Study of Silicate-Solubilizing Microorganisms Impact on the Dissolution of Soil Non-Exchangeable Potassium, Growth Indices of Maize (*Zea mays* L.), and Nutrient Uptake

Sanaz Ashrafi-Saeidlou[1,2]*, Mirhassan Rasouli-Sadaghiani[2], Abbas Samadi[2], Mohsen Barin[3], Ebrahim Sepehr[2]

(Received: August, 2024 Accepted: December, 2024)

Abstract

The rapid advancement of agricultural practices has led to a significant decline in the levels of available potassium in the soil. This decline, coupled with the annual rise in the prices of potassium-based chemical fertilizers and their imbalanced application, poses serious challenges to sustainable farming. Additionally, the detrimental effects of these fertilizers on the environment further emphasize the urgent need for alternative approaches. One promising solution is the utilization of native potassium found in the soil. To this end, harnessing the ability of effective microbial strains to dissolvenon-exchangeable forms of potassium (K) can play a vital role in enhancing soil fertility and promoting sustainable agricultural practices. This study aimed to evaluate the potential of potassium-solubilizing microorganisms (KSMs) in solubilizing and releasing soil insoluble potassium, the availability of other essential nutrients, and the growth indices of maize (*Zea mays* L.). The research utilized a completely randomized design for the experimental setup. The treatments included microbial inoculation with either bacterium or fungus (*Pseudomonas fluorescens* and *Aspergillus niger*), as well as two control groups: $Cont^+$ (which included potassium without inoculation) and $Cont^-$ (which lacked both inoculation and potassium. The results of the study demonstrated a significant impact of microbial inoculation on plant growth indices and nutrient concentrations in the soil, as well as in the shoots and roots of the plants. Notably, the highest recorded plant height (54.5 cm) and stem diameter (0.64 cm) were observed in the group subjected to bacterial inoculation. These measurements represented increases of 18.1% and 18.2%, respectively, compared to the $Cont^-$ treatment. The dry weight of plant shoots significantly increased under bacterial inoculation, with increases of 1.8 times and 1.4 times compared to the $Cont^-$ and $Cont^+$ treatments, respectively. In contrast, fungal inoculation resulted in increases of 1.5 times and 1.2 times comparedto the same control treatments. Additionally, bacterial inoculation exerted a considerable effect on the levels of soluble potassium and available phosphorus in the soil. Specifically, the concentrations of soluble potassium and available phosphorus were 1.2 times and 1.3 times higher, respectively, under bacterial inoculation than under fungal treatment. The concentration of exchangeable potassium rose by 30.1% in the presence of bacteria and by 5.1% in the presence of fungi when compared to the $Cont^-$ treatment. These findings suggest that the presence of silicate-solubilizing microorganisms contributes to plant growth enhancement by facilitating the release of potassium from potassium-bearing minerals.

Keywords: Potassium-solubilizing microorganisms, Bio-fertilizer, Potassium release, Nutrient availability.

Ashrafi-Saeidlou S., Rasouli-Sadaghiani M.H., Samadi A., Barin M. and Sepehr E. 2025. Study of silicate-solubilizing microorganisms impact on the dissolution of soil non-exchangeable potassium, growth indices of maize (*Zea mays* L.), and nutrient uptake. *Applied Soil Research*, 12(4): 15-29.

1- Researcher (Ph.D), Soil and Water Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Urmia, Iran.
2- Ph.D Graduated and Professor respectively, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
3- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
* Corresponding Author Email: sanazashrafi92@yahoo.com

مطالعه تأثیر میکروارگانیسم‌های حل‌کننده سیلیکات بر انحلال پتاسیم غیرتبادلی خاک، شاخص‌های رشد گیاه ذرت (*Zea mays* L.) و میزان جذب عناصر غذایی

ساناز اشرفی سعیدلو[۱،۲*]، میرحسن رسولی صدقیانی[۲]، عباس صمدی[۲]، محسن برین[۳]، ابراهیم سپهر[۲]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰)

چکیده

پیشرفت سریع روش‌های کشاورزی منجر به کاهش قابل توجهی در سطح پتاسیم قابل دسترس در خاک شده است. این کاهش، همراه با افزایش سالانه قیمت کودهای شیمیایی پتاسیمی و استفاده نادرست از آن‌ها، چالش‌های جدی برای کشاورزی پایدار ایجاد می‌کند. علاوه بر این، اثرات مخرب این کودها بر محیط زیست، نیاز فوری به رویکردهای جایگزین را بیشتر نمایان می‌سازد. یکی از راه‌حل‌های امیدوارکننده، استفاده از پتاسیم بومی موجود در خاک است. در این راستا، بهره‌گیری از قابلیت سویه‌های میکروبی مؤثر در انحلال اشکال غیرقابل تبادل پتاسیم (K) می‌تواند نقش مهمی در بهبود باروری خاک و ترویج شیوه‌های کشاورزی پایدار ایفا کند. هدف این مطالعه ارزیابی پتانسیل میکروارگانیسم‌های حل‌کننده پتاسیم (KSMs) در انحلال و آزادسازی پتاسیم نامحلول خاک، قابلیت استفاده‌ی سایر عناصر غذایی ضروری و شاخص‌های رشد گیاه ذرت (*Zea mays* L.) بود. در این تحقیق از طرح کاملاً تصادفی برای اجرای آزمایش استفاده شد. تیمارهای آزمایش شامل تلقیح میکروبی (تلقیح باکتری *Pseudomonas fluorescens*، تلقیح قارچ *Aspergillus niger*، شاهد مثبت ($Cont^+$، بدون تلقیح با حضور پتاسیم) و شاهد منفی ($Cont^-$، بدون تلقیح و بدون استفاده از پتاسیم)) بود. نتایج حاکی از تأثیر معنی‌دار تلقیح میکروبی بر شاخص‌های رشد گیاهی و غلظت عناصر غذایی در خاک، اندام‌های هوایی و ریشه بود. بیشترین ارتفاع گیاه (۵۴/۵ سانتی‌متر) و قطر ساقه (۰/۶۴ سانتی‌متر) مربوط به شرایط تلقیح باکتریایی بود که نسبت به تیمار شاهد منفی، به‌ترتیب ۱۸/۱ و ۱۸/۲ درصد افزایش داشت. وزن خشک اندام هوایی گیاه نیز در شرایط تلقیح باکتری به‌ترتیب ۱/۸ و ۱/۴ برابر، و در شرایط تلقیح قارچی به‌ترتیب ۱/۵ و ۱/۲ برابر در مقایسه با تیمارهای شاهد منفی و شاهد مثبت بیشتر بود. باکتری بیشترین تأثیر را بر مقدار پتاسیم محلول و فسفر قابل استفاده خاک داشت. به‌طوری‌که غلظت K محلول و فسفر قابل استفاده در شرایط تلقیح باکتریایی به‌ترتیب ۱/۲ و ۱/۳ برابر نسبت به تیمار قارچی افزایش یافت. غلظت K تبادلی نیز در حضور باکتری و قارچ به‌ترتیب ۳۰/۱ و ۵/۱ درصد نسبت به تیمار شاهد منفی افزایش داشت. به‌طورکلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که حضور میکروارگانیسم‌های حل‌کننده سیلیکات از طریق افزایش میزان رهاسازی پتاسیم از کانی‌های پتاسیم‌دار، منجر به بهبود رشد گیاه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: میکروارگانیسم‌های حل‌کننده پتاسیم، کود زیستی، آزادسازی پتاسیم، قابلیت دسترسی عناصر غذایی

اشرفی سعیدلو س.، رسولی صدقیانی م.ح.، صمدی ع.، برین م.، سپهر ا. ۱۴۰۳. مطالعه تأثیر میکروارگانیسم‌های حل‌کننده سیلیکات بر انحلال پتاسیم غیرتبادلی خاک، شاخص‌های رشد گیاه ذرت (*Zea mays* L.) و میزان جذب عناصر غذایی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۲، شماره ۴. صفحه: ۱۵-۲۹.

۱- محقق (Ph.D.)، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران (مکاتبه کننده)

۲- بترتیب دانش‌آموخته دکتری و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

*پست الکترونیک: sanazashrafi92@yahoo.com

مقدمه

ذرت (*Zea mays* L.) از جمله گیاهان پتاسیم‌دوست با دوره رشد کوتاه و عملکرد بالا و در عین حال از محصولات راهبردی کشور است. سطح زیر کشت، میزان تولید در هکتار و مقدار مصرف ذرت، در طی سال‌های اخیر در اغلب کشورهای جهان افزایش شدیدی یافته است؛ به نحوی که در بین غلات، پس از گندم و برنج مقام سوم را کسب نموده است. سطح زیر کشت ذرت در دنیا ۱۴۰ میلیون هکتار و در ایران حدود ۶۰ هزار هکتار گزارش شده است. تغذیه مناسب و کافی با پتاسیم باعث افزایش کمیت و کیفیت ذرت می‌شود. نیاز ذرت به پتاسیم با نیتروژن برابری می‌کند به طوری‌که گفته شده است ذرت برای تولید ۹ تن دانه در هکتار ۲۷۰ کیلوگرم نیتروژن، ۷۵ کیلوگرم فسفر، ۲۸۰ کیلوگرم پتاسیم، ۳۰ کیلوگرم منیزیم و ۳۵ کیلوگرم گوگرد از یک هکتار خاک برداشت می‌کند (Malakouti *et al*., 2005). علی‌رغم اینکه پتاسیم در ساختمان ترکیبات مواد آلی و بافت‌های گیاهی شرکت نمی‌کند، نقش این عنصر در فیزیولوژی گیاهی بسیار مهم و حیاتی است. در بسیاری از موارد به دلیل انجام کشت متراکم، عدم رعایت تناوب زراعی و کوتاهی نسبی دوره رشد گیاه ذرت و توقع بالای آن نسبت به پتاسیم و نیز پایین بودن نسبی حجم خاک در اختیار ریشه، علی‌رغم کافی بودن پتاسیم قابل جذب اولیه در خاک، در اواسط دوره رشد به بعد ممکن است این گیاه دچار کمبود پتاسیم گردد. پتانسیل خاک برای تأمین پتاسیم مورد نیاز ذرت و میزان نیاز به کودهای پتاسیمی در خاک بسته به شرایط مختلف از جمله عملکرد مورد انتظار، مقدار و نوع رس، مقدار ماده آلی، ظرفیت تثبیت و آزادسازی پتاسیم متفاوت است (Malakouti, 2018). وجود مقادیر کافی از یون‌های پتاسیم در گیاه، محیط‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز مراحل متابولیکی، مخصوصاً سنتز پروتئین‌ها و لیپیدها را فراهم می‌نماید. تأمین پتاسیم به میزان کافی حساسیت ذرت را نسبت به خوابیدگی بی‌اثر می‌کند و باعث جذب مقادیر کافی نیتروژن می‌گردد. پتاسیم منجر به افزایش مقاومت ذرت به کم آبی و بیماری‌ها نیز می‌شود. وجود این عنصر سبب افزایش مقدار کربوهیدرات‌های دانه شده و در ایجاد بافت‌های نگه‌دارنده ساقه مؤثر است و مقاومت این گیاه را در مناطقی که احتمال وزش بادهای شدید وجود دارد، بالا می‌برد (Malakouti *et al*., 2005).

استفاده از مقادیر بالای کودهای پتاسیمی در کنار کودهای نیتروژنه و فسفری در جهت افزایش عملکرد محصولات زراعی منجر به ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌شود (Akande *et al*., 2008). ایجاد عدم تعادل عناصر غذایی و افزایش تلفات سایر عناصر از طریق آبشویی و رواناب، افزایش شوری، تخریب ساختمان خاک و سرکوب فعالیت میکروبی از جمله پیامدهای منفی ناشی از مصرف مقادیر بالای کودهای پتاسیمی بر کیفیت خاک در طولانی‌مدت محسوب می‌شوند (Savci, 2012; Farhani *et al*., 2018; Chen *et al*., 2020; Al-Shammary *et al*., 2024). انحلال پتاسیم کانی‌ها و رهاسازی آهسته عناصر غذایی توسط میکروب‌هایی که رشد و عملکرد گیاه را افزایش می‌دهند؛ ممکن است از لحاظ کشاورزی مفیدترین و از جنبه زیست‌محیطی میسرترین راه برای تأمین پتاسیم محلول خاک باشد و سبب افزایش قابل توجه عملکرد در محصولات متنوع شود (Ekin, 2010; Bahadur *et al*., 2014; Meena *et al*., 2014; Meena *et al*., 2015). میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه یا PGPRها می‌توانند رشد و تغذیه گیاه، الگوی رشد ریشه، قابلیت رقابت‌پذیری و مقاومت گیاه در مواجه با تنش‌های مختلف را بهبود بخشند. در ارتباط با نقش باکتری‌ها در رهاسازی پتاسیم از طریق تخریب کانی‌های سیلیکاتی، مطالعات زیادی صورت گرفته است (Avakyan, 1984). از این باکتری‌ها که به باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات معروف هستند، کود بیولوژیکی بنام کود بیولوژیک پتاسیمی[1] تهیه می‌گردد. باکتری‌های موجود در کود بیولوژیک از کانی‌هایی نظیر بیوتیت، فلوگوپایت، مسکوویت، ارتوکلاز و میکروکلین عناصر مختلف از جمله پتاسیم را آزاد می‌کنند. باکتری‌ها و قارچ‌ها با تجزیه کانی‌های حاوی پتاسیم، فسفر و آهن نظیر میکا و فلدسپار می‌توانند منجر به آزادسازی این عناصر شوند (Styriakova *et al*., 2003). مطالعات انجام شده حاکی از آن است که باکتری‌های مختلفی از جمله *Pseudomonas*، *Burkholderia*، *Acidithiobacillus ferrooxidans*، *Bacillus mucilaginosus*، *Bacillus edaphicus* و *B. circulans* دارای توانایی رهاسازی پتاسیم از کانی‌های پتاسیم‌دار هستند (Lian *et al*., 2002; Li *et*

1- Biological Potassium Fertilizer

al., 2006; Zhang *et al*., 2013). در بین قارچ‌ها نیز *Aspergillus niger*، *Penicillium frequentant*، *Cladosporium cladsporioides* دارای قابلیت انحلال کانی‌های پتاسیم‌دار و رهاسازی پتاسیم موجود در ساختار آن‌ها می‌باشند (Reitmeir, 1951; Argelis *et al*., 1993). توانایی *Pseudomonas fluorescens* و *Aspergillus niger* در انحلال پتاسیم در تحقیقات مختلفی ارزیابی شده است (Verma *et al*., 2017; Ashrafi-Saiedlou *et al*., 2022; David *et al*., 2023; Ashrafi-Saiedlou *et al*., 2024; Uzah *et al*., 2024). نتایج این مطالعات حاکی از ترشح مقادیر بالایی از اسیدهای آلی مونو، دی و تری مختلف از جمله اسید لاکتیک، اسید سیتریک، اسید اگزالیک، اسید مالیک، اسید مالئیک و اسید سوکسنیک و کاهش قابل توجه pH و در نتیجه افزایش انحلال و آزادسازی پتاسیم از ساختار کانی‌ها می‌باشد. بررسی تغییرات ساختاری کانی‌های پتاسیمی در اثر تلقیح قارچی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان‌دهنده‌ی نفوذ میسلیوم‌های قارچی در ساختار کانی‌ها هستند. این میسلیوم‌ها برای تأمین عناصر غذایی موردنیاز از طریق توسعه هیف وارد ساختار درونی کانی‌ها شده و از طریق نیروهای فیزیکی وارد شده کانی‌ها را خرد نموده و ضمن کاهش اندازه ذرات سطوحی تازه و با واکنش‌پذیری بالایی را ایجاد می‌نمایند. کاهش اندازه ذرات، هماوری و تغییر شکل کانی‌ها از دیگر اثرات میکروارگانیسم‌ها بر کانی‌ها محسوب می‌شوند (Ashrafi-Saeidlou, 2020). بطورکلی تجزیه کانی‌ها در اثر کاهش pH محیط‌کشت (به دلیل تولید اسیدهای آلی نظیر اسید سیتریک، تارتاریک، استیک،گلیکولیک، سوکسینیک که از طریق تشکیل کمپلکس و تولید H^+ تأثیر خود در آزادسازی پتاسیم را اعمال می‌نمایند) (Welch & Ullman, 1993)، تشکیل کمپلکس با کاتیون‌های سطحی کانی (به واسطه اسیدهای آلی و سیدروفور تولید شده)، تولید اگزو پلی‌ساکاریدها[1] و نیز تولید آنزیم‌ها از سازوکارهای اصلی باکتری‌ها در رهاسازی پتاسیم بشمار می‌آیند (Liu *et al*., 2006; Lian *et al*., 2008). قارچها نیز از سه طریق می‌توانند انحلال کانی‌ها و رهاسازی عناصر را افزایش دهند: (۱) تولید اسیدهای آلی و تضعیف پیوندهای شیمیایی کانی‌ها (Harley & Gilkes, 2000)؛ (۲) تجزیه (Lian *et al*., 2008; Sterflinger, 2000)؛ (۳) خرد نمودن مکانیکی ذرات از طریق توسعه هیف (Jongmans *et al*., 1997).

این میکروارگانیسم‌ها که به بذر، ریشه و یا خاک تلقیح می‌شوند، باعث افزایش تحرک و قابلیت استفاده عناصر غذایی بخصوص نیتروژن، فسفر و پتاسیم شده و به ایجاد میکروفلور و افزایش سلامت خاک کمک می‌نمایند. کود زیستی در مقایسه با کودهای شیمیایی، عناصر غذایی را بصورت ثابت و پایدار برای گیاهان فراهم می‌نماید. این امر ناشی از آن است که کود زیستی می‌تواند باعث بهبود خواص فیزیکی خاک و افزایش ظرفیت نگهداشت آب شود. میکروارگانیسم‌ها در ریزوسفر فعالیت می‌کنند، این فعالیت می‌تواند منجر به ایجاد ریزوسفری گردد که در آن مقادیر ثابتی از عناصر غذایی بصورت پیوسته برای ریشه گیاهان فراهم می‌گردد. علاوه بر این، میکروارگانیسم‌هایی که توسط کودهای زیستی وارد خاک می‌شوند با فعالیت خود از آبشویی عناصر غذایی افزوده شده به خاک جلوگیری می‌کنند. اگرچه مقدار عناصر غذایی که در کوتاه‌مدت توسط کودهای زیستی در اختیار گیاه قرار داده می‌شود در مقایسه با انواع شیمیایی کمتر است؛ اما مطالعات نشان داده‌اند که در طولانی‌مدت مصرف کود زیستی با ترکیب ۲۵ درصدی از کود شیمیایی تأثیرات مطلوبی بر رشد گیاهان دارد (El Kramany *et al*., 2007). بطوریکه تلقیح باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم و فسفات از طریق افزایش جذب عناصر پرمصرف شامل نیتروژن، فسفر و پتاسیم منجر به حصول عملکرد بالا در گندم، ذرت، فلفل، خیار و بادمجان می‌شود (Aleksandrov, 1958; Han & Lee, 2006).

کشور ایران در منطقه‌ی خشک و نیمه خشک واقع شده است و به دلیل وجود کانی‌های خاص مانند میکا و ایلایت، غنی از پتاسیم می‌باشد، ولی در اثر بهره‌برداری مداوم از خاک‌ها و برداشت پتاسیم فراوان توسط محصولات کشاورزی و عدم رایج بودن مصرف کودهای پتاسیمی، پتاسیم خاک رو به تخلیه رفته و در بیشتر مناطق کشور کمبود پتاسیم وجود دارد. از سوی دیگر با توجه به آهکی بودن خاک‌های بیشتر مناطق کشور، غلظت‌های بالای عناصری نظیر کلسیم و منیزیم در خاک باعث ایجاد اختلال در جذب پتاسیم و بروز کمبود آن در گیاهان می‌شود (Peyghami, 2014). مدیریت عناصر غذایی در

1- Exo-polysaccharide

خاک‌های آهکی در تولید محصول و پایداری تولیدات کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و اتخاذ استراتژی‌های دوستدار محیط‌زیست در این زمینه انکارناپذیر می‌باشد. میکروارگانیسم‌های خاک نقش مهمی در چرخه‌های بیوژئوشیمیایی ایفا کرده و مسئول چرخه عناصر غذایی در اشکال قابل‌استفاده گیاهی هستند و از طریق مشارکت در تغذیه گیاهی، سلامت گیاه، ساختار و حاصلخیزی خاک اکوسیستم‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. استفاده از سویه‌های مؤثر در انحلال پتاسیم در خاک‌هایی با مقادیر پایین پتاسیم قابل‌استفاده از جمله خاک‌های آهکی نه تنها منجر به ایجاد روش مطلوب تغذیه پتاسیم می‌شود؛ بلکه از طریق ترشح اسیدهای آلی، پلی‌ساکاریدها و هورمون‌ها قابلیت استفاده سایر عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان را افزایش داده و باعث بهبود رشد آن‌ها می‌گردد. با وجود اینکه پژوهش‌های گسترده‌ای که در زمینه کارآیی ریزجلنداران در حلالیت و آزادسازی عناصر غذایی در کشتزارها و آزمایشگاه انجام شده است، کارآیی باکتری‌ها و قارچ‌ها در رهاسازی پتاسیم در کانی‌های مختلف به خوبی بررسی نشده است. بر این اساس ارزیابی اثرات کاربرد سویه‌های باکتریایی و قارچی کارآمد در ترکیب با کانی‌های بومی موجود در خاک از قبیل میکا، فلدسپار و سنگ فسفات جهت جایگزینی با کودهای شیمیایی و کاهش هزینه تولید محصول ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش با هدف ارزیابی اثر سویه‌های میکروبی توانمند بر انحلال کانی‌ها و هوازدگی کانی‌های پتاسیمی، رهاسازی پتاسیم، قابلیت استفاده برخی از عناصر غذایی ضروری و شاخص‌های رشد گیاه ذرت (*Zea mays* L.) اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و آنالیز خاک

به‌منظور انجام آزمایش گلخانه‌ای نمونه‌ی خاک از زمین‌های غیرزراعی شهرستان ارومیه از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شد. نمونه‌ها هوا خشک شده و به آزمایشگاه منتقل شدند. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نظیر بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، هدایت الکتریکی (EC_e) و pH در عصاره حاصل از گل اشباع (Nelson & Sommers, 1982)، کربن آلی به روش والکی-بلک (Nelson & Sommers, 1982)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Tandon, 1998)، فسفر قابل‌جذب به روش اولسن (Olsen *et al*., 1954)، و مقدار پتاسیم محلول، تبادلی و غیر تبادلی به وسیله روش‌های استاندارد ارائه شده اندازه‌گیری گردیدند (Champan & Pratt, 1962; Knudsen *et al*., 1983).

تهیه بذور، اعمال تیمارهای میکروبی، کشت، برداشت و آنالیز گیاه

تعداد کافی از بذور سالم ذرت سینگل (رقم Single Cross- 704) انتخاب و با محلول‌های هیپوکلریت سدیم ۵ درصد (۲ دقیقه)، اتانول ۹۶ درصد (۳۰ ثانیه) ضدعفونی شده و در ادامه ۷ الی ۸ مرتبه با آب مقطر استریل شستشو یافتند. بعد از ضدعفونی سطحی بذرهای ذرت، به منظور تأمین مقدار رطوبت مورد نیاز اولیه برای جوانه‌زنی، بذرها قبل از کاشت به مدت ۴۸ ساعت با آب استریل مرطوب گردیدند.

به منظور اعمال تیمارهای میکروبی، سویه‌های باکتریایی (*Pseudomonas fluorescens*) و قارچی (*Aspergillus niger*) از بانک میکروبی دانشگاه ارومیه تهیه شد. جهت تهیه مایه تلقیح، ابتدا باکتری در محیط جامد نوترینت آگار (NA[1]) و قارچ در محیط جامد PDA[2] بازکشت گردید. پس از گذشت ۴۸ ساعت از رشد، یک لوپ از کشت تازه هر سویه به درون ارلن ۲۵۰ میلی‌لیتری که حاوی ۱۰۰ میلی‌لیتر از محیط مایع نوترینت براث بود، مایه‌زنی شده و جهت یکنواخت شدن در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت با سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه (rpm) تکان داده شدند. بعد از تعیین جمعیت میکروبی مایه‌های تلقیح (با جمعیتی برابر $۲/۴۷ \times ۱۰^۸$ سلول باکتری و $۶/۷ \times ۱۰^۸$ سلول قارچی در یک میلی‌لیتر محلول در جذب نور با طول موج ۶۰۰ نانومتر)، بذور به مدت دو ساعت با مایع تلقیح و صمغ عربی خیسانده شده و شیک گردیده و سپس صاف و هوا خشک گردیدند (Barin *et al*., 2017).

در این آزمایش از گلدان‌های پلاستیکی با گنجایش چهار و نیم کیلوگرم خاک استفاده شد. ابتدا در کف گلدان‌ها کاغذ صافی واتمن قرار داده شد، سپس تا ارتفاعی مشخص، خاک (نمونه‌های خاک در دستگاه اتوکلاو و با دمای ۱۲۱

1- Nutrient agar

2- Potato dextrose agar

درجه سلسیوس و فشار ۱/۵ اتمسفر به مدت ۲ ساعت استریل شدند) داخل گلدان‌ها ریخته شد. در ادامه تعداد ۸ بذر ذرت در هر گلدان قرار داده شد. ۱۰ روز پس از سبز شدن بذور، تعداد ۳ بوته در هر گلدان نگه داشته شد. تا اتمام دوره رشد از آب مقطر برای آبیاری و از محلول غذایی کامل و عاری از پتاسیم ($NH_4H_2PO_4$، $MgSO_4.7H_2O$، $Ca(NO_3)_2.4H_2O$، FeEDTA، $MnSO_4.4H_2O$، H_3BO_3، $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$، $ZnSO_4.7H_2O$ و $CuSO_4.5H_2O$) جهت جلوگیری از هر گونه تنش تغذیه‌ای استفاده گردید (Hoagland & Arnon, 1950).

پس از سپری شدن ۶۵ روز از زمان کاشت، گیاه ذرت داخل گلدان‌ها برداشت شده و پس از آن بخش هوایی و ریشه گیاه از بذر تفکیک شدند. سپس صفات مورفولوژیکی گیاه شامل ارتفاع گیاه، قطر ساقه، وزن خشک و تر ریشه و بخش هوایی گیاه اندازه‌گیری گردید. ارتفاع گیاه در انتهای دوره رشد از سطح گلدان تا انتهایی‌ترین غلاف برگ انتهایی توسط خط‌کش اندازه‌گیری گردید، برای اندازه‌گیری قطر ساقه، طوقه گیاه به عنوان معیار اندازه‌گیری، انتخاب شد و در انتهای دوره رشد به وسیله کولیس اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن تر و خشک نیز، گیاهان از محل طوقه جدا شده و ابتدا وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری گردید، سپس گیاهان به مدت ۷۲ ساعت در آون در حرارت ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند تا به طور کامل خشک شوند، در ادامه وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری گردید. پس از برداشت گیاهان، مقدار نیتروژن (N) در عصاره حاصل از هضم تر گیاهان با روش کجلدال (Bremner & Breitenbeck, 1983)، غلظت فسفر به روش رنگ سنجی در طول موج ۴۳۰ نانومتر به وسیله اسپکتروفتومتر (Shimadzu UV3100) و پتاسیم (K) توسط دستگاه فلیم‌فتومتر در عصاره حاصل از هضم خشک گیاهان (Planquart *et al*., 1999) اندازه‌گیری شدند. برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل هدایت الکتریکی (EC_e) و pH، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل و فسفر قابل‌جذب نیز به وسیله روش‌های استاندارد ارائه شده اندازه‌گیری گردیدند (Olsen *et al*., 1954; Nelson & Sommers, 1982; Champan & Pratt, 1962; Tandon, 1998).

مقدار پتاسیم محلول خاک در عصاره‌ی گل اشباع اندازه‌گیری شد. در ادامه با استفاده از روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم ۱ مولار (pH=7) مقدار پتاسیم تبادلی و محلول در آب تعیین گردید. با کسر نمودن مقدار پتاسیم محلول از مقدار پتاسیم بدست آمده با روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم، میزان پتاسیم تبادلی خاک محاسبه گردید. به منظور تعیین پتاسیم غیرتبادلی نیز از روش استخراج پتاسیم با اسید نیتریک ۱ مولار جوشان استفاده شد. از اختلاف بین پتاسیم استخراج شده با این روش و مقدار پتاسیمی که با استفاده از روش استات آمونیوم استخراج شده بود، مقدار پتاسیم غیرتبادلی خاک محاسبه شد. برای تعیین غلظت پتاسیم در هر سه روش فوق‌الذکر، از دستگاه فلیم‌فتومتر (Corning 410) استفاده گردید (Chapman & Pratt, 1962; Knudsen *et al*., 1983).

طرح آزمایشی و تجزیه آماری

آزمایش در قالب طرح کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل تلقیح میکروبی (تلقیح باکتری، تلقیح قارچ، شاهد مثبت (بدون تلقیح با حضور پتاسیم) و شاهد منفی (بدون تلقیح و بدون استفاده از پتاسیم)) بود.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها شامل تست نرمال بودن، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۰/۰۵، با استفاده از نرم‌افزارهای MSTATC و SAS انجام شد. نمودارها نیز با استفاده از نرم افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. اندازه‌گیری خواص اولیه خاک حاکی از آن است که خاک مورد استفاده از نوع آهکی، غیرشور و با بافت لوم شنی بوده و دارای مقادیر نسبتاً پایینی از عناصر غذایی است. وجود بافت درشت، باعث کاهش نگهداشت عناصر غذایی در خاک شده است. لذا تلقیح سویه‌های کارآمد میکروبی می‌تواند در افزایش شکل‌های قابل دسترس عناصر غذایی و بهبود رشد گیاه مؤثر باشد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1. Some soil studied physical and chemical properties

Soil texture	Clay	Silt	Sand	N	OC	OM	$CaCO_3$	K soluble	K exchangeable	K non-exchangeable	P	pH	EC
	%							mg kg^{-1}					ds m^{-1}
Sandy loam	15.5	12.5	72	0.104	0.7	1.21	14	19.69	64.37	658.08	10.1	6.86	2.82

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تاثیر تلقیح میکروبی بر مقدار فسفر و اشکال مختلف پتاسیم خاک، معنی‌دار بود (P≤ ۰/۰۰۱) (جدول ۲). نتایج مقایسات میانگین حاکی از آن بود که در بین تیمارهای تلقیح میکروبی، باکتری بیشترین تأثیر را بر مقدار پتاسیم محلول و فسفر خاک داشت، به‌طوری‌که غلظت K محلول و فسفر در شرایط تلقیح باکتریایی به‌ترتیب ۱/۱۷ و ۱/۳۰ برابر نسبت به تیمار قارچی افزایش داشت. بدر (Badr, 2006) در بررسی انحلال کانی‌های حاوی پتاسیم و فسفر توسط باکتری‌های حل‌کننده سیلیکات‌های معدنی مشاهده نمود که رهاسازی پتاسیم و فسفر در تیمارهای مایه‌زنی شده با سویه‌های باکتری در مقایسه با تیمار بدون مایه‌زنی افزایش یافت. توانایی این میکروارگانیسم‌ها در افزایش پتاسیم قابل استفاده در محیط‌هایی که حاوی پتاسیم غیرتبادلی‌اند را چنین می‌توان توجیه کرد که این میکروارگانیسم‌ها با تخریب کانی‌های پتاسیم‌دار، این عنصر را از کانی آزاد کرده و به شکل قابل استفاده برای گیاه در می‌آورند. مکانیسم تجزیه سیلیکات‌ها بر حسب نوع میکروارگانیسم تجزیه کننده متفاوت خواهد بود. ولی اساساً این فرآیند در نتیجه تأثیر فرآیندهای متابولیک این میکروارگانیسم‌ها روی کانی‌ها انجام می‌گیرد (Sadeghi Azad, 2014). شنگ و همکاران (Sheng *et al*., 2008) نیز گزارش کردند که تجزیه کانی‌های پتاسیم‌دار و آزادسازی پتاسیم توسط *Bacillus globisporus* به علت تولید اسیدهای آلی می‌باشد. تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه شامل باکتری‌های آزادکننده پتاسیم و فسفر در کودهای زیستی، به عنوان یک راهکار پایدار جهت بهبود تغذیه و افزایش تولیدات گیاهی گزارش شده است (Vessey, 2003).

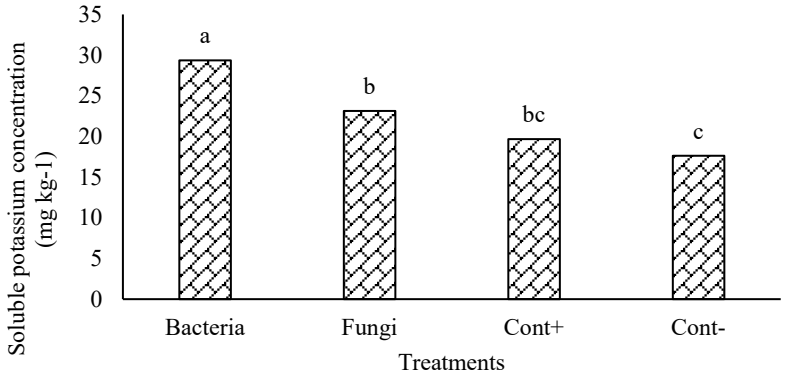
جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس خصوصیات اندازه‌گیری شده در خاک

Table 2. Analysis of variance for soil measured properties

Source of variation	df	Mean Square									
		N	P	$K_{soluble}$	$K_{exchangeable}$	$K_{non-exchangeable}$	OC	OM	pH	EC	$CaCO_3$
Microbial inoculation	3	0.001^{ns}	15.02^{***}	33^{***}	351.2^{***}	26592^{***}	0.005^{***}	0.014^{**}	0.008^{ns}	0.008^{ns}	8.01^{ns}
Error	8	0.00038^{ns}	0.262	7.83	34.87	1123	0.001	0.002	0.002	0.001	0.667
CV (%)	-	12.96	6.36	9.14	12.44	6.58	9.22	9.26	0.64	1	6.08

***,** Show significant difference at 0.1 and 1%, respectively, and ns show non-significant difference.

تأثیر تلقیح میکروبی بر مقادیر پتاسیم محلول و تبادلی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. نتایج این بررسی نشان داد که تلقیح میکروبی منجر به افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم محلول شد. بیشترین غلظت K محلول مربوط به تیمار باکتریایی (۲۹/۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کمترین مقدار مربوط به تیمار شاهد منفی (۱۷/۶۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) بود. در ارتباط با K تبادلی نیز تلقیح میکروارگانیسم‌ها، افزایش غلظت پتاسیم را در پی داشت. غلظت K تبادلی در حضور باکتری و قارچ به‌ترتیب ۳۰/۱۲ و ۵/۰۹ درصد نسبت به تیمار شاهد منفی افزایش یافت.

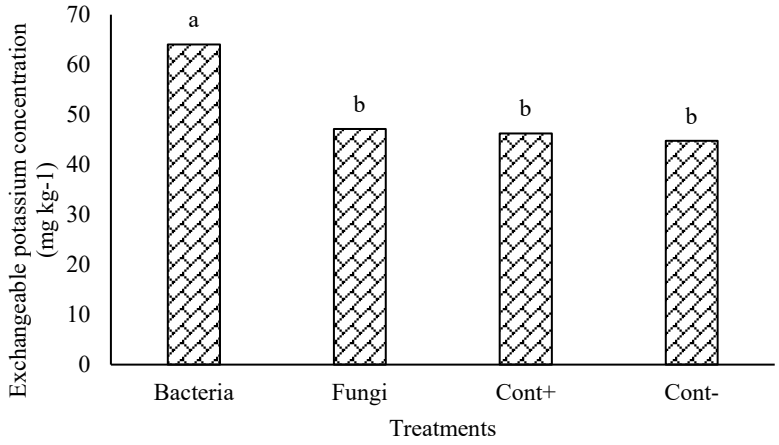


شکل ۱- اثر تلقیح میکروبی بر غلظت پتاسیم محلول خاک

$Cont^+$ و $Cont^-$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

Figure 1. The effect of microbial inoculation on soil soluble potassium concentration

$Cont^+$ and $Cont^-$ show conditions without inoculation with the addition of potassium and without potassium, respectively.



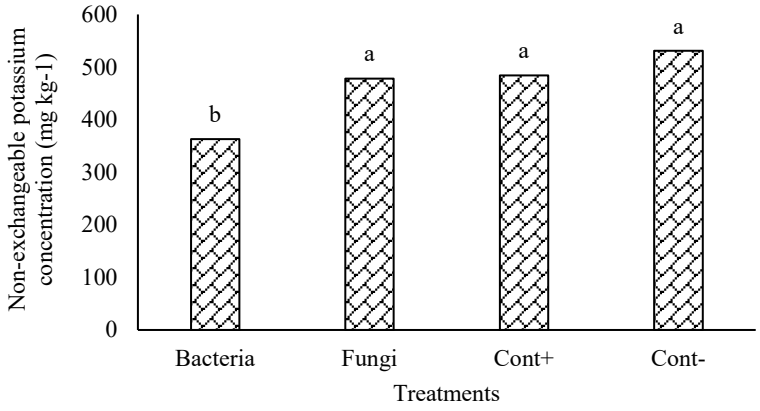
شکل ۲- اثر تلقیح میکروبی بر غلظت پتاسیم تبادلی خاک

$Cont^+$ و $Cont^-$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

Figure 2. The effect of microbial inoculation on soil exchangeable potassium concentration

$Cont^+$ and $Cont^-$ show conditions without inoculation with the addition of potassium and without potassium, respectively.

مقایسات میانگین نشان داد مقدار پتاسیم غیرتبادلی در تیمارهای تلقیح یافته در مقایسه با تیمارهای بدون تلقیح کاهش معنی‌دار داشت (شکل ۳). به‌عبارت دیگر تلقیح باکتری و قارچ منجر به کاهش شکل غیرتبادلی پتاسیم و افزایش شکل‌های محلول و تبادلی شده است. تأثیر تلقیح میکروبی بر مقدار فسفر خاک نیز معنی‌دار بود ($P\leq$ ۰/۰۰۱) (شکل ۴). بالاترین غلظت فسفر در شرایط تلقیح باکتری مشاهده شد. به‌گونه‌ای که مقدار فسفر در این تیمار در مقایسه با تیمارهای قارچ، شاهد منفی و شاهد مثبت به‌ترتیب ۱/۳، ۱/۶ و ۱/۹۰ برابر بیشتر بود.

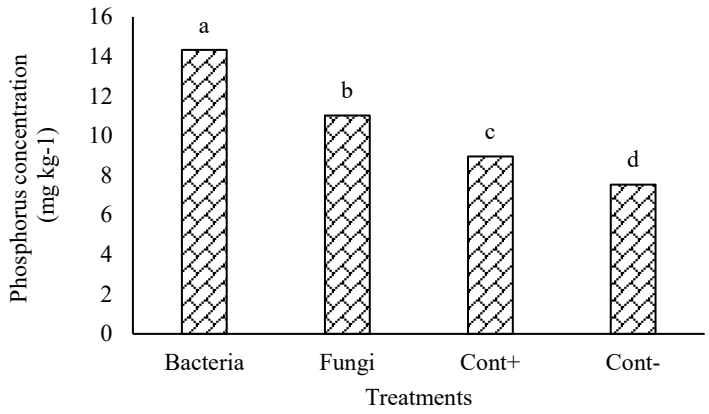


شکل ۳- اثر تلقیح میکروبی بر غلظت پتاسیم غیرتبادلی خاک

$Cont^+$ و $Cont^-$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

Figure 3. The effect of microbial inoculation on soil non-exchangeable potassium concentration

$Cont^+$ and $Cont^-$ show conditions without inoculation with the addition of potassium and without potassium, respectively.



شکل ۴- اثر تلقیح میکروبی بر غلظت فسفر خاک

$Cont^+$ و $Cont^-$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

Figure 4. The effect of microbial inoculation on soil phosphorus concentration

$Cont^+$ and $Cont^-$ show conditions without inoculation with the addition of potassium and without potassium, respectively.

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تلقیح میکروبی اثر معنی‌داری بر شاخص‌های رشد گیاهی و غلظت عناصر غذایی در اندام‌های هوایی و ریشه داشت (جدول‌های ۳ و ۴).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های رشد اندازه‌گیری شده

Table 3. Analysis of variance for measured growth indicators

Source of variation	df	Mean Square					
		Shoot length	Stem diameter	Shoot fresh weight	Root fresh weight	Shoot dry weight	Root dry weight
Microbial inoculation	3	52.52^{***}	0.007^{**}	143.02^{**}	549.8^{**}	1.945^{ns}	141.8^{*}
Error	8	4.84	0.001	13.98	44.32	0.905	31.5

***,**,* Show significant difference at 0.1, 1 and 5%, respectively, and ns show non-significant difference.

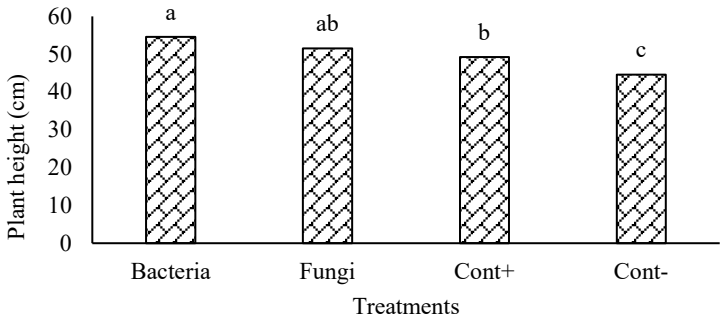
جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس برخی عناصر پرمصرف اندازه‌گیری شده

Table 4. Analysis of variance for measured macro elements

Source of variation	df	Mean Square					
		Shoot			Root		
		N	P	K	N	P	K
Microbial inoculation	3	0.0288^{ns}	881^{***}	375.4^{***}	0.0105^{***}	31.03^{***}	655^{***}
Error	8	0.0126	0.191	2.49	0.0005	0.383	8.37

*** Show significant difference at 0.1%, and ns show non-significant difference.

نتایج مقایسه میانگین نشان داد که تلقیح میکروبی منجر به افزایش ارتفاع گیاه و قطر ساقه گردید. به‌طوری‌که بیشترین ارتفاع اندام هوایی (۵۴/۵ سانتی‌متر) و قطر ساقه (۰/۶۴ سانتی‌متر) مربوط به شرایط تلقیح باکتریایی بود که نسبت به تیمار شاهد منفی، به‌ترتیب ۱۸/۱۹ و ۱۸/۲۲ درصد افزایش داشت (شکل‌های ۵ و ۶). نتایج حاکی از آن است که کمترین مقدار N اندام هوایی به تیمار شاهد منفی مربوط است (شکل ۷). احتمال دارد به دلیل وجود اثرات آنتاگونیستی بین پتاسیم و آمونیوم، وجود غلظت‌های بالای K (جدول ۵)، باعث جذب ترجیحی K شده و انتقال N به اندام‌های هوایی را کاهش داده باشد. افزایش در شاخص‌های رشد گیاه و جذب عناصر غذایی را می‌توان به تأثیر میکروارگانیسم‌های محرک رشد تلقیح شده نسبت داد. پژوهشگران مختلفی تأثیر این میکروارگانیسم‌ها را بر رشد و جذب عناصر غذایی در گیاهان مختلف گزارش کرده‌اند (Asghar *et al*., 2004). این میکروارگانیسم‌ها به‌صورت مستقیم در سنتز فیتوهورمون‌ها، انحلال عناصر معدنی مانند فسفر و پتاسیم مؤثر هستند (Vessey, 2003).

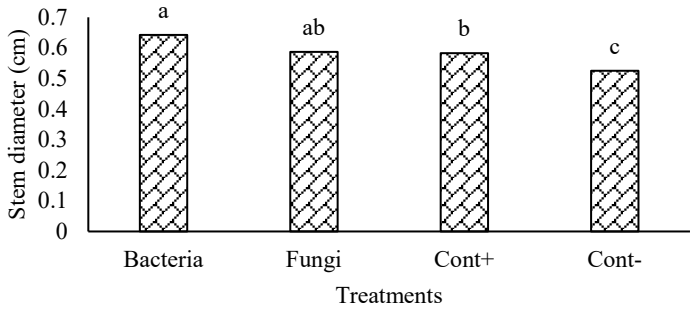


شکل ۵- اثر تلقیح میکروبی بر ارتفاع گیاه

$Cont^+$ و $Cont^-$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

Figure 5. The effect of microbial inoculation on plant height

$Cont^+$ and $Cont^-$ show conditions without inoculation with the addition of potassium and without potassium, respectively.

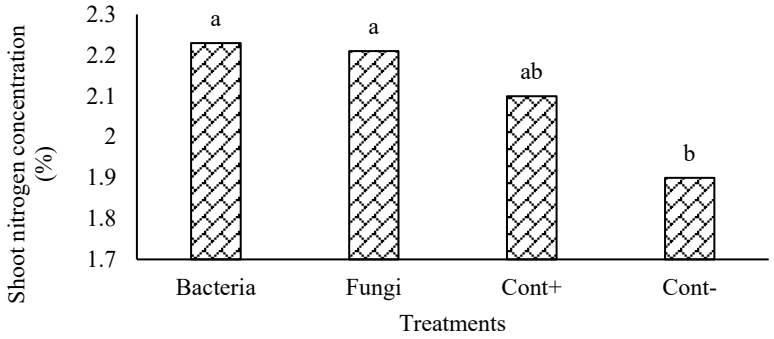


شکل ۶- اثر تلقیح میکروبی بر قطر ساقه

$Cont^+$ و $Cont^-$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

Figure 6. The effect of microbial inoculation on stem diameter

$Cont^+$ and $Cont^-$ show conditions without inoculation with the addition of potassium and without potassium, respectively.



شکل ۷- تأثیر تلقیح میکروبی بر غلظت نیتروژن اندام هوایی

$Cont^+$ و $Cont^-$ به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی شرایط بدون تلقیح با افزودن پتاسیم و بدون پتاسیم می‌باشند.

Figure 7. The effect of microbial inoculation on shoot nitrogen concentration

$Cont^+$ and $Cont^-$ show conditions without inoculation with the addition of potassium and without potassium, respectively.

شکل ۸ تاثیر تلقیح میکروبی را بر رشد گیاه ذرت نشان می‌دهد. اثرات تلقیح میکروبی بر غلظت پتاسیم و فسفر و وزن خشک اندام هوایی و ریشه نیز در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، بالاترین غلظت پتاسیم (۷۵۰/۸۷ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم وزن خشک) و فسفر (۴۳۰/۵۵ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم وزن خشک) اندام هوایی در حضور باکتری مشاهده گردید. تأثیر تلقیح باکتری بر غلظت فسفر اندام هوایی بیشتر از تلقیح قارچی بود. به‌طوری‌که مقدار فسفر در این تیمار ۱۸/۲۵ درصد بیش از تلقیح قارچی بود (جدول ۵). وزن خشک ذرت در حضور باکتری و قارچ به‌صورت معنی‌داری نسبت به تیمارهای دیگر افزایش یافت. به‌طوری‌که میانگین وزن خشک اندام هوایی ذرت در شرایط تلقیح باکتریایی ۲/۵ واحد نسبت به تیمار شاهد منفی افزایش داشت. وزن خشک ریشه ذرت در حضور باکتری و قارچ نیز به ترتیب ۵۲/۹ و ۴۰/۴ درصد در مقایسه با تیمار شاهد منفی بیشتر بود (جدول ۶). کالو و همکاران (Calvo *et al*., 2016) تأثیر تلقیح میکروبی بر غلظت عناصر غذایی و مورفولوژی گیاه ذرت را بررسی نموده و گزارش کردند تلقیح میکروبی اثر مثبتی بر رشد گیاه و نیز غلظت عناصر غذایی خصوصاً در دوره رشد رویشی دارد. افزایش غلظت عناصر غذایی در ارتباط با ظرفیت میکروارگانیسم‌های تلقیح شده در تأثیر بر مورفولوژی ریشه در مراحل اولیه رشد گیاه ذرت می‌باشد. بر اساس مطالعات آرچانا و همکاران (Archana *et al*., 2012) نیز باکتری‌های کارآمد حل‌کننده پتاسیم باعث افزایش رشد و عملکرد ذرت شدند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از افزایش کامل رشد گیاه، جذب عناصرغذایی و عملکرد در مقایسه با تیمار شاهد بود. گزارش‌ها حاکی از آن هستند که افزایش غلظت پتاسیم گیاه ممکن است ناشی از تحریک رشد ریشه یا طویل شدن تارهای کشنده توسط میکروارگانیسم‌های بخصوصی باشد (Sindhu *et al*., 2012). افزایش مقدار فسفر اندام هوایی در حضور باکتری و قارچ نیز می‌تواند ناشی از توانایی سویه‌های مورد بررسی در تولید انواع مختلفی از هورمون‌های گیاهی در محیط ریزوسفر باشد. مطالعات نشان داده‌اند میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه می‌توانند با استفاده از روش‌هایی چون ترشح H^+، تشکیل کلات و انواع واکنش‌های تبادلی منجر به افزایش جذب فسفر شوند (Sadeghi Azad, 2014). بر اساس گزارشات اگامبردیوا (Egamberdiyeva, 2007)، تلقیح سویه‌های باکتریایی *P. alcaligens*، *Bcillus polymyxa* و *M. phlei* باعث افزایش چشمگیر وزن خشک ریشه و اندام هوایی ذرت شد و مقادیر نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم ریشه و اندام هوایی را در مقایسه با نمونه‌های شاهد از ۱۶ تا ۸۶ درصد افزایش داد. شارما و جوهری (Sharma & Johri, 2003) نیز افزایش درصد جوانه‌زنی، افزایش وزن خشک ریشه و اندام هوایی، افزایش ارتفاع ریشه و اندام هوایی ذرت را به دنبال تلقیح سویه‌های GRP3A و PRS9 باکتری *سودوموناس* گزارش نمودند. افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه نسبت به شاهد در اثر تلقیح با سویه‌های مورد آزمایش را می‌توان به تولید و ترشح اسیدهای آلی و معدنی، پلی‌ساکاریدها و سیدروفور توسط این سویه‌ها نسبت داد که منجر به آزادسازی پتاسیم از ترکیبات نامحلول شده و به شکل قابل استفاده برای گیاه در آمده است. یکی دیگر از سازوکارهای افزایش وزن خشک اندام هوایی و ریشه را می‌توان به تولید مواد محرک رشد گیاه مثل ایندول استیک

اسید (IAA) و جیبرلین نسبت داد. محققین گزارش کردند که باکتری‌های *Bacillus sp.* و *Bacillus megaterium* قادر به تولید IAA می‌باشند که این ترکیب تولید شده توسط باکتری می‌تواند منجر به افزایش وزن خشک اندام هوایی و عملکرد گردد (Chakraborty *et al*., 2006). باکتری‌های سیلیکاتی در طی فعالیت‌های حیاتی خود می‌توانند مواد محرک رشد گیاه تولید کنند. به طوری‌که مشخص شده است که در محیط‌کشت باکتری مقدار زیادی جیبرلین و سایر مواد فعال‌کننده وجود دارد که محرک رشد گیاه می‌باشند (Rongchang & Fenyting, 1995).

جدول ۵- اثر تلقیح میکروبی بر میزان پتاسیم و فسفر در اندام هوایی و ریشه گیاه

Table 5. The effects of microbial inoculation on potassium and phosphorus amount in plant shoot and root

Plant part	Mean concentration of K (mg $100g^{-1}DW$) Microbial inoculation				Mean concentration of P (mg $100g^{-1}DW$) Microbial inoculation			
	Bacteria	Fungi	$Cont^+$	$Cont^-$	Bacteria	Fungi	$Cont^+$	$Cont^-$
Shoot	750.78^a	660.83^b	600.19^c	540.16^d	430.55^a	350.60^b	110.86^c	90.12^d
Root	1460.78^a	1240.28^c	1310.78^b	880.15^d	130.17^a	120.78^a	90.65^b	60.26^c

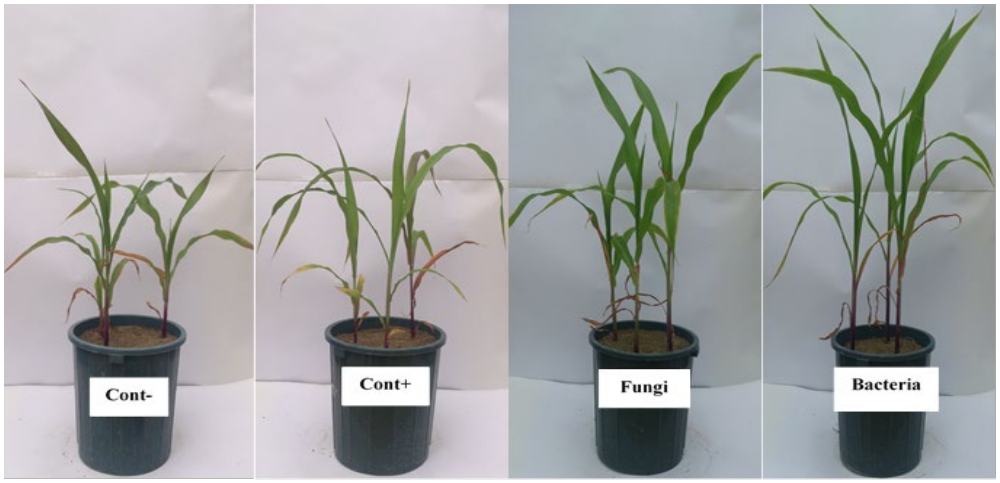
Means with the same superscript letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $P < 0.05$

جدول ۶- اثر تلقیح میکروبی بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه

Table 6. The effects of microbial inoculation on shoot and root dry weight

Plant part	Mean of dry weight (g) Microbial inoculation			
	Bacteria	Fungi	$Cont^+$	$Cont^-$
Shoot	5.61^a	4.79^{ab}	3.97^{bc}	3.1^c
Root	26.8^a	21.16^a	12.92^b	12.61^b

Means with the same superscript letters are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $P < 0.05$



شکل ۸- تأثیر تلقیح میکروبی بر رشد ذرت

Figure 8. The effect of microbial inoculation on maize growth

نتیجه‌گیری کلی

نتایج به‌دست آمده در آزمون گلدانی نشان‌دهنده‌ی توانایی بالای میکروارگانیسم‌های مورد کاربرد در افزایش قابلیت استفاده عناصر غذایی نامحلول خاک و آزادسازی پتاسیم غیرتبادلی و نیز بهبود رشد گیاه بود. لذا می‌توان پس از انجام مطالعات مزرعه‌ای با کشت گیاهان مختلف در مناطق جغرافیایی متفاوت، از این میکروارگانیسم‌ها در تهیه کودهای زیستی و در راستای کاهش مصرف کودهای پتاسیمی و افزایش رشد و عملکرد گیاهان استفاده نمود. هم‌چنین توصیه می‌شود از نظر افزایش قابلیت دسترسی پتاسیم، برهمکنش (مثبت یا منفی) این میکروارگانیسم‌ها با سایر PGPRها ارزیابی شود.

References

Akande M.O., Adediran J.A., Oluwatoyinbo F.I., Makinde E.A., and Adetunji M.T. 2008. Suitability of poultry manure amended Sokoto rock phosphate on growth, nutrient uptake and yield of chilli pepper (*Capsicum fruitscens* L). *Nigerian Journal of Soil Science*, 18:167–174.

Aleksandrov V.G. 1958. Organo-mineral fertilizers and silicate bacteria. *Dokl Akad Nauk*, 7:43–48.

Al-Shammary A.A.G., Al-Shihmani L.S.S., Fernández-Gálvez J., and Caballero-Calvo A. 2024. Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impacts on soil attributes. *Journal of Environmental Management*, 364: 121487.

Archana D.S., Nandish M.S., Savalagi V.P., and Alagawadi A.R. 2012. Screening of potassium solubilizing bacteria (KSB) for plant growth promotional activity. *Bioinfolet*, 9:627–630.

Argelis D.T., Gonzala D.A., Vizcaino C., and Gartia M.T. 1993. Biochemical mechanism of stone alteration carried out by filamentous fungi living in monuments. *Biogeochemistry*, 19:129–147.

Asghar H.N., Zaeir Z.A., and Arshad M. 2004. Screening rhizobacteria for improving the growth, yield and oil cotent of canola (*Brassica napus* L.). *Australian Journal of Agricultural Research*, 55:187-194.

Ashrafi-Saiedlou S. 2020. The effect of microbial inoculation on potassium release from soil K-bearing minerals and maize growth indicators (Zea mays L.). Ph. D Thesis. Urmia University, Urmia, Iran. (In Persian)

Ashrafi-Saiedlou S., Rasouli-Sadaghiani M., Samadi A., Barin M. and Sepehr E. 2024. *Aspergillus niger* as an eco-friendly agent for potassium release from K-bearing minerals: Isolation, screening and ulture medium optimization using Plackett-Burman design and response surface methodology. *Heliyon*, 10(7).

Avakyan Z.A. 1984. Silicon compounds in solution bacteria quartz degradation. *Microbiology*, 54: 301–307.

Ashrafi-Saeidlou S., Samadi A., Rasouli-Sadaghiani M., Sepher E. and Barin M. 2022. Optimizing nutritional and culture medium conditions for potassium release from illite by *Aspergillus niger* and *Pseudomonas fluorescens*. *Water and Soil Science*, 32(1):53-70. (In Persian)

Badr M.A. 2006. Efficiency of K-feldspar combined with organic materials and silicate dissolving bacteria on tomato yield. *Journal of Applied Sciences Research*, 2:1191–1198.

Bahadur I., Meena V.S., and Kumar S. 2014. Importance and application of potassic biofertilizer in Indian agriculture. *International Research Journal of Biolgical Sciences*, 3:80–85.

Barin M., Rasouli-Sadaghiani M.H., Ashrafi-Saeidlou S. and Shakouri F. 2019. Yield and Phosphorous Efficiency Indicators of Corn (*Zea mays* L.) as Affected by Salinity and Microbial Inoculation. *Applied Soil Research*, 7(1): 148-165. (In Persian)

Bremner J.M., and Breitenbeck G.M. 1983. A simple method for determination of ammonium in semimicro-Kjeldahl analysis of soils and plant materials using a block digester. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 14: 905–913.

Calvo P., Watts D.B., Kloepper J.W., and Torbert H.A. 2016. Effect of microbial-based inoculants on nutrient concentrations and early root morphology of corn (*Zea mays*). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1- 15.

Chakraborty U., Chakraborty B., and Basnet M. 2006. Plant growth promotion and induction of resistance in Camellia sinensis by *Bacillus megaterium*. *Journal of Basic Microbiology*, 46: 186-195.

Chapman H.D., & Pratt P.F. 1962. Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, 93(1):68.

Chen Q., Xin Y., and Liu Z. 2020. Long-term fertilization with potassium modifies soil biological quality in K-rich soils. *Agronomy*, 10(6): 771.

David O.M., Olawusi A.C., Oluwole O.A., Adeola P.O. and Odeyemi A.T. 2023. Isolation, Molecular Characterization and Application of *Aspergillus niger* and *Penicillium chrysogenum* with iofertilizer Potentials to Enhance Rice Growth. *Tropical Journal of Natural Product Research*, 7(4).

Egamberdiyeva D. 2007. The effect of plant growth promoting bacteria on growth and nutrient uptake of maize in two different soils. *Applied Soil Ecology*, 36(2-3): 184-189.

Ekin Z. 2010. Performance of phosphate solubilizing bacteria for improving growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in the presence of phosphorus fertilizer. *African Journal of Biotechnology*, 9:3794–3800.

El Kramany M.F., Bahr A.A., Mohamed M.F., and Kabesh M.O. 2007. Utilization of bio-fertilizers in field crops production 16-groundnut yield, its components and seeds content as affected by partial

replacement of chemical fertilizers by bio-organic fertilizers. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(1): 25-29.

Farahani E., Emami H., Keller T., Fotovat A., and Khorassani R. 2018. Impact of monovalent cations on soil structure. Part I. Results of an Iranian soil. *International Agrophysics*, 32(1).

Gee G.H., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. In: A. klute, (Ed.), Methods of soil Analysis. Physical Properties. SSSA, Madison, WI, pp. 383-411.

Han H.S., and Lee K.D. 2006. Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber. *Plant Soil and Environment*, 52:130–136.

Harley A.D., and Gilkes R.J. 2000. Factors influencing the release of plant nutrient elements from silicate rock powders: a geochemical overview. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 56: 11–36.

Hoagland D.R., and Arnon D.I. 1950. The water culture method for growing plants without soil. Circular - California Agricultural Experiment Station. 39p.

Jongmans A., Van Breemen G., Lundstrom N., Van Hees U., Finlay P.A.W., Srinivasan R.D., Unestam, M., Giesler T., Melkerud R., and Olsson M. 1997. Rock-eating fungi. *Nature*, 389:682–683.

Knudsen D., Peterson G.A., and Pratt P.F. 1983. Lithium, sodium, and potassium. Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties. pp. 225-246.

Lian B., Fu P.Q., Mo D.M., and Liu C.Q. 2002. A comprehensive review of the mechanism of potassium releasing by silicate bacteria. *Acta Mineralogica Sinica*, 22: 179–183.

Lian B., Wang B., Pan M., Liu C., and Teng H.H. 2008. Microbial release of potassium from K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*. *Geochimical et Cosmochimica Acta*, 72: 87–98.

Liu W., Xu X., Wu X., Yang Q., Luo Y., and Christie P. 2006. Decomposition of silicate minerals by *Bacillus mucilaginosus* in liquid culture. *Environmental Geochemistry and Health*, 28: 133-140.

Malakouti M.J. 2018. Optimal Fertilizer Use Recommendations for Yield Increase and Production of Healthy Crops. 4th Ed. Moballegan Press. Tehran, 480p. (In Persian)

Malakouti M.J., Shahabi A.A., and Bazargan K. 2005. Potassium in Iranian agriculture. 1st Ed. Sana Press. Tehran, 292p. (In Persian)

Meena V.S., Maurya B.R., and Bahadur I. 2014. Potassium solubilization by bacterial strain in waste mica. *Bangladesh Journal of Botany*, 43(2):235–237.

Meena V.S., Maurya B.R., Verma J.P., Aeron A., Kumar A., Kim K., Vive K., and Bajpai K. 2015. Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): isolation, identification, and K-release dynamics from waste mica. *Ecological Engineering*, 81:340–347.

Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 539–579.

Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extracting with sodium bicarbonate. USDA Cric. 939. U. S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

Peyghami H. 2014. Potassium absorption in soils of the Khoy region, M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University. (In Persian)

Planquart P., Bonin G., Prone A., and Massiani C. 1999. Distribution, movement and plant availability of trace metals in soils amended with sewage sludge composts: application to low metal loadings. *The Science of Total Environment*, 241: 161-179.

Reitmeir R.F. 1951. Soil potassium. *In*: Advances in Agronomy, American Society of Agronomy, Vol. 3th Ed., Norman, A.G., Academic Press, Int. Publ. New York, pp. 113-164.

Rongchang L., and Fenyting L. 1995. International training course on biological fertilizer. Bodenk Boading, China. pp. 11-68.

Sadeghi Azad, 2014. Isolation of silicate-solubilizing microorganisms and evaluation of potassium dissolution efficiency, M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University. (In Persian)

Savci S. 2012. An agricultural pollutant: chemical fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(1): 73.

Sharma A., and Johri B.N. 2003. Growth promoting influence of siderophore-producing Pseudomonas strains GRP3A and PRS9 in maize (*Zea mays* L.) under iron limiting conditions. *Microbiological research*, 158(3): 243-248.

Sheng X.F., Zhao F., He L.Y., Qiu G., and Chen L. 2008. Isolation and characterization of silicate mineral-solubilizing *Bacillus globisporus* Q12 from the surfaces of weathered feldspar. *Canadian Journal of Microbiology*, 54(12): 1064-1068.

Sindhu S.S., Parmar P., and Phour M. 2012. Nutrient cycling: potassium solubilization by microorganisms and improvement of crop growth. *In*: Geomicrobiology and biogeochemistry. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 175-198.

Sterflinger K. 2000. Fungi as geologic agents. *Geomicrobiology Journal*, 17: 97–124.

Styriakova I., Styriak I., Nandakumar M.P., and Mattiasson B. 2003. Bacterial destruction of mica during bioleaching of kaolin and quartz sand by *Bacillus cereus*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 19 (6): 583-590.

Tandon H.L.S. 1998. Methods of Analysis of Soils, Plants, Waters and Fertilizers. Fertilizers Development and Consultancy Organization, New Dehli.

Uzah G.A., Ire F.S. and Ogugbue C.J. 2023. Isolation and molecular characterization of microorganisms with biofertilizer potential. *Scientia Africana*, 23(1):173-188.

Verma P., Yadav A.N., Khannam K.S., Saxena A.K. and Suman A. 2017. Potassium-solubilizing microbes: diversity, distribution, and role in plant growth promotion. Microorganisms for green revolution: Volume 1: *Microbes for sustainable crop production*, 125-149.

Vessey J. K. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255(2): 571-586.

Welch S.A., and Ullman W.J. 1993. The effect of organic acids on plagioclase dissolution rates and stoichiometry. *Geochim Cosmochim Acta*, 57:2725–2736.

Zhang A.M., Zhao G.Y., Gao T.G., Wang W., Li J., Zhang S.F., and Zhu B.C. 2013. Solubilization of insoluble potassium and phosphate by *Paenibacillus kribensis* CX-7: a soil microorganism with biological control potential. *African Journal of Microbiol Research*, 7:41–47.