacillus pumilus* kezelés hatására tapasztaltunk jelentősen

nagyobb gyökér nedves tömeget a növényeknél (**15. ábra**). A kukoricák vízhasznosítási együtthatójának mértékét optimális vízellátottság során a *Pseudomonas fluorescens* oltás az 50%-os nővirágzás fázisában jelentősen növelte. A *Bacillus megaterium* kezelés esetében vízmegvonás során mérsékelt növekedést tapasztaltunk (**18. ábra**). A növények nedves tömeg/száraz tömeg arányát optimális vízellátottság mellett a *Pseudomonas fluorescens*, szárazságstressz során pedig a *Pseudomonas putida* oltás javította jelentős mértékben az 50%-os nővirágzás idején (**19. ábra**). A *Pseudomonas fluorescens* kezelés jelentős mértékben növelte a növények szárazanyag-tartalmát optimális vízellátottság során az 50%-os nővirágzás fázisában. Ugyanezt tapasztaltuk a *Pseudomonas putida* kezelés esetében is szárazságstresszelt körülmények között, mely hatás a teljes érés szakaszában is mérsékeltén megjelent (**20. ábra**). Eredményeinket megerősíti Ahmad és mtsai. (2019), Mubeen és mtsai. (2021) tanulmánya, akik hasonló hatást tapasztaltak a *Pseudomonas fluorescens* és *Pseudomonas putida* kezelés esetében a kukorica növénymagasság, a hajtás nedves és száraz tömeg, a gyökér nedves és száraz tömeg, a szárazanyag-tartalom vizsgálata során (optimális és szárazságstresszelt környezetben). Eredményeink alapján megállapíthatjuk: a *Pseudomonas putida* kezelés növelte a GKT 3385-ös hibrid nedves és száraz tömegét és a szárazanyag-tartalmát szárazságstresszelt körülmények között.

5.4 A hibridek alkalmazkodóképességének változása talajoltás hatására szántóföldi körülmények között

A terméshozam növelése és minőségének megőrzése a növénytermesztési és nemesítési kutatások egyik legfontosabb célja (Kayad és mtsai. 2021). A genetikai terméspotenciál hibridenként nagymértékben változik, ami a genotípus és a környezet kölcsönhatásával párosul, így a hozam és a minőség kapcsolata összetett és változó. A kukorica termése a szemsorok számából, a csövön lévő szemek számából és a szemek tömegéből tevődik össze. A terméshozamot a különböző meteorológiai tényezők jelentős mértékben befolyásolják (Yang és mtsai. 2022). Jelen tanulmányunkban - a termés mennyiségét és beltartalmi értékét meghatározó tulajdonságok eredményei alapján - megállapítható, hogy a vizsgált hibridek érésidőben és alkalmazkodóképességben is eltérnek egymástól.

A környezeti változások (például: éghajlat, talaj, vízellátottság, napfény) és a biotikus stressz jelentős hatással lehetnek a növények fejlődésére és termőképességére. Adott genotípusú növény kedvező környezetben jól teljesíthet,

kedvezőtlen környezetben viszont gyengébb teljesítményt mutat. Ezért a növények környezethez való alkalmazkodása kritikus tényező, amelyet figyelembe kell venni a nemesítés és a növényfajták kiválasztása során. A genotípus és a környezet között szinergikus vagy antagonista hatások lehetnek (előbbi erősíti, utóbbi csökkenti a növény teljesítményét). Sárvári és Pepo (2014) szerint a kukoricatermesztés intenzitása határozza meg az agrárökoszisztéma ellenálló képességét, valamint a kedvezőtlen időjárási viszonyokra adott választát. Kimutatható, hogy az éghajlatváltozás okozta szélsőséges időjárási viszonyok nagy hatással vannak a kukorica hozamára (Brown és Rosenberg 1999). A hároméves szántóföldi kísérletek eredményei alapján elmondható, hogy a kukorica termésmennyiségére az évjárat volt a legnagyobb hatással. 2019 és 2020 a kukoricatermesztés szempontjából intenzív évek tekinthető, amely a vizsgált hibridek esetében közel 10 t/ha termésátlagot jelentett. 2021 ezzel szemben rendkívül kedvezőtlen év volt - a csapadékhiány, a magas átlaghőmérséklet és a címerhányáskori légköri aszály miatt - 38%-os termésnövekedést (6,5 t/ha) okozott a vizsgált hibridek termésátlagában (**16. táblázat**). A szemek száma részben függ a virágzás és a megtermékenyülés ütemétől. A virágzási és a megtermékenyülési folyamatok nagyon érzékenyek a környezetváltozásra, és ha ezt az időszakot vízhiány vagy kedvezőtlen éghajlati viszonyok (pl.: túlzott csapadék, nem megfelelő páratartalom, alacsony hőmérséklet, tápanyaghiány) jellemzik, akkor a terméskötés csökken, ami a szemek hiányát okozza. A szem tömege tükrözi a kukorica külső fejlődési és belső fiziológiai állapotát, melyek megfelelő működése feltétele annak, hogy a növények magas terméshozamot érjenek el (Wu és mtsai. 2022). Hosszú távú kísérletek eredményei bizonyították, hogy a különböző terménymodellek egyensúlyát és ebből következően a termelékenységét nagymértékben befolyásolták a környezeti, elsősorban időjárási tényezők (Sárvári et Pepo 2014).

Számos tanulmány beszámolt arról, hogy a PGPR oltás eltérő mértékben növelheti a terméshozamot, javíthatja a talaj tápanyagellátottságát, valamint növelheti a talajban lévő tápanyagok felszívódását és hasznosulását (Cassán és mtsai. 2009, Díaz-Zorita és Fernández-Canigia 2009, Singh és mtsai. 2011). A kukorica rizoszférából izolált különböző *Azospirillum brasilense* törzsekkel történt oltás 5–11%-kal növelte a kukorica szemtermését. (Salvo és mtsai. 2018, Skonieski és mtsai. 2019). Aquino és mtsai. (2019) 40 PGPR izolátumot használtak fel a kukorica és a cirok növekedésére gyakorolt hatás felmérésére. Az izolátumok között szerepelt a

Bacillus pumilus és a *Bacillus megaterium*, melyek hatására főként a növénymagasság, a hajtás száraz tömeg és a klorofilltartalom mutatott növekedést. Katsenios és mtsai. (2022) eredményei alapján a *Bacillus subtilis*, a *Bacillus pumilus*, a *Bacillus pseudomycooides* növelte a csemegekukorica szemtermésének mennyiségét. A PGPR talajoltás pozitív hatást mutatott a kukorica hozamára (Ferreira és mtsai. 2013, Noumavo és mtsai. 2013, Abo-kora 2016). Munkánk során a hároméves termésátlagokat tekintve a legmagasabb szemtermés mennyiséget a KD2 oltási kezelés esetében mértük (9,3 t/ha). Ezt követte a MLT kezelés 8,9 t/ha-ral, majd a K 8,8 t/ha és végül a KD1 kezelés 8,6 t/ha-ral. A KD2 oltás hatása 5,7%-os, az MLT kezelés hatása pedig 1,1%-os termésnövekedést eredményezett az oltatlan K növényekhez képest. A KD1 kezelésnél 2,3%-os termés kiesést mértünk (**17. táblázat**). Iqbal és mtsai. (2016) a PGPR-ral kezelt kukorica szemtermés mennyiségének növekedéséről számolt be. Ullah és Bano (2019) szerint a hozam magasabb volt a *Pseudomonas putida* és a *Bacillus pumilus*-al kezelt növényekben. Singh és mtsai. (2023) szerint a kukorica fejlődésére, növekedésére és a terméspotenciál javítására különösen az *Azospirillum lipoferum* és a *Pseudomonas putida* van kedvező hatással.

Jelen tanulmányunkban a hároméves szántóföldi kísérlet eredményei alapján azt tapasztaltuk, hogy a *Bacillus pumilus* + *Pseudomonas putida* kombinált törzskeverék talajoltás hatására a növények képesek az aszályos évjárat ellenére többlettermést realizálni, ami mind növénytermesztési, mind nemesítési, mind gazdasági szempontból kiemelten fontos (**23. ábra**). Az összefüggések pontosabb megértéséhez nélkülözhetetlen a fenológiai tulajdonságokat kifejező genetikai háttér feltárása, melyek eredményei tovább mélyítik és segítik a szelektációs folyamatokat. A lehetséges biostimulátorok alapját képező mikrobák hatékonyságát szántóföldi körülmények között több termőhelyes teljesítménykísérletek keretein belül, széles genotípus portfólión kell vizsgálni és értékelni, hogy a kapott eredmények alapján ténylegesen a fenntartható mezőgazdaság és a precíziós gazdálkodás hatékony és környezetkímélő technológiája legyen.

6 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A különböző PGPR (*Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*) oltások hibridspecifikusan eltérő hatást váltottak ki a különböző éréscsoportú és azonos éréscsoporton belüli hibridek koleoptil és radikula hossz, valamint csírázási vigor index értékére.
2. A *Pseudomonas putida* oltás jelentős mértékben javította a GKT 3385 (korai FAO 390) szemes hibridkukorica és a GK Silostar (középerésű FAO 490) silóhibrid csírázóképeségét és serkentette a csírák növekedését.
3. A *Bacillus megaterium* és *Pseudomonas fluorescens* oltás jelentős mértékben javította a GK Silostar (középerésű FAO 490) silóhibrid csírázóképeségét és serkentette a csírák növekedését.
4. Először közöltünk adatokat a különböző PGPR (*Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas putida*) oltások optimális vízellátottság és tartós vízmegvonás alatt lévő kukoricánövény fiziológiai tulajdonságaira gyakorolt hatásáról, 50%-os nővirágzás és tejes érés fázisában.
5. Szárazságstressz során az 50%-os nővirágzás és tejes érés fázisában a *Pseudomonas putida* kezelés mérsékelten növelte a GKT 3385 (korai FAO 390) szemes hibridkukorica nedves gyökér tömegét. Az 50%-os nővirágzás fázisában javította a nedves tömeg/száraz tömeg arányát, és mindkét vizsgált fenofázisban jelentősen növelte a szárazanyag-tartalmat.
6. A 3 éves kísérleti eredményeink alapján *Bacillus pumilus*+*Pseudomonas putida* kombinált oltása évhatástól függetlenül hibridspecifikusan jelentős mértékben növelte a szemtermés mennyiségét szántóföldi körülmények között.
7. A 3 éves kísérleti eredményeink alapján a *Bacillus pumilus*+*Pseudomonas putida* kombinált oltása évhatástól függetlenül jelentős mértékben növelte a GKT 3385 (korai FAO 390) szemes hibridkukorica és a GK Silostar (középerésű FAO 490) silóhibrid szemtermés mennyiségét szántóföldi körülmények között.

8. A *Rhodopseudomonas palustris* + *Lactobacillus plantarum* + *Lactobacillus casei* + *Saccharomyces cerevisiae* kombinált oltása aszályos évben jelentős mértékben növelte a GK Silostar (középérésű FAO 490) silóhibrid szemtermés mennyiségét szántóföldi körülmények között.

7 ÖSSZEFOGLALÁS

A kukorica (*Zea mays* L.) az abiotikus stresszekkel szembeni érzékenységéről ismert, ami gyakran jelentős veszteséget okoz a termés hozamban. A növényi növekedést serkentő rizobaktériumokkal (PGPR) képesek lehetünk mérsékelni a szárazság és a hőstressz káros hatásait a növényeken. Ezek a mikroorganizmusok különféle növényi növekedést elősegítő tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek szárazság- és hőtűrést válthatnak ki a kukoricánövényekben azáltal, hogy közvetlenül vagy közvetve befolyásolják a növények molekuláris, metabolikus és fiziológiai stresszválaszait. Dolgozatom célja: a növények fiziológiai tulajdonságainak vizsgálata szárazságstressz hatására négy PGPR oltás, két öntözési norma és két fenofázis tényezőinek és interakcióinak elemzésével. Ezek mellett vizsgálataink kiterjednek a PGPR tápanyagfeltáró képességének és hatásfokának tesztelésére, a növényi növekedés serkentés vizsgálatára és szántóföldi teljesítménykísérletre. Eredményeink alapján a PGPR-ok közül a *Pseudomonas putida* volt a leghatékonyabb foszfát feltáró, növényi növekedést serkentő, növényi szárazságtűrést erősítő és ezáltal többlettermést realizáló baktérium kukoricánövény esetében. Munkánk célja továbbá, hogy jellemezni tudjuk a jótékony mikroorganizmusok együttműködésének hatását a szántóföldi körülmények között termesztett kukoricára. A teszteket három egymást követő évben végeztük szántóföldi kisparcellás kísérletekben kezeletlen kontroll és kombinált törzskeverékkel oltott parcellákon. A termés a kukoricánemesítés és termesztés szempontjából a legfontosabb tulajdonság, ezért vizsgálata a biostimulátor kezelések hatása alatt nagy jelentőségű volt. Eredményeink alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a kukorica termésmennyiségét befolyásoló tényezők közé sorolható az évjárat, a genotípus és a tápanyagellátottság, valamint a jótékony mikroorganizmusokból felépülő biostimulátor kezelés is. A biostimulátor kezelés önálló tényezőként is hatással van a kukoricahibridek termésmennyiségére, terméselemeire és a beltartalmi értéket meghatározó tulajdonságaira. Az egyik legfontosabb tényező a genotípusok és a velük kölcsönhatásba lépő mikroorganizmusok interakciója. A munkánk során végzett oltási kezelések eredményei alapján egy biostimulátort tudunk kiemelni, amely a tesztelt genotípusok 75%-nál képes volt terméstöbbletet realizálni mindhárom évben, a kontrollcsoporttal megegyező beltartalmi értékekkel.

8 SUMMARY

Maize (*Zea mays* L.) is known for its sensitivity to abiotic stresses, which often causes significant yield losses. With plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), the harmful effects of drought and heat stress on plants can be alleviated. These microorganisms have various plant growthpromoting properties that can induce drought and heat tolerance in maize plants by influencing directly or indirectly the molecular, metabolic, and physiological stress responses of the plants. The aim of the present study was to investigate the physiological traits of plants affected by drought stress in a treatment including four PGPR bacteria, two regimes of irrigation and two stages of phenophases, and the analysis of the influence of the individual factors and their combined effects, respectively. In addition, the investigations covered the testing of nutrient acquisition ability and nutrient use efficiency, the plant growth stimulating effect of PGPR bacteria, and the analysis of the performance trials. The results demonstrated, that in the four tested bacteria, *Pseudomonas putida* was the most efficient in phosphate mobilization, promotion of plant growth and drought stress tolerance of maize plants and realizing plus yield. The aim of this paper is to present the results of the field trial carried out to collect and assess data on the interaction of maize genotypes and beneficial microorganisms. The small plot field trial consisting of untreated control plots and plots treated with biostimulants was conducted in three consecutive years (2019, 2020 and 2021). Yield is a particularly important trait from the aspect of maize breeding and maize production as well, therefore the present study focused on it, more closely, how it was influenced by the biostimulant treatments. The results reflected that the treatment with biostimulants constituted from beneficial microorganisms can be listed among the factors influencing the yield, in addition to the seasonal effect, the genotype and the nutrient supply of the soil. The treatment with biostimulants, even on its own among the factors had impact on the quantity and components of yield, and on the characteristics determining the kernel nutritional value. The interaction between the genotypes and the interacting microorganisms is of specific importance. The most spectacular result has been attained by applying one of the biostimulants leading to elevated yield in 75% of the maize genotypes in the study, along with kernel nutritive value equal to the control group over all of the three years of the trial.

9 MELLÉKLETEK

9.1 M1. Irodalomjegyzék

Abbasi S, Sadeghi A, Safaie N, (2020) *Streptomyces* alleviate drought stress in tomato plants and modulate the expression of transcription factors ERF1 and WRKY70 genes. *Sci. Horticulturae* 265:109206

Abo-kora HA, (2016) Endophytic colonization of maize (*Zea mays* v.) root plants by PGPRs under salinity stress. *Nat. Sci.*, 14(7): 34-51

Agbodjato NA, Noumavo PA, Adjanohoun A, Agbessi L, Baba-Moussa L, (2016) Synergistic effects of plant growth promoting rhizobacteria and chitosan on in vitro seeds germination, greenhouse growth, and nutrient uptake of maize (*Zea mays* L.). *Biotechnology research international*.

Agrawal DK, Wanner BL, (1990) A *phoA* structural gene mutation that conditionally affects formation of the enzyme bacterial alkaline phosphatase. *J Bacteriol* 172(6):3180–3190

Ahemad M, Kibret M, (2014) Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *J. King Saud Univ. Sci.* 26, 1–20

Ahmad I, Zaib S, Alves PC MS, Luthe DS, Bano A, Shakeel SN (2019) Molecular and physiological analysis of drought stress responses in *Zea mays* treated with plant growth promoting rhizobacteria. *Biol Plant*, 63, 536-547.

Ahmad HM, Fiaz S, Hafeez S, Zahra S, Shah AN, Gul B, Aziz O, Mahmood-Ur-Rahman, Fakhar A, Rafique M, Chen Y, Yang SH and Wang X (2022) Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Eliminate the Effect of Drought Stress in Plants: A Review. *Front. Plant Sci.* 13:875774

Ahluwalia O, Singh PC, Bhatia R, (2021) A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 5, 100032.

Ali B, Sabri AN, Ljung K Hasnain S, (2009) Auxin production by plant associated bacteria: Impact on endogenous IAA content and growth of *Triticum aestivum* L. *Letter of Appl. Microbiol.*, 48: 542-547

- Ali SZ, Sandhya V, Grover M, Linga VR, Bandi V, (2011) Effect of inoculation with a thermotolerant plant growth promoting *Pseudomonas putida* strain AKMP7 on growth of wheat (*Triticum* spp.) under heat stress *J Plant Interact*, 6, pp. 239-246
- Alori ET, Glick BR, Babalola OO, (2017) Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. *Front. Microbiol.* 8:971. doi: 10.3389/fmicb.2017.00971
- Amara U, Khalid R, Hayat R, (2015) Soil bacteria and phytohormones for sustainable crop production. In *Bacterial Metabolites in Sustainable Agroecosystem*; Maheshwari, D.K., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, pp. 87–103
- Amri M, Rjeibi MR, Gatrouni M, Mateus DMR, Asses N, Pinho HJO, Abbes C. Isolation, Identification, and Characterization of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Tunisian Soils. *Microorganisms.* 2023; 11(3):783. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030783>
- Amy C, Avice J-C, Laval K, (2022) Are native phosphate solubilizing bacteria a relevant alternative to mineral fertilizations for crops? Part I. when rhizobacteria meet plant P requirements. *Rhizosphere* 21:100476
- FAOSTAT, (2010): Statistical Database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Rome
- Aquino JPA, (2019) Plant growth-promoting endophytic bacteria on maize and sorghum1. *Pesqui. Agropecu. Trop.* 49
- Arora NK, Khare E, Maheshwari DK, (2010) Plant growth promoting rhizobacteria: Constraints in bioformulation, commercialization, and future strategies. In *Plant Growth and Health Promoting Bacteria*; Maheshwari, D., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 97–116
- Aslam M, Maqbool MA, Cengiz R, (2015) *Drought Stress in Maize*. Springer US. pp. 19-36
- Ashagre H, Ibrahim A, Hamza, Urgecha F, Worku N, (2014) Influence of boron on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.). *African Journal of Plant Science.* 8(2) pp. 133-139

- Azeem M, Haider MZ, Javed S, Saleem MH, Alatawi A, (2022) Drought Stress Amelioration in Maize (*Zea mays* L.) by Inoculation of *Bacillus* spp. Strains under Sterile Soil Conditions. *Agriculture*. 12(1):50
- Backer R, Rokem JS, Ilangumaran G, Lamont J, Praslickova D, Ricci E, Subramanian S, Smith DL, (2018) Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Front. Plant Sci.* 9, 1473
- Badri DV, and Vivanco JM, (2009) Regulation and function of root exudates. *Plant Cell Environ.* 32, 666–681. doi: 10.1111/j.1365-3040.2008.01926.x
- Bag S, Mondal A, Banik A, (2022) Exploring tea (*Camellia sinensis*) microbiome: Insights into the functional characteristics and their impact on tea growth promotion. *Microbiological Research*, 254, 126890.
- Bakker MG, Manter DK, Sheflin AM, Weir TL, Vivanco JM, (2012) Harnessing the rhizosphere microbiome through plant breeding and agricultural management. *Plant Soil* 360, 1–13. doi: 10.1146/annurev.arplant.57.032905.105159
- Bastías DA, Applegate ER, Johnson LJ, Card SD, (2022) Factors controlling the effects of mutualistic bacteria on plants associated with fungi. *Ecology Letters*, 25(8), 1879-1888.
- Basu A, Prasad P, Das SN, Kalam S, Syyed RZ, Reddy MS, El Enshasy H, (2021) Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Green Bioinoculants: Recent Developments, Constraints, and Prospects. *Sustainability* 13, 1140
- Berde CP, Rawool P, Berde VB, (2021) Chapter 2—Phosphate-solubilizing bacteria: recent trends and applications in agriculture. In Mandal SD and Passari AK (ed) *Recent advancement in microbial biotechnology*. Academic Press, Elsevier, PP 27–47
- Berg G, Köberl M, Rybakova D, Müller H, Grosch R, Smalla K, (2017) Plant microbial diversity is suggested as the key to future biocontrol and health trends. *Fems Microbiol. Ecol.* 93, 50
- Berjak P, (2006) Unifying perspectives of some mechanisms basic to desiccation tolerance across life forms. *Seed Sci Res.* 16:1–15

- Bhadrecha P, Singh S, Dwibedi V (2023) A plant's major strength in rhizosphere': the plant growth promoting rhizobacteria. *Archives of Microbiology*, 205(5), 165.
- Bhardwaj D, Ansari MW, Sahoo RK, Tuteja N, (2014) Biofertilizers function as key player in sustainable agriculture by improving soil fertility, plant tolerance and crop productivity. *Microb. Cell Fact.* 13, 1–10
- Bhattacharyya PN, Jha DK, (2012) Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 28, 1327–1350
- Bíró B, Magyar K, Várady Gy, Kecskés M, (1996) Specific replant disease reduced by PGPR rhizobacteria on apple seedlings. *Acta Horticulturae.* 477: 75-81
- Bíró B, Bayoumi HEAF, Jevcsák I, Kecskés M, (1999) Antagonistic effect of rhizosphere microorganisms on some associative diazotrophs and scavenger Pseudomonads. *Sci. Bullet.* XIII: 29-34
- Bíró B, (2015) Jó úton haladunk? Fontos kérdésekre keressük a választ – Baktériumtrágyázás. *Agro Napló* 2015/09. p. 55-64
- Bíró B, Sumalan R, Farkas E, Schmidt B, (2016) Az arbuskuláris mikorrhiza- (AM) gombák hatásának vizsgálata *Tagetes patula* L. foszforfelvételére és fejlődésére modellkísérletben. *Kertgazdaság*, 48(2): 45-52
- Biswas J, Ladha JK, Dazzo FB, (2000) Rhizobia inoculation improves nutrient uptake and growth in lowland rice. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1644-1650
- Brown RA, Rosenberg NJ, (1999) Climate change impacts on the potential productivity of corn and winter wheat in their primary United States growing regions. *Climate Change* 41:73–107
- Bruce WB, Edmeades GO, Barker TC, (2002) Molecular and Physiological Approaches to Maize Improvement for Crow Tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53, 13-25
- Buée M, de Boer W, Martin F, van Overbeek L, Jurkevitch E, (2009) The rhizosphere zoo: An overview of plant-associated communities of microorganisms, including phages, bacteria, archaea, and fungi, and of some of their structuring factors. *Plant Soil*, 321, 189–212
- Burr TJ, Ceasar A, (1984) Beneficial plant bacteria. *Crit. Rev. Plant Sci*, 2:1-20

Burr CA, Sun J, Yamburenko MV, Willoughby A, Hodgens C, Boeshore SL, Kieber JJ, (2020) The HK5 and HK6 cytokinin receptors mediate diverse developmental pathways in rice. *Development*, 147(20), dev191734.

Çakir R, (2004) Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crop Res.* 89:1–16

Cassán F, Perrig D, Sgroy V, Masciarelli O, Penna C, Luna V, (2009) Corrigendum to “Azospirillum brasilense Az39 and Bradyrhizobium japonicum E109, inoculated singly or in combination, promote seed germination and early seedling growth in corn (*Zea mays* L.) and soybean (*Glycine max* L.) [Eur. J. Soil Biol. 45 (2009) 28-35]”. *Eur J Soil Biol* 45: 28–35.

Cardinale M, Ratering S, Suarez C, Zapata Montoya, AM, Geissler-Plaum R, Schnell S, (2015) Paradox of plant growth promotion potential of rhizobacteria and their actual promotion effect on growth of barley (*Hordeum vulgare* L.) under salt stress. *Microbiol. Res.* 181, 22–32

Carreiras J, Cruz-Silva A, Fonseca B, Carvalho RC, Cunha JP, Proença Pereira J, Duarte B, (2023) Improving Grapevine Heat Stress Resilience with Marine Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Consortia. *Microorganisms*, 11(4), 856.

Chandra S, Choure K, Dubey RC, Maheshwari DK, (2007) Rhizosphere competent Mesorhizobium lot MP6 induces root hair curling of Indian mustard (*Brassica campestris*). *Braz. J. Microbiol.*, 38: 124-130

CHEKTERIKOV S, FEOKTISTOVA A, TIMERGALIN M, RAMEEV T, HKUDAYGULOV G, KENDJIEVA A, SHARIPOV D, (2023) Mitigation of the negative effect of auxinic herbicide by bacterial suspension of *Pseudomonas protegens* DA1. 2 in wheat plants under drought conditions. *Acta agriculturae Slovenica*, 119(1), 1-7.

Chowdhury MK, Hasan MA, Bahadur MM, Islam MR, Hakim MA, Iqbal MA, Javed T, Raza A, Shabbir R, Sorour S, (2021) Evaluation of drought tolerance of some wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes through phenology, growth, and physiological indices. *Agronomy* 11:1792

Cochard H, (2002) Xylem Embolism and Drought-Induced Stomatal Closure in Maize. *Planta*, 215, 466-471

- Cordero AP, Vergara DEM, Mendoza YA, (2023) Production of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid deaminase (ACC) by *Burkholderia cepacia* as an indicator of cadmium contamination. *Journal of Positive Psychology and Wellbeing*, 942-949.
- Csathó P, (2004) A hazai agrokémiai iskolák kutatói által beállított NPK trágyázási szabadföldi kísérletek adatbázisának értékelése. Kézirat MTA TAKI
- Dangi SR, Tirado-Corbalá R, Gerik J, Hanson BD, (2017) Effect of long-term continuous fumigation on soil microbial communities. *Agronomy* 7, 37
- Deacon JW, (2006) Fungal biology. Fungal Symbiosis. Blackwell Publishing Ltd. 4th edition. ISBN-13 978-1-4051-3066-0. United Kingdom, Edinburgh. 256-261
- Debreczeni B, (1990) Kálium a növénytermesztésben. *Magyar Mezőgazdaság*. 45 21: 10-12
- Debreczeni B-né, Sárdi K. (1999a) A nitrogén szerepe a növények életében. [In: Fülek Gy. (szerk) Tápanyag-gazdálkodás] Mezőgazda Kiadó. Budapest. 30–91
- Debreczeni B-né, Sárdi K, (1999b) A foszfor szerepe a növények életében. [In: Fülek Gy. (szerk) Tápanyag-gazdálkodás] Mezőgazda Kiadó. Budapest. 45–51
- Delachiave M, Pinho S, (2003) Germination of *Senna occidentalis* seed at different osmotic potential levels. *Architectural Technologies*. 46:1663-166
- De-Bashan LE, Magallon-Servin P, Lopez BR, Nannipieri P, (2021) Biological activities affect the dynamic of P in dryland soils. *Biol Fertil Soils* 58:105–119. <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01609-6>
- De la Fuente Cantó C, Simonin M, King E, Moulin L, Bennett MJ, Castrillo G, Laplaze L, (2020) An extended root phenotype: The rhizosphere, its formation and impacts on plant fitness. *Plant J*. 103, 951–964
- Dhole AM, Shelat HN, Patel HK, Jhala YK, (2023) Evaluation of the Co-inoculation Effect of Rhizobium and Plant Growth Promoting Non-rhizobial Endophytes on *Vigna radiata*. *Current Microbiology*, 80(5), 167.
- Díaz-Zorita M, Fernández-Canigia MV, (2009) Field performance of a liquid formulation of *Azospirillum brasilense* on dryland wheat productivity. *Eur J Soil Biol* 45: 3–11.

- Díaz M, Bach T, González Anta G, Agaras B, Wibberg D, Noguera F, Valverde C, (2022) Agronomic efficiency and genome mining analysis of the wheat-biostimulant rhizospheric bacterium *Pseudomonas pergaminensis* sp. nov. strain 1008T. *Frontiers in Plant Science*, 13, 894985.
- Doornbos RF, Geraats BP, Kuramae EE, Van Loon LC, Bakker PA, (2011) Effects of jasmonic acid, ethylene, and salicylic acid signaling on the rhizosphere bacterial community of *Arabidopsis thaliana*. *Mol. Plant Microbe Interact.* 24, 395–407. doi: 10.1094/MPMI-05-10-0115
- Dutta S, Podile AR, (2010) Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): The bugs to debug the root zone. *Crit. Rev. Microbiol.* 36, 232–244
- Edmeades GO, Bolanos J, Elings A, Ribaut JM, Banziger M, Westgate ME, (2000) The Role and Regulation of the Anthesis-Silking Interval in maize. In: Westgate ME, Boote KJ, Eds., *Physiology and Modeling Kernel Set in Maize*, Vol. 29, CSSA Special Publication, Wisconsin, 43-73
- Edmeades GO, (2013) Progress in Achieving and Delivering Drought Tolerance in Maize: An Update. ISAAA, Ithaca
- El-Hawary MI, El-Hawary Fatma I, El-Ghamry AM, El-Naggar E, (2002) Effect of application of biofertilizer on the yield and NPK uptake of some wheat genotypes as affected by the biological properties of soil. *Pak. J. Biol. Sci.*, 5: 1181-1185
- Etesami H, Adl SM, (2020) Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and their action mechanisms in availability of nutrients to plants. *Phyto-Microbiome in stress regulation*, 147-203.
- Fabiańska I, Gerlach N, Almario J, Bucher M, (2019) Plant-mediated effects of soil phosphorus on the root-associated fungal microbiota in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytol.* 221, 2123–2137
- Fadiji AE, Babalola OO, (2020), Elucidating mechanisms of endophytes used in plant protection and other bioactivities with multifunctional prospects. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 467. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00467>
- Fahad S, Hussain S, Bano A, Saud S, Hassan S, Shan D, Huang J, (2015) Potential role of phytohormones and plant growth-promoting rhizobacteria in abiotic stresses:

consequences for changing environment. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 4907-4921.

Farhat F, Tariq A, Waseem M, Masood A, Raja S, Ajmal W, Maqsood MF, (2023) Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) Induced Improvements in the Growth, Photosynthesis, Antioxidants, and Nutrient Uptake of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *Gesunde Pflanzen*, 1-14.

Farooq M, Wahid A, Kobayashi N, Fujita D, Basra SMA (2009) Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In: Lichtfouse E, Navarrete M, Debaeke P, Souchere V, Alberola C (eds) *Sustainable agriculture*. Springer, pp 153–188

Ferreira A, Pires RP, Rabelo R, Oliveira J, Brito C, (2013) Implications of *Azospirillum brasilense* inoculation and nutrient addition on maize in soils of the Brazilian Cerrado under green house and field conditions. *Appl. Soil Ecol.*, 72: 103-108

Fraga-Vidal R, Mesa HR, Villegas G, (2007) Vector for chromosomal integration of the *phoC* gene in plant growth-promoting bacteria. Paper Presented at the First International Meeting on Microbial Phosphate Solubilization 102:239–244

Fusseder A, (1984) Der Einfluss von Bodenart, Durchlüftung des Bodens, Ernährung and Rizosphärenflora auf die Morphologie des seminalen Wurzelsystems von Mais. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 147: 553-565

Fülekgy Gy, (1979) Foszfordinamika az újszentmargitai szolonyec talajokon. *Agrokémia és Talajtan.* 28. 115-122

Fülekgy Gy, Rajkainé VK. (1999) A talaj tápelem-szolgáltató képessége. In.: *Tápanyag-gazdálkodás.* (Szerk: Fülekgy Gy.) Mezőgazda Kiadó. Budapest. 91-130

García-Fraile P, Menéndez E, Rivas R, (2015) Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *Aims Bioeng.* 2, 183–205

Garg T, Singh Z, Chennakesavulu K, Mushahary KKK, Dwivedi AK, Varapparambathu V, Yadav SR (2022) Species-specific function of conserved regulators in orchestrating rice root architecture. *Development*, 149(9), dev200381.

Gatiboni LC, Brunetto G, Pavinato PS, George TS, (2020) Legacy phosphorus in agriculture: role of past management and perspectives for the future. *Front Earth Sci* 8:619935. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.619935>

Georgieva G, Nedeva T, Badalova M, Deleva V, Savov V (2023) Study of the plant growth-promoting capacity of *Pseudomonas putida* 1046 in a model plant system. In: Chankova S, Danova K, Beltcheva M, Radeva G, Petrova V, Vassilev K (Eds) Actual problems of Ecology. *BioRisk* 20: 115-128. <https://doi.org/10.3897/biorisk.20.97581>

Gerretsen FC, (1948) The influence of microorganisms on the phosphate intake by the plant. *Plant and Soil*, 1: 51-58

Ghosh R, Barman S, Mukherjee R, (2016) Role of phosphate solubilizing *Burkholderia* spp. for successful colonization and growth promotion of *Lycopodium cernuum* L. (Lycopodiaceae) in lateritic belt of Birbhum district of West Bengal. *India Microbiological Research* 183:80–91

Glick BR, Pasternak JJ, (2003) Plant growth promoting bacteria. In: Glick BR, Pasternak JJ (eds) *Molecular biotechnology principles and applications of recombinant DNA*, 3rd edn. ASM Press, Washington, pp 436-454

Glick BR, (2001) Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnol Adv*, 21(3): 83-393

Glick BR, (2012) Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica* 2012, 963401

Glick BR, (2014) Bacteria with ACC deaminase can promote plant growth and help to feed the world. *Microbiological Research*, 169(1): 30-39

Godó Z, (2011) *Agro-ökológia*. Digitális Tankönyvtár

Goldstein AH, (1994) Involvement of the quinoprotein glucose dehydrogenase in the solubilization of exogenous phosphates by gram-negative bacteria. *Phosphate in microorganisms: cellular and molecular biology*. ASM Press, Washington, DC 197–203

Gopalakrishnan S, Sathya A, Vijayabharathi R, Varshney RK, Gowda CLL, Krishnamurthy L, (2015) Plant growth promoting rhizobia: Challenges and opportunities. *3 Biotech* 5, 355–377

Goss MJ, Carvalho M, Brito I, Alho L, Kadir S, (2017) Impacts on Host Plants of Interactions between AMF and Other Soil Organisms in the Rhizosphere.

- Goswami D, Thakker JN, Dhandhukia PC (2016) Portraying mechanics of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A review. *Cogent Food Agric.* 2, 1127500
- Goswami M, Deka S, (2020) Plant growth-promoting rhizobacteria—alleviators of abiotic stresses in soil: a review. *Pedosphere* 30, 40–61
- Gouda S, Kerry RG, Das G, Paramithiotis S, Shin HS, Patra JK, (2018) Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiol. Res.* 206, 131–140. doi: 10.1016/j.micres.2017.08.016
- Gowtham H, Brijesh Singh S, Murali M, Shilpa N, Melvin P, Mohammed A, (2020) Induction of drought tolerance in tomato upon the application of ACC deaminase producing plant growth promoting rhizobacterium *Bacillus subtilis* Rhizo SF 48. *Microbiol. Res.* 234:126422
- Granssee A, Wittenmayer L, (2000) Qualitative and quantitative analysis of water-soluble root exudates in relation to plant species and development. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 381–385. doi: 10.1002/1522-2624(200008)163:4<381:AID-JPLN381>3.0.CO;2-7
- Gravel V, Antoun H, Tweddell RJ, (2007) Growth stimulation and fruit yield improvement of greenhouse tomato plants by inoculation with *Pseudomonas putida* or *Trichoderma atroviride*: Possible role of Indole Acetic Acid (IAA). *Soil Biol. Biochem.*, 39: 1968-1977
- Greenwood DJ, Cleaver TJ, Turner MK, Hunt J, Niendorf KB, Loquens SMH, (1980) Comparison of the effects of phosphate fertilizer on the yield: phosphate content and quality of 22 different vegetable and agricultural crops. *J. Agr. Sci.* 95: 457–469
- Grover A, Mittal D, Negi M, Lavania D, (2013) Generating high temperature tolerant transgenic plants: Achievements and challenges. *Plant Sci.* 205-206:38-47
- Guan H, Liu X, Fu Y, Han X, Wang Y, Li Q, He W, (2023) The locoweed endophyte *Alternaria oxytropis* affects root development in *Arabidopsis* in vitro through auxin signaling and polar transport. *Journal of Experimental Botany*, 74(3), 931-944.
- Gruiz K. (2019) Mikroorganizmusok szerepe az elemkörforgalmakban. *Környezeti mikrobiológia és ökotoxikológia c. tárgyhoz*

Guo JH, Qi HY, Guo YH, Ge HL, Gong LY, Zhang LX, (2004) Biocontrol of tomato wilt by plant growth promoting rhizobacteria. *Biol. Control*, 29. 66-7.

Gupta S, Pandey S, (2023) Plant Growth Promoting Rhizobacteria to Mitigate Biotic and Abiotic Stress in Plants. *Sustainable Agriculture Reviews 60: Microbial Processes in Agriculture*, 47-68.

Hamzei J, (2012) Seed N concentration, nitrogen use efficiency and growth of barley under combinations of bio and chemical N fertilizer application. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(1): 70-76

Han Y, White PJ, Cheng L, (2022) Mechanisms for improving phosphorus utilization efficiency in plants. *Ann. Bot.* 129, 247–258. doi: 10.1093/aob/mcab145

Hartman K, Tringe SG, (2019) Interactions between plants and soil shaping the root microbiome under abiotic stress. *Biochem. J.* 476, 2705–2724

Hassan SS, Kodakandla V, Redwan EM, Lundstrom K, Choudhury PP, Abd El-Aziz TM, Uversky VN (2022) An issue of concern: unique truncated ORF8 protein variants of SARS-CoV-2. *PeerJ*, 10, e13136.

Hershey DM, Lu X, Zi J, Peters RJ, (2014) Functional conservation of the capacity for ent-kaurene biosynthesis and an associated operon in certain rhizobia. *Journal of bacteriology*, 196(1), 100-106.

Hossner LR, Freeouf JA, Felson BL, (1973) Solution phosphorus concentration and growth of rice (*Oryza sativa*, L.) in flooded soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 37, 405-408

Hsiao TC, Xu LK, (2000) Sensitivity of Growth of Roots versus Leaves to Water Stress: Biophysical Analysis and Relation to Water Transport. *Journal of Experimental Botany*, 51, 1595-1616

Hsu PH, Jackson ML, (1960) Inorganic P transformation by chemical weathering in soils. *Soil Sci.* 90. 16-24

Hugh JE, Richard FD (2003) Effect of drought stress on leaf and whole canopy radiation use efficiency and yield of maize. *Agron J* 95:688–696

Illmer P, Schinner F, (1995) Solubilization of inorganic calcium phosphates—solubilization mechanisms. *Soil Biol Biochem* 27(3):257–263

- Islam S, Akanda AM, Prova A, Islam M.T, Hossain MM, (2016) Isolation and identification of plant growth promoting rhizobacteria from cucumber rhizosphere and their effect on plant growth promotion and disease suppression. *Front. Microbiol.* 6, 1360.
- Iqbal MA, Khalid M, Zahir ZA, Ahmad R, (2016) Auxin producing plant growth promoting rhizobacteria improve growth, physiology and yield of maize under saline field conditions. *Int. J. Agri. Biol.*, 18(1): 37-45
- Jafari M, Tahmoures M, Ehteram M, Ghorbani M, Panahi F, (2022) The Role of Vegetation in Confronting Erosion and Degradation of Soil and Land. In: *Soil Erosion Control in Drylands*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04859-3_2
- Jalal A, da Silva Oliveira CE, Galindo FS, Rosa PAL, Gato IMB, de Lima BH, Teixeira Filho MCM (2023) Regulatory mechanisms of plant growth-promoting rhizobacteria and plant nutrition against abiotic stresses in Brassicaceae family. *Life*, 13(1), 211.
- Jiang W, Metcalf WW, Lee KS, (1995) Molecular cloning, mapping, and regulation of pho regulon genes for phosphonate breakdown by the phosphonatase pathway of *Salmonella typhimurium* LT2. *J Bacteriol* 177(22):6411–6421
- Jiang F, Zhang L, Zhou J, (2021) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance mineralisation of organic phosphorus by carrying bacteria along their extraradical hyphae. *New Phytol* 230:304–315
- Jurgens SK, Johnson RR, Boyer JS, (1978) Dry Matter Production and Translocation in Maize Subjected to Drought during Grain Fill. *Agronomy Journal*, 70, 678-682
- Kalam S, Das SN, Basu A, Podile AR, (2017) Population densities of indigenous Acidobacteria change in the presence of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in rhizosphere. *J. Basic Microbiol.* 57, 376–385
- Kalam S, Basu A, Podile AR, (2020) Functional and molecular characterization of plant growth promoting *Bacillus* isolates from tomato rhizosphere. *Heliyon* 6, e04734
- Kang SM, Khan AL, Waqas M, You YH, Kim JH, Kim JG, Lee IJ, (2014) Plant growth-promoting rhizobacteria reduce adverse effects of salinity and osmotic stress

by regulating phytohormones and antioxidants in *Cucumis sativus*. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 673-682.

Karnwal A, Shrivastava S, Al-Tawaha ARMS, Kumar G, Kumar A, Kumar A, (2023) PGPR-Mediated Breakthroughs in Plant Stress Tolerance for Sustainable Farming. *Journal of Plant Growth Regulation*, 1-17.

Katsenios N, Andreou V, Sparangis P, (2022) Assessment of plant growth promoting bacteria strains on growth, yield and quality of sweet corn. *Sci Rep* 12, 11598 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16044-2>

Katznelson H, Bose B, (1959) Metabolic activity and phosphate dissolving capability of bacterial isolates from wheat roots, rhizosphere and non - rhizosphere soil. *Can. J. Microbiol.*, 5: 79-85

Kaur J, Pandove G, (2023) Understanding the beneficial interaction of plant growth promoting rhizobacteria and endophytic bacteria for sustainable agriculture: a bio-revolution approach. *Journal of Plant Nutrition*, 1-29.

Kayad A, Sozzi M, Gatto S, Whelan B, Sartori L, Marinello F, (2021) Ten years of corn yield dynamics at field scale under digital agriculture solutions: A case study from North Italy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 185, 106126.

Kátai J, (2011) *Alkalmazott talajtan*. Debreceni Egyetem, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Pannon Egyetem, Digitális Tankönyvtár

Kátai J, Zsuposné Oláh Á, Sándor Zs, Tállai M, (2015) Összefüggések a talaj kémiai tulajdonságai és mikrobiológiai aktivitása között egy trágyázásitartamkísérletben. In: *A talajok térbeli változatossága, elméleti és gyakorlati vonatkozások*, Hernádi, H., Sisák, I., Szabóné Kele, G. (szerk) *Talajtani Vándorgyűlés*, 29-38

Kennedy IR, Choudhury AIMA, Kecskes ML, (2004) Non-symbiotic bacterial diazotrophs in crop-farming systems: can their potential for plant growth promotion be better exploited? *Soil Boil Biochem*, 36(8): 1229-1244

Khadka K, Ear HJ, Raizada MN, Navabi A, (2020) A physio-morphological trait-based approach for breeding drought tolerant wheat. *Front. Plant Sci.* 11:715. doi: 10.3389/fpls.2020.00715

- Khayatnezhad M, Zaeifizadeh M, Gholamin R, (2010): Investigation and Selection Index for Drought Stress. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(10): 4815-4822
- Khan AG, (2005) Role of soil microbes in the rhizosphere on plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *J trace Elem Med Biol*, 18: 355-364
- Khan A, Munsif F, Akhtar K, Afridi MZ, Zahoor – Ahmad Z, Fahad S, Ullah R, Khan FA, Din M, (2014) Response of Fodder Maize to Various Levels of Nitrogen and Phosphorus. *American Journal of Plant Science*. 5. 2323-2329
- Khan N, Bano A, (2019) Exopolysaccharide producing rhizobacteria and their impact on growth and drought tolerance of wheat grown under rainfed conditions. *PLoS One* 14: e0222302
- Khan H, Akbar WA, Shah Z, Rahim HU, Taj A, Alatalo JM, (2022) Coupling phosphate-solubilizing bacteria (PSB) with inorganic phosphorus fertilizer improves mungbean (*Vigna radiata*) phosphorus acquisition, nitrogen fixation, and yield in alkaline-calcareous soil. *Heliyon*, 8(3).
- Khalid A, Arshad M, Zahir ZA, (2006) Phytohormones, microbial production and applications. In: *Biological approaches to sustainable soil systems*. Boca Raton, Uphoff N, Ball AS, Fernandes E, Herren H, Husson O, Laing M, Palm C, Pretty J, Sanchez P, Sanginga N, Thies J, (eds) Taylor and Francis/CRC Press, pp. 207–220
- Khumairah FH, Setiawati MR, Fitriatin BN, Simarmata T, Alfaraj S, Ansari MJ, Najafi S, (2022) Halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria isolated from saline soil improve nitrogen fixation and alleviate salt stress in rice plants. *Frontiers in Microbiology*, 13, 905210.
- Kifle MH and Laing MD (2016) Effects of Selected Diazotrophs on Maize Growth. *Front. Plant Sci.* 7:1429. doi: 10.3389/fpls.2016.01429
- Kloepper JW, Leong J, Teintze M, Schroth MN, (1980) Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth promoting rhizobacteria, *Nature*, 268: 885-886
- Kloepper JW, Lisfhitz R, Schroth MN, (1988) *Pseudomonas* inoculants to benefit plant production. *Anim. Plant Sci.*, 60-64

Kour D, Khan SS, Kaur T, Kour H, Singh G, Yadav A, Yadav AN (2022) Drought adaptive microbes as bioinoculants for the horticultural crops. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09493>

Kour D, Kaur T, Devi R, Chaubey KK, Yadav AN, (2023) Co-inoculation of nitrogen fixing and potassium solubilizing *Acinetobacter* sp. for growth promotion of onion (*Allium cepa*). *Biologia*, 1-7.

Krishnaraj P, Goldstein A, (2001) Cloning of a *Serratia marcescens* DNA fragment that induces quinoprotein glucose dehydrogenase-mediated gluconic acid production in *Escherichia coli* in the presence of stationary phase *Serratia marcescens*. *Fems Microbiol Lett* 205(2):215–220

Kristin A, Miranda H, (2013) The root microbiota—a fingerprint in the soil? *Plant Soil* 370, 671–686. doi: 10.1007/s11104-013-1647-7

Kumar A, Bhargava P, Rai, LC (2010) Isolation and molecular characterization of phosphate solubilizing *Enterobacter* and *Exiguobacterium* species from paddy fields of Eastern Uttar Pradesh, India. *African Journal of Microbiology Research*, 4(9), 820-829.

Kumar A, Verma H, Singh VK, Singh PP, Singh SK, Ansari WA, Yadav A, (2017) Singh, P.K.; Pandey, K.D. Role of *Pseudomonas* sp. in sustainable agriculture and disease management. In *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture*; Meena, V.S., Mishra, P.K., Bisht, J.K., Pattanayak, A., Eds.; Springer: Singapore, Volume 2, pp. 195–215

Kumar A, Patel JS, Meena VS, Srivastava R, (2019) Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 20, 101271.

Kumar R, Swapnil P, Meena M, Selpair S, Yadav BG, (2022) Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Approaches to alleviate abiotic stresses for enhancement of growth and development of medicinal plants. *Sustainability*, 14(23), 15514.

Kusale SP, Attar YC, Sayyed RZ, (2021) Production of plant beneficial and antioxidants metabolites by *Klebsiella variicola* under salinity stress. *Molecules* 26(7):1894

- Lambers H, (2022) Phosphorus acquisition and utilization in plants. *Annu Rev Plant Biol* 73:17–42. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-125738>
- Li GX, Wu XQ, Ye JR, (2013) Biosafety and colonization of *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 and its growth-promoting effects on poplars. *Appl Microbiol Biot* 97(24):10489–10498
- Li C, Li Q, Wang Z, (2019) Environmental fungi and bacteria facilitate lecithin decomposition and the transformation of phosphorus to apatite. *Sci Rep-Uk* 9(1):15291
- Li H, Guo Q, Jing Y, Liu Z, Zheng Z, Sun Y, Xue Q, Lai H (2020) Application of *Streptomyces pactum* Act12 enhances drought resistance in wheat. *J Plant Growth Regul* 39:122–132. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-09968-z>
- Li B, Fan R, Sun G, (2021) Flavonoids improve drought tolerance of maize seedlings by regulating the homeostasis of reactive oxygen species. *Plant Soil* 461, 389–405. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04814-8>
- Liang JL, Liu J, Jia P, (2020) Novel phosphate-solubilizing bacteria enhance soil phosphorus cycling following ecological restoration of land degraded by mining. *Isme J* 14(6):1–14
- Liu Y, Li S, Chen F, Yang S, Chen X, (2010) Soil water dynamics and water use efficiency in spring maize (*Zea mays* L.) fields subjected to different water management practices on the Loess Plateau, China. *Agric Water Manage.* 97:769–775
- Liu F, Xing S, Ma H, (2013) Cytokinin-producing, plant growth-promoting rhizobacteria that confer resistance to drought stress in *Platycladus orientalis* container seedlings. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(20): 9155-9164
- Lobell DB, Roberts MJ, Schlenker W, Braun N, Bertis B, Little Roderick M, Rejesus Graeme L, Hammer Lopes MS, Araus, JL, Van Heerden PDR, Foyer CH, (2011): Enhancing drought tolerance in C4 crops *J. Exp. Bot.*, 62, pp. 3135-3153
- Loch J, Nosticzius Á, (1983) *Alkalmazott kémia*. Mezőgazdasági Kiadó. Budapest
- Loch J. (2000) *Agrokémia*. Egyetemi jegyzet. Debrecen

- Loch J, Nosticzius Á. (2004) *Agrokémia és növényvédelmi kémia. Mezőgazda Kiadó. Budapest.* 19-115
- Lopes MS, Araus JL, Heerden PDR, Foyer CH, (2011) Enhancing drought tolerance in C4 crops, *Journal of Experimental Botany*, Volume 62, Issue 9, P 3135–3153
- López-Bucio J, Campos-Cuevas JC, Hernández-Calderón E, Velásquez-Becerra C, Farias-Rodríguez R, Macías-Rodríguez LI, Valencia-Cantero E, (2007) *Bacillus megaterium* Rhizobacteria Promote Growth and Alter Root-System Architecture Through an Auxin- and Ethylene-Independent Signaling Mechanisms in *Arabidopsis thaliana*. *Molecular Plant-Microbe Interaction*, 20(2): 207-217
- Lugtenberg BJJ, Chin-A-Woeng TFC, Bloemberg GV, (2002) Microbe-plant interactions: Principles and mechanisms. *Antonie van Leeuwenhoek*, 81: 373-383
- Luo D, Wang L, Nan H, Cao Y, Wang H, Kumar TV, Wang C, (2023) Phosphorus adsorption by functionalized biochar: a review. *Environ Chem Lett.* 21(1):497–524. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108779>.
- Magallon-Servín P, Antoun H, Taktek S, (2020) The maize mycorrhizosphere as a source for isolation of arbuscular mycorrhizae-compatible phosphate rock-solubilizing bacteria. *Plant Soil* 451(1):169–186
- Mahajan A, Gupta RD, (2009) Biofertilizers: Their kinds and requirement in India. In *Integrated Nutrient Management (INM) in a Sustainable Rice—Wheat Cropping System*; Mahajan, A., Gupta, R.D., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2009; pp. 75–100
- Mahanty T, Bhattacharjee S, Goswami M, Bhattacharyya P, Das B, Ghosh A, Tribedi P (2017) Biofertilizers: A potential approach for sustainable agriculture development. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 3315–3335
- Mahmud K, Makaju S, Ibrahim R, Missaoui A, (2020) Current progress in nitrogen fixing plants and microbiome research. *Plants*, 9(1), 97.
- Malusà E, Pinzari F, Canfora L, (2016) Efficacy of biofertilizers: Challenges to improve crop production. In *Microbial Inoculants in Sustainable Agricultural Productivity*; Singh, D.P., Singh, H.B., Prabha, R., Eds.; Springer: New Delhi, India, pp. 17–40

- Mariotti L, Scartazza A, Curadi M, Picciarelli P, Toffanin A, (2021) *Azospirillum baldaniorum* Sp245 induces physiological responses to alleviate the adverse effects of drought stress in purple basil. *Plants*, 10(6), 1141.
- Martinez-Klimova E, Rodríguez-Peña K, Sergio Sánchez K, (2017) Endophytes as sources of antibiotics. *Biochemical Pharmacology*, 134, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2016.10.010>
- Massalha H, Korenblum E, Tholl D, Aharoni A, (2017) Small molecules below-ground: the role of specialized metabolites in the rhizosphere. *Plant J.* 90, 788–807. doi: 10.1111/tpj.13543
- Matics H, Bíró B, (2015) History of soil fertility enhancement with inoculation methods. *Journal of Central European Agriculture*, 16(2): 231-348.
- Meena M, Swapnil P, Divyanshu K, Kumar S, Tripathi YN, Zehra A, Marwal A, Upadhyay RS, (2020) PGPR-mediated induction of systemic resistance and physiochemical alterations in plants against the pathogens: Current perspectives. *J. Basic Microbiol.* 60, 828–861
- Meenakshi Annapurna K, Govindasamy V, Ajit V, Choudhary DK, (2019) Mitigation of drought stress in wheat crop by drought tolerant endophytic bacterial isolates. *Vegetos* 32, 486–493
- Mei C, Chretien RL, Amaradasa BS, He Y, Turner A, Lowman S. Characterization of Phosphate Solubilizing Bacterial Endophytes and Plant Growth Promotion In Vitro and in Greenhouse. *Microorganisms.* 2021; 9(9):1935. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091935>
- Meliani A, Bensoltane A, Benidire L, Oufdou K, (2017) Plant growth-promotion and IAA secretion with *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas putida*. *Research & Reviews: Journal of Botanical Sciences*, 6(2), 16-24.
- Mengel K, Kirkby EA, (1987) *Principles of Plant Nutrition*. 4th Edition. International Potash Institute, IPI, Bern, Switzerland
- Mia MB, (2022) Enhanced Root Morphogenesis in Non-legumes as Induced by Rhizobacteria *Bacillus* spp. In *Bacilli in Agrobiotechnology: Plant Stress Tolerance, Bioremediation, and Bioprospecting* (pp. 151-168). Cham: Springer International Publishing.

- Micallef SA, Channer S, Shiaris MP, Colon-Carmona A, (2009) Plant age and genotype impact the progression of bacterial community succession in the *Arabidopsis* rhizosphere. *Plant Signal. Behav.* 4, 777–780. doi: 10.1093/jxb/erp053
- Mickelbart MV, Hasegawa PM, Bailey-Serres J, (2015) Genetic Mechanisms of Abiotic Stress Tolerance That Translate to Crop Yield Stability. *Nature Reviews Genetics*, 16, 237-251
- Moon YS, Ali S, (2022) Isolation and identification of multi-trait plant growth-promoting rhizobacteria from coastal sand dune plant species of Pohang beach. *Folia Microbiologica*, 67(3), 523-533.
- Moreno-Galván A, Romero-Perdomo FA, Estrada-Bonilla G, Meneses CHSG, Bonilla RRJM, (2020) Dry-caribbean *Bacillus* spp. strains ameliorate drought stress in maize by a strain-specific antioxidant response modulation. *Microorganism* 8, 823
- Morgenstein E, Okon Y, (1987) Promotion of plant growth and NO₃ – and R+ uptake in *Sorghum bicolor* × *Sorghum sudanense* inoculated with *Azospirillum brasilense* Cd. *Arid Soil Res. Rehabil.*, 1: 211-217
- Mpanga IK, Nkebiwe PM, Kuhlmann M, Cozzolino V, Piccolo A, Geistlinger J, Berger N, Ludewig U, Neumann G, (2019) The Form of N Supply Determines Plant Growth Promotion by P-Solubilizing Microorganisms in Maize. *Microorganisms*. 7(2):38. <https://doi.org/10.3390/microorganisms7020038>
- Mubeen M, Bano A, Ali B, Islam ZU, Ahmad A, Hussain S, Nasim W, (2021) Effect of plant growth promoting bacteria and drought on spring maize (*Zea mays* L.). *Pak. J. Bot.* 53(2), 731-739.
- Murphy J, and Riley JP, (1962) A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36. [http://dx.doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Musilova L, Ridl J, Polivkova M, Macek T, Uhlik O, (2016) Effects of secondary plant metabolites on microbial populations: changes in community structure and metabolic activity in contaminated environments. *Int. J. Mol. Sci.* 17:1205. doi: 10.3390/ijms17081205

- Nagel R, Bieber JE, Schmidt-Dannert MG, Nett RS, Peters RJ, (2018) A third class: Functional gibberellin biosynthetic operon in beta-proteobacteria. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2916.
- Nakashima K, Takasaki H, Mizoi J, Shinozaki K, Yamaguchi-Shinozaki K, (2012) NAC transcription factors in plant abiotic stress responses. *Biochem Biophys Acta* 1819,2: 97-103
- Nagy J (2007) *Kukoricatermesztés*. Akadémiai Kiadó. Budapest. 42–276
- Naseem H, Ahsan M, Shahid MA, Khan N, (2018). Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance. *J. Basic Microbiol.* 58, 1009–1022
- Nezarat S, Gholami A, (2009) Screening Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Improving Seed Germination, Seedling Growth and Yield of Maize. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 12, 26-32
- Nishad R, Ahmed T, Rahman VJ, Kareem A, (2020) Modulation of plant defense system in response to microbial interactions. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1298. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01298>
- Niu X, Song L, Xiao Y, Ge W, (2018) Drought-Tolerant plant growth-promoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. *Front. Microbiol.* 8:2580
- Noumavo PA, Kochoni E, Didagbé YO, Adjanohoun A, Allagbé M, Sikirou R, Gachomo EW, Kotchoni SO, Baba-Moussa L, (2013) Effect of Different Plant Growth Promoting Rhizobacteria on Maize Seed Germination and Seedling Development. *American Journal of Plant Sciences*.4: 1013-1021
- Nyiri LM (1997) *Az aszálykárók mérséklése*. Mezőgazda Kiadó. Budapest. 156
- Oliveira TRA, de Carvalho HWL, Nascimento M, Costa EFN, do Amaral Junior AT, Gravina GDA, de Carvalho Filho JLS, (2018) The Eberhart and Russel's Bayesian method used as an instrument to select maize hybrids. *Euphytica*, 214, 1-9.
- Ortíz-Castro R, Valencia-Cantero E, López-Bucio J, (2008) Plant growth promotion by *Bacillus megaterium* involves cytokinin signalling. *Plant Signal Behaviour*, 3(4): 263-265

- Ortiz-Castro R, Campos-García J, López-Bucio J, (2020) *Pseudomonas putida* and *Pseudomonas fluorescens* influence *Arabidopsis* root system architecture through an auxin response mediated by bioactive cyclodipeptides. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(1), 254-265.
- Osugi A, Sakakibara H, (2015) Q&A: How do plants respond to cytokinins and what is their importance?. *BMC biology*, 13(1), 1-10.
- Nguyen C, Yan W, Le Tacon F, Lapeyrie F, (1992). Genetic variability of phosphate solubilizing activity by monocaryotic and dicaryotic mycelia of the ectomycorrhizal fungus *Laccaria bicolor* (Maire) P.D. Orton. *Plant Soil* 143: 193-199
- Özdoğan DK, Akçelik N, Akçelik M, (2022) Genetic diversity and characterization of plant growth-promoting effects of bacteria isolated from rhizospheric soils. *Curr Microbiol* 79:132
- Paço A, Da-Silva JR, Torres DP, Glick BR, Brígido C, (2020) Exogenous ACC deaminase is key to improving the performance of pasture legume-rhizobial symbioses in the presence of a high manganese concentration. *Plants*, 9, 1630. <https://doi.org/10.3390/plants9121630>
- Pal KK, Tilak KVBR, Saxena AK, Dey R, Singh CS, (2001) Suppression of maize root diseases caused by *Machrophomina phaseolina*, *Fusarium miniliforme* and *Fusarium graminearum* by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiol. Res.*, 156: 209-223
- Pal P, Ansari SA, Jalil SU, Ansari MI, (2023) Regulatory role of phytohormones in plant growth and development. In *Plant Hormones in Crop Improvement* (pp. 1-13). Academic Press.
- Pandey RK, Maranville JW, Chetima MM (2000) Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. *Agric Water Manage* 46:15–27
- Pandey A, Trivedi P, Kumar B, Palni LMS, (2006) Characterization of a Phosphate Solubilizing and Antagonistic Strain of *Pseudomonas putida* (B0) Isolated from a Sub-Alpine Location in the Indian Central Himalaya. *Current Microbiology* volume 53: 102–107

- Pandya ND, Desai PV, (2014) Screening and characterization of GA3 producing *Pseudomonas monteilii* and its impact on plant growth promotion. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 3(5): 110-115
- Papp S. (Szerk.) (2011) Néhány fém környezeti kémiája. *Környezeti kémia. Környezetmérnöki tudástá. 9. kötet. Pannon Egyetem, Veszprém.* 219-246
- Park SH, Elhiti M, Wang H, Xu A, Brown D, Wang A, (2017) Adventitious root formation of in vitro peach shoots is regulated by auxin and ethylene. *Scientia Horticulturae*, 226, 250-260.
- Parnell JJ, Berka R, Young HA, Sturino JM, Kang Y, Barnhart DM, Dileo MV (2016) From the lab to the farm: An industrial perspective of plant beneficial microorganisms. *Front. Plant Sci.* 7, 1110
- Parray JA, Jan S, Kamili AN, Qadri RA, Egamberdieva D, Ahmad P, (2016) Current perspectives on plant growth-promoting rhizobacteria. *J. Plant Growth Regul.* 35, 877–902.
- Parádi I, (2013) Növényi szimbiózisok élettana. In: Fodor F. (szerk.): A növényi anyagcsere élettana. ELTE Eötvös kiadó, Budapest, 371 p., 349-371. p.
- Patra D, Mandal S, (2022) Non-rhizobia are the alternative sustainable solution for growth and development of the nonlegume plants. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews*, 1-30.
- Patten CL, Glick BR, (2002) Regulation of indoleacetic acid production in *Pseudomonas putida* GR12-2 by tryptophan and the stationary-phase sigma factor RpoS. *Canadian J Microbiol*, 48: 635-642
- Paul D, Sinha SN, (2013) Phosphate solubilization potential and phosphatase activity of some bacterial strains isolated from thermal power plant effluent exposed water of river Ganga. *CIBTech J Microbiol*, 2(3), 1-7.
- Penrose DM, Glick BR, (2003) Methods for isolating and characterizing ACC deaminase-containing plant growth- promoting rhizobacteria. *Plant and soil*, 118: 10-15
- Pervez HZ, Srinivasan G, Cordova HS, Sanchez C (2004) Gains from improvement for mid-season drought tolerance in tropical maize (*Zea mays* L.). *Field Crop Res* 89:135–152

Pethő M. (1998) A mezőgazdasági növények élettana. ISBN 9630579456. Akadémiai Kiadó ZRt. Budapest

Picoli MM, Paschetto JVG, Muraoka CY, Milani KML, Marin FBB, Souchie EL, Tezotto T, (2022) Combination of Azospirillum and Bradyrhizobium on inoculant formulation improve nitrogen biological fixation in soybean. *Journal of Agricultural Science*, 14(4), 145.

Ponmurugan P, Gopi C, (2006) In vitro production of growth regulators and phosphatase activity by phosphate solubilizing bacteria. *Afr J Biotechnol* 5(4):348–350

Quinn JP, Kulakova AN, Cooley N, (2020) New ways to break an old bond: the bacterial carbon-phosphorus hydrolases and their role in biogeochemical phosphorus cycling. *Environ Microbiol* 9(10):2392–2400

Raj A, Jhariya MK, Khan N, Banerjee A, Meena RS, (2021) Ecological Intensification for Sustainable Development. In: Jhariya, M.K., Meena, R.S., Banerjee, A. (eds) *Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3_5

Rehman, A., Ullah, A., Nadeem, F., Farooq, M. (2019). Sustainable Nutrient Management. In: Farooq, M., Pisante, M. (eds) *Innovations in Sustainable Agriculture*. Springer, Cham.

Revilla P, Malvar RA, Abuin MC, Ordás B, Soengas P, Ordás A, (2000) Genetic background effect on germination of su1 maize and viability of the su1 allele. *Maydica*, 45: 109-111

Ribaut JM, Betran J, Monneveux P, Setter T, (2009) Drought Tolerance in Maize. In: Bennetzen, J. - Hake, S.: Eds., *Handbook of Maize: Its Biology*, Springer, New York, 311-344

Richardson AE, (2001): Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorous by plants. *Aust J Plant Physiol*, 28: 897-906

Robertson MJ, Fukai S, Ludlow MM, Hammer GL, (1993) Water Extraction by Grain Sorghum in a Sub-Humid Environment. II. Extraction in Relation to Root Growth. *Field Crops Research*, 33, 99-112

- Rodríguez H Fraga R, (1999) Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17(4): 319-339
- Roskova Z, Skarohlid R, Mcgachy L, (2022) Siderophores: an alternative bioremediation strategy? *Sci Total Environ* 819:153144. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153144>
- Rovira AD, Bowen GD, Foster RC, (1983) The significance of rhizosphere microflora and mycorrhizas in plant nutrition. In' *Encyclopaedia of Plant Physiology*, New series (A. Launchli and R.L. Bielski, Eds), 15A: 61-89. Springer Verlag, Berlin
- Ruzzi M, Aroca R, (2015) Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 124-134.
- Ryu CM, (2004) Bacterial volatiles induce systemic resistance in *Arabidopsis*. *Plant Physiol* 134:1017–1026
- Saghafi D, Delangiz N, Lajayer B, Ghorbanpour M (2019) An overview on improvement of crop productivity in saline soils by halotolerant and halophilic PGPRs. *3 Biotech*. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1799-0>
- Sandhya V, Ali SKZ, Grover M, Reddy G, Venkateswarlu B, (2009) Alleviation of drought stress effects in sunflower seedlings by the exopolysaccharides producing *Pseudomonas putida* strain GAP-P45. *Biology and Fertility of Soils*. 46: 17–26
- Sandhya, V, Ali, SK. Z., Grover, M., Reddy, G. – Venkateswarlu, B. (2010): Effect of plant growth promoting *Pseudomonas* spp. on compatible solutes, antioxidant status and plant growth of maize under drought stress. *Plant Growth Regulation* volume 62: 21–30
- Saleem M, Arshad M, Hussain S, Bhatti AS, (2007) Perspective of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) containing ACC deaminas in stress agriculture. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 34: 635-648
- Saleem S, Iqbal A, Ahmed F, Ahmad M, (2021) Phytobeneficial and salt stress mitigating efficacy of IAA producing salt tolerant strains in *Gossypium hirsutum*. *Saudi journal of biological sciences*, 28(9), 5317-5324.
- Salvo LPD, Cellucci GC, Carlino ME, Salamone IEG, (2018) Plant growth-promoting rhizobacteria inoculation and nitrogen fertilization increase maize (*Zea*

mays L.) grain yield and modified rhizosphere microbial communities. *Appl Soil Ecol* 126: 113–120.

Sarkar B, Kumar C, Pasari S, Goswami B, (2022) Review On *Pseudomonas Fluorescens*: A Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *Journal of Positive School Psychology*, 2701-2709.

Sarma SJ, Brar SK, LeBihan Y, (2016) Potential application of biohydrogen production liquid waste as phosphate solubilizing agent-a study using soybean plants. *Appl Biochem Biotech* 178:865–875

Sayyed RZ, Seifi S, Patel PR, Shaikh SS, Jadhav HP, El Enshasy H, (2019) Siderophore production in groundnut rhizosphere isolate, *Achromobacter* sp. RZS2 influenced by physicochemical factors and metal ions. *Environ. Sustain.* 2, 117–124.

Sárdi Km (1999): A kálium szerepe a növények életében. [In: Fülek Gy. (szerk) Tápanyag–gazdálkodás] *Mezőgazda Kiadó*. Budapest. 51–57

Sárvári M, Pepó P, (2014) Effect of Production Factors on Maize Yield and Yield Stability. *Cereal Research Communications* 42(4): 710–720

Schlesinger WH, Bernhardt ES, (2013) Chapter 12 – The Global Cycles of Nitrogen and Phosphorus. *Biogeochemistry. An Analysis of Global Change*. 445–467

Shah AN, Abbas A, Waqas MM, Nawaz M, Ali M, Fiaz S, (2023) Genetic and molecular factors modulating phosphorus use efficiency in plants. Cham: Springer.

Sharma S, Compant S, Ballhausen MB, (2020) The interaction between *Rhizoglyphus irregulare* and hyphae attached phosphate solubilizing bacteria increases plant biomass of *Solanum lycopersicum*. *Microbiol Res* 240:126556

Silva U, Cuadros-Orellana S, Silva D, (2021) Genomic and phenotypic insights into the potential of rock phosphate solubilizing bacteria to promote millet growth in vivo. *Front Microbiol* 11:574550

Singh S, Singh G, Singh P, Singh N, (2008) Effect of water stress at different stages of grain development on the characteristics of starch and protein of different wheat varieties. *Food Chem.* 108:130–139

- Singh H, Singh Z, Kashyap R, Yadav SR, (2023) Lateral root branching: evolutionary innovations and mechanistic divergence in land plants. *New Phytologist*, 238(4), 1379-1385.
- Singh S, Jagota N, Kaur H, Kaur R, Kaur G, Sandhu S, Sharma A (2023), Deciphering behavioral changes in maize plants in a quest to identify species specific plant growth promoting rhizobacteria. *Total Environment Research Themes*, 6, 100043.
- Shahzad A, Gul H, Ahsan M, (2023) Comparative Genetic Evaluation of Maize Inbred Lines at Seedling and Maturity Stages Under Drought Stress. *J Plant Growth Regul* 42, 989–1005
- Sheoran S, Kaur Y, Kumar S, Shukla S, Rakshit S and Kumar R (2022) Recent Advances for Drought Stress Tolerance in Maize (*Zea mays* L.): Present Status and Future Prospects. *Front. Plant Sci.* 13:872566. doi: 10.3389/fpls.2022.872566
- Shirinbayan S, Khosravi H, Malakouti MJ, (2019) Alleviation of drought stress in maize (*Zea mays*) by inoculation with *Azotobacter* strains isolated from semi-arid regions. *Appl. Soil Ecol.* 133, 138–145
- Shivasakthi S, Kanchana D, Usharani G, Saranraj P, (2013) Production of Plant Growth Promoting Substance by *Pseudomonas fluorescens* and *Bacillus subtilis* Isolates from Paddy Rhizosphere Soil of Cuddalore District, Tamil Nadu, India. *International Journal of Microbiological Research*, 4(3): 227-233
- Shrivastava M, Srivastava PC, D'Souza SF, (2018) Phosphate-solubilizing microbes: diversity and phosphates solubilization mechanism. In: Meena V (ed) *Role of rhizospheric microbes in soil*. Springer, Singapore, pp 137–165
- Singh P, Chauhan PK, Upadhyay SK, Singh RK, Dwivedi, P, Wang J, Jain D, Jiang M, (2022) Mechanistic insights and potential use of siderophores producing microbes in Rhizosphere for mitigation of stress in plants grown in degraded land. *Frontiers in Microbiology*, 13, 898979. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.898979>
- Skonieski FR, Viégas J, Martin TN, Mingotti CCA, Naetzold S, Tonin TJ, (2019) Effect of nitrogen topdressing fertilization and inoculation of seeds with *Azospirillum brasilense* on corn yield and agronomic characteristics. *Agronomy* 9: 812.

- Singh JS, Pandey VC, Singh DP, (2011) Efficient soil microorganisms: a new dimension for sustainable agriculture and environmental development. *Agric Ecosyst Environ* 140: 339–353.
- Smith DL, Gravel V, Yergeau E, (2017) Editorial: signaling in the phytomicrobiome. *Front. Plant Sci.* 8:611. doi: 10.3389/fpls.2017.00611
- Song OR, Lee SJ, Lee YS, Lee SC, Kim KK, Choi YL, (2008) Solubilization of insoluble inorganic phosphate by *Burkholderia cepacia* DA23 isolated from cultivated soil. *Brazilian Journal of Microbiology*, 39, 151-156.
- Spaepen S, Dobbelaere S, Croonenborghs A, Vanderleyden J, (2008) Effects of *Azospirillum brasilense* indole-3-acetic acid production on inoculated wheat plants. *Plant Soil* 312, 15–23
- Suralta RR, Inukai Y, Yamauchi A, (2010) Dry matter production in relation to root plastic development, oxygen transport, and water uptake under transient soil moisture stresses. *Plant Soil* 332: 87–104
- Sudhakar P, Chattopadhyay GN, Gangwar SK, Ghosh JK, (2000) Effect of foliar application of *Azotobacter*, *Azospirillum* and *Beijerinckia* on leaf yield and quality of mulberry (*Morus alba*). *J of Agr. Sci.*, 134: 227-234
- Swarnalakshmi K, Yadav V, Tyagi D, Dhar DW, Kannepalli A, Kumar S, (2020) Significance of plant growth promoting rhizobacteria in grain legumes: Growth promotion and crop production. *Plants* 9, 1596
- Szabó IM. (2008) *Az általános talajtan biológiai alapjai*. Mundus Magyar Egyetemi Kiadó, Budapest. 29-146
- Szegi J, Vörös I. (1993) *Az arbuskuláris szimbiózis néhány problémája*. *Agrokémia és Talajtan, Akadémiai Kiadó, Budapest.* 42. 391-407
- Szűcs M, Szűcs M-né. (2003) *Művelt talajok oldható P- és K-tartalmának változásai*. *Agrokémia és Talajtan.* 52. 1-2. Akadémiai Kiadó, Budapest. 53-66
- Tardieu FT, Simonneau T, (1998) Variability among Species of Stomatal Control under Fluctuating Soil Water Status and Evaporative Demand: Modeling Isohydric and Anisohydric Behaviors. *Journal of Experimental Botany*, 49, 419-432

Tariq MR, Shaheen F, Mustafa S, ALI S, Fatima A, Shafiq M, Safdar W, Sheas MN, Hameed A, Nasir MA. 2022. Phosphate solubilizing microorganisms isolated from medicinal plants improve growth of mint. PeerJ 10:e13782 <https://doi.org/10.7717/peerj.13782>

Thankuria D, Talukdar NC, Goswami C, Hazarika S, Boro RC, Khan MR, (2004) Characterization and screening of bacteria from rhizosphere of rice grown in acidic soils of Assam. Curr. Sci., 86: 978-985

Thomas L, Singh I, (2019) Microbial biofertilizers: Types and applications. In Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment; Giri, B., Prasad, R., Wu, Q.S., Varma, A., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, pp. 1–19

Timmusk S, Wagner EGH, (1999) The plant growth-promoting rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* induces changes in *Arabidopsis thaliana* gene expression, a possible connection between biotic and abiotic stress responses. Mol Plant-Microbe Inter. 12:951–959

Tóth B, Kovács B, Lévai L, Veres SZ. (2015) The big question: use of agriculture or not? In: Plant KK, Sinha S, Bajpai S, Govil JN, (Eds) Fertilizer Technology, Vol. 2.: Biofertilizers. USA: Studium Press LLC, 2015. pp. 132-147

Tye A, Siu F, Leung T, (2002) Molecular cloning and the biochemical characterization of two novel phytases from *B. subtilis* 168 and *B. licheniformis*. Appl Microbiol Biot 59(2–3):190–197

Turner TR, James EK, Poole PS, (2013) The plant microbiome. Genome Biol. 14:209. doi: 10.1186/gb-2013-14-6-209

Ullah A, Akbar A, Luo Q, Khan AH, Manghwar H, Shaban M, Yang X, (2019) Microbiome diversity in cotton rhizosphere under normal and drought conditions. Microb. Ecol. 77, 429–439

Upadhyay SK, Srivastava AK, Rajput VD, Chauhan PK, Bhojiya AA, Jain C, Sharma DB, Minkina T, (2022) Root exudates: Mechanistic insight of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable crop production. Frontiers in Microbiology. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.916488>

Upadhyay SK, Rajput VD, Kumari A, Espinosa-Saiz D, Menendez E, Minkina T, Mandzhieva S, (2023) Plant growth-promoting rhizobacteria: A potential bio-asset

for restoration of degraded soil and crop productivity with sustainable emerging techniques. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(12), 9321-9344.

Uzma M, Iqbal A, Hasnain S, (2022) Drought tolerance induction and growth promotion by indole acetic acid producing *Pseudomonas aeruginosa* in *Vigna radiata*. *PloS one*, 17(2), e0262932.

Vacheron J, Desbrosses G, Bouffaud ML, Touraine B, Moëgne-Loccoz Y, Muller D, Legendre L, Wisniewski-Dyé F, Prigent-Combaret C, (2013) Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Front. Plant Sci.* 4, 356

Vaikuntapu PR, Dutta S, Samudrala RB, Rao VRVN, Kalam S, Podile AR (2014) Preferential promotion of *Lycopersicon esculentum* (tomato) growth by plant growth promoting bacteria associated with tomato. *Indian J. Microbiol.* 54, 403–412

Vaghela N, Gohel S, (2023) Medicinal plant - associated rhizobacteria enhance the production of pharmaceutically important bioactive compounds under abiotic stress conditions. *Journal of Basic Microbiology*, 63(3-4), 308-325.

Vanderlinde EM, Harrison JJ, Muszynski A, Carlson RW, Turner RJ, Yost CK, (2010) Identification of a novel ABC-transporter required for desiccation tolerance, and biofilm formation in *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* 3841. *FEMS Microbiol Ecol* 71:327–340

Vasseur-Coronado M, du Boulois HD, Pertot I, Puopolo G, (2021) Selection of plant growth promoting rhizobacteria sharing suitable features to be commercially developed as biostimulant products. *Microbiological Research*, 245, 126672.

Vazquez P, Holguin G, Puente ME, (2000) Phosphate-solubilizing microorganisms associated with the rhizosphere of mangroves in a semiarid coastal lagoon. *Biol Fert Soils* 30(5–6):460–468

Vejan P, Abdullah R, Khadiran T, Ismail S, Nasrulhaq Boyce A, (2016) Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability - A review. *Molecules* 21, 573.

Veres SZ, Lévai L, Marozsán M, Gajdos É, (2009) The effect of plant growth promoting bacteria containing fertilizer to the photosynthetic activity of maize seedlings. In: Giametta G, Zimbalatti G (Eds) *Proceedings of XXXIII CIOSTA CIGIR V Conference and IUFRO (Unit 3.06.00)*

- Vessey JK, (2003) Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers, *Plant and Soil*, 255: 571-586
- Vlot AC, Rosenkranz M, (2022) Volatile compounds—the language of all kingdoms?. *Journal of Experimental Botany*, 73(2), 445-448.
- Vurukonda SSKP, Vardharajula S, Shrivastava M, SkZ A, (2016) Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiol. Res.* 184, 13–24
- Wang F, Shi N, Jiang R, (2016) In situ stable isotope probing of phosphate-solubilizing bacteria in the rhizosphere. *J Exp Bot* 67(6):1689–1701
- Wang LJ, Sheng MY, Li S, Wu J, (2021) Patterns and dynamics of plant diversity and soil physical-chemical properties of the karst rocky desertification ecosystem, SW China. *Pol. J. Environ. Stud.* 30, 1393–1408. doi: 10.15244/pjoes/124225
- Wang Y, Zhang G, Huang Y, Guo M, Song J, Zhang T, Liu H, (2022) A potential biofertilizer—Siderophilic bacteria isolated from the rhizosphere of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*. *Frontiers in Microbiology*, 13, 870413.
- Wang Z, Wang Y, Du Q, Yan P, Yu B, Li WX, Zou CQ, (2023) The auxin signaling pathway contributes to phosphorus-mediated zinc homeostasis in maize. *BMC Plant Biol.* 23(1):1–13. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04039-8>.
- Weemstra M, Valverde-Barrantes OJ, McCormack ML, Kong D, (2022) Root traits and functioning: from individual plants to ecosystems. *Authorea Preprints*.
- Whitehead PG, Crossman J, (2012) Macronutrient cycles and climate change: Key science areas and an international perspective. *Science of the Total Environment* 434. 13-17
- Winston ME, Hampton-Marcell J, Zarrasaindia I, Owens SM, Moreau CS, Gilbert JA, (2014) Understanding cultivar-specificity and soil determinants of the cannabis microbiome. *PLoS One* 9:e99641. doi: 10.1371/journal.pone.0099641
- Woo OG, Kim H, Kim JS, Keum HL, Lee KC, Sul WJ, (2020). *Bacillus subtilis* strain GOT9 confers enhanced tolerance to drought and salt stresses in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica campestris*. *Plant Physiol. Biochem.* 148, 359–367

- World Bank, (2005) Agriculture Investment Sourcebook. Agriculture and Rural Development. World Bank, Washington DC.
- Wu SC, Cao ZH, Li ZG, Cheung KC, Wong MH, (2005) Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: A greenhouse trial. *Geoderma*, 125: 155-166
- Wu QS, Li GH, Zou YN, (2011) Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient acquisition of peach (*Prunus persica* (L.) Batsch) seedlings. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 21(4): 746-750
- WU YW, Bo ZHAO, LI XL, LIU QL, FENG DJ, LAN TQ, YUAN JC, (2022) Nitrogen application affects maize grain filling by regulating grain water relations. *Journal of Integrative Agriculture*, 21(4), 977-994.
- Xie J, Yan Z, Wang G, (2021) A bacterium isolated from soil in a karst rocky desertification region has efficient phosphate-solubilizing and plant growth-promoting ability. *Front Microbiol* 11:625450
- Yang B, Wu S, Yan Z, (2022) Effects of Climate Change on Corn Yields: Spatiotemporal Evidence from Geographically and Temporally Weighted Regression Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(8), 433.
- Yankey R, Omoor IN, Karanja JK, Wang L, Urga RT, Fang CH, Lin Z, (2022) Metabolic properties, gene functions, and biosafety analysis reveal the action of three rhizospheric plant growth-promoting bacteria of Jujuncao (*Pennisetum giganteum*). *Environmental Science and Pollution Research*, 29(25), 38435-38449.
- Yi Y, Huang W, Ge Y, (2007) Exopolysaccharide: a novel important factor in the microbial dissolution of tricalcium phosphate. *World J Microb Biot* 24(7):1059–1065
- Zahir AZ, Arshad M, Frankenberger WT Jr, (2004) Plant growth promoting rhizobacteria: application and perspectives in Agriculture. *Adv Agron*, 81: 97-168
- Zaidi A, Khan M, Ahemad M, (2009) Plant growth promotion by phosphate solubilizing bacteria. *Acta Microbiol Imm H* 56(3):263–284
- Zhai X, Lu P, Zhang R, Bai W, Zhang WH, Chen J, Tian Q, (2023) Mowing accelerates phosphorus cycling without depleting soil phosphorus pool. *Ecol Appl*. <https://doi.org/10.1002/eap.2861>.

Zhang R, Vivanco JM, and Shen Q, (2017) The unseen rhizosphere root-soil-microbe interactions for crop production. *Curr. Opin. Microbiol.* 37, 8–14. doi: 10.1016/j.mib.2017.03.008

Zhang WP, Li ZX, Gao SN, Yang H, Xu HS, Yang X, Li L, (2023a) Resistance vs. surrender: Different responses of functional traits of soybean and peanut to intercropping with maize. *Field Crops Res.* 291:108779. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108779>.

Zhang DX, Gao Y, Yuan Q, Zhang W, Jie H, Ma Z, Xu Y, Rao W, Zhang Y, Wang D, Liu S, (2023b) The long-term effect of biochar amendment on soil fertility and phosphorus availability in two calcareous soils. *SSRN Prepr.* <https://doi.org/10.2139/ssrn.4440742>

Zarei T, Moradi A, Kazemeini SA, Farajee H, Yadavi A, (2019) Improving sweet corn (*Zea mays* L. var *saccharata*) growth and yield using *Pseudomonas fluorescens* inoculation under varied watering regimes. *Agricultural Water Manag.* 226:105757

Zeng Q, Wu X, Wen X, (2016) Effects of soluble phosphate on phosphate-solubilizing characteristics and expression of *gcd* gene in *Pseudomonas frederiksbergensis* JW-SD2. *Curr Microbiol* 72(2):198–206

Zeng Q, Ding X, Wang J, Han X, Iqbal HMN, Bilal M, (2022) Insight into soil nitrogen and phosphorus availability and agricultural sustainability by plant growth-promoting rhizobacteria. *Environ Sci Pollut Res* 29:45089–45106. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20399-4>Return to ref 2022 in article

9.2 M2. Ábrák jegyzéke

1. ábra: A világ 10 legnagyobb kukorica termelő országának átlaghozama 2021-ben (FAOSTAT 2022)	11
2. ábra: Az EU-27 5 legnagyobb kukorica termelő országának átlaghozama 2021-ben (FAOSTAT 2022)	13
3. ábra: A kukorica termőterülete 2012-2022-ig (FAOSTAT 2022, KSH 2023)	14
4. ábra: A kukorica termelt mennyisége és exportja 2012-2021-ig (FAOSTAT 2022)	15
5. ábra: A terméshozamok és az eladási átlagárak 2012-2022-ig (FAOSTAT 2022, KSH 2023).....	15
6. ábra: A PGPR, a növények és a kórokozók közötti kölcsönhatások (Basu és mtsai. 2021).....	20
7. ábra: A PGPR-ok foszfát-szolubilizáló mechanizmusa (Zeng és mtsai. 2022)	27
8. ábra: A PGPR-ok által közvetített mechanizmusok a szárazságstressz enyhítésére (Ahmad és mtsai. 2022).....	36
9. ábra: Foszfát-mobilizációra utaló feltisztulási zónák a 7 napos PGPR baktérium telepek körül	50
10. ábra: A főkomponens analízis eredménye a vizsgált tulajdonságok adatai alapján	52
11. ábra: A növények koleoptil hossza, radikula hossza és csírázási vigor indexe a genotípus - baktérium interakció hatására	56
12. ábra: A főkomponens analízis eredménye a vizsgált tulajdonságok adatai alapján	57
13. ábra: A növények vízigénye optimális és stresszelt körülmények között	58
14. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények növénymagassága optimális vízellátottság és vízmegvonás során	59
15. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények gyökér nedves tömege optimális vízellátottság és vízmegvonás során.....	61
16. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények hajtás nedves tömege optimális vízellátottság és vízmegvonás során.....	62

17. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények hajtás száraz tömege optimális vízellátottság és vízmegvonás során	64
18. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények vízhasznosítási együtthatója optimális vízellátottság és vízmegvonás során.....	65
19. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények nedves tömeg/száraz tömeg aránya optimális vízellátottság és vízmegvonás során.....	67
20. ábra: A különböző baktériumkezelésben részesített, 50%-os nővirágzásban és tejes érésben lévő kukorica növények szárazanyag-tartalma optimális vízellátottság és vízmegvonás során.....	68
21. ábra: A főkomponens analízis eredménye a vizsgált tulajdonságok adatai alapján	70
22. ábra: A növények szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és szem szárazanyag-tartalma genotípus - oltóanyag interakció hatására	75
23. ábra: A növények szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és szem szárazanyag-tartalma évhatás - oltóanyag interakció hatására.....	77
24. ábra: A növények szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma genotípus - oltóanyag interakció hatására	82
25. ábra: A növények szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma évhatás - oltóanyag interakció hatására.....	84
26. ábra: A főkomponens analízis eredménye a vizsgált tulajdonságok adatai alapján	85

9.3 M3. Táblázatok jegyzéke

1. táblázat: A világ 10 legnagyobb kukorica termelő országának termőterülete 1000 ha-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)	9
2. táblázat: A világ 10 legnagyobb kukorica termelő országának termésmennyisége 1000 t-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)	10
3. táblázat: A világ 10 legnagyobb kukorica termelő országának átlaghozama kg/ha-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022).....	11
4. táblázat: Az EU-27 5 legnagyobb kukorica termelő országának termőterülete 1000 ha-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)	12
5. táblázat: Az EU-27 5 legnagyobb kukorica termelő országának termésmennyisége 1000 t-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)	12
6. táblázat: Az EU-27 5 legnagyobb kukorica termelő országának átlaghozama kg/ha-ban kifejezve, 2012-2021 (FAOSTAT 2022)	13
7. táblázat: Biotrágya alapját képezhető mikroorganizmusokkal végzett vizsgálatok (Basu és mtsai. 2021)	22
8. táblázat: A foszfát-mobilizálásban részt vevő szerves savak, amelyeket PSB-k állítanak elő (Zeng és mtsai. 2022)	28
9. táblázat: A PGPR hatására a gyökér morfológiájának, a növények növekedésének és fejlődésének változása szárazságstressz alatt (Ahmad és mtsai. 2022)	35
10. táblázat: A kísérleti terület talajának jellemzői 2019-2021-ig	46
11. táblázat: Az átlaghőmérséklet és a csapadék mennyisége a kukorica tenyészidejében 2019-2021-ig.....	48
12. táblázat: A baktériumok kolónia átmérője, feltisztulási zóna átmérője, foszfát-mobilizáló indexe és az oldható szerves foszfát koncentrációja.....	51
13. táblázat: A csíranövények koleoptil hossza, radikula hossza és csírázási vigor indexe a genotípus tényező hatására	53
14. táblázat: A csíranövények koleoptil hossza, radikula hossza és csírázási vigor indexe a baktérium tényező hatására.....	54
15. Táblázat: A hibridek szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és a szem szárazanyag-tartalma a genotípus tényező hatására	71
16. táblázat: A hibridek szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és a szem szárazanyag-tartalma az évhatás tényező hatására	72
17. táblázat: A hibridek szemtermés mennyisége, betakarításkori szemnedvessége és a szem szárazanyag-tartalma az oltóanyag tényező hatására	73

18. táblázat: A hibridek szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma a genotípus tényező hatására	79
19. táblázat: A hibridek szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma az évhatás tényező hatására	79
20. táblázat: A hibridek szem fehérjetartalma, szem olajtartalma és szem keményítőtartalma az oltóanyag tényező hatására	80

9.4 M4. A szántóföldi kísérlet lokációja és paraméterei

1. melléklet: A 3 éves szántóföldi kísérletben résztvevő hibridek és kombinált oltási kezelések

psz	K	psz	KD1	psz	KD2	psz	MLT
b101	GKT3213	b201	GKT3213	b301	GKT3213	b401	GKT3213
b102	GKT3385	b202	GKT3385	b302	GKT3385	b402	GKT3385
b103	GKT376	b203	GKT376	b303	GKT376	b403	GKT376
b104	GK Silostar	b204	GK Silostar	b304	GK Silostar	b404	GK Silostar

2. melléklet: A 2019-es szántóföldi kísérlet randomizációs és vetési térképe

	v		v		v		v		v		v		v		v		v			
	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓		
SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ		
SZ	b103	b104	b101	b102	SZ	b203	b204	b201	b202	SZ	b303	b304	b301	b302	SZ	b403	b404	b401	b402	
SZ	b104	b101	b102	b103	SZ	b204	b201	b202	b203	SZ	b304	b301	b302	b303	SZ	b404	b401	b402	b403	
SZ	b101	b102	b103	b104	SZ	b201	b202	b203	b204	SZ	b301	b302	b303	b304	SZ	b401	b402	b403	b404	
SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	
↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	
o																				

3. melléklet: A 2019-es szántóföldi kísérlet műholdképe (A) és diszpozíciója (B) Kiszomboron (46°10'52.66"E) (Google Earth 2023)



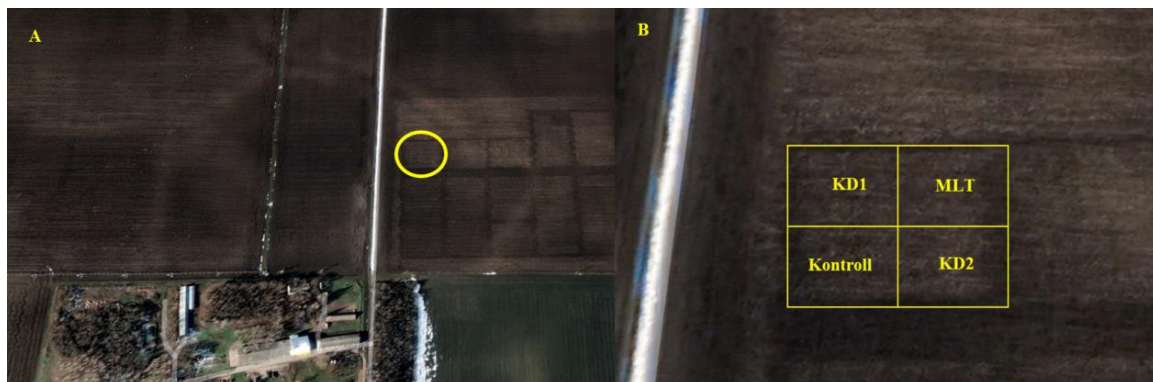
4. melléklet: A 2020 és 2021-es szántóföldi kísérlet randomizációs és vetési térképe

	v		v		v		v		v	
	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓	↓↓↓
SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ
SZ	b203	b204	b201	b202	SZ	b403	b404	b401	b402	SZ
SZ	b204	b201	b202	b203	SZ	b404	b401	b402	b403	SZ
SZ	b201	b202	b203	b204	SZ	b401	b402	b403	b404	SZ
SZ	b103	b104	b101	b102	SZ	b303	b304	b301	b302	SZ
SZ	b104	b101	b102	b103	SZ	b304	b301	b302	b303	SZ
SZ	b101	b102	b103	b104	SZ	b301	b302	b303	b304	SZ
SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ	SZ
↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑	↑↑↑
o		o		o		o		o		o

5. melléklet: A 2020-as szántóföldi kísérlet műholdképe (A) és diszpozíciója (B) Kiszomboron (46°11'8.37"E) (Google Earth 2023)



6. melléklet: A 2021-es szántóföldi kísérlet műholdképe (A) és diszpozíciója (B) Kiszomboron (46°11'27.93"E) (Google Earth 2023)



9.5 M5. Publikációk jegyzéke

Idegen nyelvű lektorált tudományos közlemények a dolgozat témakörében

Kálmán CD, Kálmán L, Szél S, Mórocz Salamon K, Nagy Z, Kiss E, Posta K, (2023) Assessment of the influence of soil inoculation on changes in the adaptability of maize hybrids. Cereal Research Communications, 1-17.

Kálmán CD, Nagy Z, Berényi A, Kiss E, Posta K, (2023) Investigating PGPR bacteria for their competence to protect hybrid maize from the factor drought stress. Cereal Research Communications, 1-22.

Magyar nyelvű lektorált tudományos közlemények a dolgozat témakörében

Kálmán CD, Kálmán L, Latos Cs, Pauk J, Bóna L, Nagy Z, (2021) Kukoricahibridek fiatalkori szárazságstresszre és talajtípusra adott reakciói üvegházban. Növénytermelés, 71. 2.

Magyar nyelvű ismeretterjesztő közlemények a dolgozat témakörében

Kálmán CD, Nagy Z, (2021) A kukorica vízhasznosítása, aszálytűrése. Agrofórum, 92. 26 p.

Konferencia kiadványok

Kálmán CD, Kálmán L, Móroczné S K, Nagy É, Nagy Z, Szél S (2018) Kukorica agrotechnikai kísérletek eredményei az elmúlt három évben. XXIV. Növénynevelési Tudományos Nap, Összefoglalók.

Kálmán CD, Szentgyörgyi A, Kiss E, (2018) Examination of the phosphate solubilizing ability of PGPR bacteria. Journal of Food Processing & Technology, Volume 9. 73 p., 55. p

Kálmán CD, Szentgyörgyi A, Kiss E, (2019) PGPR baktériumok foszfát-szolubilizáló képességének vizsgálata. XXV. Növénynevelési Tudományos Nap, Összefoglalók.

Nagy Z, **Kálmán CD**, Lantos Cs, Palágyi A, Palágyi A, Pauk J, Purgel Sz, Pugris T, Szakál M, Bóna L, (2019) Egyszerű digitális képanalízis alkalmazása kukorica növények szárazságtűrésének vizsgálatában. XXV. Növénynevelési Tudományos Nap, Összefoglalók.

10 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom a GINOP-2.2.1-15-2017-00042 és az ÚNKP-21-3 I-(II)-MATE-K/1301-4/2021 kódszámú programoknak, melyek szakmai támogatásával elkészülhetett ez a dolgozat.

Szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőimnek, Dr. Posta Katalinnak és Dr. Kiss Erzsébetnek, akik lehetővé tették PhD disszertációm elkészítését. A szükséges szakmai feltételek biztosítása mellett, közös pályázati együttműködéssel, hasznos tanácsokkal és építő jellegű kritikákkal segítették munkámat és szakmai fejlődésemet.

Köszönetet szeretnék mondani Dr. Szarka Béla, Wágner József és Mandák Attila Dávid ügyvezető igazgató uraknak, akik támogatták, hogy munkámat a Gabonakutató Nonprofit Közhasznú Kft-nél végezhessem.

Köszönet illeti Dr. Pauk Jánost, aki az úton elindított és tanácsaival támogatott a képzés során.

Köszönettel tartozom a Kukorica Nemesítési Osztály valamennyi munkatársának, különösen Muzsik Ferencnek és Süli Attilának, akik szakmai és baráti segítséggel vettek részt a szántóföldi és üvegházi kísérletek beállításában és gondozásában.

Külön szeretném megköszönni Dr. Szél Sándor és Dr. Nagy Zoltán osztályvezető uraknak a türelmet és a támogatást. Köszönettel tartozom Dr. Mórocz Sándornak, aki laboratóriumi körülményeket biztosított számomra a munkám során.

Köszönetem fejezem ki Berényi Attilának az analitikai vizsgálatok kivitelezésében nyújtott segítségével. Köszönöm Dr. Lantos Csaba és Búza Lajosné segítségét a tudományos publikációk elkészítésében.

Köszönettel tartozom feleségemnek Kálmánné Dr. Kiss Klaudia Andreának a támogatásáért, biztatásáért és türelméért. Gyermekeimnek Kálmán Adélnak és Kálmán Kornélnak a sok bátorító mosolyért.

Hálával tartozom Szüleimnek, Családtagjaimnak, Barátaimnak a támogatásukért és biztatásukért.

A dolgozatot édesapám, Kálmán Dániel emlékének ajánlom.