

تأثیر کاربرد کانی سپیولیت بر رشد و جذب عناصر غذایی دانه‌های پسته در حضور باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات تحت تنش خشکی

ریحانه نژاد اسدی^۱، عیسی اسفندیارپور بروجنی^{۲*}، محسن حمیدپور^۳، پیمان عباس‌زاده دهجی^۴، سید جواد حسینی فرد^۵،
میرحسین رسولی صدقیانی^۶

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۶

چکیده

روابط همزیستی و هم‌افزایی بین باکتری‌ها و گیاه به‌واسطه تأثیری که بر بهبود رشد گیاه می‌گذارند، از اهمیت بالایی برخوردار هستند. پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات در آزادسازی عناصر از کانی سپیولیت انجام شد. آزمون گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل سه سویه باکتری (*Bacillus anthracis*, B1)، (*Bacillus cereus*, B2) و (*Serratia marcescens*, B7)، گیاه پسته (دو رقم بادامی ریز زرد و قزوینی) و چهار سطح خشکی (شامل ۹۰ درصد (شاهد)، ۷۵ درصد، ۶۰ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی) بود. نتایج نشان داد که در بالاترین سطح تنش کاربرد سویه‌های B1 و B2 میزان جذب سیلیسیم ریشه را در دانه‌های قزوینی به‌ترتیب ۷۷ و ۹۷ درصد و در دانه‌های بادامی ریز زرد به‌طور میانگین ۲/۷۵ برابر نسبت به عدم تنش خشکی افزایش داد. کاربرد سویه B7 جذب منیزیم را در دانه‌های قزوینی از ۶/۹۱ میلی‌گرم در گلدان در شرایط عدم تنش خشکی به میزان ۱۳/۹ میلی‌گرم در گلدان در بالاترین سطح تنش خشکی افزایش داد. در رقم بادامی ریز زرد نیز کاربرد سویه مذکور جذب منیزیم اندام‌هوایی را در سه سطح تنش ۷۵، ۶۰ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۷۴، ۶۷ و ۶۶ درصد نسبت به عدم تنش خشکی افزایش داد. به‌نظر می‌رسد که حضور این سویه‌ها به‌صورت همیار با گیاهان، تأثیر معنی‌داری بر آزادسازی عناصر از کانی‌ها و جذب آن‌ها توسط گیاه و در نتیجه بهبود وضعیت تغذیه گیاه و تغییر ساختار کانی‌های خاک خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: پراش پرتو ایکس، کانی‌های رسی رشته‌ای، هوادیدگی بیولوژیکی، باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات،

مناطق خشک و نیمه‌خشک

^۱ دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران

^۲ استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران

* نویسنده مسئول: esfandiarpoor@vru.ac.ir

^۳ دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران

^۴ استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان، رفسنجان، ایران

^۵ دانشیار مؤسسه تحقیقات علوم باغبانی، رفسنجان، ایران

^۶ استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

مقدمه

زمین اثرگذار هستند و به باروری خاک کمک می‌کنند؛ زیرا کانی‌های سیلیکاتی، یکی از اصلی‌ترین منابع عناصر غذایی مورد نیاز موجودات زنده هستند (Uroz *et al.*, 2011).

میکروارگانسیم‌ها می‌توانند آزادسازی عناصر از کانی‌های سیلیکاتی را در شرایط هوازای تسریع کنند (Barker *et al.*, 1998). باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات با آزادسازی عناصر از ساختار کانی و تبدیل آن‌ها از شکل غیرقابل دسترس گیاهان به شکل قابل دسترس، سبب افزایش حاصلخیزی خاک و در نتیجه افزایش بهره‌وری گیاهان می‌شوند (Maleva *et al.*, 2017). این باکتری‌ها با سازوکارهای مختلفی از جمله ترشح اسیدهای آلی و معدنی، ترشح پروتون، تولید اگزوپلی‌ساکاریدها و چسبندگی به سطوح کانی‌ها، ساختار کانی‌های سیلیکاتی را به هم ریخته و عناصر ساختاری آن‌ها را آزاد می‌کنند (Barker *et al.*, 1998) و عناصر آزاد شده را به صورت کمپلکس‌های محلول با اسیدهایی مانند اگزالیک اسید، سیتریک اسید و هیدروکسی کربولیک اسید، به راحتی در دسترس گیاهان قرار می‌دهند (Kumawat *et al.*, 2019). Chandrakala *et al.* (۲۰۱۹) خواص محرک رشدی و حل‌کنندگی سیلیکات سویه *Rhizobium Sp.* جدا شده از ریشه گیاه برنج را بررسی نموده و اظهار داشتند که این سویه علاوه بر داشتن خواص محرک رشدی بالا

یکی از تنش‌های غیرزیستی مهم که بر فیزیولوژی و رشد گیاهان تأثیر می‌گذارد، کمبود آب است. از جمله پیامدهای اصلی تنش خشکی در گیاهان زراعی، کاهش سرعت تقسیم سلولی، اندازه برگ، کشیدگی ساقه، تکثیر ریشه، باز و بسته شدن روزنه‌ها، جذب آب و عناصر غذایی توسط گیاه و کارایی مصرف آب می‌باشد (Fahimi *et al.*, 2016).

گیاهان در محیط ریشه، عوامل محیطی را دریافت و به آن پاسخ می‌دهند. آن‌ها در پاسخ به عامل ایجاد تنش (مانند شوری و یا خشکی و یا حتی تنش مربوط به کمبود عناصر غذایی)، تغییراتی در محیط ریشه خود به وجود می‌آورند که از جمله آن‌ها می‌توان به ترشح پروتون و اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم شامل اسید سیتریک، اسید اگزالیک، اسید مالیک، اسید فوماریک و اسید مالئیک اشاره نمود (Vance *et al.*, 2003).

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ترشح اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم توسط گیاهان می‌تواند حلالیت کانی و واکنش‌های هوادیدگی را از طریق ایجاد کمپلکس سطحی با عناصر موجود در ساختار کانی تشدید کند (Bakhshandeh *et al.*, 2011; Maleva *et al.*, 2017). از سوی دیگر، باکتری‌ها از طریق هوادیدگی کانی‌های سیلیکاتی در خاک، بر چرخه عناصر موجود در پوسته

برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی برخوردار هستند (Rahneshan *et al.*, 2018)؛ لیکن برای رشد بهینه و تولید پایدار به شرایط مطلوب نیاز دارند.

Fahimi Khoyerdi *et al.* (۲۰۱۸) با بررسی تأثیر

تنش خشکی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و اسمزی چندین رقم پسته (بادامی ریز زرد، قزوینی، سرخس و ابارقی) اظهار داشتند که تنش خشکی سبب کاهش وزن ساقه و ریشه، سطح برگ، محتوای نسبی آب، کلروفیل کل، کاروتنوئیدها و پروتئین‌های محلول و افزایش پرولین، گلاپسین، فنول و پراکسید هیدروژن در ریشه‌ها و برگ‌های هر چهار رقم پسته شد. ایشان همچنین رقم بادامی ریز زرد را به‌عنوان مقاوم‌ترین رقم به خشکی نسبت به سه رقم دیگر به‌دلیل انباشت اسمولیت بیشتر و همچنین وزن خشک بیشتر ریشه و اندام‌هوایی گزارش نمودند. Jamshidi Goharrizi *et al.* (۲۰۱۹) نیز پایه‌های پسته چهارماهه UCB1، بادامی، قزوینی و کله‌قوچی را به مدت هشت هفته تحت تنش شوری، تنش خشکی و ترکیب تنش شوری و خشکی قرار دادند. ایشان بیان نمودند که در همه پایه‌های پسته مورد مطالعه، غلظت یون‌های سدیم و کلر افزایش و غلظت پتاسیم کاهش یافت. همچنین، در شرایط تنش در تمام پایه‌های پسته

(از جمله توانایی بالای حل‌کنندگی روی و فسفر)، قادر به آزادسازی میزان قابل توجهی سیلیسیم از کانی‌های مختلف از جمله بنتونیت، کائولینیت و کوارتز است. باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPR)^۱ نیز گروهی دیگر از باکتری‌ها هستند که با تولید هورمون‌های گیاهی، سیدروفور، اسیدهای آلی و سیانید هیدروژن باعث انحلال ترکیبات کم‌محلول و فراهمی عناصر غذایی از جمله فسفر، روی و آهن در خاک می‌شوند. از سوی دیگر، با تولید آنزیم ACC-دآمیناز، مقاومت گیاهان را در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی افزایش می‌دهند (Karlidag *et al.*, 2007). مطالعات متعدد (از جمله: Ullah *et al.*, 2017; Razzaghi *et al.*, 2019) نشان داده‌اند که تلقیح باکتری‌های PGPR به ریشه گیاهان، با راه‌کارهای متعددی اثرات تنش بر گیاهان را تعدیل می‌کنند که از جمله آن‌ها می‌توان به تولید اکسین و در نتیجه آن، افزایش رشد و تراکم ریشه و کاهش سطح اتیلن اشاره نمود.

پسته، به‌دلیل سازگاری و مقاومت بالا به شرایط نامساعد محیطی از جمله تنش‌های شوری و خشکی، در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. اگر چه درختان پسته از مقاومت بالایی در

¹ Plant Growth Promoting Rhizobacteria

تنش در گیاهان می‌شود و همچنین از طریق افزایش حجم و وزن ریشه، جذب آب را در شرایط تنش خشکی افزایش می‌دهد (Liang *et al.*, 2005). Habibi & Hajiboland (۲۰۱۳) با بررسی تأثیر سیلیسیم بر کاهش تنش خشکی در پایه پسته احمدآقایی بیان نمودند که تأثیر کاربرد این عنصر در کاهش اثرات تنش خشکی، مثبت و معنی‌دار بود؛ به طوری که تیمار سیلیسیم به طور معنی‌داری سبب افزایش وزن خشک گیاه و مقدار نسبی آب تحت تنش خشکی شد. این عنصر، فعالیت آنزیم‌های کاتالاز و سوپراکسید دسموتاز را افزایش داده و با تأثیر بر سیستم فتوسنتزی، اثرات سوء تنش خشکی را کاهش داد.

با توجه به اثبات وجود کانی‌های فیبری در خاک‌های منطقه رفسنجان به عنوان یکی از مناطق مهم پسته‌کاری ایران (نورمندی پور و همکاران، ۱۳۹۳؛ فرپور، ۱۳۸۲)، پژوهش حاضر در راستای امکان‌سنجی حلالیت و آزادسازی عناصر از این کانی در محیط ریشه پسته و تأثیر آن بر رشد و مقاومت دانه‌ها به تنش خشکی طراحی شده است. اهداف اصلی پژوهش حاضر، (۱) بررسی تأثیر تنش خشکی بر آزادسازی عناصر از کانی سپیولیت و جذب احتمالی آن‌ها توسط دانه‌های پایه‌های مختلف پسته (بادامی ریز زرد و قزوینی) و (۲) بررسی تأثیر کاربرد سویه‌های مختلف باکتری حل‌کننده سیلیکات بر میزان آزادسازی عناصر از کانی سپیولیت و

مورد مطالعه و در مقایسه با شاهد، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، میزان نشت الکترولیت و پرولین افزایش یافت. در این پژوهش، به ترتیب پایه‌های UCB1 < بادامی < قزوینی < کله‌قوچی، به عنوان پایه‌های مقاوم به تنش شوری و خشکی گزارش شدند.

ایلیت، کلریت، ورمیکولیت، اسمکتیت، کائولینیت و کانی‌های فیبری پالیگورسکیت و سپیولیت از جمله کانی‌های غالب در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند (Wilson, 1999). سپیولیت، یکی از کانی‌های رشته‌ای (فیبری) محسوب می‌شود که در گروه کانی‌های سیلیکات ورقه‌ای (فیلوسیلیکات‌ها) با ساختار ۲:۱ قرار گرفته است. فرمول ساختمانی ایده‌آل این کانی به صورت $Mg_8Si_{12}O_{30}(OH)_4(H_2O)_4 \cdot 8H_2O$ می‌باشد (Galan, 1996). کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی سپیولیت، بسیار حساس به تغییرات پی‌اچ و شرایط قلیایی خاک، نسبت سیلیسیم به منیزیم محلول، دما، شوری، شرایط اکسیداسیون و احیا و فراهمی یون آلومینیوم می‌باشد (Cuadros *et al.*, 2017).

منیزیم و سیلیسیم، از جمله عناصر اصلی موجود در ساختار کانی سپیولیت هستند. سیلیسیم به عنوان عنصر مفید در کاهش انواع تنش‌ها از جمله سمیت عناصر، شوری، خشکی و سرمازدگی شناخته شده است. این عنصر با تحریک سیستم آنتی‌اکسیداتیو، باعث کاهش اثرات

نقش آن‌ها در افزایش مقاومت دانه‌های پسته به تنش خشکی بود.

مواد و روش‌ها

بر اساس مطالعه قبلی انجام شده بر روی حلالیت کانی سپیولیت در حضور جدایه‌های مختلف باکتری با ترکیب کشت و زمان انکوباسیون متفاوت (Nejadasadi *et al.*, 2021)، سویه‌های B1 (*Bacillus anthracis*)، B2 (*Serratia marcescens*) و B7 (*Bacillus cereus*) به‌عنوان سویه‌های برتر در رهاسازی عناصر مختلف از کانی سپیولیت شناسایی شدند. لذا در پژوهش حاضر، توانایی باکتری‌های مذکور در آزادسازی عناصر از کانی سپیولیت در ریزوسفر گیاه پسته، تحت تنش خشکی، مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعات کانی‌شناسی

کانی سپیولیت استفاده شده در این پژوهش از معدن فریمان مشهد، شمال شرقی ایران (۴۰° ۵۹' تا ۴۲° ۵۹' طول شرقی و ۳۷° ۳۵' تا ۳۹° ۳۵' عرض شمالی) تهیه شد. قبل از انجام مطالعات مورد نظر، به‌منظور آگاهی از ترکیب اولیه این کانی، آنالیز تجزیه عنصری (XRF)^۱ با استفاده از دستگاه XRF مدل 1800 ساخت شرکت

شیمادزو^۲ ژاپن با ولتاژ ۲۰ ولت و آمپراژ ۵ میلی‌آمپر انجام گرفت. هم‌چنین، خالص‌سازی کانی به دو روش فیزیکی و شیمیایی انجام شد. در روش فیزیکی، از شیوه پیشنهادی توسط مؤمن و همکاران (۱۳۹۶) برای حذف ناخالصی‌های غیررسی استفاده گردید؛ به این صورت که نمونه‌های کانی آسیاب‌شده با آسیاب گلوله‌ای از الک ۲۷۰ مش عبور داده شدند. سپس، خالص‌سازی شیمیایی بر روی نمونه‌های عبور داده شده از الک به روش کیتریک و هوپ^۳ (۱۹۶۳) انجام شد و در نهایت، بعد از چند مرحله شست‌وشو با آب مقطر، نمونه کانی در آون با درجه حرارت ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت خشک گردید. علاوه بر این، ریخت‌شناسی کانی مزبور با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۴ انجام شد. بعد از انجام مطالعات گلخانه‌ای نیز، به‌منظور آگاهی از تغییر در ترکیب شیمیایی کانی، آنالیز تجزیه عنصری (XRF) بر روی کانی استخراج‌شده از محیط ریشه انجام گرفت.

³ Kittrick and Hope

⁴ Scanning Electron Microscope

¹ X-ray fluorescence (XRF)

² Shimadzu

اندازه‌گیری خصوصیات حل‌کنندگی سیلیکات و

محرك رشدی سويه‌ها

در پژوهش حاضر، از سه سويه باکتری دارای توانایی حل‌کنندگی سیلیکات استفاده شده است که از بانک باکتری دانشگاه ارومیه (www.urmia.ac.ir) انتخاب گردیده‌اند و پیش از این توسط رسولی صدقیانی و همکاران (۱۳۹۵) به‌عنوان باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم و سیلیکات معرفی شده‌اند.

به‌منظور بررسی خصوصیات محرك رشدی سويه‌ها، تولید سیدروفور، اکسین، سیانید هیدروژن، آنزیم ACC-دآمیناز و حل‌کنندگی ترکیبات نامحلول فسفات $(Ca_3(PO_4)_2)$ و روی (ZnO و $ZnCO_3$) آن‌ها اندازه‌گیری شد. به این‌صورت که توان تولید سیدروفور به روش لکه‌گذاری ۱۵ میکرولیتر سوسپانسیون باکتری روی پلیت‌های حاوی محیط CAS^۱ و اندازه‌گیری نسبت قطر هاله نارنجی رنگ به قطر کلونی تعیین شد (Alexander & Zuberer, 1991). برای اندازه‌گیری توان تولید اکسین سويه‌ها، ۵۰ میکرولیتر از سوسپانسیون باکتری به ۲۵ میلی‌لیتر محیط نوترینت برات^۲ حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر ال-تریپتوفان منتقل شد و بعد از ۴۸ ساعت،

سوسپانسیون باکتری سانتریفیوژ و با معرف سالکوفسکی^۳ مخلوط شد و با استفاده از اسپکتروفتومتر، میزان جذب نور در طول موج ۵۳۵ نانومتر اندازه‌گیری گردید (Bent *et al.*, 2001). توان تولید HCN^۴، براساس تغییر رنگ کاغذ صافی آغشته به محلول کربنات سدیم و اسید پیکریک در داخل پلیت نوترینت آگار^۵ غنی‌شده با گلايسين، بعد از گذشت پنج روز از کشت باکتری تعیین شد. برای تعیین توان تولید آنزیم ACC-دآمیناز سويه‌ها، ۵۰ میکرولیتر از سوسپانسیون تازه باکتری به ۲۰ میلی‌لیتر محیط کشت حداقل^۶ (DF)، ۲۰ میلی‌لیتر محیط کشت حداقل حاوی سه میلی‌مولار ACC و ۲۰ میلی‌لیتر محیط کشت حداقل حاوی دو میلی‌گرم در لیتر سولفات آمونیوم انتقال داده شد و بعد از ۴۸ ساعت شیکر، میزان جذب نور با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۵۳۵ نانومتر اندازه‌گیری گردید (Jalili *et al.*, 2009). برای اندازه‌گیری توانایی حل‌کنندگی فسفر، ۲۰۰ میکرولیتر از تعلیق باکتری به ۲۵ میلی‌لیتر محیط PKV^۷ حاوی پنج گرم در لیتر تری‌کلسیم فسفات منتقل شد و پس از ۱۲۰ ساعت شیکر، محلول رویی سانتریفیوژ شد و سپس با معرف آمونیوم مولیبدات-وانادات مخلوط و میزان جذب

⁵ Nutrient Agar

⁶ Default Media

⁷ Pikovskaya

¹ Chrome Azurol S

² Nutrient Broth

³ Salkowski

⁴ Hydrogen Cyanide

اندازه‌گیری شد. با افزودن آگار به محیط PKV حاوی نمک‌های نامحلول و لکه‌گذاری تعلیق باکتری بر روی پلیت‌های حاوی این محیط، نسبت قطر هاله شفاف اطراف کلونی به قطر کلونی نیز به‌عنوان معیاری از میزان انحلال ترکیبات کم‌محلول فسفر و روی اندازه‌گیری شد (Saravanan *et al.*, 2003).

سطح خشکی (شامل ۹۰ (شاهد)، ۷۵، ۶۰ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی) به‌منظور بررسی تأثیر تنش خشکی بر هوادیدگی و آزادسازی عناصر از کانی سپیولیت استفاده گردید. همچنین، برای کاشت بذرها، پسته از گلدان‌های یک کیلوگرمی استفاده شد. گلدان‌ها با شن کوارتزی در محدوده اندازه ۰/۳ تا ۱ میلی‌متر شست‌وشو شده، با اسید کلریدریک رقیق و آب مقطر پر شدند. به این صورت که در انتهای هر گلدان، یک کاغذ صافی واتمن^۱ قرار داده شد و سپس، ۱۰۰ گرم شن ته هر گلدان ریخته و بر روی آن، مخلوط شن به‌همراه ۲۰ گرم کانی سپیولیت قرار داده شد (۲/۵ درصد وزنی) و پس از قرار دادن شش بذر جوانه‌دار شده در مرکز هر گلدان و تلقیح باکتری با ریختن ۱۰۰۰ میکرولیتر از مایه تلقیح روی بذرها، روی آن‌ها با شن کوارتزی پوشانده شد (شکل ۱).

نور با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر قرائت گردید (Jeon *et al.*, 2003). برای اندازه‌گیری توانایی حل‌کنندگی روی نیز از محیط مایع PKV حاوی یک گرم در لیتر نمک‌های ZnO و ZnCO₃ استفاده شد و پس از تلقیح باکتری و شیکر، مقدار روی آزاد شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی (GBC Avanta)

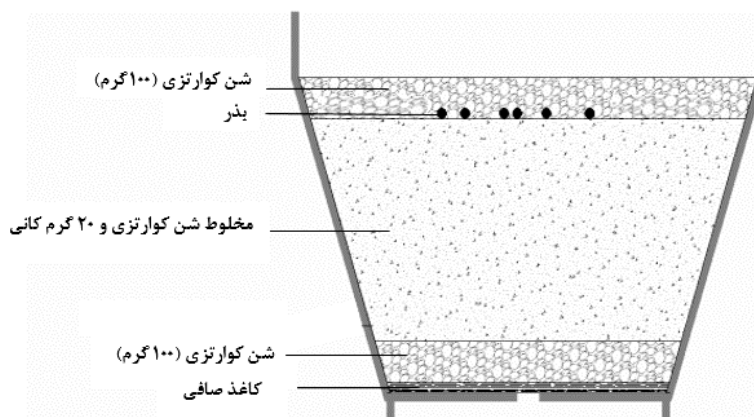
اندازه‌گیری تحمل تنش خشکی سویه‌ها

به‌منظور بررسی میزان تحمل سویه‌ها به سطوح مختلف خشکی، به محیط کشت NB غلظت‌های صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد پلی‌اتیلن گلیکول ۶۰۰۰ (PEG) (به ازای هر لیتر محیط کشت NB) اضافه شد که به‌ترتیب پتانسیل‌های آبی صفر، -۵، -۱۰، -۲۰ و -۳۰ بار را ایجاد کرد. در نهایت، توان رشد باکتری‌ها با اندازه‌گیری چگالی نوری محیط رشد در ۶۰۰ نانومتر بعد از ۷۲ ساعت محاسبه شد (Wang *et al.*, 2014).

آزمون گلخانه‌ای

آزمون گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. در این آزمایش از سه سویه برتر باکتری (با بیشترین توان انحلال کانی، مقاوم به خشکی و دارای بهترین صفات محرک رشدی) و گیاه پسته (دو رقم بادامی ریز زرنند و قزوینی) و چهار

¹ Whatman



شکل ۱- شماتیکی از گلدان مورد استفاده در پژوهش (برگرفته از: Bakhshandeh et al., 2011)

غلظت کل منیزیم و سیلیسیم به‌وسیله دستگاه جذب اتمی مدل GBC Avanta به‌عنوان ویژگی‌هایی از میزان تأثیرپذیری و حلالیت کانی سپیولیت (Bader, 2011) اندازه‌گیری شدند. به‌منظور جداسازی کانی از ریشه‌ها و بررسی تغییرات عنصری سپیولیت در محیط ریشه دانهال‌های پسته، ریشه‌ها را روی الک ۲۳۰ مش قرار داده و با آب مقطر شست‌وشو شدند. سپس محلول زیرین الک، جمع‌آوری گردید و کوارتز باقی‌مانده روی الک بیرون ریخته شد. پس از ته‌نشین شدن کانی عبور داده شده از الک و خارج کردن آب رویی، کانی در آون با درجه حرارت ۶۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت خشک گردید و سپس مقداری از آن به‌منظور بررسی تجزیه عنصری تهیه پراش‌نگار پرتو ایکس به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی شاهرود ارسال شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای آبیاری گلدان‌ها از آب مقطر و محلول غذایی استگنر (Stegner, 2002) بدون منبع منیزیم استفاده شد. آبیاری گلدان‌ها در طول دوره رشد به‌صورت یک روز در میان انجام و رطوبت آن‌ها در ۹۰ درصد ظرفیت زراعی به روش وزنی نگهداری شد. برای اعمال تیمار خشکی بعد از گذشت ۷۰ روز از آغاز کشت و استقرار کامل دانهال‌ها، گلدان‌ها به‌صورت یک روز در میان وزن شده و به میزان اختلاف وزن آن‌ها با وزن‌های محاسبه‌شده در ظرفیت‌های زراعی معین (۹۰، ۷۵، ۶۰ و ۴۵ درصد) آبیاری شدند. بعد از گذشت ۱۵۰ روز از کشت گیاهان پسته، طول ساقه‌ها با خط‌کش، قطر ساقه‌ها به‌وسیله کولیس و تعداد برگ اندازه‌گیری شد. سپس، دانهال‌ها برداشت و پس از خشک نمودن آن‌ها در آون در دمای ۶۰ درجه سلسیوس، وزن خشک اندام‌هوایی و ریشه با استفاده از ترازوی با حساسیت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. به‌علاوه، در عصاره‌های تهیه‌شده از اندام‌هوایی و ریشه به روش خشک‌سوزانی،

۷۵، ۶۰ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی) با استفاده از نرم افزار آماری SAS (نسخه ۹/۱) انجام شد. همچنین، مقایسه میانگین داده‌ها با آزمون دانکن^۱ ($p < 0.05$) انجام گرفت.

و پیک‌های با شدت متوسط ۴/۴۷، ۴/۲۷، ۳/۷۴، ۳/۳۴ و ۳/۱۸ آنگستروم بود. همچنین، کانی دولومیت (پیک ۲/۸۷ آنگستروم) به‌عنوان کانی همراه با کانی سپیولیت به میزان ناچیز در نمونه وجود داشت (شکل ۱). تصویر حاصل از مطالعه کانی مزبور در زیر میکروسکپ الکترونی روبشی (شکل ۲) نیز نمایانگر رشته‌ای (سوزنی) شکل بودن آن و به‌نوعی مکمل نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس بود.

تجزیه واریانس داده‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با تیمارهای نوع سویه باکتری (سه سویه و یک شاهد)، رقم گیاه (دو رقم پسته قزوینی و بادامی ریز زرنده) و تنش خشکی (چهار سطح ۹۰ (شاهد)،

نتایج و بحث

کانی‌شناسی سپیولیت

نتایج مربوط به ترکیب عنصری کانی سپیولیت مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه گردیده است. بر پایه ترکیب عنصری این کانی، میزان آلومینیم، سدیم، پتاسیم، فسفر، منگنز و تیتانیم در نمونه کانی ناچیز بود؛ حال آن‌که مقادیر قابل توجهی سیلیسیم و منیزیم در این کانی مشاهده شد. پراش‌نگار پرتو ایکس کانی سپیولیت نیز نشانگر یک پیک قوی ۱۲/۱ آنگستروم

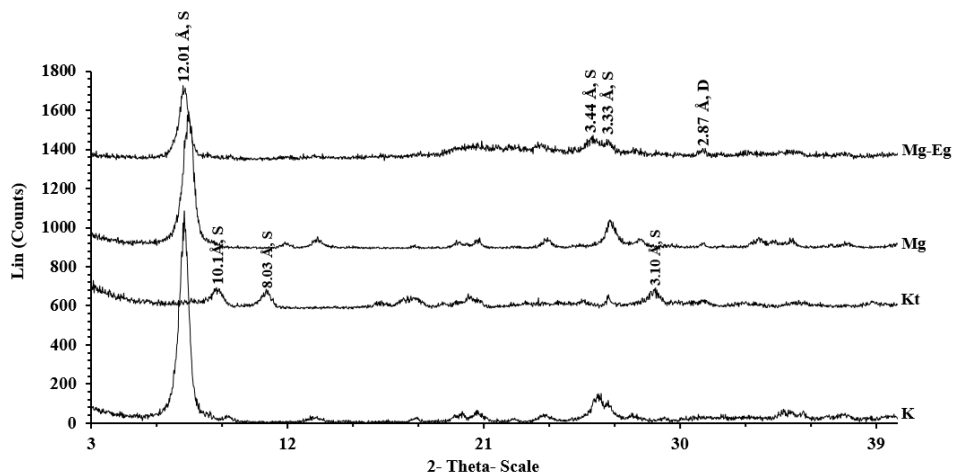
جدول ۱- نتایج XRF کانی سپیولیت مورد استفاده (قبل از انجام مطالعات آزمایشگاهی و گلخانه‌ای)

اکسید عناصر (درصد)											
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	LOI ²	SUM
۰/۰۰۸	۳۱/۲۱	۰/۵۱	۴۴/۳۹	۰/۰۰۸	۰/۰۷۲	۲/۰۵	۰/۰۴۸	۰/۰۱۶	۱/۶۳	۱۹/۹	۹۹/۸۴

LOI: افت حرارتی؛ SUM: مجموع درصد اکسید عناصر

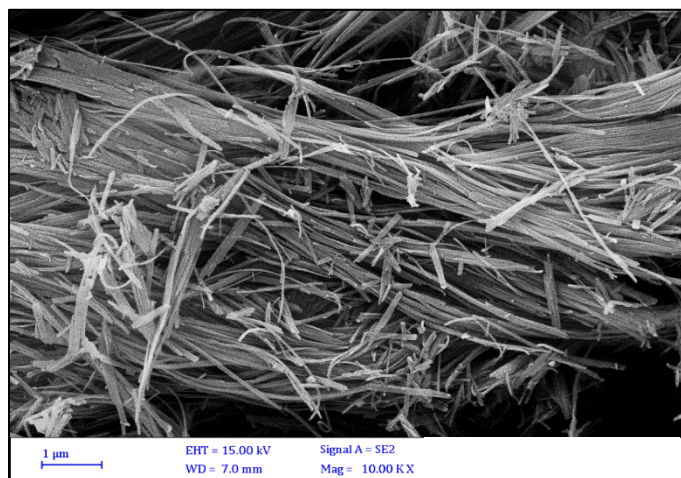
² Loss on Ignition

¹ Duncan



شکل ۱- پراش‌نگار پرتو ایکس نمونه کانی سپیولیت مورد استفاده (قبل از انجام مطالعات آزمایشگاهی و گلخانه‌ای)

Mg-Eg = نمونه اشباع شده با منیزیم و اتیلن‌گلیکول، Mg = نمونه اشباع شده با منیزیم، Kt = نمونه اشباع شده با پتاسیم پس از حرارت دادن تا ۵۵۰ درجه سلسیوس؛ K = نمونه اشباع شده با پتاسیم؛ S = سپیولیت و D = دولومیت.



شکل ۲- تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) سپیولیت مورد استفاده (قبل از انجام مطالعات آزمایشگاهی و گلخانه‌ای)

خصوصیات محرک رشدی سویه‌ها

به کلونی (۲/۵) و سویه B7 (قطر هاله به کلونی ۱/۸۲)، به‌ترتیب بیشترین و کم‌ترین توانایی را در این ارتباط داشتند. تولید عوامل کلات‌کننده توسط باکترهای محرک رشد گیاه به تحرک و انتقال عناصر با حلالیت پایین (مانند آهن و آلومینیم) کمک می‌کند و حلالیت کانی‌های حاوی

جدول ۲ نتایج مربوط به خواص محرک رشدی سویه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جدول، هر سه سویه باکتری توانایی رشد در محیط CAS و تولید سیدروفور را داشتند که از این بین، سویه B1 (قطر هاله

و از این طریق، سرعت هوادیدگی مواد و کانی‌های معدنی را توسط مکانیسم انحلال پروتون افزایش می‌دهد.

تمامی سویه‌ها توانایی انحلال ترکیبات کم‌محلول روی را نیز داشتند که بیشترین و کمترین انحلال آن، به ترتیب مربوط به سویه‌های B2 (با میزان آزادسازی ۶۳/۳ میلی‌گرم در لیتر روی از ترکیب کم‌محلول کربنات روی) و B5 (با میزان آزادسازی ۳۲ میلی‌گرم در لیتر روی از ترکیب کم‌محلول کربنات روی) بود (جدول ۲). مکانیسم اصلی باکتری‌ها در انحلال ترکیبات کم‌محلول روی، کاهش پی‌اچ محیط به پنج و یا کمتر و کلات کردن روی توسط لیگاندهای ترشح شده از میکرواگانیزم‌ها و در نتیجه آزادسازی این عنصر می‌باشد (Sarathambal *et al.*, 2010).

در رابطه با تولید اکسین که یکی از مهم‌ترین هورمون‌های گیاهی مؤثر در رشد و نمو گیاه بوده و به‌عنوان تنظیم‌کننده رشد محسوب می‌شود (Abbaszadeh-Dahaji *et al.*, 2018)، تمامی سویه‌ها توانایی تولید این هورمون را داشتند که از بین آن‌ها بیشترین توانایی تولید مربوط به سویه B2 و کمترین آن به سویه B1 تعلق داشت. هورمون اکسین با تغییر در مورفولوژی ریشه و افزایش تراکم آن و همچنین ازدیاد

این عناصر را افزایش می‌دهد. سیدروفورها از جمله این عوامل کلات‌کننده میکروبی هستند که به شدت آهن و سایر عناصر را کلات می‌کنند و جذب آن توسط گیاه را حتی در غلظت‌های بسیار کم تقویت می‌کنند (Sarwar *et al.*, 2020).

نتایج همچنین نشان داد که تمامی سویه‌ها توانایی بالایی در انحلال نمک کم‌محلول تری‌کلسیم فسفات و آزادسازی فسفر داشتند که هر سه سویه باکتری به‌طور میانگین، ۶۵۸ میلی‌گرم در لیتر فسفر را از منبع تری‌کلسیم فسفات آزاد نمودند (جدول ۲). انحلال ترکیبات کم‌محلول فسفات توسط باکتری‌ها طی سه مرحله شامل انتشار ترکیبات حل‌کننده مواد معدنی (مانند اسیدهای آلی و معدنی)، ترشح آنزیم‌های خارج سلولی و آزادسازی فسفر با تخریب بستر^۱ اتفاق می‌افتد که در این فرآیند، کاتیون‌های آهن، آلومینیم و کلسیم که با فسفر پیوند ساختاری دارند با گروه‌های عامل هیدروکسیل و کربوکسیل اسیدها کلات تشکیل داده و در نتیجه فسفر از ساختار ترکیبات مزبور آزاد می‌شود و پی‌اچ محیط کاهش می‌یابد (Bashri, 2017). (Barker *et al.*, 1998) دریافتند که این تعامل میکروبی با مواد معدنی و انحلال آن‌ها، باعث افزایش غلظت اسید کربنیک در سطوح مواد معدنی شده

¹ Substrate

آن‌ها به ریشه گیاه ذرت سبب افزایش شاخص‌های رشدی این گیاه از جمله وزن خشک اندام‌هوایی، طول ساقه، سطح برگ و میزان کلروفیل شد. هیچ‌کدام از سویه‌ها، توانایی تولید سیانید هیدروژن (HCN) و آنزیم ACC-دآمیناز را نداشتند (جدول ۲).

ریشه‌های جانبی، رشد گیاه و جذب آب و عناصر غذایی را افزایش می‌دهد (Miransari & Smith, 2014). رضایی و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی توانایی سویه‌های سودوموناس فلورسنت در تولید اکسین و تأثیر آن بر رشد ذرت بیان نمودند که این سویه‌ها توانایی بالایی در تولید اکسین (حتی به میزان ۲۴/۱ میلی‌گرم در لیتر) داشتند و تلقیح

جدول ۲- برخی از خصوصیات محرک رشدی سویه‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر

ACC-دآمیناز ^b	سیانید هیدروژن ^a	حل‌کنندگی روی			سیدروفور	توان انحلال عناصر مختلف			اکسین	سویه
		ZnO	ZnCO ₃	Ca ₃ (PO ₄) ₂		ZnO	ZnCO ₃	Ca ₃ (PO ₄) ₂		
		هاله به کلونی				میلی‌گرم در لیتر				
-	۱	۱/۳۲	۱/۴۸	۲/۲۲	۲/۵۰	۴۲/۲	۳۲/۰۰	۶۶۶	۲/۳۳	B1
-	۱	۱/۴۴	۱/۶۹	۱/۹۸	۲/۰۸	۴۹/۲	۶۳/۳	۶۴۵	۴/۴۵	B2
-	۱	۱/۷۲	۱/۴۵	۲/۲۷	۱/۸۲	۳۹/۷	۴۹/۹	۶۶۵	۳/۴۱	B7

^a: ۱ (عدم تولید)، ۲ (تولید کم)، ۳ (تولید متوسط)، ۴ (تولید زیاد) و ۵ (تولید خیلی زیاد).

^b: + و - به ترتیب نشانگر تولید و عدم تولید آنزیم ACC-دآمیناز است.

شوری و خشکی می‌تواند رشد گیاه را بهبود بخشد و اثرات تنش‌ها را بر گیاه کاهش دهد. Ansari & Ahmad (۲۰۱۹) با بررسی کاربرد سویه‌های *Pseudomonas sp.*، *Brevibacterium sp.*، *Pantoea sp.*، *Bacillus sp.* و *Acinetobacter sp.* دارای صفات محرک رشدی بالا و متحمل به تنش‌های شوری و خشکی (۱/۵ مولار کلرید سدیم و ۵۵ درصد پلی‌اتیلن‌گلیکول) بیان نمودند که تلقیح گیاه گندم با سویه‌های مذکور سبب افزایش قابل توجهی در صفات رویشی این گیاه مانند طول ساقه، طول ریشه و وزن خشک اندام‌هوایی و ریشه در مقایسه با شاهد گردید.

مقاومت جدایه‌ها به شوری و خشکی در شرایط

آزمایشگاهی

نتایج مطالعه مقاومت سویه‌های استفاده‌شده در این پژوهش به تنش خشکی و رشد و یا عدم رشد آن‌ها در شرایط تنش در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان داد که تمامی سویه‌ها قادر به رشد تا سطح ۴۰ درصد پلی‌اتیلن‌گلیکول بودند و توانایی بالایی در تحمل تنش خشکی داشتند. با توجه به این‌که سویه‌های مزبور، خصوصیات محرک رشدی بالایی نیز داشتند (جدول ۲)؛ این احتمال وجود خواهد داشت که کاربرد آن‌ها در شرایط

جدول ۳- نتایج مقاومت جدایه‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر به تنش خشکی

سطوح خشکی (غلظت پلی‌اتیلن‌گلیکول)				جدایه
۴۰٪	۳۰٪	۲۰٪	۱۰٪	
+	+	+	+	B1
+	+	+	+	B2
+	+	+	+	B7

+ نشانگر رشد کامل باکتری در سطوح خشکی است.

گیاه، باکتری و خشکی بر طول ساقه و تعداد برگ دانه‌های پسته معنی‌دار بود. تنش خشکی، تنها عامل اثرگذار بر روی قطر ساقه و وزن خشک ریشه دانه‌های پسته بود. در رابطه با وزن خشک اندام‌هوایی نیز اثر متقابل باکتری و تنش خشکی معنی‌دار بود.

تأثیر رقم پسته، خشکی و باکتری بر صفات رویشی

دانه‌های پسته

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به تأثیر رقم پسته، باکتری و تنش خشکی بر صفات رویشی دانه‌های پسته (جدول ۴) نشان داد که اثر متقابل هر سه تیمار رقم

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر رقم پسته، باکتری و خشکی بر صفات رویشی دانه‌های پسته

میانگین مربعات				درجه آزادی	منبع تغییرات ^۱
وزن خشک ریشه	وزن خشک اندام‌هوایی	قطر ساقه	تعداد برگ	طول ساقه	
۰/۱۵ ^{ns}	۳/۰۷ ^{ns}	۰/۱۳ ^{ns}	۱۱/۵ ^{ns}	۴/۸۶ ^{ns}	۱ A
۰/۱۷ ^{ns}	۰/۸۹ ^{ns}	۰/۰۳۴ ^{ns}	۹/۹۲*	۱۰/۶۶ ^{ns}	۳ B
۰/۷۰**	۲/۵۷ ^{ns}	۰/۲۰*	۲۰۱**	۵۵/۷**	۳ C
۰/۰۹ ^{ns}	۰/۵ ^{ns}	۰/۰۵۸ ^{ns}	۱۵/۲*	۱۴/۲ ^{ns}	۳ A*B
۰/۰۸۷ ^{ns}	۰/۶۱ ^{ns}	۰/۰۰۵ ^{ns}	۲/۴۸ ^{ns}	۲۶/۰۷*	۳ A*C
۰/۴۱ ^{ns}	۲/۲۴*	۰/۰۵۷ ^{ns}	۴/۰۰ ^{ns}	۷/۵۵ ^{ns}	۹ B*C
۰/۳۱ ^{ns}	۰/۷۸ ^{ns}	۰/۰۲۳ ^{ns}	۹/۱۶**	۱۹/۵*	۹ A*B*C
۰/۰۴	۰/۲۳	۰/۰۵	۳/۱۲	۹/۱۱	۶۴ خطا
۲۹/۲	۲۵/۳	۱۳/۴	۱۴/۷	۱۶/۶	- ضریب تغییرات (/.)

^۱A: رقم پسته؛ B: باکتری؛ C: خشکی

***، ** و ns: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم معنی‌داری

برگ دانه‌ها در جدول ۵ آورده شده است. در شرایط عدم تنش خشکی (۹۰ درصد ظرفیت زراعی^۱) در رقم

نتایج مقایسه میانگین تأثیر متقابل هر سه تیمار رقم پسته، باکتری و تنش خشکی بر طول ساقه و تعداد

^۱ Field capacity

لیپیده‌ها، تخریب غشاء، تخریب پروتئین‌ها، لیپیدها و اسیدهای نوکلئیک را به اندام‌های گیاهی وارد سازد (Vurukonda *et al.*, 2016). از طرف دیگر، از آنجا که عناصر غذایی توسط آب به ریشه‌ها منتقل می‌شوند، تنش خشکی بر دسترسی و انتقال این عناصر تأثیر می‌گذارد و انتشار عناصر محلول در آب مانند نیترات، سولفات، کلسیم، منیزیم و سیلیسیم را کاهش می‌دهد؛ در نتیجه، عملکرد فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاه در چنین شرایطی دچار اختلال می‌گردد (Vandana *et al.*, 2020). هنگام مواجهه گیاهان با تنش خشکی، باکتری‌های محرک رشد گیاه از طریق سازوکارهای متنوعی چون: (۱) تولید فیتوهورمون‌هایی مانند آبسزیک اسید، سیتوکینین، جیبرلیک اسید، اکسین و اتیلن؛ (۲) تولید ACC-دآمیناز برای کاهش سطح اتیلن ریشه؛ (۳) تغییر در مورفولوژی ریشه؛ (۴) تولید اگزوپلی ساکارید و (۵) تجمع اسمولیت‌ها، تحمل گیاهان به تنش خشکی را بالا می‌برند (Yang *et al.*, 2009). با قرار گرفتن گیاهان در معرض تنش خشکی، آبسزیک اسید اصلی‌ترین هورمون سنتز شده در ریشه‌ها است که به برگ‌ها منتقل می‌شود تا از طریق بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش رشد گیاه، سازگاری گیاهان را با تنش خشکی آغاز کند (Wilkinson *et al.*, 2012).

قرزویی، کاربرد سویه‌های باکتری، اختلاف معنی‌داری را در طول ساقه و تعداد برگ دانهال‌ها نسبت به شاهد ایجاد نکرد؛ اما در رقم بادامی ریز زرد کاربرد سویه‌های باکتری، افزایش معنی‌دار ۲۸ و ۴۲ درصدی را به ترتیب در طول ساقه و تعداد برگ نسبت به شاهد ایجاد نمود. *et al.* Khalilpour (۲۰۲۱) نیز افزایش معنی‌دار طول ساقه، سطح برگ، تعداد برگ و وزن خشک اندام‌هوایی و ریشه دانهال‌های پسته بادامی ریز زرد تلقیح‌شده با سویه‌های باکتری محرک رشد گیاه تحت تنش‌های شوری و خشکی (نسبت به شاهد) را گزارش نمودند. در هر دو رقم پسته با افزایش سطوح خشکی، طول ساقه و تعداد برگ دانهال‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت.

یکی از اثرات اصلی تنش خشکی بر گیاهان، کاهش و یا مهار فتوسنتز است و تحت شرایط تنش آبی، بسته‌شدن روزنه‌ها می‌تواند در مهار فتوسنتز مؤثر باشد (Zlatev & Lidon, 2012). با طولانی شدن زمان بسته ماندن روزنه‌ها، محدودیت‌هایی در تبادلات گازی گیاه ایجاد می‌شود. در چنین شرایطی، ممکن است که میزان اکسیژن مولکولی کاهش یابد و منجر به تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS^۱) از جمله رادیکال‌های سوپراکسید و هیدروکسیل شود. در نتیجه می‌تواند آسیب‌های مختلفی مانند آسیب اکسیداتیو در کلروپلاست‌ها، پراکسیداسیون

^۱ Reactive Oxygen Species

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر رقم پسته، باکتری و خشکی بر طول ساقه و تعداد برگ دانهال‌های پسته

سطوح خشکی (درصد ظرفیت زراعی (FC))				رقم پسته	سویه باکتری
۴۵٪ FC	۶۰٪ FC	۷۵٪ FC	۹۰٪ FC		
طول ساقه دانهال‌ها (سانتی‌متر در گلدان)					
۱۵/۱ ^{de}	۱۵/۹ ^{c-e}	۱۶/۳ ^{c-e}	۲۰/۰ ^{a-c}	B0	قزوینی
۱۶/۸ ^{c-e}	۱۶/۹ ^{c-e}	۲۱/۲ ^{ab}	۱۹/۸ ^{b-d}	B1	
۱۶/۳ ^{c-e}	۱۷/۳ ^{c-e}	۲۰/۴ ^{a-c}	۲۱/۲ ^{ab}	B2	
۱۶/۱ ^{c-e}	۱۷/۱ ^{c-e}	۲۲/۴ ^a	۲۱/۳ ^{ab}	B7	
۱۳/۹ ^e	۱۶/۹ ^{c-e}	۱۶/۲ ^{c-e}	۱۷/۲ ^{c-e}	B0	بادامی ریز زرد
۱۵/۹ ^{c-e}	۱۸/۵ ^{b-d}	۱۸/۷ ^{b-d}	۲۱/۹ ^{ab}	B1	
۱۵/۱ ^{de}	۱۶/۷ ^{c-e}	۱۷/۷ ^{b-e}	۲۲/۳ ^a	B2	
۱۶/۲ ^{c-e}	۱۷/۸ ^{b-e}	۲۰/۳ ^{a-c}	۲۲/۳ ^a	B7	
تعداد برگ دانهال‌ها (میانگین تعداد برگ در گلدان)					
۱۰/۰ ^{g-z}	۱۰/۳ ^{g-z}	۱۴/۳ ^{b-f}	۱۴/۳ ^{b-f}	B0	قزوینی
۸/۶۰ ^{ij}	۱۱/۶ ^{e-i}	۱۵/۳ ^{b-d}	۱۶/۰ ^{bc}	B1	
۱۰/۰ ^{g-z}	۱۱/۰ ^{f-i}	۱۳/۳ ^{c-g}	۱۶/۳ ^{bc}	B2	
۹/۰ ^{.hij}	۱۲/۳ ^{d-h}	۱۲/۳ ^{d-h}	۱۵/۳ ^{b-d}	B7	
۷/۳۰ ^j	۹/۰ ^{h-j}	۱۱/۶ ^{e-i}	۱۲/۰ ^{d-i}	B0	بادامی ریز زرد
۹/۶۰ ^{h-j}	۱۰/۳ ^{g-z}	۱۱/۰ ^{f-i}	۱۴/۳ ^{b-f}	B1	
۸/۶۰ ^{ij}	۱۰/۰ ^{g-z}	۱۲/۳ ^{d-h}	۱۷/۰ ^{ab}	B2	
۹/۰ ^{h-j}	۱۰/۰ ^{g-z}	۱۵/۰ ^{b-e}	۱۹/۷ ^a	B7	

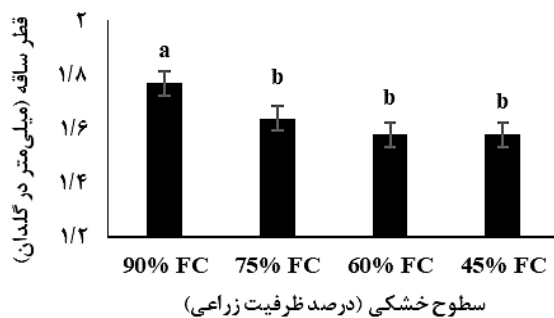
در هر ستون، حروف غیرمشابه نمایان‌گر تفاوت معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن می‌باشند.

تا سطح ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، وزن خشک اندام‌هوایی را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش داد. این افزایش در رابطه با سویه B1 در شرایط عدم تنش خشکی (۹۰ درصد ظرفیت زراعی) و سویه B2 در سطح اول خشکی (۷۵ درصد ظرفیت زراعی) نیز مشاهده گردید. در بالاترین سطح خشکی، اختلاف معنی‌داری در کاربرد باکتری نسبت به شاهد مشاهده نگردید و وزن خشک اندام‌هوایی دانهال‌ها کاهش یافت (شکل ۴). از آن‌جا که سویه‌های تلقیح‌شده به دانهال‌ها از صفات محرک رشد بالایی از جمله توانایی تولید اکسین، سیدروفور و

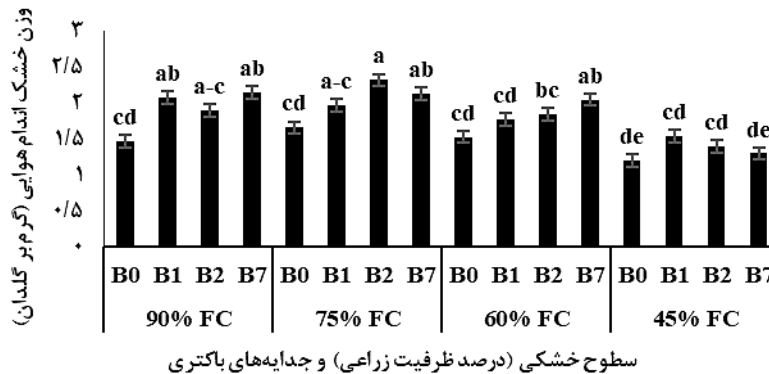
تنش خشکی به‌طور معنی‌داری قطر ساقه را نسبت به شاهد کاهش داد (شکل ۳). مقایسه میانگین اثر متقابل باکتری و خشکی بر وزن خشک اندام‌هوایی دانهال‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. تا سطح ۷۵ درصد تنش خشکی، سویه‌های B2 و B7 وزن خشک اندام‌هوایی را به‌طور معنی‌داری نسبت به شاهد افزایش دادند و تأثیر مثبتی بر افزایش رشد رویشی دانهال‌ها داشتند. با افزایش سطوح خشکی، وزن خشک اندام‌هوایی دانهال‌ها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. کاربرد سویه B7

رشد گیاهان و افزایش مقاومت آن‌ها به تنش‌های محیطی دارد و علاوه بر آزادسازی عناصر غذایی و در اختیار قرار دادن آن برای گیاه، از رشد گیاه از طریق تولید هورمون‌هایی مانند اکسین، جیبرلین و زئاتین، تثبیت بیولوژیکی نیتروژن و کنترل بیولوژیکی عوامل بیماری‌زا حمایت می‌کنند (Bashri, 2017). بررسی تأثیر باکتری‌های محرک رشد بر دانهال‌های پسته در شرایط تنش خشکی توسط سرچشمه‌پور و همکاران (۱۳۹۲) نیز نشان داد که کاربرد سویه‌های مولد اکسین، ACC-دآمیناز و حل‌کننده فسفات توانست تأثیر معنی‌داری بر افزایش وزن خشک اندام‌هوایی، ارتفاع، تعداد برگ و سطح برگ دانهال‌های پسته نسبت به شاهد داشته باشد.

حل‌کنندگی ترکیبات کم‌محلول فسفر و روی برخوردار بودند (جدول ۲) و نیز مقاومت خوبی نسبت به تنش خشکی داشتند (جدول ۳)، کاربرد آن‌ها توانست اثر تنش خشکی بر کاهش رشد اندام‌هوایی را نسبت به شرایط عدم تلقیح باکتری تعدیل نماید. مشابه نتایج پژوهش حاضر، پژوهش‌های دیگری نیز نقش کاربرد سویه‌های سودوموناس، باسیلوس و سراسیا مارسنس را در بهبود رشد گیاهان تحت تنش شوری و سویه‌های سودوموناس و باسیلوس را در بهبود رشد و مقاومت گیاهان به تنش خشکی گزارش نموده‌اند (Bashri, 2017). افزودن باکتری‌های دارای قابلیت حل‌کنندگی ترکیبات نامحلول به خاک، اثرات مستقیم و غیرمستقیم زیادی را بر روی



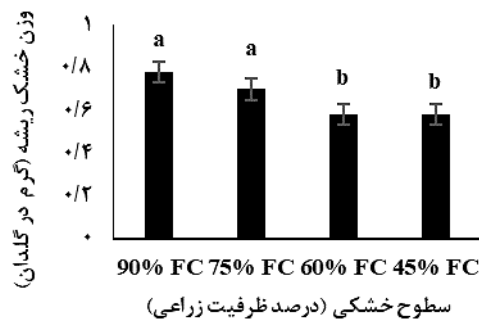
شکل ۳- مقایسه میانگین قطر ساقه دانهال‌های پسته در سطوح خشکی متفاوت حروف مشابه، فاقد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن می‌باشند.



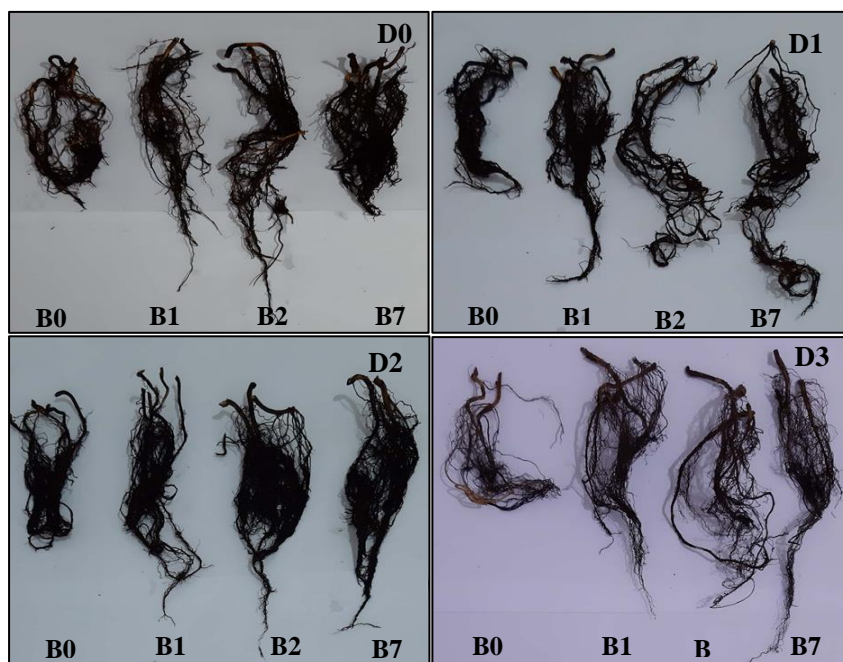
شکل ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل باکتری و خشکی بر وزن خشک اندام هوایی دانه‌های پسته (B0: عدم تلقیح باکتری، B1: *Bacillus anthracis*، B2: *Bacillus cereus* و B7: *Serratia marcescens*) حروف مشابه، فاقد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن می‌باشند.

بادامی ریز زرد نتایج مشابهی را گزارش نمودند. در بسیاری از محصولات مهم کشاورزی، تنش خشکی ابتدا توسط سیستم ریشه درک می‌شود. اگرچه رشد ریشه اولیه تحت تأثیر تنش خشکی نیست، اما رشد ریشه‌های جانبی به‌طور عمده کاهش می‌یابد و این موضوع به‌طور عمده با جلوگیری از فعال شدن مریستم‌های ریشه‌های جانبی اتفاق می‌افتد (Deak & Malamy, 2005).

عامل اثرگذار مهم بر وزن خشک ریشه دانه‌ها، تنش خشکی بود و با افزایش تنش خشکی و کم‌آبی، وزن خشک ریشه در هر دو رقم پسته کاهش یافت (شکل ۵). این روند کاهش تراکم ریشه و در نتیجه آن، کاهش وزن خشک ریشه دانه‌ها در شکل ۶ قابل ملاحظه است. Fahimi Khoyerdi *et al.* (۲۰۱۶) نیز با بررسی تأثیر تنش خشکی بر رشد دانه‌های پسته رقم قزوینی و



شکل ۵- مقایسه میانگین وزن خشک ریشه دانه‌های پسته در سطوح خشکی متفاوت حروف مشابه، فاقد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن می‌باشند.



شکل ۶- تغییرات سیستم ریشه‌ای دانهال‌های پسته قزوینی در پاسخ به تنش خشکی در حضور سویه‌های باکتری (D0: FC: ۹۰٪، D1: FC: ۷۵٪، D2: FC: ۶۰٪ و D3: FC: ۴۵٪: B0: عدم تلقیح باکتری، B1: *Bacillus anthracis*، B2: *Bacillus cereus* و B7: *Serratia marcescens*)

تأثیر رقم پسته، خشکی و باکتری بر جذب عناصر

در اندام‌هوایی و ریشه دانهال‌های پسته

جدول ۶ نشان‌دهنده نتایج تجزیه واریانس میزان

جذب عناصر غذایی در اندام‌هوایی و ریشه دانهال‌های

پسته در شرایط تنش خشکی می‌باشند.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس اثر رقم پسته، باکتری و خشکی بر جذب منیزیم و سیلیسیم در اندام‌هوایی و ریشه دانه‌های پسته

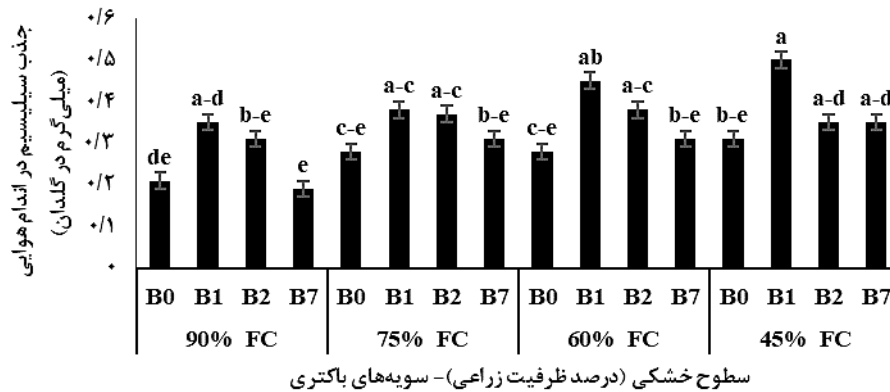
میانگین مربعات				درجه آزادی	منبع تغییرات ^۱
ریشه		اندام‌هوایی			
منیزیم	سیلیسیم	منیزیم	سیلیسیم		
۱۷/۷**	۰/۳۱ ^{ns}	۹/۳۸ ^{ns}	۰/۰۰۰۸ ^{ns}	۱	A
۱۳/۵**	۶/۹۵**	۱۰/۲*	۰/۰۲۶*	۳	B
۱۴/۱**	۶/۶۹**	۷/۳۵ ^{ns}	۰/۰۵۱**	۳	C
۱۲/۴**	۰/۶۳*	۱۷/۴**	۰/۰۲۳ ^{ns}	۳	A*B
۲۱/۴**	۱/۶۷**	۱۴/۹**	۰/۰۱۶ ^{ns}	۳	A*C
۶/۴**	۰/۹۷**	۲۶/۹**	۰/۰۲۸**	۹	B*C
۳/۶*	۱/۲۲**	۱۰/۱**	۰/۰۰۶ ^{ns}	۹	A*B*C
۱/۴۵	۰/۱۵	۳/۰۹	۰/۰۰۸	۶۴	خطا
۲۴/۹	۲۴/۶	۱۹/۸	۲۷/۱	-	ضریب تغییرات (%)

A^۱: رقم پسته؛ B: باکتری؛ C: خشکی

**، *، ns: به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، پنج درصد و عدم معنی‌داری

دانه‌ها ایجاد نکرد؛ اما با افزایش تنش خشکی، این اختلاف معنی‌دار شد. کاربرد سویه B1، میزان سیلیسیم جذب‌شده در اندام‌هوایی در سطوح سوم (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) و چهارم (۴۵ درصد ظرفیت زراعی) تنش خشکی را به ترتیب ۶۰ و ۶۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داد.

با توجه به نتایج جدول ۶ اثرات اصلی و همچنین اثر متقابل دو تیمار تنش خشکی و باکتری بر جذب سیلیسیم اندام‌هوایی دانه‌ها معنی‌دار بود. مقایسه میانگین میزان جذب سیلیسیم اندام‌هوایی تحت تأثیر متقابل خشکی و باکتری در شکل ۷ آورده شده است. در شرایط عدم تنش خشکی، کاربرد و عدم کاربرد باکتری، تفاوت معنی‌داری را در جذب سیلیسیم اندام‌هوایی



شکل ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی و باکتری بر جذب سیلیسیم اندام‌هوایی دانهال‌ها (B0: عدم تلقیح باکتری، B1: *Bacillus anthracis*، B2: *Bacillus cereus* و B7: *Serratia marcescens*) حروف مشابه، فاقد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح پنج درصد آزمون دانکن می‌باشند.

نسبت به دانهال‌های تلقیح‌شده با سویه‌های مذکور در شرایط عدم تنش خشکی افزایش یافت. دانهال‌های رقم بادامی ریز زرد نیز روند مشابهی را در پیش گرفتند؛ با این تفاوت که سویه B1 در این رقم کارآمدتر بود و در سطوح سوم و چهارم تنش خشکی، میزان جذب سیلیسیم را به‌طور معنی‌داری، $\frac{2}{8}$ برابر نسبت به دانهال‌های تلقیح‌شده با این سویه در شرایط عدم تنش خشکی افزایش داد. این افزایش در میزان جذب سیلیسیم ریشه در رابطه با سویه B2 تلقیح‌شده در دانهال‌های رقم بادامی ریز زرد در بالاترین سطح تنش خشکی (۴۵ درصد ظرفیت زراعی) به‌میزان $\frac{2}{7}$ برابر نسبت به دانهال مربوطه در شرایط عدم تنش خشکی نیز مشاهده گردید. در بیشتر موارد، به‌نظر می‌رسد که گیاهان تا زمانی که با تنش روبه‌رو نشوند، سیلیسیم برای آن‌ها مفید نمی‌باشد و

در رابطه با میزان جذب سیلیسیم در ریشه دانهال‌ها اثر متقابل هر سه تیمار رقم پسته، باکتری و خشکی معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین تأثیر متقابل سه تیمار رقم پسته، باکتری و خشکی بر جذب سیلیسیم ریشه در جدول ۷ آورده شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند در رقم قزوینی در شرایط عدم تنش خشکی کاربرد سویه B1 میزان جذب سیلیسیم ریشه را $\frac{2}{4}$ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. با اعمال تنش خشکی تا ۶۰ درصد ظرفیت زراعی، اختلاف معنی‌داری در کاربرد سویه‌های باکتری در جذب سیلیسیم ریشه وجود نداشت؛ اما در سطح چهارم تنش خشکی (۴۵ درصد ظرفیت زراعی)، این اختلاف در ریشه دانهال‌های تلقیحی با سویه‌های B1 و B2 معنی‌دار شد و میزان جذب سیلیسیم ریشه به‌ترتیب ۷۷ و ۹۷ درصد

فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز) تأثیر مثبت و معنی‌داری داشت. استفاده از میکروارگانیزم‌های حل‌کننده سیلیکات به‌طور بالقوه در انحلال اشکال نامحلول سیلیکات و آزادسازی سیلیسیم مفید هستند.

تأثیر تنش خشکی به‌طور گسترده بر روی رشد و جذب عناصر غذایی چندین محصول مانند ذرت، جو و گندم مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل بر تأثیر منفی تنش خشکی بر کاهش انتشار و جذب عناصر غذایی محلول در آب مانند کلسیم، منیزیم، سیلیسیم، نترات و سولفات اتفاق نظر دارند (Vandana *et al.*, 2020). باکتری‌های محرک رشد گیاه قادر هستند که فیتوهورمون‌هایی مانند ایندول استیک اسید، جیبرلین، اتیلن، آبسزیک اسید و سیتوکینین (که توسط گیاهان تولید می‌شوند و برای رشد و نمو گیاه و همچنین پاسخ به تنش‌ها بسیار مهم هستند) را تولید کنند که این هورمون‌ها می‌توانند رشد سلول‌های گیاهی را تحریک کرده و اثرات تنش را کاهش دهند (Egamberdieva & Kucharova, 2009).

اثرات متقابل هر سه تیمار رقم گیاه، باکتری و تنش خشکی بر جذب منیزیم اندام‌هوایی و ریشه دانه‌ها معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج مقایسه میانگین این اثر

حضور آن در هنگامی که گیاهان در معرض تنش‌های محیطی قرار می‌گیرند، نقش مهمی در سلامت گیاه دارد. این عنصر به‌عنوان یک مانع فیزیکی-مکانیکی عمل می‌کند و بخشی از دیواره‌های سلول اپیدرمی و بافت‌های آوندی محسوب می‌شود. یکی از نقش‌های اصلی عنصر مذکور تقویت دیواره‌های سلولی با رسوب سیلیس جامد است. این فرضیه وجود دارد که در اثر انتقال آب از گیاه، اسید سیلیسیک در گیاه تجمع می‌یابد و به دنبال آن، اسید سیلیسیک کلوئیدی و سپس سیلیس آمورف را تشکیل می‌دهد. به این رسوبات سیلیسی موجود در گیاهان، فیتولیت^۱ یا آپال^۲ گیاه گفته می‌شود. علاوه بر این که سیلیسیم به‌طور طبیعی در محلول خاک وجود دارد، بسیاری از گیاهان به افزودن سیلیسیم مکمل در شرایط تنش خشکی پاسخ مثبت می‌دهند (Brahma *et al.*, 2020). Habibi & Hajiboland (۲۰۱۳) با بررسی تأثیر کاربرد سیلیسیم از منبع متاسیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) به میزان ۰/۳۵ گرم بر کیلوگرم خاک بر کاهش اثرات تنش خشکی در رقم پسته احمد آقایی گزارش نمودند که کاربرد سیلیسیم بر اکثر صفات فیزیولوژیکی اندازه‌گیری شده در برگ‌های پسته (مانند وزن تازه و خشک اندام‌هوایی و ریشه، مقدار نسبی آب و

¹ Phytolith² Plant's opal

تلقیح‌شده با سویه مذکور در شرایط عدم تنش خشکی افزایش معنی‌دار داد. در رقم بادامی ریز زرد، دانهال‌های تلقیح‌شده با سویه B1 در شرایط عدم تنش خشکی، جذب منیزیم بالایی داشتند (۱۴/۱ میلی‌گرم منیزیم در گلدان)؛ اما با اعمال تنش، کارایی آن‌ها کاهش یافت. نتایج جذب منیزیم ریشه نشان داد در رقم قزوینی در شرایط عدم تنش خشکی، اختلاف بین میزان جذب منیزیم ریشه دانهال‌های تلقیح‌شده با سویه B1 با سایر سویه‌ها معنی‌دار بود و کاربرد این سویه، میزان جذب را ۲/۴ برابر نسبت به شاهد افزایش داد. با افزایش تنش خشکی (تا ۶۰ درصد ظرفیت زراعی) کاربرد سویه‌ها تأثیری بر جذب منیزیم نداشت؛ اما در بالاترین سطح تنش خشکی، میزان جذب منیزیم در حضور سویه B1 به‌طور ناگهانی به میزان ۲/۳ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. در رقم بادامی ریز زرد، اختلاف معنی‌داری در کاربرد سویه‌ها با جذب منیزیم در مقایسه با شاهد وجود نداشت (جدول ۷).

متقابل در جذب منیزیم اندام‌هوایی در جدول ۷ آورده شده است. نتایج بررسی نقش باکتری در بهبود جذب منیزیم با افزایش تنش خشکی نشان داد که در رقم قزوینی در وضعیت عدم تنش خشکی، اختلاف معنی‌داری در جذب منیزیم در شرایط کاربرد و عدم کاربرد باکتری وجود نداشت؛ اما با افزایش تنش، این اختلاف در رابطه با سویه B7 معنی‌دار شد؛ به‌نحوی که میزان جذب منیزیم در دانهال‌های تلقیح‌شده با سویه B7 از ۶/۹۱ میلی‌گرم در گلدان در شرایط عدم تنش خشکی به میزان ۱۳/۹ میلی‌گرم در گلدان در بالاترین سطح تنش خشکی (۴۵ درصد ظرفیت زراعی) رسید. در رابطه با رقم بادامی ریز زرد، تأثیر سویه B7 در افزایش جذب منیزیم گیاه از همان سطح اول تنش خشکی مشهود بود؛ به‌طوری که کاربرد این سویه، میزان جذب منیزیم اندام‌هوایی را در سه سطح تنش ۷۵، ۶۰ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۷۴، ۶۷ و ۶۶ درصد نسبت به جذب منیزیم دانهال‌های

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل رقم پسته، باکتری و خشکی بر جذب سیلیسیم و منیزیم در اندام‌هوایی و ریشه

دانهال‌های پسته					
رقم پسته	خشکی (% FC)	سویه باکتری	منیزیم اندام‌هوایی (mg pot ⁻¹)	سیلیسیم ریشه (mg pot ⁻¹)	منیزیم ریشه (mg pot ⁻¹)
۹۰		B0	۶/۸۱ ^{de}	۰/۷۳ ^j	۲/۸۹ ^e
		B1	۱۰/۷ ^{a-d}	۱/۷۹ ^{d-i}	۸/۹۲ ^b
		B2	۱۰/۶ ^{a-d}	۱/۳۸ ^{e-j}	۶/۰۶ ^{b-e}
		B7	۶/۹۱ ^{de}	۰/۶۳ ^j	۲/۹۳ ^e
۷۵		B0	۶/۳۹ ^{de}	۰/۸۵ ^{g-j}	۳/۱۳ ^e
		B1	۱۱/۸ ^{ab}	۱/۵۱ ^{e-j}	۴/۷۶ ^{c-e}
		B2	۶/۳۷ ^{de}	۰/۸۸ ^{g-j}	۳/۸۴ ^{de}
		B7	۹/۴۴ ^{b-d}	۱/۳۳ ^{e-j}	۳/۱۱ ^e
قزوینی	۶۰	B0	۵/۶۹ ^e	۱/۱۹ ^{f-j}	۳/۳۶ ^e
		B1	۸/۷ ^{b-d}	۲/۰۰ ^{d-g}	۵/۳۶ ^{c-e}
		B2	۵/۷۹ ^e	۱/۲۵ ^{e-j}	۳/۹۰ ^{de}
		B7	۶/۶۳ ^{de}	۱/۱۵ ^{f-j}	۵/۰۳ ^{c-e}
۴۵		B0	۷/۴۸ ^{c-e}	۱/۴۹ ^{e-j}	۵/۵۴ ^{c-e}
		B1	۹/۴۱ ^{b-d}	۳/۱۷ ^{a-c}	۱۳/۰ ^a
		B2	۷/۵۸ ^{c-e}	۲/۷۳ ^{b-d}	۶/۹۹ ^{b-d}
		B7	۱۳/۹ ^{ab}	۱/۵۲ ^{e-j}	۵/۸۱ ^{b-e}
۹۰		B0	۵/۶۴ ^e	۰/۶۶ ^{ij}	۲/۷۳ ^e
		B1	۱۲/۳ ^{ab}	۱/۳۳ ^{e-j}	۴/۵۷ ^{c-e}
		B2	۱۴/۱ ^a	۰/۹۶ ^{g-j}	۴/۳۱ ^{c-e}
		B7	۷/۷ ^{c-e}	۰/۸۸ ^{g-j}	۳/۴۸ ^{de}
۷۵		B0	۶/۶۹ ^{de}	۰/۹۰ ^{g-j}	۲/۵۶ ^e
		B1	۱۰/۷ ^{a-d}	۰/۹۱ ^{g-j}	۲/۶۶ ^e
		B2	۷/۷۹ ^{c-e}	۱/۲۵ ^{e-j}	۵/۳۰ ^{c-e}
		B7	۱۳/۴ ^{ab}	۰/۹۴ ^{g-j}	۵/۹۱ ^{b-e}
بادامی ریز زرند	۶۰	B0	۷/۰۶ ^{c-e}	۱/۴۱ ^{e-j}	۴/۸۹ ^{c-e}
		B1	۱۰/۳ ^{a-d}	۳/۶۰ ^{ab}	۷/۴۵ ^{bc}
		B2	۷/۰۶ ^{c-e}	۱/۸۵ ^{d-h}	۴/۳۴ ^{c-e}
		B7	۱۲/۹ ^{ab}	۱/۳۷ ^{e-j}	۴/۹۴ ^{c-e}
۴۵		B0	۷/۸۶ ^{c-e}	۱/۶۲ ^{e-j}	۴/۳۸ ^{c-e}
		B1	۸/۱۴ ^{b-d}	۳/۷۸ ^a	۵/۳۴ ^{c-e}
		B2	۸/۶ ^{b-d}	۲/۷۴ ^{b-d}	۴/۷۴ ^{c-e}
		B7	۱۲/۸۲ ^{ab}	۱/۶۰ ^{e-j}	۳/۹۳ ^{de}

دانهال‌های پسته تحت تنش خشکی را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج اخیر با نتایج مربوط به ترکیب عنصری

جدول ۸ نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل ترکیب

شیمیایی سپولیت پس از جداسازی از محیط ریشه

سپیولیت قبل از قرارگیری در محیط ریشه دانهال‌ها (جدول ۱) نشان‌دهنده آن است که مقادیر عناصر سیلیسیم و منیزیم در سپیولیت، به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است که حاکی از انحلال سپیولیت و آزاد شدن عناصر مزبور از ساختار آن می‌باشد.

جدول ۴-۸- نتایج XRF کانی سپیولیت جداشده از محیط ریشه دانهال پسته تحت تنش خشکی در انتهای دوره کشت

اکسید عناصر (درصد)							
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
۰/۰۱	۲۷/۴۲	۱/۰۳	۴۵/۱۱	۰/۰۴	۰/۲۴	۲/۸۰	۲/۷۱
SUM	LOI	Cr ₂ O ₃	NiO	SrO	SO ₃	TiO ₂	MnO
۹۹/۹۸	۲۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۰۶

LOI: افت حرارتی؛ SUM: مجموع درصد اکسید عناصر

رشد بالایی مانند تولید سیدروفور و حل‌کنندگی ترکیبات نامحلول فسفر و روی و همچنین مقاومت بالایی به تنش شوری و خشکی دارند و این سه توانایی باکتری‌ها در آزادسازی عناصر از کانی، صفات محرک رشدی بالقوه و تحمل تنش‌های محیطی می‌توانند نقش بسیار مؤثری در بهبود وضعیت رشد، تغذیه و عملکرد گیاهان در خاک‌های مناطق خشک تحت تأثیر تنش خشکی (و البته تنش شوری) داشته باشد.

منابع

۱. رسولی صدقیانی، م.ح، صادقی آزاد، س، برین، م، سپهر، ا، و دولتی، ب. (۱۳۹۵). تأثیر باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات بر آزادسازی پتاسیم از کانی‌های میکایی و جذب آن توسط گیاه ذرت. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)، جلد ۲۰ (شماره ۷۸): ۸۹-۱۰۲.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به این که سویه‌های برتر باکتری در این پژوهش، نقش مؤثری در آزادسازی بخش عمده عناصر از ساختار کانی داشتند، شاید بتوان گفت در شرایط کمبود عناصر غذایی با مکانیزم‌هایی که در محیط ریزوسفر و در حضور این باکتری‌ها رخ می‌دهد، کانی‌های موجود در خاک می‌توانند هوادیده شوند و عناصر خود را در اختیار گیاه قرار دهند. این موضوع، به‌ویژه در خاک‌های مناطق خشک که گیاهان از کمبود عناصر غذایی و ماده آلی رنج می‌برند می‌تواند از اهمیت دوچندان برخوردار باشد. از بین سه سویه کاربردی در تنش خشکی، سویه‌های B1 (*Bacillus anthracis*) و B2 (*Bacillus cereus*) بیشترین تأثیر در بهبود صفات رویشی و افزایش جذب عناصر غذایی را داشتند. این سویه‌ها علاوه بر توانایی آزادسازی مقادیر قابل توجهی عناصر از کانی سپیولیت، خصوصیات محرک

۲. رضایی، د.س، عباسزاده دهجی، پ، اخگر، ع.ر، و سلطانی، ع.ا. (۱۳۹۳). تأثیر زمان و ترکیب محیط کشت بر تولید IAA توسط جدایه‌های مختلف سودوموناس فلورسنت و تأثیر جدایه‌ها بر رشد ذرت (*Zea mays L*). نشریه تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۲ (شماره ۲): ۱۲-۲۷.
۳. سرچشمه‌پور، م، ثوابی، غ.ر، سیادت، ح، و علیخانی، ح.ع. (۱۳۹۲). تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد بر بهبود تغذیه و رشد دانهال پسته در شرایط تنش خشکی. مجله پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب)، جلد ۲۷ (شماره ۱): ۱۰۷-۱۱۹.
۴. فرپور، م.ه. (۱۳۸۲). رابطه بین ژنومورفولوژی و تکامل خاک‌های گچی در منطقه رفسنجان. پایان‌نامه دکتری، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۲۴۳ صفحه.
۵. مؤمن، م، کریمی، ع.ر، حلاج‌نیا، ا، و میرحسینی موسوی، پ. (۱۳۹۶). یک روش ساده فیزیکی خالص‌سازی سپیولیت. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۳۱ (شماره ۵): ۱۴۴۷-۱۴۵۵.
۶. نورمندی‌پور، ف، فرپور، م.ه، و سرچشمه‌پور، م. (۱۳۹۳). چگونگی تشکیل، رده‌بندی و کانی‌شناسی رسی خاک‌های گچی نمکی منطقه کشکوئیه-انار کرمان. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، جلد ۲۲ (شماره ۲): ۲۶۹-۲۸۰.
7. Abbaszadeh-Dahaji, P, Saleh-Rastin, N, Asadi-Rahmani, H, Khavazi, K, Soltani, A, Shoary-Nejati, AR, & Miransari, M. (2018). Correction to: plant growth-promoting activities of *fluorescent pseudomonads*, isolated from the Iranian soils. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40(2), 26-33.
8. Alexander, DB, & Zuberer, DA. (1991). Use of chrome azurol S reagents to evaluate siderophore production by rhizosphere bacteria. *Biology and Fertility of Soils*, 12(1), 39-45.
9. Ansari, FA, & Ahmad, I. (2019). Isolation, functional characterization and efficacy of biofilm-forming rhizobacteria under abiotic stress conditions. *Antonie van Leeuwenhoek*, 112, 1827-1839.
10. Bader, N. (2011). Sample preparation for flame atomic absorption spectroscopy. *Rasayan Journal of Chemistry*, 4(1), 49-55.
11. Bakhshandeh, SH, Khormali, F, Dordipour, E, Olamaei, M, & Kehl, M. (2011). Comparing the weathering of soil and sedimentary palygorskite in the

19. Egamberdieva, D, & Kucharova, Z. (2009). Selection for root colonising bacteria stimulating wheat growth in saline soils. *Biology and Fertility of Soils*, 45 (6), 563-571.
20. Fahimi Khoyerdi, F, Shamshiri, MH, & Estaji, A. (2016). Changes in some physiological and osmotic parameters of several pistachio genotypes under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 198, 44-51.
21. Galan, E. (1996). Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays. *Clay Minerals*, 31, 443-453.
22. Habibi, G, & Hajiboland, R. (2013). Alleviation of drought stress by silicon supplementation in pistachio (*Pistacia vera L.*) plants. *Folia Horticulturae*, 25(1), 21-29.
23. Jalili, F, Khavazi, K, Pazira, E, Nejati, A, Asadi Rahmani, H, Rasuli Sadaghiani, H, & Miransari, M. (2009). Isolation and characterization of ACC deaminase producing fluorescent pseudomonads, to alleviate salinity stress on canola (*Brassica napus L.*) growth. *Plant Physiology*, 166, 667-674.
24. Jeon, JS, Lee, SS, Kim, HY, Ahn, TS, & Song, HG. (2003). Plant growth promotion in soil by some inoculated microorganism. *Journal of Microbiology*, 41(4), 271-276.
25. Karlidag, H, Esitken, A, Turan, M, & Sahin, F. (2007). Effects of root inoculation of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on yield, growth rhizosphere zone. *Applied Clay Science*, 54, 235-241.
12. Barker, WW, Welch, SA, Welch, SC, & Banfield, F. (1998). Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. *American Mineralogist*, 83, 1551-1563.
13. Bashri, G, Patel, A, Singh, R, Parihar, P, & Prasad, SM. (2017). Mineral solubilization by microorganism, mitigating strategy in mineral deficient soil. *Microbial Biotechnology*, 12, 265-285.
14. Bent, E, Tuzan, S, Chanway, CP, & Enebak, S. (2001). Alteration in plant growth and in root hormone levels of lodgepole pines inoculated with rhizobacteria. *Canadian Journal of Microbiology*, 47, 793-800.
15. Brahma, R, Ahmed, P, & Choudhury, M. (2020). Silicon nutrition for alleviation of abiotic stress in plants: a review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(4), 1374-1381.
16. Chandrakala, C, Voleti, SR, Bandeppa, S, Sunil Kumar, N, & Latha, PC. (2019). Silicate solubilization and plant growth promoting potential of *Rhizobium sp.* isolated from rice rhizosphere. *Silicon*, 11, 1-12.
17. Cuadros, J. (2017). Clay minerals interaction with microorganisms: a review. *Clay Minerals*, 52(2), 235-261.
18. Deak, KI, & Malamy, J. (2005). Osmotic regulation of root system architecture. *The Plant Journal*, 43(1), 17-28.

- Environmental and Experimental Botany*, 99, 110-121.
32. Nejadasadi, R, Esfandiarpour-Boroujeni, I, Hamidpour, M, Abbaszadeh-Dahaji, P, & Hosseinifard, SJ. (2021). Sepiolite Dissolution by Different Silicate Solubilizing Bacteria. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 4(1), 3232-3246.
33. Rahnesan, Z, Nasibi, F, & Ahmadi Moghadam, A. (2018). Effects of salinity stress on some growth, physiological, biochemical parameters and nutrients in two pistachio (*Pistacia vera L.*) rootstocks. *Plant Interactions*, 13(1), 73-82.
34. Razzaghi Komaresofla, B, Alikhani, HA, Etesami, H, & Khoshkholgh-Sima, NA. (2019). Improved growth and salinity tolerance of the halophyte *Salicornia sp.* by co-inoculation with endophytic and rhizosphere bacteria. *Applied Soil Ecology*, 138, 160-170.
35. Jamshidi Goharrizi, K, Baghizadeh, A, Kalantar, M, & Fatehi, F. (2019). Combined effects of salinity and drought on physiological and biochemical characteristics of pistachio rootstocks. *Scientia Horticulturae*, 261, 108-117.
36. Richards, LA. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Agriculture Handbook, No. 60, United States Department of Agriculture, Washington, 166 p.
37. Sarathambal, C, Thangaraju, M, Paulraj, C, & Gomathy, M. (2010). Assessing the and nutrient elements contents of leaves of apple. *Scientia Horticulturae*, 114, 16-20.
26. Khalilpour, M, Mozafari, V, & Abbaszadeh-Dahaji, P. (2021). Tolerance to salinity and drought stresses in pistachio (*Pistacia vera L.*) seedlings inoculated with indigenous stress-tolerant PGPR isolates. *Scientia Horticulturae*, 289, 1-11.
27. Kittrick, JA, & Hope, EW. (1963). A procedure for the particle size separation of soils for X-ray diffraction analysis. *Soil Science*, 96(5), 312-325.
28. Kumawat, N, Kumar, R, Khandkar, UR, Yadav, RK, Saurabh, K, Mishra, JS, Dotaniya, ML, & Hans, H. (2019). Silicon (Si)- and Zinc (Zn)-solubilizing microorganisms, Role in sustainable agriculture. In: Giri, B, Prasad, R, Wu, QS, & Varma, A. (Eds). *Biofertilizers for Sustainable Agriculture and Environment*. (pp. 109-135). Springer, Cham.
29. Liang, YC, Wong, JW, & Long, W. (2005). Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays L.*) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere*, 58, 475-483.
30. Maleva, M, Borisova, G, Koshcheeva, O, & Sinenko, O. (2017). Biofertilizer based on silicate solubilizing bacteria improves photosynthetic function of brassica juncea. *Agrofor International Journal*, 2(3), 13-19.
31. Miransari, M, & Smith, DL. (2014). Plant hormones and seed germination.

- ectomycorrhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(11), 2275-2282.
43. Vance, CP, Uhde-Stone, C, & Allan, DL. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptation by plants for securing a non-renewable resource. *New Phytologist*, 157, 423-447.
44. Vandana, UK, Singha, B, Gulzar, ABM, & Mazumder, PB. (2020). Molecular mechanisms in plant growth promoting bacteria (PGPR) to resist environmental stress in plants. In: Sharma, V., Salwan, R. & Tawfeeq, L. (Eds.). *Molecular Aspects of Plant Beneficial Microbes in Agriculture*. (pp. 221-233). Academic Press: Cambridge, MA, USA; Elsevier Inc.: Hoboken, NJ, USA.
45. Vurukonda, SSKP, Vardharajula, S, Shrivastava, M, & SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 184, 13-24.
46. Wang, S, Ouyang, L, Ju, X, Zhang, L, Zhang, Q, & Li, Y. (2014). Survey of plant drought-resistance promoting bacteria from *Populus euphratica* tree living in arid area. *Indian Journal of Microbiology*, 54(4), 419-426.
47. Wilkinson, S, Kudoyarova, GR, Veselov, DS, Arkhipova, TN, & Davies, WJ. (2012). Plant hormone interactions: innovative targets for crop breeding and management. *Journal of Experimental Botany*, 63(9), 3499-3509.
- Zinc solubilization ability of *Gluconacetobacter diazotrophicus* in maize rhizosphere using labelled ^{65}Zn compounds. *Indian Journal of Microbiology*, 50(1), 103-109.
38. Saravanan, VS, Subramoniam, SR, & Raj, SA. (2003). Assessing in vitro solubilization potential of different zinc solubilizing bacterial (ZSB) isolates. *Brazilian Journal of Microbiology*, 34, 121-125.
39. Sarwar, S, Khaliq, A, Yousra, M, Sultan, T, Ahmad, N, & Khan, M. (2020). Screening of siderophore-producing PGPRs isolated from groundnut (*Arachis Hypogaea L.*) rhizosphere and their influence on iron release in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(12), 1680-1692.
40. Stegner, R. (2002). *Plant Nutrition Studies*. Lamotte Company, Maryland, USA, 662 p.
41. Ullah, S, Hussain, MB, Khan, MY, & Asghar, HN. (2017). Ameliorating salt stress in crops through plant growth-promoting bacteria. In: Singh, D, Singh, H, & Prabha, R. (Eds.). *Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives*. (pp. 542-575). Springer, Singapore.
42. Uroz, S, Turpault, MP, Van Scholl, L, Palin, B, & Frey-Klett, P. (2011). Long term impact of mineral amendment on the distribution of the mineral weathering associated bacterial communities from the beech *Scleroderma citrinum*

- tolerate abiotic stress. *Trends in Plant Science*, 14(1), 1-4.
50. Zlatev, Z, & Lidon, FC. (2012). An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 24(1), 57-72.
48. Wilson, MJ. (1999). The origin and formation of clay minerals in soils: past, present and future perspectives. *Clay Minerals*, 34(1), 7-25.
49. Yang, J, Kloepper, JW, & Ryu, CM. (2009). Rhizosphere bacteria help plants

Effect of Sepiolite Application on Growth and Nutrient Uptake of Pistachio Seedlings in the Presence of Silicate Solubilizing Bacteria under Drought Stress

Nejadasadi, R¹, Esfandiarpour-Boroujeni, I^{2*}, Hamidpour, M³, Abbaszadeh-Dahaji, P⁴, Hosseini-fard, S.J⁵, Rasouli Sadaghiani, M.H⁶

Abstract

Symbiotic and synergy relationship between bacteria and plant through its effect on improving the plant's growth, is very important. The present study aimed to investigate the efficiency of silicate solubilizing bacteria in the release of elements of sepiolite. The greenhouse test was performed as factorial with completely randomized design with three repetitions. This experiment consisted of three bacterial strains (*Bacillus anthracis*, B1), (*Bacillus cereus*, B2) and (*Serratia marcescens*, B7) and pistachio (two cultivars Badami Riz Zarand and Qazvini) and four drought levels (including 90% (control), 75%, 60% and 45% of field capacity). The results showed that at the highest level of drought stress, application of strains B1 and B2 increased the rate of root Si uptake in Qazvini seedlings by 77% and 97%, respectively, and in seedlings of Badami Riz Zarand by an average of 2.75 times compared to non-drought stress conditions. Application of B7 strain increased Mg uptake in Qazvini seedlings from 6.91 mg per pot under non-drought stress conditions to 13.9 mg per pot at the highest level of drought stress. In Badami Riz Zarand, the application of the mentioned strain increased the uptake of Mg in the shoot at three stress levels of 75%, 60% and 45% of the field capacity by 74%, 67% and 66%, respectively, compared to non-drought stress conditions. It seems that the presence of these bacterial strains in symbiosis with plants will have a significant effect on the release of elements from minerals and its absorption by the plant and thus improve plant nutrition and change the mineral structure.

Keywords: X-ray diffraction, Fibrous clay minerals, Bioweathering, Silicate solubilizing bacteria; Arid and semi-arid areas

¹ Graduated PhD student in Soil Sciences and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

² Professor, Soil Sciences and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

³ Associate Prof., Soil Sciences and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

⁴ Assistant Prof., Soil Sciences and Engineering Department, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

⁵ Associate Prof., Horticultural Sciences Research Institute (HSRI), Rafsanjan, Iran.

⁶ Professor, Soil Sciences and Engineering Department, Urumieh University, Urumieh, Iran.

* Corresponding Author Email: esfandiarpour@vru.ac.ir