تأثیر باکتری‌های بومی شورپسند، قلیاپسند و شورقلیاپسند ریزوسفری بادام (*Prunus amygdalus* L.) برفراهمی عناصر غذایی در خاک‌های شور و سدیمی

مهرنوش اسکندری‌تربقان*[۱]، غلامحسین خلیلی‌طرقبه[۲]، عبدالحمید شرافتی[۳] و مسعود اسکندری تربقان[۴]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲)

چکیده

ریزجانداران مفید خاک با ایجاد روابط همزیستی با گیاه، موجب حفاظت گیاه از تنش؛ و با تبدیل و نگهداری عناصر در خاک، گیاه را تغذیه می‌کنند. این پژوهش در دو بخش ۱) جداسازی و خالص‌سازی ۵۵ جدایه شور، قلیا و شورقلیاپسند از ریزوسفر بادامستان‌های (*Prunus amygdalus* L.) استان خراسان‌رضوی و سپس بررسی برخی ویژگی‌های افزاینده رشد گیاهی جدایه‌ها در شرایط آزمایشگاهی برای انتخاب جدایه‌های برتر؛ ۲) تست شش جدایه برتر در مجاورت پایه بادام GN15 برای ارزیابی تأثیر آنها بر فراهمی عناصر فسفر، پتاسیم، آهن، روی و یون‌های کلر و سدیم در چهار خاک شور-سدیمی (شوری ۲، ۴، ۸ و ۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر، و SAR به‌ترتیب ۹/۶۹، ۱۴/۹۹، ۱۴/۲۱ و ۱۹/۷۲) اجرا شد. نتایج نشان داد میانگین تولید ویژگی‌های افزاینده رشد گیاه برای جدایه‌های قلیاپسند، شورقلیاپسند و شورپسند به‌ترتیب برای تولید ایندول‌تری‌استیک‌اسید (۲۱۳/۹۳، ۷۷/۱۳ و ۱۵/۹۸میلی‌گرم برلیتر)، حل‌کنندگی فسفات‌های معدنی (۱۲۷/۵۵، ۷۳/۹۹ و ۴۰/۱۹ میلی‌گرم برلیتر) و تولید اگزوپلی‌ساکاریدها (۵۷۸/۱۱ ، ۲۸۴/۵۴ و۳۵/۹۰ میلی‌گرم برلیتر) بود. بکارگیری باکتری‌ها موجب ثبات pH در محدوده ۷ تا ۷/۵ و کاهش چشمگیر هدایت الکتریکی خاک در شوری‌های بالا (۸ و ۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر) و افزایش اگزوپلی‌ساکاریدها شد. بیش‌ترین غلظت آنیون‌های فسفر و کلر خاک در تیمار قلیاپسندها مشاهده گردید؛ بیش‌ترین غلظت پتاسیم، آهن، روی و سدیم خاک تحت تأثیر باکتری‌های شورپسند بود. بیش‌ترین نسبت پتاسیم به سدیم درخاک به‌ترتیب در تیمار باکتری‌های شورپسندها (۱۵/۳)، قلیاپسندها (۱۱/۸) و شورقلیاپسندها (۹/۴) بدست آمد. انواع باکتری‌های بومی شوروقلیا در شوری بیش از ۸ دسی‌زیمنس‌برمتر و SAR بالاتر از ۱۵ کارایی بیش‌تری در تبدیل و نگهداری عناصر نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: انحلال فسفات نامحلول، بادام درختی، خاک شور-سدیمی، ریزمغذی‌ها، کلر

اسکندری تربقان م.، خلیلی طرقبه غ.، شرافتی ع.، اسکندری تربقان م. ۱۴۰۲. تأثیر باکتری‌های بومی شورپسند، قلیاپسند و شورقلیاپسند ریزوسفری بادام (*Prunus amygdalus* L.) برفراهمی عناصر غذایی در خاک‌های شور و سدیمی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲ شماره ۱. صفحه: ۳۸-۵۵.

۱-محقق، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران (مکاتبه‌کننده)

۲-دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳-مربی پژوهش، بخش تحقیقات علوم زراعی - باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

۴-مربی پژوهش، بخش تحقیقات علوم زراعی - باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

* پست الکترونیک: mehrnoosh.eskandary@gmail.com

مقدمه

شوری و قلیائیت خاک یکی از عوامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی در جهان است. یافتن روشی مناسب و اقتصادی در مدیریت تنش شوری چالش بزرگ پژوهشگران می‌باشد (Eskandari Torbaghan, 2017). بهره‌برداری از پتانسیل بیولوژیک خاک‌ها که می‌تواند حلالیت و تحرک عناصر را برای تغذیه مطلوب گیاهان فراهم نماید (Ebrahimi Karim Abad *et al.*, 2016) و نیز استفاده از باکتری‌های محرّک رشد یکی از راهکارهای مهم تعدیل اثرات شوری محسوب می‌شود (Khodadadi *et al.*, 2019).

در این میان، نتایج مطالعات مختلف نشان داده که ریزجانداران شور و قلیاپسند بومی خاک می‌توانند در افزایش تحمل گیاهان در برابر تنش شوری و قلیائیت مؤثر باشند (Khavazi *et al.*, 2013). این ریزجانداران در محیط‌های شور و قلیایی به شرایط شوری و pH بالا سازگار شده و برای رشد مطلوب به‌مقدار مشخصی نمک همانند کلریدسدیم و کربنات‌سدیم نیاز دارند (Venkateswarlu & Shanker, 2009). وجود باکتری‌های شور و قلیاپسند در خاک‌های شور و قلیا از طریق بهبود ساختمان خاک، حفظ چرخهٔ عناصرغذایی، تجزیهٔ مواد آلی، و بهبود حاصلخیزی خاک، شرایط خاک را بهبود می‌بخشند (Safdarian *et al.*, 2017). افزون بر این، اصلاح زیستی خاک با استفاده ازریزجانداران متحمل به شوری و قلیائیت برای اصلاح خاک‌های شور و قلیا در مقیاس وسیع به کار گرفته شده است (Mehrshad *et al.*, 2012). در سال‌های اخیر، مطالعه تنوع میکروبی در محیط‌هایی با نمک و pH زیاد در ایران (دریاچه‌های ارومیه، مهارلو و بختگان، آران و بیدگل و دریاچه حوض سلطان) و بسیاری از مناطق دیگر مورد توجه قرار گرفته است (Mehrshad Khodabakhsh *et al.*, 2011; *et al.*, 2012). در عین حال از دیدگاه علم کشاورزی و جنبه علم خاک، گستره این نوع مطالعات در محیط‌های خاکی به‌ویژه در ایران، اندک است.

دو باکتری شورپسند *آزوسپیریلیوم هالوپرافرنس*[1] و *آزوسپیریلوم برازیلنس*[2]، با ترشح گلایسین بتائین رشد گیاه و تثبیت نیتروژن را در شرایط تنش شوری تحریک نمودند (Hartman, 1988). این باکتری‌ها از طریق تثبیت نیتروژن و تولید هورمون‌هایی مانند اکسین می‌توانند تحمل گیاهان به شرایط شور را بهبود دهند. در مطالعه دیگری جذب پتاسیم و فسفر با مایه‌زنی باکتری *آکروموباکتر* پیچوئیدی[3] در خاک با شوری ۱۵/۷ دسی-زیمنس‌برمتر در گوجه‌فرنگی افزایش یافت. این باکتری درحضور نمک، کارایی مصرف آب (WUE) را افزایش داد (Mayak *et al.*, 2004). ساریج و همکاران (Sarige *et al.*, 1988) گزارش کردند که بوته‌های سورگوم مایه‌زنی شده با *آزوسپیریلیوم*[4]، رطوبت بیش‌تری را از خاک جذب کردند و کاربرد این باکتری سبب شد که آب از لایه‌های عمیق‌تر نیمرخ خاک استخراج شود. قادری و همکاران (Ghaderi *et al.*, 2008) با بررسی اثر حل‌کنندگی فسفات در سه باکتری *سودوموناس پوتیدا*[5]، *سودوموناس فلورسنس چائو*[6] و *تبریز سودوموناس فلورسنس*[7] مقادیر آزاد شده فسفر را از هیدروکسید آهن (III) ۲۹، ۵۱ و ۶۲ درصد گزارش کردند؛ و بیش‌ترین غلظت فسفر آزاد شده ۱۴/۸ میکروگرم بر میلی‌لیتر بود. این در حالی است که *سودوموناس استریتا*[8] و *باسیلیوس پلی‌میکسا*[9] به‌ترتیب ۱۵۶ و ۱۱۶ میکروگرم بر میلی‌لیتر فسفر را آزاد می‌کنند (Rodriguez and Fraga, 1999). باکتری *سودوموناس فلورسنس*[10] از منابع تری‌کلسیم فسفات، فسفات آلومینیم و فسفات آهن به‌ترتیب مقادیر ۱۰۰، ۹۲ و ۵۱ میکروگرم بر میلی‌لیتر فسفر آزاد کرد (Khan *et al.*, 2009). اخیراً انحلال فسفات به‌میزان ۱۲۰ و ۱۵۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر برای دو باکتری *سودوموناس آگلومرانس* P5[11] و *سودوموناس پوتیدا* P13 نیز گزارش شده است (Malboobi *et al.*, 2009). در دهه‌های اخیر اگزوپلی‌ساکاریدهای میکروبی جایگزین پلی‌ساکاریدهای گیاهی شده‌اند. اگزوپلی‌ساکاریدها در هنگام رشد باکتری‌ها به‌وسیله باکتری‌های مختلف مانند باکتری‌های

1 *Azospirillum halopraeferens*
2 *Azospirillum brasilense*
3 *Achromobacter piechaudii*
4 *Azospirillum*
5 *Pseudomonas putida*
6 *Pseudomonas fluorescens CHAO*
7 *Tabriz pseudomonas fluorescens*
8 *Pseudomonas striata*
9 *Bacillus polymyxa*
10 *Pseudomonas fluorescens*
11 *Pseudomonas agglomerans*

اسیدلاکتیک، *بیفیدوباکتریوم*[1]*ها* و *باسیلوس‌ها* تولید می‌شوند (Larpin *et al*., 2002). اگزوپلی‌ساکاریدها در محیط، دارای مزایای منحصر به فردی هستند، که به‌طور مثال از سلول‌های گیاهی در مقابل سمیت مس محافظت می‌کنند (Looijesteijn *et al*., 2001). باکتری *آزوسپیریلوم* با تغییر میزان جذب یون‌های سمی و عناصر غذایی (Zhang *et al*., 2008)، تغییر مقدار سدیم و بهبود شرایط فیزیک ریزوسفر از راه تولید اگزوپلی‌ساکاریدها (Upadhyay *et al*., 2011)، موجب تنظیم پتانسیل اسمزی گیاه گردید. محققان نشان دادند که ریزوباکتری‌های محرک رشد می‌توانند با افزایش جذب پتاسیم، نیتروژن و فسفات از خاک و در نتیجه کاهش نسبت سدیم به پتاسیم اثرات منفی شرایط شور را کاهش دهند (Nadeem *et al*., 2009). فسفر اندام هوایی، پتاسیم، کلسیم و منیزیم ریشه و نیز نسبت‌های Ca/Na و K/Na ریشه و اندام هوایی در تیمار مایه‌زنی *تبریز سودوموناس فلورسنس* [2] موجب افزایش معنی‌دار، نسبت به تیمارهای *سودوموناس فلورسنس چائو*[3] و شاهد شد و غلظت سدیم ریشه و کلر اندام هوایی در حضور تیمار *سودوموناس - فلورسنس چائو* به طور معنی‌دار بیش‌تر از تیمارهای شاهد و تیمار *سودوموناس فلئورسنس تبریز* بود (Hakimi *et al*., 2013). غلظت سدیم، کلسیم، منیزیم و کلر در اندام‌های گیاه با افزایش شوری افزایش یافت، درحالی‌که غلظت‌های پتاسیم و فسفر روند کاهشی نشان دادند. درنهایت، مایه‌زنی گیاه گوجه‌فرنگی با باکتری *تبریز سودوموناس فلورسنس*، شاخص‌های تحمل به شوری و در نتیجه شرایط رشد را در گوجه‌فرنگی بهبود بخشید (Hakimi *et al*., 2013).

هدف از این پژوهش بررسی صفات محرک رشد گیاه (تولید ایندول‌تری‌استیک اسید، حلالیت کمی فسفات‌های معدنی و تولید اگزوپلی‌ساکاریدها) درجدایه‌های بومی شورپسند، قلیاپسند و شورقلیاپسند ریزوسفری بادام (*Prunus amygdalus* L.)؛ و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر برخی ویژگی‌های خاک شامل قابلیت هدایت الکتریکی، pH خاک و نیز بهبود غلظت قابل جذب برخی عناصرغذایی شامل فسفر، پتاسیم و منیزیم، آهن و روی در خاک؛ و نیز ممانعت از فراهمی یون‌های سمی سدیم و کلر، در خاک‌هایی با شوری و قلیائیت متفاوت بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک

به‌منظور جداسازی جدایه‌های شور، قلیا و شور قلیاپسند بومی، نمونه‌برداری خاک به‌صورت ساده از چهار منطقه از ریزوسفر بادامستان‌های مختلف در استان خراسان رضوی از عمق توسعه ریشه بادام (۳۰ – ۵۰ سانتی‌متر) (Khalil Torghabe *et al*., 2022؛ Zarinkafsh, 1992) که قابلیت هدایت الکتریکی خاک بیش‌تر از ۴ دسی‌زیمنس‌برمتر و SAR در محدوده ۸ تا ۱۵ بود؛ انجام شد. سپس ضمن ثبت مشخصات جغرافیایی محل نمونه‌برداری (با GPS)، نمونه‌ها در ظروف استریل قرار گرفته و در مدت زمان کم‌تر از ۴۸ ساعت و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد به آزمایشگاه منتقل و نگهداری شدند.

جداسازی، خالص‌سازی و نگهداری جدایه‌ها

جداسازی و خالص‌سازی تعداد ۵۵ جدایه از هر یک از گروه‌های شور، قلیا و شورقلیاپسند از نمونه‌های خاک توسط محیط کشت اختصاصی (جدول۱) آن‌ها انجام شد. جهت جداسازی، سوسپانسیون ۱:۱ از خاک و آب (یک گرم خاک به یک میلی‌لیتر آب مقطر استریل) تهیه شد (Horikoshi, 2006). ۱۰۰ میکرولیتر از سوسپانسیون فوق بر روی محیط کشت اختصاصی جامد پخش گردید. محیط کشت‌ها در دمای مناسب (۳۵ تا ۳۷ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۳ تا ۷ روز بسته به نوع ریزجانداران (شورپسند، قلیاپسند، شورقلیاپسند) گرماگذاری شدند. به ترتیب ۲۶ جدایه شورپسند توسط محیط کشت ونتوسا و همکاران (Ventosa *et al*., 1998)، ۱۸ جدایه قلیاپسند توسط محیط کشت هوری‌کوشی (I) (Horikoshi, 2006) و ۱۱ جدایه شور قلیاپسند توسط محیط کشت اختصاصی (Jones *et al*., 1992) جداسازی شدند. پس از جداسازی، برای اطمینان از خالص بودن آن‌ها، بازکشت شدند.

1 Bifidobacterium
2 Pseudomonas fluorescens Tabriz
3 Pseudomonas fluorescens Chao

جدول۱- محیط کشت‌های اختصاصی جدایه‌های باکتریایی شور (Ventosa *et al.*,1998)، **قلیا** (Horikoshi, 2006) **و شور قلیاپسند** (Jones *et al.*,1992)

Table 1. Specific culture media for halophile (Ventosa *et al.*, 1998), alkalophil (Horikoshi, 2006) and haloalkalophile bacterial isolates (Jones *et al.*, 1992)

Compounds	Amount (g L^{-1})		
	Halophile■	Alkalophile	Haloalkalophile
Glucose	1	10	-
Poly Peptone	-	5	-
Yeast extract	10	5	10
Di potassium hydrogen phosphate	-	1	-
Magnesium sulphate seven H_2O	9.6	0.2	1
Sodium carbonate	-	10*	18.5▲
Sodium Chloride	81	-	200
Magnesium chloride two H_2O	7	-	-
Calcium chloride	0.36	-	-
Potassium chloride	2	-	2
Sodium hydrogen bicarbonate	0.06	-	-
Sodium bromide	0.026	-	-
Protease Peptone	5	-	-
Casino acid	-	-	7.5
Tri sodium citrate	-	-	3
Manganese (II) chloride	-	-	0.00036
Ferrous sulfate	-	-	0.05
Agar	15	20	20
Electrical conductivity of the culture medium , dS m^{-1}	30.85	12.21	39.90
pH of culture medium	7.2	8.89	9.18

■ pH محیط کشت قبل از استریل سازی با KOH یک نرمال بر روی ۷/۲ تنظیم گردید.

▲ جداگانه از سایر مواد استریل گردیده و قبل از کشت جدایه‌ها به محیط کشت اضافه گردید.

جدایه‌های خالص‌سازی شده جهت نگهداری طولانی مدت به‌روش نیتروژن مایع (Horikoshi, 1999) ذخیره‌سازی شدند.

اندازه‌گیری ویژگی‌های افزاینده رشد گیاه در جدایه‌ها در شرایط آزمایشگاهی

پس از جداسازی، جهت انتخاب برترین جدایه‌ها برخی ویژگی‌های افزاینده رشد آن‌ها شامل تولید ایندول‌تری-استیک‌اسید (IAA) (Glickmann & Dessaux, 1995)، تولید اگزوپلی‌ساکاریدها (Ventosa *et al.*, 2004)، سنجش کمی توان حل‌کنندگی فسفات‌های معدنی نامحلول (تری‌کلسیم‌فسفات) در شرایط آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. مقادیر IAA، حلالیت فسفات‌های نامحلول و اگزوپلی ساکارید خارجی تولیدی جدایه‌ها برای هر گروه، به‌صورت جداگانه و درقالب طرح کامل تصادفی در سه تکرار با نرم‌افزار MSTAT-C تجزیه آماری و مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار(LSD) در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

مایه‌زنی جدایه‌های برتر در مجاورت پایه بادام (GN15)

در مرحله بعد این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر جدایه‌های برتر بر فراهمی عناصر غذایی پرمصرف (فسفر، پتاسیم و منیزیم)، کم‌مصرف (آهن و روی) و یون‌های کلر و سدیم خاک در شرایط تنش شوری و قلیائیت خاک، دو جدایه از بهترین جدایه‌های انتخاب شده از هر گروه (شورپسند، قلیاپسند و شورقلیاپسند) که بیش‌ترین قابلیت تولید متابولیت‌های محرک رشدی گیاه (ایندول‌تری‌استیک اسید، توان انحلال فسفات‌های نامحلول و تولید اگزوپلی-ساکاریدها) را داشتند، انتخاب شدند؛ و به‌همراه شاهد درمجاورت پایه بادام (GN15) در شرایط گلدانی (ابعاد ۲۶×۱۷×۲۳ سانتی‌متر؛ هر کدام با ۸کیلوگرم خاک) و فضای باز (میانگین دمای ۲۵/۱ درجه سانتی‌گراد، میانگین ساعات آفتابی روزانه ۱۰/۸، میانگین درصد رطوبت ۳۰/۶ و میانگین تبخیر روزانه ۱۱/۰ میلی‌متر) آزمایش شدند. آزمایش در قالب فاکتوریل بر پایه طرح کامل تصادفی با سه فاکتور: ۱) سطوح مختلف شوری خاک شامل۲، ۴، ۸ و ۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر، و SAR به-ترتیب ۹/۶۹، ۱۴/۹۹، ۱۴/۲۱ و ۱۹/۷۲؛ ۲) نوع باکتری (شورپسند، قلیاپسند و شورقلیاپسند) و ۳) نوع جدایه

(دوجدایه منتخب از هر گروه باکتری) همراه با شاهد استریل‌شده هرگروه، در سه تکرار روی پایه بادام کشت بافتی GN15 اجرا شد (منظور از شاهد استریل‌شده در حقیقت زادمایه به‌همراه باکتری‌های مصرفی از هر گروه در محیط کشت اختصاصی خودشان بود، که قبل از مصرف استریل شدند). به‌منظور تهیه بستر کشت پایه‌ها، با توجه به ویژگی‌های جدایه‌های باکتریایی دو ویژگی عمده شامل هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم (SAR) خاک مورد توجه قرار گرفت. پس از بازدیدهای میدانی در سطح استان، به‌دلیل فراهم نبودن خاک‌هایی با ویژگی‌های مد نظر به‌جهت مقدار کل املاح (EC) و سدیمی بودن (SAR)، چهار نوع خاک با مقدار شوری‌های مشخص ۲، ۴، ۸ و ۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر و SAR های متفاوت ۹/۶۹، ۱۴/۹۹، ۱۴/۲۱ و ۱۹/۷۲ (جدول۲) از ترکیب سه خاک با نسبت‌های متفاوت تهیه گردید. ویژگی‌های خاک‌های بستر کشت در جدول (۲) عنوان شده است.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی چهار خاک بستر کشت پایه‌های GN15 بادام

Table 2. Some physical and chemical properties of four soils of GN15 almond rootstocks

No	Parameter	Unit	S2	S4	S8	S16
1	Sand	%	72.8	64.8	58.8	62
2	Silt	%	18	22	26	21
3	Clay	%	9.2	13.2	15.2	17
4	Soil Texture	-	Sandy loam	Sandy loam	Sandy loam	Sandy loam
5	pH	-	7.35	7.17	6.98	6.72
6	EC	$dS\ m^{-1}$	2.18	4.12	8.00	16.42
7	SP	%	24.31	23.21	23.70	24.37
8	N_t	%	0.025	0.016	0.08	0.03
9	P_{ava}	$mg\ kg^{-1}$	7.56	6.72	8.19	8.58
10	K_{ava}	$mg\ kg^{-1}$	6.97	6.97	6.97	5.47
11	OM	%	0.49	0.318	0.58	0.64
12	CCE^{Φ}	%	9.5	13.5	19.0	52.25
13	Gypsum	%	0.40	0.778	1.531	3.16
14	Soluble Na	$meq\ L^{-1}$	71.0	124.0	139.0	200
15	Soluble Ca+Mg	$meq\ L^{-1}$	107.37	136.90	191.36	205.70
16	SAR	-	9.69	14.99	14.21	19.72
17	Soluble $SO_4^{=}$	$meq\ L^{-1}$	27.25	51.50	100.00	205.25
18	Soluble Cl^{-}	$meq\ L^{-1}$	8.0	34.0	82.4	271.0

S2 = شوری۲ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S4 = شوری۴ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S8 = شوری۸ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S16 = شوری۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر،
CCE^{Φ} یا (Calcium carbonate equivalent) کربنات کلسیم معادل

مایه‌زنی باکتری‌ها به‌روش کشت مستقیم و با استفاده از کشت تازه باکتریایی در محیط کشت اختصاصی مایع هر جدایه مطابق جدول (۱) در هر گروه باکتری، به ریشه‌های نهال‌های کشت بافتی و مقاوم‌سازی شده به هوای آزاد؛ و در هنگام انتقال از بستر اولیه نهال‌های GN15 به خاک-های بستر کشت با EC و SAR جدید انجام شد (Astaraei and Farid Hosseini, 2012). برای هر نهال مقدار ۱۵ میلی‌لیتر از محیط کشت تازه باکتریایی مایع با جمعیتی در حدود $۱۰^{۷}$ تا $۱۰^{۸}$ سلول در هر میلی‌لیتر مایه‌زنی شد (Rashidi *et al.*, 2013). هر نهال مایه‌زنی شده در یک گلدان با ابعاد ۲۶×۱۷×۲۳ سانتی‌متر و ظرفیت ۸ کیلوگرم خاک کشت گردید. مقدار آبیاری در تیمارهای فوق بر اساس نیاز آبی گیاه بادام (۲۴۳۰ لیتر به مدت چهار ماه در شرایط گلدانی) و بدون هیچ گونه آبشویی در گلدان‌ها در طول دوره کشت (مقدار آب در هر مرتبه آبیاری برابر ۷۵۰ میلی‌لیتر برای هر گلدان و کل مقدار آب مصرفی هر گلدان در چهار ماه برای آبیاری با دور چهار روز برابر ۲۲/۵ لیتر بود) با استفاده از آب لوله-کشی شهری صورت پذیرفت (مقدار هدایت الکتریکی آب لوله‌کشی شهری ۰/۵ دسی‌زیمنس‌بر متر بود که برای همه تیمارها یکنواخت بود). همچنین بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در مرحله آزمایشگاهی مبنی بر تعیین ویژگی-های محرک رشد گیاه برای بررسی اثرات جدایه‌ها در مجاورت نهال‌ها و جلوگیری از تداخل اثرات آن‌ها، هیچ

نوع کودی اعم از شیمیایی یا حیوانی در طول دوره رشد مصرف نگردید.

اندازه‌گیری برخی عناصر و ویژگی‌های شیمیایی در خاک

پس از گذشت چهار ماه از مایه‌زنی باکتری‌ها، اندازه‌گیری برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک پس از برداشت گیاه انجام شد. خاک گلدان کاملاً مخلوط و نمونه‌برداری به‌صورت یکنواخت انجام شد. برخی از ویژگی‌های شیمیایی خاک پس از برداشت گیاه، شامل pH با pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی توسط EC متر (مدل JENWAY PFP 7)، فسفر قابل دسترس خاک (Olsen *et al.*, 1954)، پتاسیم قابل دسترس خاک به‌روش استات آمونیوم نرمال و با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر (Manteghi, 1968)، سدیم به‌روش استات آمونیوم نرمال (Manteghi, 1968) و کلر به‌روش تیتراسیون با نیترات نقره ۰/۰۱ نرمال (Klute, 1986)؛ و نیز عناصر غذایی کم‌مصرف آهن و روی به‌روش عصاره‌گیری با DTPA-TEA و قرائت با دستگاه جذب اتمی (Lindsay and Norvell, 1978) اندازه‌گیری شدند.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

آنالیز آماری داده‌ها با استفاده از نرم افزار MSTAT-C انجام و جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

بررسی ویژگی‌های PGPR جدایه‌ها در شرایط آزمایشگاهی

بیش‌ترین میانگین تولید ایندول‌تری‌استیک اسید، انحلال فسفات‌های معدنی و اگزوپلی‌ساکاریدها به‌ترتیب برای جدایه‌های قلیاپسند، شورقلیاپسند و شورپسند مشاهده گردید (جدول۳). بر اساس نتایج آزمایشگاهی جدایه‌های برتر تولید کننده ایندول‌تری‌استیک اسید، انحلال فسفات‌های معدنی و اگزوپلی‌ساکاریدها در گروه شورپسندها جدایه H10 به‌ترتیب با ۱۳۳/۵، ۷۷/۸۸ و ۲۲/۹۵ میلی‌گرم برلیتر و جدایه H22 با ۹۱/۵، ۲۴/۵۵ و ۴۵/۸۱ میلی‌گرم برلیتر، در قلیاپسندها جدایه A7 به‌ترتیب با ۱۲۰۲، ۲۵۱/۴ و ۴۸۸/۶ میلی‌گرم برلیتر و جدایه A11 با ۱۵۵۴، ۱۴۱/۷ و ۵۷۲/۸ میلی‌گرم برلیتر، و نهایتاً در گروه شورقلیاپسندها جدایه HA7 با ۲۲۰/۱، ۱۸۰/۶ و ۱۰۲/۸ میلی‌گرم برلیتر و جدایه HA9 به‌ترتیب با ۲۶۹/۸، ۱۲۲/۲ و ۱۰۲/۶ میلی‌گرم برلیتر مشخص شدند. در جداسازی باکتری‌های متحمل به نمک از خاک‌های شور و تعیین خصوصیات محرک رشدی آنها نشان داده شد دو جدایه شماره ۱۷ و ۵ به‌عنوان جدایه برتر شناسایی شدند (Talebi *et al.*, 2018). بیش‌ترین مقدار سیدروفور در جدایه ۵ با نسبت قطر هاله به کلنی برابر با دو مشاهده شد. بیش‌ترین میزان تولید اکسین در جدایه شماره ۱۷ با مقدار ۸/۱۴ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده شد. همچنین این جدایه بالاترین توانایی آزادسازی پتاسیم معدنی با مقدار ۱۲/۲ و ۱۸/۶۲ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب در حضور و عدم حضور نمک را داشت (Talebi *et al.*, 2018). اغلب جدایه‌ها مقاومت به خشکی در سطح ۲ و ۵ بار از خود نشان دادند. بیش‌ترین مقاومت به خشکی در سطح ۱۵بار در جدایه شماره ۱۷ و ۵ به‌ترتیب با ۵۵/۶ و ۵۳/۲ درصد کاهش رشد نسبت به محیط بدون تنش مشاهده شد. آزمایش‌های تعیین ترادف ژنی16SrRNA نشان داد که جدایه ۱۷ به میزان ۹۹/۴ درصد با سویه *باسیلیوس لنچی‌فورمیس*[1] DSM13 و جدایه ۵ به میزان ۹۹/۵۷ درصد با سویه *باسیلیوس مگاتریوم*[2] NBRC 15308 قرابت فیلوژنی دارند (Talebi *et al.*, 2018).

1 *Bacillus licheniformis* DSM13

2 *Bacillus megaterium* NBRC 15308

جدول ۳- مقایسه میانگین غلظت تری‌ایندول‌استیک اسید، حلالیت فسفات‌های‌نامحلول و اگزوپلی‌ساکارید تولیدی در جدایه‌های باکتریایی شور، قلیا و شور قلیاپسند

Table 3. Mean comparison of IAA, PSB, and EPS concentrations in halophilic, alkaliphilic, and haloalkaliphilic bacterial isolates

No. of Strain	Halophilic			No. of Strain	Alkaliphilic			No. of Strain	Haloalkaliphilic		
	IAA (mg L^{-1})	PBS (m L^{-1})	EPS (mg L^{-1})		IAA (mg L^{-1})	PBS (mg L^{-1})	EPS (mg L^{-1})		IAA (mg L^{-1})	PBS (mg L^{-1})	EPS (mg L^{-1})
H_1	0.000 ^{j}	98.79 ^{b}	3.640 ^{n}	A_1	158.6 ^{k}	140.3 ^{f}	101.8 ^{ab}	HA_1	413.9 ^{a}	0.0000 ^{h}	90.25 ^{ab}
H_2	0.000 ^{j}	104.8 ^{a}	20.45 ^{h}	A_2	138.2 ^{l}	255.6 ^{b}	135.4 ^{ab}	HA_2	381.4 ^{b}	13.89 ^{gh}	78.46 ^{bc}
H_3	0.000 ^{j}	42.12 ^{gh}	50.32 ^{a}	A_3	235.5 ^{i}	34.73 ^{k}	93.73 ^{ab}	HA_3	384.8 ^{b}	0.0000 ^{h}	67.97 ^{cd}
H_4	0.000 ^{j}	40.91 ^{gh}	20.93 ^{g}	A_4	128.1 ^{l}	19.45 ^{l}	50.70 ^{ab}	HA_4	248.1 ^{e}	144.4 ^{b}	71.71 ^{cd}
H_5	125.0 ^{c}	26.06 ^{j}	7.867 ^{l}	A_5	111.2 ^{m}	226.4 ^{c}	114.7 ^{ab}	HA_5	288.9 ^{c}	105.6 ^{d}	64.54 ^{cd}
H_6	0.000 ^{j}	21.21 ^{klmn}	31.99 ^{e}	A_6	96.96 ^{m}	272.2 ^{a}	128.8 ^{ab}	HA_6	231.4 ^{f}	63.89 ^{e}	60.03 ^{d}
H_7	0.000 ^{j}	3.30 ^{p}	44.79 ^{c}	A_7	1202 ^{d}	251.4 ^{b}	488.6 ^{ab}	HA_7	220.6 ^{fg}	180.6 ^{a}	102.8 ^{a}
H_8	0.000 ^{j}	45.15 ^{fg}	5.183 ^{m}	A_8	105.1 ^{m}	0.0000 ^{m}	0.0000 ^{b}	HA_8	280.6 ^{cd}	122.2 ^{c}	94.02 ^{ab}
H_9	7.190 ^{i}	83.03 ^{c}	34.15 ^{d}	A_9	369.2 ^{f}	198.6 ^{d}	189.7 ^{ab}	HA_9	269.8 ^{d}	122.2 ^{c}	102.6 ^{a}
H_{10}	133.5 ^{b}	77.88 ^{d}	22.95 ^{f}	A_{10}	187.2 ^{j}	23.06 ^{c}	143.3 ^{ab}	HA_{10}	197.3 ^{h}	22.22 ^{g}	23.00 ^{e}
H_{11}	14.97 ^{h}	56.67 ^{e}	0.0000 ^{r}	A_{11}	1554 ^{b}	141.7 ^{ef}	572.8 ^{ab}	HA_{11}	213.1 ^{gh}	38.89 ^{f}	92.88 ^{ab}
H_{12}	395.0 ^{a}	25.76 ^{jk}	0.5861 ^{qr}	A_{12}	1355 ^{c}	51.39 ^{j}	469.5 ^{ab}	–	–	–	–
H_{13}	0.000 ^{j}	20.91 ^{lmn}	0.0000 ^{r}	A_{13}	282.0 ^{h}	44.45 ^{jk}	112.0 ^{ab}	–	–	–	–
H_{14}	0.000 ^{j}	0.0000 ^{p}	0.0000 ^{r}	A_{14}	801.7 ^{e}	109.7 ^{g}	311.7 ^{ab}	–	–	–	–
H_{15}	44.25 ^{f}	18.79 ^{mno}	4.319 ^{n}	A_{15}	290.2 ^{h}	73.61 ^{i}	127.4 ^{ab}	–	–	–	–
H_{16}	0.000 ^{j}	21.21 ^{klmn}	11.60 ^{j}	A_{16}	1815 ^{a}	155.6 ^{e}	660.8 ^{a}	–	–	–	–
H_{17}	25.03 ^{g}	87.58 ^{c}	2.684 ^{o}	A_{17}	0.0000 ^{n}	0.0000 ^{m}	0.0000 ^{b}	–	–	–	–
H_{18}	13.86 ^{h}	45.15 ^{fg}	1.586 ^{p}	A_{18}	338.1 ^{g}	90.28 ^{h}	149.9 ^{ab}	–	–	–	–
H_{19}	68.10 ^{e}	17.88 ^{no}	0.9255 ^{pq}	–	–	–	–	–	–	–	–
H_{20}	0.000 ^{j}	35.15 ^{i}	0.0000 ^{r}	–	–	–	–	–	–	–	–
H_{21}	0.000 ^{j}	49.09 ^{f}	17.86 ^{i}	–	–	–	–	–	–	–	–
H_{22}	91.50 ^{d}	24.55 ^{jkl}	45.81 ^{b}	–	–	–	–	–	–	–	–
H_{23}	0.000 ^{j}	22.73 ^{jklm}	10.46 ^{k}	–	–	–	–	–	–	–	–
H_{24}	0.000 ^{j}	14.55 ^{o}	34.80 ^{d}	–	–	–	–	–	–	–	–
H_{25}	0.000 ^{j}	38.18 ^{hi}	20.52 ^{h}	–	–	–	–	–	–	–	–
H_{26}	15.23 ^{h}	23.64 ^{jkl}	22.15 ^{g}	–	–	–	–	–	–	–	–
C	0.000 ^{j}	0.0000 ^{p}	0.0000 ^{r}	C	0.0000 n	0.0000 m	0.0000 b	C	0.0000 i	0.0000 h	0.0000 f
Pv	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	Pv	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	Pv	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$	$< 10^{-4}$
Average†	15.98	40.19	35.90		213.93	127.55	578.11		77.13	73.99	284.53

IAA = تری‌ایندول‌استیک‌اسید، PBS= حلالیت فسفات‌های‌نامحلول، EPS = اگزوپلی‌ساکارید

† میانگین تولید ویژگی‌های PGPR جدایه‌ها در شرایط آزمایشگاهی

†Production rate of PGPR characteristics of isolates in laboratory conditions

میانگین‌ها در هر ستون با حروف غیرمشابه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار می‌باشند.

Means in each column with different letters are significant based on the LSD test at the 5% probability level.

بررسی برخی ویژگی‌های خاک

نتایج تجزیه واریانس برخی ویژگی‌ها و عناصر غذایی مورد بررسی در جدول ۴ نشان داده شده است.

واکنش خاک (pH)

با افزایش شوری خاک، مقدار pH خاک نسبت به کم‌ترین سطح شوری (۲ دسی‌زیمنس‌برمتر) افزایشی بود (جدول۵). غلظت بالای نمک‌های محلول، ممکن است pH خاک را کاهش دهد و می‌تواند رشد گیاه را در برخی موارد بیش از ۹۰ درصد محدود کند (Kalev and Toor, 2018). غلظت بالای Na^{+} (کاتیون غالب) قادر بوده مقداری از H^{+} را که در سطح تبادلی رس بوده حذف نموده و وارد محلول خاک نماید.

جدول ۴- تجزیه واریانس برخی ویژگی‌ها و عناصر غذایی در خاک

Table 4. Analysis of variance of some characteristics and nutritional elements in soil

Sources	df	Mean of squers							
		pH	EC	P_{ava}	K_{ava}	Fe	Zn	Na	Cl
Soil salinity	3	0.42**	98.68**	286652**	216932**	4.384**	0.033^{ns}	14442.7**	9559.8**
Bacterial type	2	0.01^{ns}	1.17**	145480**	1625.8**	1.484**	0.023^{ns}	89.4**	123.08**
Soil salinity × type of bacteria	6	0.03^{ns}	3.06**	66292**	3605.9**	3.153**	0.063^{ns}	299.9**	297.4**
Strain type	2	0.006^{ns}	3.78**	106614**	335.9**	0.193^{ns}	0.012*	248.1**	423.8**
Soil salinity × strain type	6	0.024^{ns}	8.35**	138280**	7501.6**	0.886**	0.068^{ns}	367.4**	749.5**
Type of bacteria × type of strain	4	0.007^{ns}	4.49**	44866**	7297.8**	0.363^{ns}	0.020*	434.7**	460.4**
Soil salinity × type of bacteria × type of strain	12	0.040^{ns}	2.90**	67517**	3172.7**	0.632*	0.034^{ns}	279.0**	337.5**
Experimental error	72	0.018	0.507	6.648	4.454	0.268	0.019	1.315	0.825
Coefficient of variation		1.84	11.17	0.62	1.39	16.05	15.73	3.46	3.61

* و **؛ به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد را نشان می‌دهد

ns, * and **: Not significant, significant at the 5% and 1% probability levels, respectively

هر چه غلظت H^{+} در محلول بیش‌تر باشد، pH کاهش می یابد (Cancellier, 2013). مقدار pH خاک تحت تأثیر نوع باکتری اختلاف معنی‌داری نشان نداد (جدول۶). pH خاک تحت تأثیر اثرات متقابل شوری، نوع باکتری و جدایه آن در تمامی تیمارها در محدوده ۶/۹۸ تا ۷/۵۲ متغیر بود و اختلاف آماری معنی‌داری داشت (جدول ۷). در تحقیقی مشخص شد که کاربرد باکتری‌های محرک رشد، موجب کاهش pH خاک از ۶/۷ به ۶ شد که می‌توان این کاهش را به کلونیزه شدن باکتری‌ها در خاک و تولید اسیدهای آلی نسبت داد (Lind *et al*., 2003). گزارش شده است که تولید اسیدهای معدنی مانند اسیدسولفوریک، اسیدنیتریک و اسیدکربنیک نیز به وسیله ریزجانداران، موجب کاهش pH و انحلال ترکیبات نامحلول در خاک مانند فسفر می‌شود (Gyaneshwar *et al*., 2002). عنایتی ضمیر و همکاران (Enayatizamir *et al*., 2020) نشان دادند که کم‌ترین مقدار pH و بیش‌ترین مقدار شکل‌های کربن در حضور سویه‌های مختلف باکتری محرک رشد *انتروباکتر کلوآسه*[1] نسبت به شاهد مشاهده شد. باکتری‌های محرک رشد با افزایش فعالیت خود (تنفس پایه و بهره میکروبی)، افزایش توسعه ریشه، افزایش شکل‌های آلی کربن و کاهش جزئی pH خاک، عملکرد گندم را بهبود بخشیدند (Enayatizamir *et al*., 2020). در ریزوسفر تغییراتی مانند اسیدی شدن، افزایش مقدار ماده آلی در هر دو فاز جامد و محلول خاک، با تغییرات در فعالیت و زیست‌توده میکروبی درارتباط بود. باکتری‌های محرک رشد با افزایش زیست-توده گیاه و تحریک ریشه‌زایی از طریق تولید هورمون-های گیاهی نقش مهمی در جذب بیش‌تر مواد غذایی برای گیاه داشتند (Shrivastava *et al*., 2015). افزایش فعالیت‌های ریشه گیاه شامل ترشح انواع ترکیبات آلی، جذب آب و عناصر غذایی و آزادسازی یون‌های هیدروژن و بی‌کربنات و برقراری ارتباط با ریزجاندارن ریزسفری خاک موجب تغییرات در ویژگی‌های شیمیایی، از جمله pH و کربن آلی محلول در ریزوسفر خاک می‌شود (Bais *et al*., 2006). در حقیقت، تغییر pH در نتیجه برهمکنش متقابل مثبت بکارگیری باکتری‌های محرک رشد و افزایش فعالیت‌های ریشه است.

1 *Enterobacter cloacae*

جدول۵- تأثیر سطوح مختلف شوری خاک بر برخی ویژگی‌های خاک

Table 5. The effect of different soil salinity levels on some soil properties

Treatments	pH	EC ($dS\ m^{-1}$)	P_{ava} ($mg\ kg^{-1}$)	K_{ava} ($mg\ kg^{-1}$)	Na ($mg\ L^{-1}$)	Cl ($mg\ L^{-1}$)	Fe ($mg\ kg^{-1}$)	Zn ($mg\ kg^{-1}$)
S2	7.07[c]	5.28 [c]	364.3 [c]	76.04 [d]	15.16 [d]	578.65 [c]	2.74 [c]	0.86 [a]
S4	7.35[a]	5.77 [b]	299.0 [d]	150.6 [b]	36.60 [b]	620.18 [b]	3.10 [b]	0.84 [a]
S8	7.20[b]	5.22 [c]	525.1 [a]	102.0 [c]	16.39 [c]	482.80 [d]	3.69 [a]	0.90 [a]
S16	7.31[a]	9.22 [a]	475.9 [d]	277.8 [a]	64.58 [a]	1891.64[a]	3.36 [b]	0.91 [a]
P_{value}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1769

S2 = شوری۲ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S4 = شوری۴ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S8 = شوری۸ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S16 = شوری۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر،

میانگین‌ها در هر ستون با حروف غیرمشابه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار می‌باشند.

Means in each column with different letters are significant based on the LSD test at the 5% probability level.

جدول۶- تأثیر نوع باکتری بر برخی ویژگی‌های خاک

Table 6. The effect of the type of bacteria on some soil properties

Treatments	pH	EC ($dS\ m^{-1}$)	P_{ava} ($mg\ kg^{-1}$)	K_{ava} ($mg\ kg^{-1}$)	Na ($mg\ L^{-1}$)	Cl ($mg\ L^{-1}$)	Fe ($mg\ kg^{-1}$)	Zn ($mg\ kg^{-1}$)
H	7.24 [a]	6.21 [b]	358.6 [c]	158.0 [a]	35.00 [a]	823.24 [c]	3.37 [a]	0.90 [a]
A	7.24 [a]	6.57 [a]	484.3 [a]	144.6 [c]	32.30 [b]	953.53 [a]	3.30 [a]	0.85 [a]
HA	7.21 [a]	6.34 [ab]	405.2 [b]	152.2 [b]	32.24 [b]	903.12 [b]	2.99 [b]	0.85 [a]
P_{value}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0058	0.3101

H= شورپسندها، A= قلیاپسندها، HA= شورقلیاپسندها

میانگین‌ها در هر ستون با حروف غیرمشابه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار می‌باشند.

Means in each column with different letters are significant based on the LSD test at the 5% probability level.

قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC)

روند افزایش EC خاک تحت تأثیر افزایش شوری همانند pH خاک بود (جدول ۵). بادام تا هدایت الکتریکی ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر کاهش در عملکرد آن مشاهده نمی‌گردد. درحالی‌که در ۲/۸ دسی‌زیمنس بر متر به میزان ٪۲۵ و در ۴/۸ دسی‌زیمنس بر متر به میزان ٪۵۰ و سرانجام در ۷ دسی‌زیمنس بر متر تا صددرصد از عملکرد آن کاسته می‌شود (Zarinkafsh, 1992). بیش‌ترین مقدارEC به‌ترتیب در قلیاپسندها، شوروقلیاپسندها و شورپسندها بدست آمد و اختلاف معنی‌دار (اختلاف حداکثر و حداقل۰/۳ دسی‌زیمنس بر متر) با یکدیگر ($p\geq$۰/۰۵) مشابه با نتایج تولید ویژگی‌های PGPR (جدول۳)، مشاهده شد (جدول۶). بیش‌ترین مقدار EC در دو تیمار S16×HA و S16×A با ۱۰/۰۳ و ۹/۴۱ دسی‌زیمنس بر متر و بدون اختلاف معنی‌دار با یکدیگر و حداقل مقدار EC با ۴/۹۰ دسی‌زیمنس بر متر در تیمار S8×HA بدست آمد (جدول۸). EC در تیمارهای ۸ و۱۶ دسی‌زیمنس بر متر با کاربرد باکتری کاهش چشمگیر داشت که احتمالا به‌دلیل مکانیسم ترشح اگزوپلی‌ساکارید خارجی بود (جدول۷). میانگین ترشح اگزوپلی ساکارید خارجی(EPS) به‌ترتیب در قلیاپسندها (۲۱۳/۹۳ میلی‌گرم برلیتر)، شورقلیاپسندها (۷۷/۱۳ میلی‌گرم برلیتر) و شورپسندها (۱۵/۹۸ میلی‌گرم برلیتر) بود (جدول۳). روند افزایش تولید اگزوپلی ساکارید خارجی در سه گروه مختلف باکتری مطابق با افزایش EC (جدول۳) توسط آن‌ها بود. ریزجانداران نمک‌دوست (شورپسند) با تولید بیوسورفکتانت‌ها و پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی می‌توانند نقش‌های ویژه‌ای در مقابله با تنش‌های محیطی و کمبود آب در خاک که به‌طور معمول عامل اصلی کاهش عملکرد درگیاهان می‌باشد، بازی‌کنند (Margesin & Schinner, 2001). پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی (EPS) از واحدهای قندی مختلف تشکیل شده که هدایت الکتریکی بالاتری نسبت به سایر ترشحات گیاه و باکتری به‌دلیل یونیزه شدن دارند (Afshar *et al*., 2018) و در نتیجه در قلیاپسندها با بیش‌ترین میانگین مقدارتولید EPS ؛ هدایت الکتریکی نیز افزایش داشت (جداول ۳ و ۶).

جدول ۷ - تأثیر سطوح مختلف شوری خاک، نوع باکتری و نوع جدایه بر برخی ویژگی‌های خاک

Table 7 . The effect of different levels of soil salinity, the type of bacteria and the type of isolate on some soil characteristics

Treatment	pH	EC ($dS\ m^{-1}$)	P_{ava} ($mg\ kg^{-1}$)	K_{ava} ($mg\ kg^{-1}$)	Na ($mg\ L^{-1}$)	Cl ($mg\ L^{-1}$)	Fe ($mg\ kg^{-1}$)	Zn ($mg\ kg^{-1}$)
S2× H0	7.08 fghij	5.69 fghijk	366.7 q	72.33 u	14.37 pq	760.03 ij	3.50 defghi	0.97 abcde
S2× H10	7.15 defghij	5.21 hijk	185.3 [	65.84 w	14.68 pq	599.32 mno	2.42 mn	0.72 cdefghi
S2× H22	7.08 fghij	5.04 hijk	468.0 m	70.98 uv	12.22 rs	500.20 qr	3.15 fghijklm	0.84 cdefghi
S2× A0	7.09 efghij	5.08 hijk	238.7 x	67.89 vw	14.75 pq	471.88 rs	2.74 ijklmn	0.85 cdefghi
S2× A7	7.06 hij	5.89 efghij	302.7 u	66.86 w	17.43 o	720.92 j	2.44 lmn	0.86 cdefghi
S2× A11	6.98 j	5.29 ghijk	498.7 j	66.86 w	13.21 qrs	590.11 nop	2.19 n	0.75 efghi
S2×HA0	7.06 ghij	5.59 ghijk	281.3 v	72.01 u	15.60 op	648.13 lmn	2.57 klmn	0.88 bcdefgh
S2×HA7	7.07 fghij	4.74 jk	412.0 o	76.12 t	13.06 qrs	467.28 rs	3.09 ghijklm	1.04 abc
S2×HA9	7.09 efghij	4.99 hijk	525.3 i	125.5 m	20.97 n	448.51 rs	2.53 klmn	0.82 cdefghi
S4× H0	7.42 ab	5.71 efghjk	312.0 st	151.20 k	30.20 k	604.27 mno	3.96 bcdef	0.80 defghi
S4× H10	7.41 abc	6.82 ef	74.67 \	222.20 h	39.96 h	849.60 h	3.49 defghi	0.66 hi
S4× H22	7.34 abcd	5.89 efghij	262.7 w	157.40 j	50.41 f	651.36 lm	3.07 hijklm	0.93 abcdef
S4× A0	7.26 bcdefghi	5.96 efgh	404.0 p	209.80 i	59.35 d	712.60 jk	2.88 hijklmn	1.03 abc
S4× A7	7.30 abcde	5.57 ghijk	574.7 h	151.20 k	26.95 l	556.84 op	3.12 fghijklm	0.97 abcd
S4× A11	7.35 abcd	6.02 efgh	212.0 y	80.24 s	35.91 i	660.91 kl	2.52 lmn	0.84 cdefghi
S4×HA0	7.52 a	5.77 efghijk	468.0 m	215.50 i	28.45 kl	599.32 mno	3.36 efghijk	0.91 bcdefg
S4×HA7	7.39 abc	5.30 ghijk	73.33 \	84.35 qr	33.81 j	467.28 rs	3.11 ghijklm	0.64 i
S4×HA9	7.19 cdefghij	4.95 hijk	309.3 t	86.41 pqr	24.60 m	462.67 rs	2.41 mn	0.80 defghi
S8× H0	7.09 efghij	4.73 k	313.1 s	88.47 op	13.84 pqr	377.71 t	3.68 cdefgh	0.89 bcdefg
S8× H10	7.17 defghij	5.91 efghi	634.7 f	151.20 k	32.14 j	604.27 mno	4.83 a	1.15 a
S8× H22	7.33 abcd	4.88 hijk	316.0 s	95.69 n	12.29 rs	420.19 st	4.13 abcde	0.96 abcde
S8× A0	7.17 defghij	5.43 ghijk	477.3 l	83.32 rs	13.06 qrs	490.20 qr	3.52 defghi	0.90 bcdefg
S8× A7	7.27 bcdefgh	5.78 efghijk	734.7 b	86.41 pqr	14.82 pq	594.72 no	4.25 abcd	0.85 cdefghi
S8× A11	7.280 bcdefg	5.567 ghijk	486.7 k	146.10 l	22.72 n	604.27 mno	4.64 ab	0.89 bcdefg
S8×HA0	7.31 abcd	4.79 ijk	721.3 c	88.62 op	11.87 s	316.22 u	2.72 ijklmn	0.69 ghi
S8×HA7	7.06 hij	5.18 hijk	450.7 n	87.44 opq	13.49 qrs	538.08 pq	2.17 n	0.90 bcdefg
S8×HA9	7.15 defghij	4.73 k	590.7 g	90.52 o	13.28 qrs	386.92 t	3.24 fghijklm	0.91 bcdefg
S16× H0	7.29 bcdef	10.20 b	409.3 o	225.3 gh	65.18 c	2227.72 c	2.59 jklmn	0.83 cdefghi
S16× H10	7.30 abcde	6.45 efg	302.7 u	330.20 a	70.98 b	811.72 hi	2.77 ijklmn	1.10 ab
S16× H22	7.30 abcde	8.01 cd	657.3 e	265.40 e	63.97 c	1444.32 f	2.89 hijklmn	1.04 abc
S16× A0	7.44 ab	8.34 c	702.7 d	227.30 g	70.41 b	1458.48 f	3.43 defghij	0.82 cdefghi
S16× A7	7.470 ab	6.917 de	330.7 r	247.90 f	42.22 g	1217.76 g	4.47 abc	0.84 cdefghi
S16× A11	7.29 bcdef	12.99 a	849.3 a	301.40 c	56.73 e	3308.83 a	3.41 defghij	0.89 bcdefg
S16×HA0	7.04 ij	11.86 a	456.3 m	301.40 c	95.60 a	2862.79 b	3.93 bcdefg	0.73 fghi
S16×HA7	7.34 abcd	8.26 c	196.0 \	291.80 d	51.72 f	1557.60 e	3.26 fghijkl	0.98 abcd
S16×HA9	7.33 abcd	9.95 b	369.3 \	309.60 b	64.38 c	2086.12 d	3.51 defghi	0.98 abcd
Pvalue	0.0191	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0128	0.0733

S2 = شوری۲ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S4 = شوری۴ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S8 = شوری۸ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S16 = شوری۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر،

H= شورپسندها، A= قلیاپسندها، HA= شورقلیاپسندها،

میانگین‌ها در هر ستون با حروف غیرمشابه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار می‌باشند.

Means in each column with different letters are significant based on the LSD test at the 5% probability level.

فسفر قابل دسترس خاک

بیش‌ترین غلظت فسفر خاک با ۵۲۵/۱، ۴۷۵/۹، ۳۶۴/۳ و ۲۹۹/۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب در ۸، ۱۶، ۲ و ۴ دسی‌زیمنس‌برمتر مشاهده شد. تیمار ۸ دسی‌زیمنس بر متر که کم‌ترین هدایت الکتریکی را داشت، بیش‌ترین مقدار فسفر در آن مشاهده گردید (جدول۵). بیش‌ترین غلظت فسفر خاک در قلیاپسندها، شوروقلیاپسندها و شورپسندها با ۴۸۴/۳، ۴۰۵/۲ و ۳۵۹/۶ میلی‌گرم برکیلوگرم و اختلاف معنی‌دار با یکدیگر (P<۰/۰۵) و مشابه ویژگی‌های PGPR مشاهده شد (جدول۶). قلیاپسندها، شورقلیاپسندها و شورپسندها در شوری‌های ۸ و۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر بیش‌ترین تأثیر را بر غلظت فراهم فسفر خاک داشتند (جدول۸)؛ که روندی مشابه با توان انحلال فسفات‌های نامحلول در باکتری‌ها در شرایط آزمایشگاهی نشان داده شد (جدول۳). اختلاف غلظت‌های فسفر خاک تحت تأثیر شوری، نوع باکتری و جدایه در تیمارها برابر ۷۷۵/۹ میلی‌گرم برکیلوگرم بود (جدول۷).

جدول۸- تأثیر سطوح مختلف شوری خاک و نوع باکتری بر برخی ویژگی‌های خاک

Table 8. The effect of different levels of soil salinity and type of bacteria on some soil properties

Treatments	pH	EC ($dS\ m^{-1}$)	P_{ava} ($mg\ kg^{-1}$)	K_{ava} ($mg\ kg^{-1}$)	Na ($mg\ L^{-1}$)	Cl ($mg\ L^{-1}$)	Fe ($mg\ kg^{-1}$)	Zn ($mg\ kg^{-1}$)
S2×H	7.10 de	5.31 def	340.0 j	69.7 k	13.76 i	619.85 ef	3.02 cd	0.84 bcd
S2×A	7.04e	5.42 def	346.7 h	62.2 l	15.13 h	601.09 f	2.46 e	0.82 cd
S2×HA	7.07 de	5.11 ef	406.2 f	91.2 i	16.54 g	509.76 h	2.73 de	0.91 abc
S4×H	7.39 a	6.14 c	216.4 l	176.9 d	40.10 d	701.62 d	3.51 bc	0.79 cd
S4×A	7.30 ab	5.85 cd	396.9 g	147.1 e	40.74 d	643.57 e	2.84 de	0.95 ab
S4×HA	7.37 a	5.34 def	383.6 k	127.8 f	28.95 e	509.76 h	2.96 d	0.78 d
S8×H	7.19bcd	5.17 ef	421.4 e	111.8 g	19.42 f	467.28 i	4.21a	1.00 a
S8×A	7.24 bc	5.59 cde	566.2 c	105.3 h	16.87 g	563.21 g	4.14 a	0.88 abcd
S8×HA	7.17 cd	4.90 f	587.6 b	88.9 j	12.88 i	413.82 j	2.71de	0.83 bcd
S16×H	7.30 abc	8.22 b	456.4 d	273.6 b	66.71 b	1494.58 c	2.75 de	0.99 a
S16×A	7.40 a	9.41 a	627.6 a	258.9 c	56.46 c	1995.14 b	3.77 ab	0.85 bcd
S16×HA	7.24 bc	10.03 a	343.6 i	300.9 a	70.57 a	2168.95 a	3.57 b	0.89 abcd
Pvalue	0.1870	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0069

S2 = شوری۲ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S4 = شوری۴ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S8 = شوری۸ دسی‌زیمنس‌برمتر ،S16 = شوری۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر،

H= شورپسندها، A= قلیاپسندها، HA= شورقلیاپسندها،

میانگین‌ها در هر ستون با حروف غیرمشابه بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار می‌باشند.

Means in each column with different letters are significant based on the LSD test at the 5% probability level.

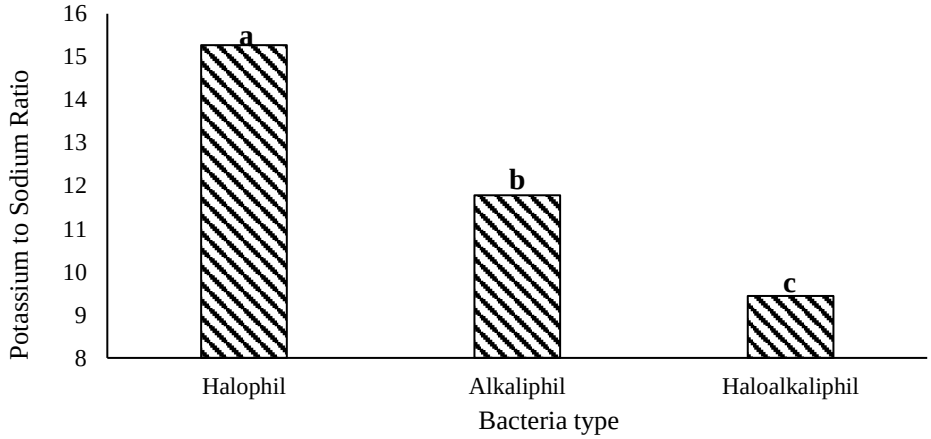
حداکثر غلظت فسفر خاک در دو تیمار S16×A11 و S8×A7 به‌ترتیب با ۸۴۹/۳ و۷۳۴/۷ میلی‌گرم برکیلوگرم، و حداقل آن نیز در دو تیمار S4×HA7 و S4×A10 به‌ترتیب با ۷۳/۳ و ۷۴/۷ میلی‌گرم برکیلوگرم مشاهده شد (جدول۷). بررسی تنوع میکروبی شورپسندها و قلیاپسندها در ریزوسفر و ریزوپلن گیاه شورزیست جارو[1]نشان داد (Yaqoob *et al*., 2013) که ۶۵ ٪ سویه‌های ریزوسفری و ۶۲ ٪ سویه‌های ریزوپلن موجب انحلال فسفر معدنی شدند. باکتری‌های حل‌کننده فسفات از طریق سازوکارهایی از جمله با ترشح اسیدهای آلی همانند اسید گلوکنیک، اسید اگزالیک و اسید سیتریک و کلات‌های آکسو اسیدی از قندها (Asea *et al*., 1988) موجب کاهش pH خاک در منطقه ریزوسفر شده و در نتیجه سبب افزایش حلالیت فسفر نامحلول می‌شوند. نقش اسیدهای آلی در حلالیت فسفات‌های نامحلول به کاهش pH، کلات نمودن کاتیون‌ها و رقابت با فسفر جهت اشغال مکان‌های جذب در خاک نسبت داده می‌شود. همچنین گزارش شده که اسیدهای آلی ممکن است کمپلکس‌های محلول با یون‌های فلزی پیوند شده با فسفر از قبیل کلسیم، آلومینیوم و آهن تشکیل دهند و بدین طریق موجب آزاد سازی فسفر و جذب آن گردند (Omar, 1998).

پتاسیم قابل دسترس خاک

شورپسندها، شوروقلیاپسندها و قلیاپسندها به‌ترتیب با ۱۵۸/۰، ۱۵۲/۲ و ۱۴۴/۶ میلی‌گرم برکیلوگرم پتاسیم و اختلاف معنی‌دار با یکدیگر مشاهده شدند (P<۰/۰۵) و بیش‌ترین غلظت پتاسیم فراهم خاک را دارا بودند (جدول۶). حداکثر و حداقل غلظت پتاسیم قابل دسترس خاک به‌ترتیب در سطح شوری ۱۶ دسی‌زیمنس‌برمتر و شورقلیاپسند (S16×HA) و سطح شوری ۲ دسی‌زیمنس‌برمتر و قلیاپسندها (S2×A) با ۲۳۳/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم اختلاف مشاهده شد (جدول۸). استکین و همکاران (Esitken *et al*., 2010) گزارش کردند که با کاربرد باکتری‌های محرک رشد مثل *سودوموناس* و *باسیلوس*، میزان عناصری چون آهن، روی، منگنز، منیزیم و پتاسیم ازدیاد پیدا می‌کند که یکی از دلایل این افزایش را زیاد شدن در CEC تیمارهای تلقیح شده با باکتری نسبت به تیمارهای شاهد بیان کرده‌اند. روند افزایش مقدار پتاسیم خاک با توجه به نوع باکتری‌ها (جدول۶)، عکس تولید EPS توسط آن‌ها بود (جدول۳) که نشان دهنده برداشت بیش‌تر پتاسیم از خاک توسط گیاه می‌باشد. احتمالاً سویه‌های PGPR با تولید EPS (پیوند کردن سدیم و کاهش فراهمی آن برای گیاه) (Ashraf *et al*., 2004) و ACC دآمیناز (تغییر انتخاب پذیری سدیم و پتاسیم برای جذب گیاه) اثرات منفی تنش شوری را از طریق کاهش جذب سدیم و در نتیجه افزایش نسبت

[1] *Kochia Indica*

پتاسیم بـه سـدیم در گیاهـان کاهش دادند (Nadeem *et al*., 2007). محاسبه نسبت K/Na درخاک برای شور-قلیا، شور و قلیاپسندها به‌ترتیب ۴/۷۲، ۴/۵۲ و ۴/۴۷ بود (شکل۱) که نشان‌دهنده کاهش سـدیم فراهم و در نتیجه افزایش نسبت K/Na ، موجب کاهش تنش شوری توسط دو گروه شورقلیا و شورپسندها شد. یون سدیم به مقدار اندک در باکتری‌های قلیاپسند منبع تامین انرژی موتور تاژک باکتری، برای تحرک در محیط قلیایی است (Horikoshi, 1999). در گروه شورپسندها و شورقلیاپسندها، احتمالاً مکانیسم‌های دیگری همانند ترشح اگزوپلی‌ساکاریدها، مؤثر واقع شدند که در تحرک هر دو یون به یک نسبت دخیل بودند. حداکثر پتاسیم خاک با اختلاف معنی‌دار به‌ترتیب برای S16×H10 و S16×HA9 با ۳۳۰/۲و ۳۰۹/۶ میلی‌گرم برکیلوگرم در دو گروه آماری متفاوت مشاهده شد (جدول۷). دیلمی راد و همکاران (Deilamirad *et al*., 2017) نشان دادند که اثربخشی باکتری‌های آزادکننده پتاسیم متأثر از پتاسیم قابل دسترس خاک می‌باشد و هر چه غلظت پتاسیم قابل دسترس در خاک کم‌تر باشد (همانند نتایج این بررسی (جدول ۱)) می‌توان انتظار داشت که اثربخشی این باکتری‌ها افزایش یابد.



شکل ۱- تأثیر نوع باکتری بر نسبت پتاسیم به سدیم خاک

Figure 1. The effect of bacteria type on the of potassium to sodium ratio in the soil

آهن

بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت آهن خاک به ترتیب در سطوح شوری ۸ و ۲ دسی‌زیمنس‌برمتر مشاهده شد و اختلاف معنی‌دار با یکدیگر (P<۰/۰۵) به‌میزان ۳/۶۹۲ و۲/۷۴۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شدند (جدول۵). بیش‌ترین غلظت آهن خاک بدون اختلاف معنی‌دار با یکدیگر در گروه شورپسندها و قلیاپسندها بدست آمد (جدول۶). گروه شورقلیاپسندها با ۲/۹۹۶ میلی‌گرم برکیلوگرم کم-ترین غلظت آهن خاک را به خود اختصاص دادند(جدول۶). بیش‌ترین غلظت آهن خاک تحت تأثیر شوری خاک و نوع باکتری در S8×H و S8×A؛ و سپس در دو تیمار S16×A و S16×HA بدست آمد و بدون اختلاف معنی‌دار با یکدیگر به‌ترتیب ۴/۲۱ ، ۴/۱۴ ، ۳/۷۷ و ۳/۵۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بودند (جدول۸). بیش‌ترین غلظت آهن خاک تحت تأثیر اثرات شوری، نوع باکتری و جدایه در دو تیمار S8×H22 و S8×A11 با ۴/۸۳ و ۴/۶۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد (جدول۷). تولید اسیدهای آلی توسط گیاهان و باکتری‌ها در ریزوسفر موجب کاهش pH محلول خاک و در نتیجه افزایش فراهمی به عناصر معدنی نظیر فسفر، کلسیم، آهن و منگنز می‌شود (Gyaneshwar *et al*., 2002). لیو و همکاران (Liu *et al*., 2017) کاهش مقدار pH خاک را به عنوان عاملی برای افزایش جذب آهن بوسیله بادام زمینی تحت تأثیر باکتری *پائینی باسیلیوس ایلونویسیز*[1] و *باسیلیوس*[2] گزارش کردند.

روی

غلظت روی خاک تحت تأثیر شوری (جدول۵) و نوع باکتری (جدول۶) اختلاف معنی‌داری بین تیمارها نداشت.

1 Paenibacillus illinoisensis

2 Bacillus sp.

دو تیمار S8×A و S16×H با ۱/۰۰۴ و ۰/۹۹۲۷ میلی‌گرم برکیلوگرم بیش‌ترین غلظت روی خاک و تیمار S4×HA با ۰/۷۸۵۶ میلی‌گرم برکیلوگرم کم‌ترین غلظت روی خاک را نشان دادند (جدول۸). اسیدهای آلی آزاد شده از ریزجاندارانی نظیر *باسیلوس* و *سودوموناس* نیز علاوه بر فسفر، منجر به آزادسازی منگنز، روی، آهن و منیزیم از کمپلکس‌های موجود در خاک شده بود؛ به‌طوری‌که حلالیت فسفات در خاک در حضور اسیدهای آلی تا ۱۰۰۰ برابر افزایش می‌یابد (Jones & Darrah, 1996). بیش‌ترین غلظت روی خاک در دو تیمار S8×H10 و S16×H10 با ۱/۱۵۲ و ۱/۱۰۰ میلی‌گرم برکیلوگرم و کم‌ترین غلظت آن نیز با ۲/۱۷۱ و ۲/۱۹۵ میلی‌گرم برکیلوگرم در S4×H10 و S4× HA7 مشاهده گردید (جدول۷). مطالعه سلیمانی و همکاران (Soleimani *et al.*, 2016) نشان داد که پنج جدایه منتخب توانایی انحلال $Ca_3(PO_2)^{-2}$ و سه جدایه توانایی انحلال $KALSiO_3$، هر پنج جدایه ZnO را محلول و چهار جدایه تولید سیدروفور نمودند که موجب افزایش غلظت فسفات، پتاسیم، روی و آهن گندم تحت شرایط شوری خاک شدند. تیمار تلقیح باکتری *سودوموناس فلورسنس*، غلظت روی اندام هوایی ذرت را ۴۰/۹۸ درصد در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد و چنین استنباط شد که تلقیح میکروبی از طریق تأثیر بر جذب عناصر غذایی، مقاومت گیاه ذرت را در شرایط وجود تنش شوری افزایش داد (*Barin et al.*, 2019).

سدیم

غلظت سدیم محلول خاک با افزایش سطوح شوری افزایش معنی‌داری نشان داد (جدول۵). بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت سدیم خاک در تیمارهای ۱۶ و ۲ دسی‌زیمنس بر متر با حدود ۵۰ میلی‌گرم برلیتر تفاوت مشاهده گردید(جدول۵). غلظت سدیم خاک در دو گروه قلیاپسندها و شوروقلیاپسندها بدون اختلاف معنی‌دار آماری، در گروه آماری (b) قرار گرفتند و تنها مقدار این کاتیون در گروه شورپسندها (۳۵/۰۰ میلی‌گرم برلیتر) بیش‌تر بود (جدول۸). بیش‌ترین غلظت سدیم خاک در تیمارهای S16×HA، S16×H وS16×A به‌ترتیب با ۷۰/۵۷ ، ۶۶/۷۱ و ۵۶/۴۶ میلی‌گرم بر لیتر و اختلاف معنی‌دار با یکدیگر داشتند و کم‌ترین آن نیز در دو تیمار S8×HA و S2×H با ۱۲/۸۸ و ۱۳/۷۶ میلی‌گرم برلیتر بدست آمد (جدول۸). اشرف و همکاران (Ashraf *et al.*, 2004) بیان نمودند افزایش جمعیت باکتری‌های مولد EPS در منطقه ریشه، غلظت سدیم فراهم را با پیوند کردن آن، برای جذب توسط گیاه کاهش داد و از این طریق به مقاومت گیاهان رشد یافته در محیط‌های شور کمک کرد. بیش‌ترین غلظت سدیم خاک در تیمار ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده گردید (جدول۷). سه تیمار S16× HA0، S16× H10 و S16×A0 با ۹۵/۶۰ ، ۷۰/۹۸ و ۷۰/۴۱ میلی‌گرم برلیتر بیش‌ترین غلظت سدیم خاک و سه تیمار S8× HA0، S2×H22 و S8×H22 با ۱۱/۸۷ ، ۱۲/۲۲ و ۱۲/۲۹ میلی‌گرم برلیتر کم‌ترین غلظت سدیم خاک را نشان دادند و اختلاف معنی‌دار نداشتند (جدول۷).

کلر

با افزایش در سطوح شوری خاک، کلر خاک نیز افزایش یافت (جدول۵). بیش‌ترین غلظت کلر خاک به‌ترتیب در تیمارهای ۱۶، ۴، ۲ و ۸ دسی‌زیمنس‌برمتر بدست آمد، که دقیقا مشابه با مقدار هدایت الکتریکی خاک بود (جدول۵). قلیاپسندها، شوروقلیاپسندها و شورپسندها به‌ترتیب بیش‌ترین تا کم‌ترین شوری خاک را با اختلاف معنی‌دار با یکدیگر (P<۰/۰۵) موجب شدند (جدول۶). بیش‌ترین غلظت کلر خاک در سه تیمار S16×HA، S16×A و S16×H به‌ترتیب با ۲۱۶۸/۹۵ ، ۱۹۹۵/۱۴ و ۱۴۹۴/۵۸ میلی‌گرم بر لیتر و اختلاف معنی‌دار با یکدیگر داشتند (P<۰/۰۵) و کم‌ترین غلظت آن در S8×HA و S8×H با ۴۱۳/۸۲ و ۴۶۷/۲۸ میلی‌گرم برلیتر تعیین شد (جدول۸). اختلاف بین کلر خاک در بیش‌ترین و کم‌ترین تیمار ۲۹۳۱/۱۲ میلی‌گرم برلیتر بود (جدول۷). بیش‌ترین کلر خاک در دو تیمار S16×A11 و S16×HA0 با ۳۳۰۸/۸۳ و ۲۸۶۲/۷۹ میلی‌گرم برلیتر و کم‌ترین غلظت آن نیز با ۳۷۷/۷۱ و ۳۸۶/۹۲ میلی‌گرم برلیتر در S8× H0 و S8× HA9 مشاهده گردید (جدول۷).

نتیجه‌گیری کلی

این آزمایش نشان داد که غلظت عناصر در خاک با مقادیر کمی ویژگی‌های افزاینده رشد گیاه اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه، نسبتاً مطابقت داشت. با افزایش شوری خاک، فسفر، سدیم و کلر خاک افزایش داشت. شوری ۸ دسی‌زیمنس‌برمتر و SAR > ۱۵ تحت تأثیر باکتری‌های

شدیددوست[1] مورد بررسی به عنوان نقطه تغییر عمل کرد. به‌طوری‌که با افزایش شوری به بیش از ۸ دسی‌زیمنس بر متر و نسبت جذبی سدیم به بیش از ۱۵، استفاده از جدایه‌های مختلف، غلظت و فراهمی عناصر در خاک را بهبود بخشید.

روند افزایش مقدار EC و عناصر فسفر و کلر خاک تحت تأثیر باکتری‌ها، مشابه تولید مقادیر کمی افزاینده‌های رشد؛ به‌ترتیب قلیاپسند، شورقلیاپسند و شورپسندها بود. درحالی‌که غلظت آهن خاک تحت تأثیر تغییر pH محیط باکتری‌ها و به‌ترتیب در شورپسندها، قلیاپسندها و شورقلیاپسندها مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر شیمی عنصر بر قابلیت فراهمی آن‌ها با فعالیت جدایه‌های باکتریایی بود. به‌طورکلی میانگین غلظت فسفرتیمارها، ۵۳/۵ برابر فسفر اولیه خاک؛ و غلظت پتاسیم تیمارها، ۲۱ برابر پتاسیم اولیه خاک، تحت تأثیر باکتری‌ها مشاهده گردید؛ که احتمالاً نشان‌دهنده توان بالای باکتری‌های شدیددوست بومی در فراهمی و ممانعت از جذب برخی یون‌های سمی در شرایط تنش شوری و سدیم بالای خاک بود. با توجه به آن‌که بیش‌ترین غلظت فراهم از پتاسیم، آهن و روی در خاک؛ و کمترین قابلیت هدایت الکتریکی و کلر در تیمار باکتری‌های شورپسند بدست آمد، به‌ترتیب جدایه‌های شورپسند H22 و H10 به‌عنوان کاراترین گروه باکتری‌ها در شرایط شوری و قلیائیت خاک شناخته شدند.

Reference

Afshar N., Shekarchizadeh H., Kadivar M., and Fathi M. 2018. Preparation and Evaluation of Bitter Vetch Protein /Chitosan Composite Nanofibers by Electrospinning and Its Use to Encapsulate Peppermint Essential Oil. *Innonative Food Technology*, 6(1):9-18. (In Persian)

Asea P.E.A., Kucey R.M.N., and Stewart J.W.B. 1988. Inorganic Phosphate Solubilization by Two Penicillium Species in Solution Cuplied soillture and Soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 20:459–464.

Ashraf M., Hasnain S., Berge O., and Mahmood T. 2004. Inoculation Wheat Seedlings with Exopolysaccharides-Producing Bacteria Restricts Sodium Uptake and Stimulates Plant Growth under Salt Stress. *Biology and Fertility of Soils*, 40: 157-162.

Astaraei A.R., and Farid Hosseini A.R. 2012. Biological Fertilizers. Technology, Marketing and Application. Mashhad Press Publication. pp:1-220.

Bais H.P., Weir T.L., Perry L.G., Gilroy S., and Vivanco J.M. 2006. The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms. *Annual Review of Plant Biology*, 57: 233-266.

Barin M., Rasouli Sadaghiani H., Ashrafi Saeidlou S., and Shakouri F.2019. Effects of salinity and microbial inoculation on the yield and phosphorous efficiency indicators of corn. *Applied Soil Research*, 7(7(7)):148-165.

Cancellier E. 2013. Re: What are the effects of soil salinity on pH? Retrieved from: https://www.researchgate.net/post/What_are_the_effects_of_soil_salinity_on_pH/5229bdabd3df3ecb0e8259a2/citation/download.

Deilamirad M., Sarikhani M.R., and Oustan S.H. 2017. Effect of Potassium Releasing Pseudomonads on Growth and K Uptake of Tomato in Two Soils with Different Amount of Available K. *Journal of Water and Soil (Agricultural Scinces and Technology)*, 31(4):1159-1170. (In Persian)

Ebrahimi Karim Abad R., Rasouli Sadaghiani H., Barin M. 2016. Isolation of phosphate-solubilizing microorganisms from wheat rhizosphere and evaluation of their solubilizing potential in presence of two insoluble phosphate sources. *Applied Soil Research*, 3(2(2)): 29-41.

Enayatizamir N., Norouzi Masir M., and Ghadamkhani A. 2020. The Effect of Plant Growth Promoting Bacteria on Some Biological Indicators and Soil Organic Carbon Forms under Wheat Cultivation. *Journal of Water and Soil Science*, 23(4): 171-181.

[1] Extremophile شدیددوست یا فرین‌دوست (واژه مصوب فرهنگستان)

Esitken A., Yildiz H.E., Ercisli S., Donmez M.F., Turan M., and Gunes A. 2010. Effects of plant growth promoting bacteria (PGPB) on yield, growth and nutrient contents of organically grown strawberry. *Scientia Horticulturae*, 124: 62-66.

Eskandari Torbaghan M. 2017. Isolation and Effeciancy of Haloalkalophilic Bacteria on Salinity Stress Reduction in Wheat. Ph.D. Thesis. Soil Biology. Faculty of Agriculture. Ferdowsi University of Mashhad.

Ghaderi, A., Aliasgharzad, N., Oustan, S., and Olsson, PA. 2008. Efficiency of three *Pseudomonas* isolates in releasing phosphate from an artificial variable-charge mineral (iron III hydroxide). *Soil and Environment*, 27: 71-76.

Glickmann E., and Dessaux Y. 1995. A Critical Examination of the Specificity of the Salkowski Reagent for Indolic Compound Produced by Phytopathogenic Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 61: 793–796.

Gyaneshwar P., Naresh Kumar G., Parekh L.J., and Poole P.S. 2002. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*, 245: 83-93.

Hakimi M., Aliasgharzad N., Sarikhani M.R., and Najafi N.2013. Effect of Dual Inoculation with *Pseudomonas fluorescens* and *Glomus Intraradices* on Nutrient Uptake in Tomato Under Defferent Levels on Salinity. *Applied Soil Research*, 1(2(2)):45-60.

Hartman A. 1988. Ecophysiological aspects of growth and nitrogen fixation in *Azospirillum* spp. *Plant and Soil*, 110: 225-238.

Horikoshi K.1999. Alkaliphiles: Some Applications of Their Products for Biotechnology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 63: 735-750.

Horikoshi K. 2006. Alkaliphiles-Genetic Properties and Applications of Enzymes. Japan. Springer.

Jones B., Brian E., Gravin J., Stolberglaan V. 1992. European Patent Application. 1992; Bulletin 93/18. Publication Number: EP 0 540 127A1. Rank Xerox (UK) Business Services (3.10/3.6/3.3. 1).

Jones D.L., and Darrah P.R. 1996. Re-sorption of Organic Compounds by Roots of (*Zea mays* L.) and Its Consequences in the Rhizosphere. *Plant and Soil*, 178: 153-160.

Kalev S.D., and Toor G.S. 2018. The Composition of Soils and Sediments.Chapter 3.9. *Green Chemistry an Inclusive Approach. Elsevier*. pp: 339-357. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00014-5

Khalili Torghabe G.H., Tehranifar A., Abedi B., and Eskandari Torbaghan. M.2022. Improvement of some growth and biochemical properties of almonds by the use of rhizospheric halophile, alkaliphile and haloalkaliphile bacteria in Khorasan Razavi almonds orchards. *Pomology Research*.6 (2):62-80. 10.30466/RIP.2021.53296.1157

Khan AA., Jilani G., Akhtar M.S., Saqlan Naqvi S.M., and Rasheed M. 2009. Phosphorus Solubilizing Bacteria: Occurrence, Mechanisms and their Role in Crop Production. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 1(1): 48-58 .

Khavazi K., Asghar Zadeh A., Asadi Rahmani H., Rajali F., Falah Nosrat Abadi A., Besharati Kelayeh H., Khosravi H., and Afshari M. 2013. Strategic Plan for Sustainable Management of Soil Resources. Identification, Management and Utilization of Soil Biological Potential. Soil and Water Research, Sana Press.

Khodabakhsh F., Nazeri S., Amoozegar M.A. and Khodakaramian, G.R.2011. Isolation of a moderately halophilic bacterium resistant to some toxic metals from Aran & Bidgol Salt Lake and its phylogenetic characterization by 16S rDNA gene. *Feyz (Journal of Kashan University of Medical Sciences)*, 2011; 15 (1): 50-57. URL: http://feyz.kaums.ac.ir/article-1-1108-fa.html

Khodadadi R., Ghorbani-Nasrabadi R., Olamaee M., Movahedi Naeini A.R. 2019. Isolation and screening of native azotobacter from salt affected soils and measurement of their growth promoting properties. *Applied Soil Research*, 7 (2(2)):109-122.

Klute A. 1986. Method of Soil Analysis Part l: Physical and Mineralogical Methods. 2nd edition. ASA. SSSA. Madison. Wisconsin. USA.

Larpin S., Sauvageot N.S., Pichereau V., Laplace J.M., Auffray Y.k. 2002. Biosynthesis of Exopolysaccharide by *Bacillus licheniformis* Strain Isolated from Ropy Cider. *International Journal of Food Microbiology*, 77:1-9.

Lind K., Lafer G., Schloffer K., Innerhoffer G., and Meister H. 2003. Organic Ruit Growing. CABI Publication, Wallingford, UK.

Lindsay W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42: 421- 428.

Liu D., Yang Q., Ge K., Hu X., Qi G., Du B., Liu K., and Ding Y. 2017. Promotion of Iron Nutrition and Growth on Peanut by *Paenibacillus illinoisensis* and *Bacillus* sp. Strains in Calcareous Soil. *Brazilian Journal of Microbiology*, 48(4):656-670. doi: 10.1016/j.bjm.2017.02.006.

Looijesteijn P.L., Trapet L., De Vries E., Abee T., and Hugenholtz J. 2001. Physiological function of exopolysaccharides produced by *lactococcus lactis*. *International Journal of Food Microbiology*, 64:71-80.

Malboobi MA., Owlia P., Behbahani M., Sarokhani E., Moradi S., Yakhchali B., Deljou A., and Morabbi Heravi K. 2009a. Solubilization of organic and inorganic phosphates by three highly efficient soil bacterial isolates. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25: 1471–1477.

Manteghi N. 1968. Full Description of Decomposition Methods on Soil and Water Samples. Soil and Water Institute. Thechnical Issue No. 168. pp: 98-116.

Margesin R., and Schinner F. 2001. Potential of Halotolerant and Halophilic Microorganisms for Biotechnology. *Extremophiles*. 5:73–83.

Mayak S., Tirosh T., and Glick B.R.2004. Plant growth-promoting bacteria confer resistance in tomato plants to salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 42: 565–572.

Mehrshad M., Amoozegar M.A., Yakhchali B., and Shahzedeh Fazeli A. 2012. Biodiversity of moderately halophilic and halotolerant bacteria in the western coastal line of Urmia lake. *Biological Journal of Microorganisms*, 1(2): 49-70.

Nadeem S.M., Zahir Z.A., Naveed M., and Arshad M. 2007. Preliminary Investigations on Inducing Salt Tolerance in Maize through Inoculation with Rhizobacteria Containing ACC deaminase Activity. *Canadian Journal of Microbiology*, 53: 1141-1149.

Nadeem S.M., Zahir Z.A., Naveed M., and Arshad M. 2009. Rhizobacteria containing ACC-deaminase confer salt tolerance in maize grown on salt-affected fields. *Canadian journal of microbiology*, 55(11): 1302-1309.

Olsen S. R., Cole C. V., Watenabe F. S., and Dean L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by Extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture, Cooperative Information Reports (CIRs). 939. USA.

Omar DA. 1998. The Role of Rock Phosphate Solubilizing Fungi and *Vesicular Arbuscular Mycorrhiza* (VAM) in Growth of Wheat Plants Fertilized with Rock Phosphate. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 14:211-219.

Rashidi Z., Zeshkpour P., and Kharestani H. 2013. Instructions for Preparing Biofertilizers. Agricultural Education and Natural Resources Research (TAK). pp: 190.

Rodriguez H., and Fraga R. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17:319–339.

Safdarian M., Askari H., Soltani M., and Nematzadeh G. 2017. Identification of halophile bacteria from salt deserts of Iran and study some of their physiological traits. *Biological Journal of Microorganism*, 6(22):45-57. https://doi.org/10.22108/bjm.2017.21568

Sarige S., Blum A., and Okon Y. 1988. Improvement of the water status and yield of field grown grain sorghum by inoculation with *Azospirillum brasilense*. *Journal of Agricultural Science*, 110: 271-277.

Shrivastava S., Egamberdieva D., and Varma A. 2015. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and medicinal plants: The State of the Art. Pp. 1-16, In: Egamberdieva D., Shrivastava S., Varma A. (Ed). Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Medicinal Plants. Springer International Publishing. Springer, New York.

Soleimani R., Ali Alikhani H., Towfighi H., and Khavazi K. 2016. Indole-3-Acetic Acid and 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylate Deaminase-Producing Bacteria Alleviate Sodium Stress and Promote Wheat Growth. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction A: Science*, 42(3): 1-12. (In Persian) DOI: 10.1007/s40995-016-0070-3

Talebi M., Olamaei M., Ghorbani Nasr Abadi R., and Movahedi Naeini R. 2018. Isolation and investigation of some growth-promoting properties of halotolerant bacteria -producing polymer of saline soils. *Applied Soil Research*.6 (3(3)):24-36.

Upadhyay S., Singh J., and Singh D. 2011. Exopolysaccharide-producing plant growth promoting rhizobacteria under salinity condition. *Pedosphere*, 21(2): 214-222.

Venkateswarlu B., and Shanker A.K. 2009. Climate Change and Agriculture, Adaptation and Mitigation Strategies. *Indian Journal of Agronomy*, 54:226–230.

Ventosa A., Mellado E., Sanchez C., Marquez M. 2004. Halophilic and Halotolerant Micro Organism from Soils. *Microbiology of Extreme Soils*, 13: 87-15.

Ventosa A., Nieto J.J., and Oren A. 1998. Biology of Moderately Halophilic Aerobic Bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 62(2):504-44. doi: 10.1128/MMBR.62.2.504-544.1998.

Yaqoob C.H., Aslam Awan H., Maqbool A., and Malik KA. 2013. Microbial Diversity of the Rhizospher of Kochia (*Kochia Indica*) Growing Under Saline Condition. *Pakistan Journal of Botany*, 45(S1): 59-65.

Zarinkafsh M.1992. Soil fertility and production, Tehran University Press.pp:1-375.

Zhang H., Kim M.S., Sun Y., Dowd S.E., Shi H., and Paré P.W. 2008. Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 21(6): 737-744.

Effect of Native Halophilic, Alkaliphilic and Haloalkaliphilic Rhizospheric Bacteria of Almond (*Prunus Amygdalus* L.) on the Nutrient Availability in Saline and Sodic Soils

Mehrnoush Eskandari Torbaghan[*1], Gholam Hossein Khalili Torghabe[2] , Abdolhamid Sherafati[3] and Masoud Eskandari Torbaghan[4]

(Received: December, 2022 Accepted: July, 2023)

Abstract

Beneficial soil microorganisms protect the plant from stress by forming symbiotic relationships with the plant, and by converting and retaining elements in the soil, they feed the plant. This research was carried out in two parts: 1) isolation and purification of Fifty-five halophilic, alkaliphilic, and haloalkaliphilic isolates from different almond (*Prunus amygdalus* L.) rhizosphere soils in Khorasan Razavi province and investigation of some plant growth-enhancing properties in all isolates in the laboratory conditions to select superiors isolates; 2) test of the six best-selected isolates in the vicinity of the GN15 almond rootstocks to evaluate the effect of the isolates on the availability of phosphorus, potassium, iron, zinc, chlorine and sodium ions in four saline-sodic soils (2, 4, 8 and 16 dS m^{-1} salinity, and 9.69, 14.99, 14.21 and 19.72 SAR respectively). The results showed that the average production of plant growth-enhancing properties for alkaliphilic, haloalkaliphilic and halophilic isolates was for the production of indole-3-acetic acid (213.93, 77.13 and 15.98 mg L^{-1}), the solubility of mineral phosphates (127.55, 73.99 and 40.19 mg L^{-1}) and the production of exopolysaccharides (578.11, 284.54 and 35.90 mg L^{-1}). The use of bacteria stabilized the pH in the range of 7 to 7.5 and significantly reduced soil electrical conductivity at high salinities (8 and 16 dS m^{-1}) and increased exopolysaccharides. The highest concentration of phosphorus and chlorine anions in soil was observed in alkaliphilic bacteria treatment; the highest concentrations of soil potassium, iron, zinc, and sodium were affected by halophilic bacteria. The highest ratio of K/Na in soil was obtained in the treatment of halophilic (15.3), alkaliphilic (11.8), and haloalkaliphilic (9.4) bacteria, respectively. All kinds of indigenous bacteria of halo-alkaliphilic bacteria showed more efficiency in converting and maintaining nutrients in salinity more than 8 dS m^{-1} and SAR higher than 15.

Keywords: Almond, Cholorin, Dissolution of insoluble phosphate, Miceonutrients, Salin-sodic soil

Eskandari Torbaghan M., Khalili Torghabe G., Sherafati A. and Eskandari Torbaghan M. 2024. Effect of native halophilic, alkaliphilic and haloalkaliphilic rhizospheric bacteria of almond (*Prunus amygdalus* L.) on the nutrient availability in saline and sodic soils. *Applied Soil Research*, 12(1): 38-55.

1. Researcher, Soil and Water Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran (Corresponding author)
2. M.Sc. of Horticultural Science, Horticultural Department, Ferdowsi University of Mashhad
3. Instructor, Horticulture Crops Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
4. Instructor, Horticulture Crops Research Department, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
Corresponding Author Email: mehrnoosh.eskandary@gmail.com