



Effect of Actinomycete Isolates on Potassium Availability, Soil Characteristics, and Barley Growth

Reza Talebi¹ | Nasrin Ghorbanzadeh² | Mohammad Bagher Farhangi³ | Sina Noorizadeh⁴

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, 41635-1314, Iran. E-mail: reza.talebi129@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: nghorbanzadeh@guilan.ac.ir
3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, Iran. E-mail: m.farhangi@guilan.ac.ir
4. Agriculture Organization of Guilan Province, Management of Plant Protection, Rasht, Iran. E-mail: Sina2716@live.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 6, 2025

Revised: Jan. 27, 2026

Accepted: Feb. 9, 2026

Published online: March. 2026

Keywords:

Biofertilizer,
Potassium solubilizing
microorganisms,
Rhizosphere,
Sustainable management

This study comprises two complementary experiments to evaluate whether actinomycete isolates can (i) enhance potassium solubility and improve soil properties, and (ii) promote barley growth. Part I employed a completely randomized design with 29 actinomycete isolates cultured in Alexandrov medium (three replications per isolate) to evaluate their ability to dissolve potassium and to alter culture medium pH. Part II examined the effects of the two superior isolates on barley growth traits and soil properties using a completely randomized block design with four treatments: control (C), chemical fertilizer (CF), and the two selected isolates, S3C and S5A, each with three replications. A suite of soil properties, plant growth metrics, and plant nutritional status was measured. In Alexandrov medium, isolates S3C and S5A produced the lowest pH values (3.23 and 4.25, respectively) and the highest soluble potassium concentrations (4.83 and 4.73 mg L⁻¹, respectively). In soil, both actinomycete containing treatments yielded the lowest pH and the highest available potassium. Additionally, the highest available soil phosphorus was observed in the S3C treatment, and the highest available nitrogen and iron in the S5A treatment. Plant analyses showed that the potassium content in barley increased approximately 3 times in the S3C and S5A treatments relative to the control. The highest plant phosphorus and iron contents were observed in the S3C and S5A treatments, respectively. Overall, these microorganisms not only release potassium into the soil but also enhance the broader soil nutrient status. These results support the potential of actinomycete isolates as biofertilizers to boost crop productivity and promote sustainable agricultural practices. Further field validation is warranted to translate these findings into agronomic recommendations.

Cite this article: Talebi, R., Ghorbanzadeh, N., Farhani, M. B., Noorizadeh, S., (2026) Effect of actinomycete isolates on potassium availability, soil characteristics, and barley growth, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (1), 189-208. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407444.670064>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407444.670064>





EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives

Potassium (K) is an essential nutrient for plants, playing a critical role in their metabolism, growth, and resistance to both abiotic and biotic stresses. In soil, K exists in mineral forms that provide only small amounts to plants. Several factors can reduce K availability in soil, including fixation of K fertilizers into insoluble forms, leaching, and uptake by plants. Soil microorganisms, especially those that solubilize K, are vital to the natural potassium cycle. Among these microorganisms, actinomycetes represent one of the largest and most diverse groups of bacteria known for promoting plant growth in an environmentally friendly manner.

Methodology

This study aimed to investigate the ability of actinomycetes isolated from citrus orchards to enhance K solubility, improve soil properties, and promote the growth of barley plants. The research was conducted in two stages. In the first stage, a completely randomized design was used to screen 29 actinomycete isolates (each with three replicates) on Alexandrov medium for their ability to solubilize K and to alter the pH of the culture medium. This assessment led to the selection of the two most effective isolates: S3C and S5A. In the second stage, a completely randomized block design with four treatments was employed: a control (C), a chemical fertilizer treatment (CF), and treatments involving the two selected isolates S3C and S5A. Each treatment was replicated three times on barley plants. After 40 days of cultivation, a suite of soil physicochemical and biological properties was measured, including pH, electrical conductivity, available phosphorus, inorganic nitrogen, available potassium, available iron, organic carbon, microbial basal respiration, and microbial biomass carbon. Additionally, growth and morphological parameters of barley were evaluated, including stem length, root length, fresh and dry weights of shoots and roots. Plant nutritional status was also assessed by determining nitrogen, phosphorus, potassium, and iron contents in the aerial parts.

Results

The results indicated that the actinomycetes isolates had a significant impact on soluble K levels and pH ($p < 0.01$). The pH values ranged from 3.23 to 6.68, while soluble K levels varied between 1.7 and 4.83 mg L⁻¹. Among the isolates tested, S3C and S5A exhibited the highest K dissolution rates, measuring 4.8 and 4.7 mg L⁻¹, respectively. The effects of the treatments on all measured characteristics, except for electrical conductivity, were significant ($p < 0.01$). The lowest soil pH (7.1) and the highest K levels were recorded in treatments that included actinomycete isolates. The S3C treatment produced the highest levels of available soil phosphorus, whereas the S5A treatment resulted in the highest levels of available nitrogen and iron. In plant growth metrics, shoot length, root length, and shoot fresh weight did not differ significantly between the CF treatment and those involving actinomycete isolates ($P > 0.05$). K contents in the plants treated with S3C and S5A increased three times compared to the C treatment. Additionally, the highest phosphorus and iron contents were found in the S3C and S5A treatments, respectively. Beyond providing K in the soil, these microorganisms enhanced the overall nutrient status by increasing the availability of nitrogen, phosphorus, and iron.

Conclusion

Overall, these microorganisms not only release potassium into the soil but also enhance the broader soil nutrient status. These results support the potential of actinomycete isolates as biofertilizers to boost crop productivity and promote sustainable agricultural practices. Further field validation is warranted to translate these findings into agronomic recommendations.

Funding

The study was funded by the University of Guilan, Iran.

Authorship contribution

For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “Conceptualization, Nasrin Ghorbanzadeh. and Mohammad Bagher Farhangi; methodology, Nasrin Ghorbanzadeh.; software, Mohammad Bagher Farhangi; validation, Nasrin Ghorbanzadeh. and Mohammad Bagher Farhangi and sina noorizadeh; formal analysis, Reza Talebi; resources, Nasrin Ghorbanzadeh; data curation, Reza Talebi; writing—original draft preparation, Reza Talebi; writing—review and editing, Nasrin Ghorbanzadeh; Mohammad Bagher Farhangi, supervision, Nasrin Ghorbanzadeh; project administration, Nasrin Ghorbanzadeh; funding acquisition, Nasrin Ghorbanzadeh. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.” Please turn to the CRediT taxonomy for the term explanation. Authorship must be limited to those who have contributed substantially to the work re-reported.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

The authorships didn't use generative AI and AI-assisted technologies in the writing process.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study. The authors also would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تأثیر جدایه‌های اکتینومایست بر فراهمی پتاسیم و برخی ویژگی‌های خاک و رشد گیاه جو

رضا طالبی^۱ | نسرین قربانزاده^۲ | محمد باقر فرهنگی^۳ | سینا نوری‌زاده۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: reza.talebi129@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه:

nghorbanzadeh@guilan.ac.ir۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: m.farhangi@guilan.ac.ir۴. سازمان کشاورزی استان گیلان، مدیریت و حفاظت گیاهان، رشت، ایران. رایانامه: Sina2716@live.com

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

این پژوهش با هدف بررسی توانایی جدایه‌های اکتینومایست در افزایش فراهمی پتاسیم و بهبود ویژگی‌های خاک و رشد گیاه جو در دو بخش انجام شد. در بخش اول، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۹ جدایه اکتینومایست در محیط الکساندروف در سه تکرار انجام و توانایی جدایه‌ها در انحلال پتاسیم و تغییر pH محیط کشت ارزیابی شد. در بخش دوم، تأثیر دو جدایه برتر بر برخی صفات رشدی گیاه جو و برخی ویژگی‌های خاک بررسی شد. آزمایش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تیمار (شاهد (C)، کود شیمیایی (CF) و دو جدایه S3C و S5A) و در سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که در محیط الکساندروف کمترین مقدار (23/3 pH و ۴/۲۵) و بیشترین مقدار پتاسیم محلول (۴/۸۳) و ۴/۷۳ میلی‌گرم بر لیتر) به ترتیب مربوط به جدایه‌های S3C و S5A بود. کمترین مقدار pH و بیشترین مقدار پتاسیم خاک در دو تیمار دارای جدایه‌های اکتینومایست اندازه‌گیری شد. مقدار فسفر فراهم خاک در تیمار S3C و مقدار نیتروژن معدنی و آهن فراهم در تیمار S5A بیشترین مقدار پتاسیم گیاه در تیمارهای S3C و S5A نسبت به تیمار شاهد به مقدار ۳ برابر افزایش نشان داد. بیشترین مقدار فسفر و آهن گیاه به ترتیب در تیمارهای S3C و S5A ثبت شد. از آن‌جا که این ریزجانداران علاوه بر آزادسازی پتاسیم در خاک، موجب بهبود عناصر غذایی قابل دسترس می‌شوند، استفاده از آنها پس از انجام آزمایش‌های میدانی، می‌تواند بهره‌وری محصول را افزایش دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

ریزجانداران حل کننده

پتاسیم،

ریزوسفر،

کود زیستی،

مدیریت پایدار

استناد: طالبی، رضا، قربانزاده، نسرین، فرهنگی، محمدباقر، نوری‌زاده، سینا، (۱۴۰۵) تأثیر جدایه‌های اکتینومایست بر فراهمی پتاسیم و برخی ویژگی‌های خاک و رشد گیاه جو، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۱)، ۱۸۹-۲۰۸.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407444.670064>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407444.670064>

مقدمه

در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، کشاورزی یک عامل کلیدی اجتماعی-اقتصادی و یکی از مهم ترین منابع اشتغال و درآمد است. با توجه به این که تقریباً هر ساله ۸۳ میلیون نفر به جمعیت جهان افزوده می شود، افزایش کل تقاضا برای غذا تا سال ۲۰۳۰، ۴۰ درصد و تا سال ۲۰۵۰، ۷۰ درصد تخمین زده شده است (FAO, 2018). توسعه فن آوری کشاورزی با مشکلات و چالش های متعددی همراه است که اصلی ترین آنها مربوط به تضمین نرخ بالای تولید در سناریوی جهانی با کمبود فزاینده منابع و تخریب محیط زیست است (Silva et al., 2022). در این میان، حاصلخیزی ضعیف خاک یکی از مهم ترین عوامل محدود کننده افزایش عملکرد محصولات کشاورزی در کشورهای در حال توسعه است (Khosro and Yousef, 2012)، که امروزه با اتخاذ رویکردهای پایدار مانند استفاده از ریزوباکتری های مفید به عنوان کودهای زیستی، به طور قابل توجهی بهبود یافته است (Sharma et al., 2024; Kavva et al., 2025). پتاسیم (K) یکی از حیاتی ترین مواد غذایی برای گیاهان است و نقش کلیدی در متابولیسم و رشد گیاه یعنی فتوسنتز، سنتز پروتئین و نشاسته، انتقال آب و مواد غذایی در شرایط تنش شوری و فعال سازی آنزیم ها، تنظیم فشار اسمزی و باز و بسته شدن روزنه ها، فعال سازی قندها، تولید ATP و مقاومت در برابر تنش های غیرزیستی و زیستی را دارا می باشد (Meena et al., 2016; Sun et al., 2020). پتاسیم ۲/۶ درصد از وزن پوسته زمین را تشکیل می دهد و تنها حدود ۲ درصد از پتاسیم به شکل محلول است، در حالی که ۹۸ درصد باقی مانده به شکل های نامحلول مانند مواد معدنی بیوتیت، فلدسپار، میکا، مسکویت و ورمی کولیت یافت می شود که در برابر تجزیه نسبتاً مقاوم و برای جذب گیاه در دسترس نیستند (El-Egami et al., 2024; Babar et al., 2024). بنابراین شکل های معدنی، مقادیر نسبتاً کمی از پتاسیم را برای گیاهان در حال رشد فراهم می کنند و از طرفی تثبیت کودهای مصرفی پتاسیم به شکل نامحلول در خاک، آبشویی آن و جذب پتاسیم محلول توسط گیاهان، مقدار پتاسیم قابل دسترس خاک را کاهش می دهد (Sharma et al., 2024).

ریزجانداران خاک، به ویژه انواع حل کننده پتاسیم (KSMS)، نقش حیاتی در چرخه طبیعی پتاسیم ایفا می کنند. این ریزجانداران با مکانیسم های غیرمستقیم شامل مقاومت در برابر تنش های زیستی و غیرزیستی، تولید آنتی بیوتیک و آنتی اکسیدان، فعالیت کیتیناز و کاتالاز و تولید سیدروفور و هورمون، تثبیت زیستی نیتروژن، انحلال فسفر، کلونیزاسیون ریشه و انحلال ریزمغذی ها و همچنین مکانیسم های مستقیم شامل تولید اسیدهای آلی، تولید ترکیب های کلات کننده و آگزوپلی ساکاریدها سبب ارتقا رشد عمومی گیاه می شوند (Ghimirey et al., 2024). این ریزجانداران می توانند کانی های حاوی پتاسیم از جمله میکا، فلدسپار، مسکوویت، ایلیت، ارتوکلاز و بیوتیت را حل کرده و پتاسیم نامحلول را با مکانیسم هایی مانند اسیدولیز، کلات سازی، واکنش های تبادلی و کمپلکس سازی، تجزیه مواد آلی و بقایای محصولات کشاورزی (Sun et al., 2020; El-Egami et al., 2024) و همچنین آزاد کردن اسیدهای آلی مختلف مانند اسیدهای سیتریک، اگزالیک، استیک، گلوکونیک و تارتاریک به شکل محلول تبدیل کنند (Babar et al., 2024). این اسیدها سبب تجزیه کانی های پتاسیم دار شده و پتاسیم را وارد محلول خاک می کنند که برای گیاهان در دسترس قرار می گیرد. استفاده از ریزجانداران حل کننده پتاسیم شامل گونه های آسپرژیلوس، فلاوباکتریوم، ریزوبیوم، آگروباکتریوم تومفاسینس^۱ و همچنین گونه های مختلف باکتری جنس باسیلوس^۲ مانند سوپتیلیس^۳، پومیلوس^۴، موسیلاژینوسوس^۵ و سیرکولانس^۶ به عنوان کود زیستی، می تواند بهره وری محصول و در دسترس بودن مواد غذایی گیاه و همچنین مقاومت گیاه را در برابر تنش های غیرزیستی افزایش دهد و از توسعه کشاورزی پایدار حمایت کند (Meena et al., 2015). نواز و همکاران (۲۰۲۳) بیان نمودند که گونه های مختلف ریزوباکتری های محرک رشد گیاه^۸ (PGPR) مانند باسیلوس، اسیدوتیوباسیلوس^۹، پائنی باسیلوس^۱، سودوموناس^{۱۱}، انتروباکتر^{۱۲}، پانتوتا^{۱۳}، اروینیا^{۱۴}، آروسپیریوم^{۱۵}، مارینوкокوس^{۱۶}،

1. Potassium-solubilizing microorganisms
2. *Agrobacterium tumefaciens*
3. *Bacillus*
4. *B. subtilis*
5. *B. pumilus*
6. *B. mucilaginosu*
7. *B. circulans*
8. Plant growth promoting rhizobacteria
1. *Acidothiobacillus*
2. *Paenibacillus*
3. *Pseudomonas*
4. *Enterobacter*
5. *Pantoea*
6. *Erwinia*
7. *Azospirillum*
8. *Marinococcus*

سراسیبا^۱/استریپتومایسس^۲ و/ازتوباکتر^۳ سبب انحلال پتاسیم می‌شوند و متعاقباً در بهبود رشد و عملکرد گیاه نقش دارند (Nawaz et al., 2023). پژوهش‌های قبلی همچنین نقش KSMs را در افزایش رشد و عملکرد محصولات غذایی اصلی مانند برنج، گندم، ذرت و نیشکر گزارش نموده‌اند (Adnan et al., 2022; Soumare et al., 2022; Nawaz et al., 2023). در میان ریزجانداران خاک، اکتینومیست‌ها یکی از بزرگترین و متنوع‌ترین گروه‌های باکتریایی را تشکیل می‌دهند که به عنوان محرک‌های رشد گیاه و سازگار با محیط زیست، کارآمد شناخته شده‌اند (Boubekri et al., 2021). این باکتری‌های رشته‌ای با تولید اسپورهایی که به ذرات خاک می‌چسبند، توانایی مقاومت در محیط‌های بسیار دشوار و رقابتی را دارند (Gong et al., 2018) علاوه بر این، سایر ویژگی‌های این ریزجانداران مانند تولید متابولیت‌هایی که رشد گیاه و تحمل به تنش‌های زیستی و غیرزیستی را بهبود می‌بخشد، آنها را به کاندیداهای مناسبی برای تولید کودهای زیستی بسیار متنوع تبدیل می‌کند. این ریزجانداران علاوه بر افزایش قابلیت دسترسی به پتاسیم، با تحریک تنوع و فعالیت میکروبی، ویژگی‌های زیستی خاک را نیز بهبود می‌بخشند و سبب افزایش قابل توجهی در جمعیت باکتری‌ها، قارچ‌ها و سایر اکتینومیست‌ها می‌شوند و در نتیجه چرخه مواد غذایی و تجزیه مواد آلی خاک را نیز بهبود می‌بخشند (Soumare et al., 2020). اگرچه، تنها ۵ درصد از باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم را اکتینومیست‌ها تشکیل می‌دهند (Etesami et al., 2017)، اما این مزیت دوگانه سبب بهبود وضعیت مواد غذایی و تقویت زیست‌بوم خاک از نظر زیستی می‌شود و اکتینومیست‌های حل‌کننده پتاسیم را به بخش جدایی‌ناپذیر از کشاورزی پایدار تبدیل می‌کند (Kavya et al., 2025). متأسفانه، تاکنون اکتینومیست‌های جدا شده از ریزوسفر گیاه در مقایسه با سایر ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه مانند پروتوباکتری^۴ و فیرمیکوتز^۵ به ندرت مورد بررسی قرار گرفته‌اند (Yadav and Yadav, 2019). بنابراین در پژوهش حاضر به ارزیابی توانایی جدایه‌های اکتینومیست جدا شده از ریزوسفر باغ‌های مرکبات در انحلال پتاسیم نامحلول در محیط کشت مایع و همچنین توانایی جدایه‌های کارآمدتر برای افزایش فراهمی پتاسیم و همچنین تأثیرات مفید آنها بر رشد گیاه جو پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

تهیه جدایه‌های اکتینومیست و بررسی توانایی انحلال پتاسیم

جدایه‌های اکتینومیست از پژوهشکده مرکبات و میوه‌های نیمه‌گرمسیری در شهر رامسر، استان مازندران که از ریزوسفر درختان مرکبات باغ‌های شمال و جنوب ایران جداسازی شده بودند تهیه و به آزمایشگاه بیولوژی خاک دانشکده علوم کشاورزی منتقل شدند. به منظور بررسی اثر مایه‌زنی جدایه‌های اکتینومیست بر انحلال پتاسیم در محیط کشت مایع، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۹ جدایه اکتینومیست در سه تکرار انجام شد. پس از رشد جدایه‌های اکتینومیست در محیط کشت ISP2 (عصاره مالت ۱۰، عصاره مخمر ۴، گلوکز ۴ و آگار ۱۵ گرم در لیتر) یا ISP7 (۱۵ میلی‌لیتر گلیسرول، ال-تیروزین ۰/۵، ال-آسپارژین ۱، دی‌پتاسیم هیدروژن فسفات ۰/۵، کلرید سدیم ۰/۵، سولفات منیزیم ۰/۵ و آگار ۲۰ گرم در لیتر)، مایه‌زنی به محیط غربال‌گری حل‌کنندگی پتاسیم انجام شد. به منظور بررسی کمی انحلال پتاسیم توسط ۲۹ جدایه اکتینومیست، محیط کشت مایع الکساندروف (بیوتیت ۲، کربنات کلسیم ۰/۲، کلرید سدیم ۰/۲، کلرید آهن سه ظرفیتی ۰/۰۹، سولفات آمونیوم ۱، دی‌سدیم فسفات ۱، سولفات منیزیم ۰/۵ و ساکارز ۵ گرم در لیتر با pH=7) تهیه و استریل شد.

کانی بیوتیت استفاده شده در محیط کشت از کارخانه فرآوری میکا واقع در روستای البرز شهرستان املش استان گیلان تهیه شد و پس از آنالیز^۶ XRF، مقدار اکسید پتاسیم آن ۱۰/۵۹ درصد گزارش شد (جدول ۱). ابتدا بیوتیت به وسیله آسیاب برقی پودر شد و از الک ۶۰ مش (قطر کم‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر) عبور داده شد و قبل از افزودن بیوتیت به محیط کشت، کانی پیش تیمار شد. بدین منظور ۰/۵ گرم از پودر کانی در ۳۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۰/۱ مولار به مدت ۳۰ دقیقه در ۱۵۰ دور در دقیقه تکان داده شد و سپس در ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه سانتریفیوژ و محلول رویی دور ریخته شد. کانی در ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر تکان داده شد و پس از سانتریفیوژ دوباره، محلول رویی دور ریخته شد. کانی جمع‌آوری شده به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس خشک و به مقدار ۲ گرم در لیتر از آن در محیط کشت استفاده شد (ناهیدان و همکاران، ۱۳۹۸). سپس مقدار ۵۰۰ میکرولیتر از سوسپانسیون تازه هر یک از جدایه‌ها به محیط کشت افزوده شد.

9. *Serratia*
10. *Streptomyces*
11. *Azotobacter*
12. *Proteobacteria*
13. *Firmicutes*
14. X-Ray Fluorescence

جدول ۱- نتایج آنالیز XRF نمونه بیوتیت

اکسید آهن	اکسید سیلیسیوم	اکسید پتاسیم	اکسید منیزیم	اکسید آلومینیوم	اکسید تیتانیوم
۱۹/۰۴	۳۹/۲۱	۱۰/۵۹	۱۱/۲۱	۱۴/۷	۵/۲۳
$g\ 100\ g^{-1}$					

نمونه‌ها در انکوباتور شیکردار در دمای ۳۰ درجه سلسیوس و ۷۰ دور در دقیقه به مدت ۷ روز گرماگذاری شدند؛ در پایان pH نمونه‌ها توسط دستگاه pH متر قرائت شد. پس از سانتریفیوژ سوسپانسیون (۱۰۰۰۰ دور به مدت ۱۰ دقیقه)، یک میلی-لیتر از محلول شفاف رویی برداشته و مقدار پتاسیم محلول توسط دستگاه فلیم فوتومتر مدل (JENWAY) قرائت شد (Sugumaran and Janarthanam, 2007).

دو جدایه که بیشترین حل کنندگی پتاسیم را نشان دادند انتخاب و مقادیر pH و انحلال پتاسیم توسط آنها در طول زمان (۱، ۳، ۵ و ۷ روز) نیز اندازه‌گیری شدند.

نمونه‌برداری از خاک، اعمال تیمارها و کاشت گیاه

دو جدایه که بیشترین حل کنندگی پتاسیم در محیط کشت مایع را نشان دادند و دارای ویژگی‌های محرک رشدی (جدول ۲) بودند (Noorizadeh et al., 2025) انتخاب و برای کشت گیاه جو مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۲- ویژگی‌های مربوط به فعالیت‌های ارتقا دهنده رشد گیاه دو جدایه اکتینومیست انتخاب شده (Noorizadeh et al., 2025)		
جدایه		ویژگی
S5A	S3C	
+	+	تولید آمونیوم
-	+	استیل کربوکسیلاز (ACC)
-	+	ایندول استیک اسید (IAA)
+	+	تثبیت نیتروژن
-	+	انحلال فسفر
+	-	تولید سیدروفور

نمونه خاک از استان گیلان، شهرستان املش با طول جغرافیایی $50^{\circ}09'06''$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ}03'53''$ و از عمق ۳۰-۳ سانتی‌متری جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه خاک پس از هوا خشک شدن، خرد و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های خاک شامل pH، قابلیت هدایت الکتریکی (Page et al., 1982)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert and Suarez, 1996)، کربن آلی (Walkley and Black, 1934)، فسفر و پتاسیم کل (Kuo, 1996)، فسفر فراهم (Olsen, 1954)، نیتروژن کل و معدنی (Rowell, 1994)، آهن کل (Chen and Ma, 2001) و فراهم (Lindsay and Norvell, 1978) و پتاسیم محلول و تبادل (Mc Lean and Watson, 1985) اندازه‌گیری شد.

به منظور بررسی تأثیر مایه‌زنی اکتینومیست‌ها بر رشد گیاه جو، آزمایشی گلخانه‌ای در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تیمار و سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان انجام شد. تیمارها شامل شاهد مثبت (کود شیمیایی بر اساس ویژگی‌های خاک و نیاز کودی گیاه جو شامل: اوره ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار، سوپر فسفات تریپل ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار و سولفات پتاسیم ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار) و شاهد منفی (بدون اعمال تیمار کود شیمیایی و زیستی) و دو جدایه اکتینومیست S5A و S3C بودند. برای تهیه مایه تلقیح، ابتدا دو جدایه جهت تکثیر بر روی محیط کشت ISP2 بازکشت و به مدت ۴۸ ساعت در انکوباتور با دمای ۲۷ درجه سلسیوس نگهداری شدند. به منظور تلقیح خاک‌ها با جدایه‌های مورد نظر (10^4 سلول بر گرم خاک)، مقدار ۳ کیلوگرم خاک بر روی سینی‌های پلاستیکی به طور کامل پهن شدند و سپس رطوبت خاک در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی خاک رسید و پس از پخش شدن و یکنواختی کامل به گلدان‌های پلاستیکی منتقل شد. تعداد ۱۲ گلدان سه کیلوگرمی انتخاب و در کف همه گلدان‌ها به مقدار یکسان ماسه ریخته شد. بذره‌های جو سترون شدند به این منظور بذور در هیپوکلرید سدیم ۵ درصد (حجمی/حجمی) به مدت ۵ دقیقه غوطه‌ور شدند و سپس ۳ بار با آب مقطر استریل آبکشی و سپس در اتانول ۹۶ درصد (حجمی/حجمی) برای مدت ۵ دقیقه قرار گرفتند و پس

از آن دوباره ۴ بار با آب مقطر استریل آبکشی شدند (Schikora and Schmidt, 2001). بذرها استریل بر روی پلیت‌های حاوی آب آگار (۱/۵ درصد) به مدت سه روز در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در تاریکی نگهداری شدند تا جوانه بزنند. در هر گلدان ۶ عدد بذر جو در فواصل منظم در عمق ۳ سانتی‌متری در هر گلدان کشت و بذرها دو هفته بعد از کاشت به تعداد ۳ عدد در هر گلدان تنک شدند. گلدان‌ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس در روز و ۱۶ درجه سلسیوس در شب و رطوبت نسبی ۶۰ درصد نگهداری شدند. در طول دوره رشد، رطوبت گلدان‌ها در حدود ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه با روش وزنی نگهداری شد. پس از گذشت ۴۰ روز از کاشت گیاه، اندام هوایی از سطح خاک گلدان‌ها برداشت و ریشه گیاه نیز خارج شد و صفات رشدی گیاه شامل طول اندام هوایی و طول بلندترین ریشه (سانتی‌متر) و وزن تر اندام هوایی (گرم) اندازه‌گیری شد و پس از آن درون پاکت‌های کاغذی به آزمایشگاه منتقل شدند. ریشه‌ها به دقت با آب مقطر شستشو داده شدند تا ذرات خاک از آنها جدا گردد. سپس، هر دو قسمت (اندام هوایی و ریشه) در کیسه‌های کاغذی جداگانه قرار داده شده و در آن در دمای ۶۵ تا ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ تا ۳۶ ساعت (تا رسیدن به وزن ثابت) خشک شدند. پس از خشک شدن کامل، وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه‌ها (گرم) اندازه‌گیری شد. از خاک درون گلدان‌ها نیز نمونه‌برداری انجام گرفت و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری و هوا خشک شدن به آزمایشگاه منتقل شدند. اندام هوایی گیاه پس از خشک نمودن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت، آسیاب شدند. ۰/۵ گرم از پودر گیاه (عبور داده شده از الک ۰/۵ میلی‌متر) برداشته و مقدار ۵ میلی‌لیتر HNO_3 غلیظ به آن افزوده و سپس نمونه‌ها را در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس حرارت داده تا حجم نمونه کم شد. یک میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به نمونه‌ها افزوده شد. بار دیگر نمونه‌ها را در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس حرارت داده تا حجم نمونه کم شد. پس از سرد شدن نمونه، حجم آن با آب مقطر به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده و محلول با کاغذ صافی صاف شد. فسفر گیاه به روش رنگ‌سنجی وانادات-مولیبدات توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد (Estefan et al., 2013). نیتروژن نمونه‌ها با استفاده از هضم کج‌لدال (Gupta, 1999)، پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌فوتومتر و قرائت آهن با دستگاه جذب اتمی مدل (SpecrtAA 220FS, VARIAN) صورت گرفت. مقدار pH، قابلیت هدایت الکتریکی، فسفر، پتاسیم و آهن فراهم، کربن آلی، تنفس پایه میکروبی (Anderson and Domsch, 1993) و کربن زیست توده میکروبی (Jenkinson and Ladd, 1981) نیز در نمونه‌های خاک گلدان‌ها اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

این پژوهش در بخش اول در قالب طرح کاملاً تصادفی در فاز محلول با ۲۹ جدایه اکتینومایست و ۳ تکرار انجام شد. در بخش دوم، آزمایش در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی با ۴ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. نتایج به دست آمده از آزمایشگاه و گلخانه در بخش‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس پیامد ۲۹ جدایه بر مقدار pH و پتاسیم محلول در جدول ۳ آورده شده است. پیامد جدایه اکتینومایست بر ویژگی‌های مورد مطالعه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$).

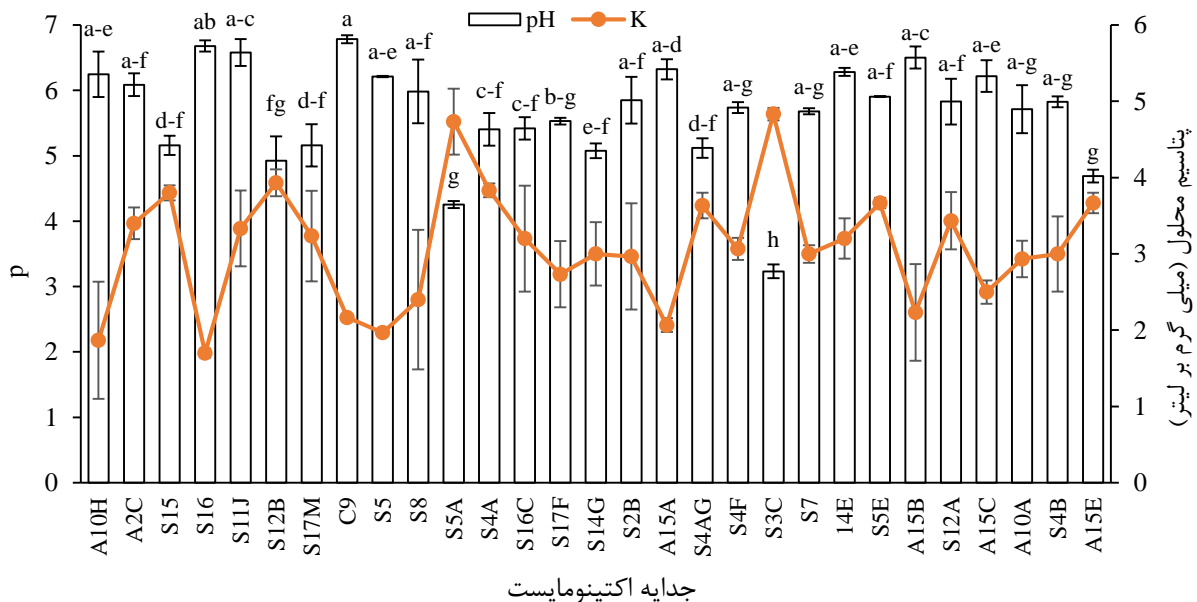
جدول ۳- تجزیه واریانس پیامد جدایه‌های اکتینومایست بر pH و پتاسیم محلول

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییرات
K	pH		
۱/۶۱۵**	۰/۹۵۲**	۲۸	تیمار
۰/۴۸۳	۰/۱۴۵	۵۸	خطا
۲۲/۷۱	۶/۵۹	-	ضریب تغییرات (%)

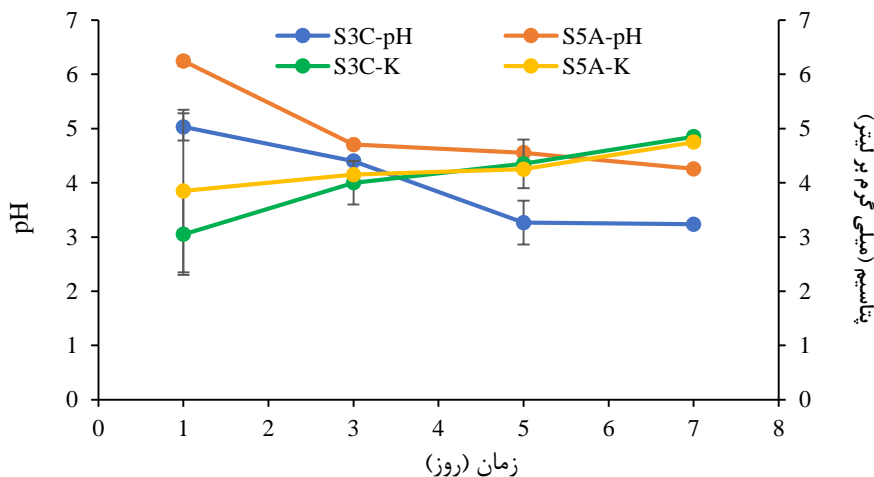
** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد می‌باشد. pH: اسیدیته، K: پتاسیم محلول

تغییرات مقدار pH و پتاسیم محلول محیط کشت در حضور ۲۹ جدایه اکتینومایست در شکل ۱ نشان داده شده است. مقدار pH در محدود ۳/۲۳ تا ۶/۶۸ و پتاسیم محلول از ۱/۷ تا ۴/۸۳ میلی‌گرم بر لیتر متغیر بود. جدایه‌ها قادر به تولید اسیدهای آلی و معدنی می‌باشند که به تجزیه کمپلکس سیلیکات آلومینیوم پتاسیم (بیوتیت) و آزاد شدن پتاسیم معدنی کمک کرده و از این رو محتوای پتاسیم

محلول را افزایش می‌دهد (Meena et al., 2016). Olaniyan و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش نمودند که باکتری‌های حل کننده پتاسیم با ترشح اسیدهای آلی مانند اسید تارتاریک، اسید سیتریک و اسید اگزالیک، پتاسیم معدنی را محلول کرده و آن را برای گیاهان قابل دسترس می‌کنند. Zhao و همکاران (۲۰۲۴) ضمن بیان همبستگی منفی معنی‌دار بین انحلال پتاسیم و pH محیط کشت، گزارش نمودند که سویه ریزوباکتری حل کننده پتاسیم *Sودوموناس آئروژینوزا* 10^8 با ترشح اسیدهای آلی مانند اسیدهای سوکسینیک، سیتریک، استیک و لاکتیک، pH محیط را کاهش می‌دهد و با ایجاد شرایط اسیدی روی سطح مواد معدنی غنی از پتاسیم، تجزیه آنها را تسهیل و یون‌های پتاسیم را از شبکه‌های کریستالی آنها آزاد می‌کند. مقدار پتاسیم محلول در محیط کشت پس از گذشت ۷ روز انکوباسیون، در حضور دو جدایه S5A و S3C به ترتیب ۴/۸ و ۴/۷ میلی‌گرم بر لیتر بود. با کاهش pH محیط کشت با گذشت زمان بر اثر فعالیت دو جدایه S5A و S3C، مقدار پتاسیم محلول ۲/۷ درصد افزایش پیدا کرد (شکل ۲). نتایج همبستگی منفی معنی‌دار بین pH و انحلال پتاسیم ($R^2 = -0.81, p < 0.01$) را نشان داد. مقدار پتاسیم محلول در محیط کشت الکساندروف پس از گذشت چهار روز انکوباسیون در حضور باکتری حل کننده پتاسیم *باسیلوس موسیلاژینوسوس* MCRCp1 در کانی مسکوویت، میکروکلین و ارتوکلاز به ترتیب ۴/۳، ۱/۲۶ و ۰/۸۵ میلی‌گرم بر لیتر گزارش شده است (Sugumaran and Janarthanam, 2007).



شکل ۱- تاثیر جدایه‌های اکتینومایست بر مقدار pH و پتاسیم محلول در محیط کشت. حروف مشابه بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت آماری معنی‌دار است و نوارها، انحراف استاندارد می‌باشند (n=3).



شکل ۲- تاثیر دو جدایه S5A و S3C در طول زمان بر مقدار pH و پتاسیم محلول در محیط کشت. نوارها، انحراف استاندارد می‌باشند (n=3).

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، در تمامی جدایه‌های با کمترین مقدار pH، بیشترین مقدار پتاسیم محلول مشاهده نشد، زیرا جدایه‌های حل‌کننده پتاسیم از طریق سه مکانیسم سبب آزادسازی پتاسیم کانی‌های حاوی پتاسیم می‌شوند. در درجه اول اسیدی شدن محیط، که کمپلکس آلومینوسیلیکات پتاسیم را با آزاد کردن اسیدهای آلی یا معدنی به سیلیکات پتاسیم یا سیلیکات آلومینیوم هوادیده تبدیل و پتاسیم را به شکل محلول آزاد می‌کنند (Bahadur et al., 2019). همچنین بر اساس اطلاعات جدول ۲، جدایه S5A می‌تواند با تولید سیدروفور با Ca^{+2} ، Si^{+4} و Al^{+3} تشکیل کلات دهد و پتاسیم موجود در فاز تبادلی را به درون محلول آزاد نماید. پلی‌مرهای خارج سلولی خاصی نیز از جمله پروتئین‌ها یا اگزوپلی‌ساکاریدها، توسط سویه‌ها سنتز می‌شوند که بیوفیلم را در اطراف کانی‌های معدنی تشکیل می‌دهند و با تغییر مورفولوژی آنها، کانی‌ها را در معرض تجزیه قرار می‌دهند و پتاسیم را به شکل محلول آزاد می‌کنند. اگزوپلی‌ساکاریدها همچنین با تشکیل کمپلکس‌هایی با یون‌های موجود در محلول، سرعت انحلال کانی‌های دارای پتاسیم (فلدسپارها) را افزایش می‌دهد (Nawaz et al., 2023). بنابراین دو مکانیسم دیگر نیز می‌توانند عامل آزادسازی بیشتر پتاسیم به داخل فاز محلول با وجود pH بیشتر باشند.

کشت گلدانی گیاه جو

تأثیر تیمارها بر ویژگی‌های خاک

برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۴ آورده شده است. خاک مورد مطالعه به ترتیب دارای ۱۹/۴، ۴۸/۶ و ۳۲، شن، سیلت و رس و بافت لوم رسی سیلتی و پتاسیم قابل دسترس ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که نشان‌دهنده مقدار متوسط پتاسیم قابل جذب توسط گیاه می‌باشد. مقدار رس زیاد در خاک نیز می‌تواند سبب کاهش فراهمی متوسط پتاسیم در خاک باشد (Havlin et al., 2014). مقدار کربنات کلسیم معادل خاک ۷/۲ درصد بود و pH نسبتاً بالا (۷/۸۱) نشان‌دهنده قلیایی بودن خاک می‌باشد. قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۲۳۴ دسی‌زیمنس بر متر حاکی از شوری پایین خاک است.

جدول ۴- برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی	pH	EC	CCE	OC	TN	TP	TK	TFe	N _{ino}	P _{ava}	K _{ava}	Fe _{ava}	بافت
واحد	-	dS m ⁻¹		g 100g ⁻¹								mg kg ⁻¹	-
Silty clay loam	۷/۸۱	۰/۲۳۴	۷/۲	۰/۸۴	۰/۰۷۳	۰/۰۴۹	۰/۴۵	۴/۲۳	۱/۲۶	۹/۵	۱۵۰	۱/۵۷	

pH: اسیدیته، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، CCE: کربنات کلسیم معادل، OC: کربن آلی، TN: نیتروژن کل، TP: فسفر کل، TK: پتاسیم کل، TFe: آهن کل، N_{ino}: نیتروژن معدنی، P_{ava}: فسفر فراهم، K_{ava}: پتاسیم قابل دسترس، Fe_{ava}: آهن فراهم

نتایج تجزیه واریانس پیامد تیمارها بر ویژگی‌های مورد بررسی خاک پس از برداشت گیاه در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه که مشخص است اثر تیمار بر تمام ویژگی‌های مورد بررسی به استثنای قابلیت هدایت الکتریکی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$).

جدول ۵- تجزیه واریانس پیامد تیمار بر برخی ویژگی‌های مورد بررسی خاک

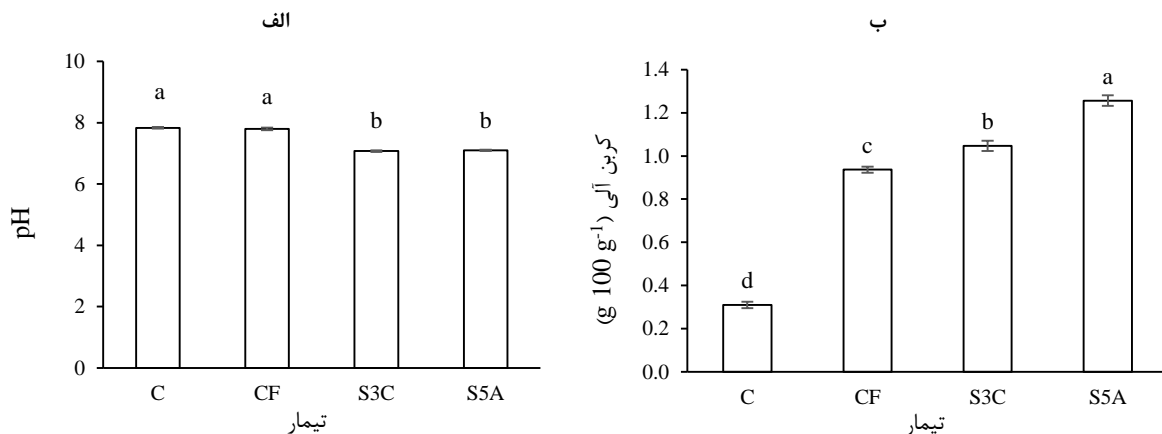
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات								
		pH	EC	N _{ino}	P _{ava}	K _{ava}	Fe _{ava}	OC	BR	MBC
تیمار	۳	۰/۵۳۱**	**۶۲۲/۴۱	**۱۳۴/۵۳	**۱۵۷/۹۴	**۲۴۹/۶۳	**۲/۱۹	**۰/۴۹	**۰/۰۳	**۸۰/۶۳
خطا	۸	۰/۰۰۳	۴۶۳/۶۹	۱۶/۶۵	۰/۵۱	۳۶	۰/۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۰/۵۸
ضریب تغییرات (%)	-	۰/۷	۸/۶۳	۱۶/۵۹	۴/۵۲	۳/۵۹	۲۴/۱۸	۳/۸۶	۷/۳۶	۷/۴۸

** و * به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد. pH: اسیدیته، EC: قابلیت هدایت الکتریکی، N_{ino}: نیتروژن معدنی، P_{ava}: فسفر فراهم، K_{ava}: پتاسیم قابل دسترس، Fe_{ava}: آهن فراهم، BR: تنفس پایه میکروبی و MBC: کربن زیست توده میکروبی

تغییرات pH و کربن آلی خاک

پیامد تیمارهای مختلف بر pH و کربن آلی خاک در شکل ۳ الف و ب نشان داده شده است. بیشترین pH (۷/۸۳) در تیمار C مشاهده شد که با تیمار کود شیمیایی (CF) (۷/۷۹) اختلاف معنی‌داری نداشت و دو تیمار S5A و S3C نیز با pH (۷/۱) اختلاف معنی‌داری با

یکدیگر نشان ندادند ($P>0.05$) (شکل ۳ الف) که نشان دهنده توان جدایه های اکتینومیست در تغییر pH خاک از طریق ترشح متابولیت های اسیدی مانند اسیدهای آلی است (Ghimirey et al., 2024). افزایش تجزیه میکروبی مواد آلی خاک بر اثر تلقیح جدایه های اکتینومیست نیز سبب تولید آمونیاک و سولفید هیدروژن می شود که می توانند در خاک اکسید شده و اسیدهای قوی مانند اسید نیتریک (HNO_3) و اسید سولفوریک (H_2SO_4) تولید کنند و سبب کاهش pH خاک شوند (Etesami et al., 2017). مقدار کربن آلی خاک در تمامی تیمارها اختلاف معنی داری نشان داد ($p<0.01$)؛ بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب در تیمارهای S5A (۱/۲۵) گرم بر ۱۰۰ گرم و C (۰/۳۱) گرم بر ۱۰۰ گرم) مشاهده شد (شکل ۳ ب). کاهش اندک در pH و افزایش جزئی در محتوای کربن آلی بر اثر کاربرد کودهای زیستی در مقایسه با خاک شاهد گزارش شده است (Xiong, Ramalakshmi et al., 2008) و همکاران (۲۰۱۷) نیز پس از استفاده از دو تیمار کود آلی و دو تیمار کود زیستی گزارش کردند که دو تیمار کود زیستی افزایش معنی داری در مقدار ماده آلی و نیتروژن معدنی در مقایسه با تیمار شاهد نشان دادند، در صورتی که در pH خاک بین چهار تیمار تفاوت معنی داری مشاهده نشد. این پژوهش گران بیان نمودند که با توجه به این که کودهای زیستی فراوانی کل باکتری ها و قارچ ها را به طور معنی داری افزایش می دهند، می توانند سبب افزایش کربن آلی خاک شوند، ضمن این که همبستگی مثبت و معنی داری نیز بین کربن آلی خاک و طول ریشه گیاه مشاهده شد ($R^2=0.7, p<0.05$). وجود ریزجانداران مفید تأثیر قابل توجهی بر مقدار کربن آلی خاک و ویژگی های شیمیایی خاک دارد (Heydari et al., 2020). بیشتر بودن مقدار کربن آلی در تیمار S5A (۱/۲۵ درصد) نسبت به تیمار S3C (۱ درصد) احتمالاً ناشی از تفاوت در مقدار زیست توده میکروبی، تفاوت جدایه ها و مقدار ترشح متابولیت ها در هر جدایه می باشد (Ali et al., 2023).

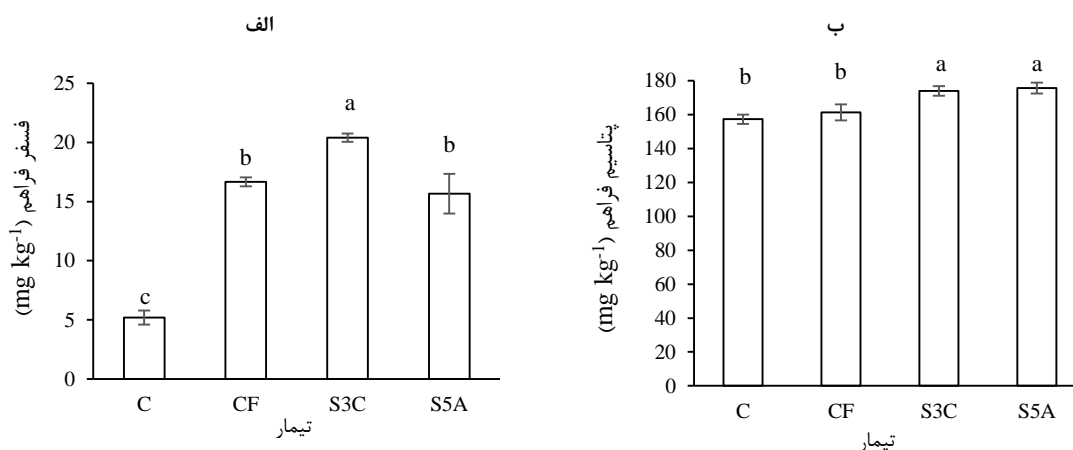


شکل ۳- اثر تیمارهای مختلف بر مقدار pH (الف) و کربن آلی (ب) خاک. C و CF به ترتیب تیمار شاهد منفی و کود شیمیایی می باشند. حروف مشابه بر روی ستون ها بیانگر نبود تفاوت آماری معنی دار است و نوارها، انحراف استاندارد می باشند (n=3).

تغییرات فسفر و پتاسیم فراهم خاک

پیامد تیمارهای مختلف بر مقدار فسفر و پتاسیم فراهم خاک در شکل ۴ الف و ب نشان داده شده است. بیشترین مقدار فسفر فراهم خاک (۲۰/۴ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار S3C اندازه گیری شد که با سایر تیمارها اختلاف افزایشی معنی داری را نشان داد ($p<0.01$). مقدار فسفر فراهم خاک در تیمار S5A (۱۵/۷ میلی گرم بر کیلوگرم) و کود شیمیایی (CF) (۱۶/۷ میلی گرم بر کیلوگرم) اختلاف معنی داری را نشان نداد ($P>0.05$)، اما نسبت به تیمار S3C کمتر و از تیمار C (۵/۲ میلی گرم بر کیلوگرم) بیشتر بود (شکل ۴ الف). با توجه به داده های جدول ۲ که توسط Noorzadeh و همکاران (۲۰۲۵) گزارش شده است، جدایه S3C علاوه بر توانایی فراهمی پتاسیم در انحلال فسفر نامحلول و فراهمی آن نقش دارد که با اسیدی کردن محیط خاک اطراف از طریق ترشح اسیدهای آلی یا آزادسازی پروتون حلالیت فسفر را افزایش می دهد. در خاک های قلیایی، فسفر معمولاً به صورت فسفات کلسیم مانند فلورآپاتیت رسوب می کند که حلالیت کمی دارد و با کاهش pH خاک، گونه های غالب فسفات به سمت شکل های ارتوفسفات تغییر می کنند. سوبه های حل کننده فسفر، منابع کربن مانند گلوکز را متابولیزه می کنند تا اسیدهای آلی را به عنوان محصولات جانبی متابولیک از طریق تنفس اکسیداتیو یا تخمیر آزاد کنند (Rawat et al., 2021). نوع و غلظت این اسیدها، به ویژه اسیدهای دی و تری کربوکسیلیک، به شدت بر کارایی حل شدن فسفات تأثیر می گذارد. اسیدهای آلی رایج شامل اسیدهای گلوکونیک، لاکتیک، سیتریک، ایزوووالریک، سوکسینیک، گلیکولیک،

اگزالیک، فرمیک، ۲-کتوگلوکونیک و استیک هستند (Adnan et al., 2017). افزایش انحلال فسفر از طریق اسیدهای آلی تولید شده توسط ریزجانداران حل کننده پتاسیم نیز گزارش شده است (Kavya et al., 2025). همبستگی مثبت و معنی داری نیز بین فسفر و پتاسیم فراهم خاک مشاهده شد ($R^2 = 0.75, p < 0.01$). بیشترین مقدار پتاسیم فراهم خاک در تیمارهای دارای اکتینومیست مشاهده شد که با تیمارهای C و CF اختلاف افزایشی معنی داری را نشان داد ($p < 0.01$) (شکل ۴ ب). تولید انواع اسیدهای آلی مانند اسید اگزالیک، اسیدهای تارتاریک، اسید گلوکونیک، اسید ۲-کتوگلوکونیک، اسید سیتریک، اسید مالیک، اسید سوکسینیک، اسید لاکتیک، اسید پروپیونیک، اسید گلیکولیک، اسید مالونیک، اسید فوماریک و غیره توسط ریزوباکتری‌های حل کننده پتاسیم گزارش شده است که در آزادسازی پتاسیم از کانی‌های پتاسیم دار خاک مؤثر هستند (Saiyad et al., 2015). هیدروژن آزاد شده ناشی از این اسیدها می‌تواند مستقیماً پتاسیم معدنی را در نتیجه آزادسازی آهسته پتاسیم، محلول و فراهم نماید. مکانیسم اصلی حل شدن کانی‌های پتاسیم دار در خاک، تولید اسیدهای آلی و معدنی و تولید پروتون (مکانیسم اسیدولیز) است که قادرند پتاسیم نامحلول خاک در کانی‌های خاک مانند میکا، مسکوویت و بیوتیت را به شکل‌های محلول پتاسیم و قابل جذب توسط گیاه تبدیل کنند. بنابراین اسیدهای آلی تولید شده توسط ریزجانداران حل کننده پتاسیم، علاوه بر کاهش pH خاک، یون‌های پتاسیم را با کلات کردن (تشکیل کمپلکس) یون‌های Al^{3+} ، Si^{4+} ، Ca^{2+} و Fe^{3+} مرتبط با کانی‌های پتاسیم دار آزاد کنند (Etesami et al., 2017).



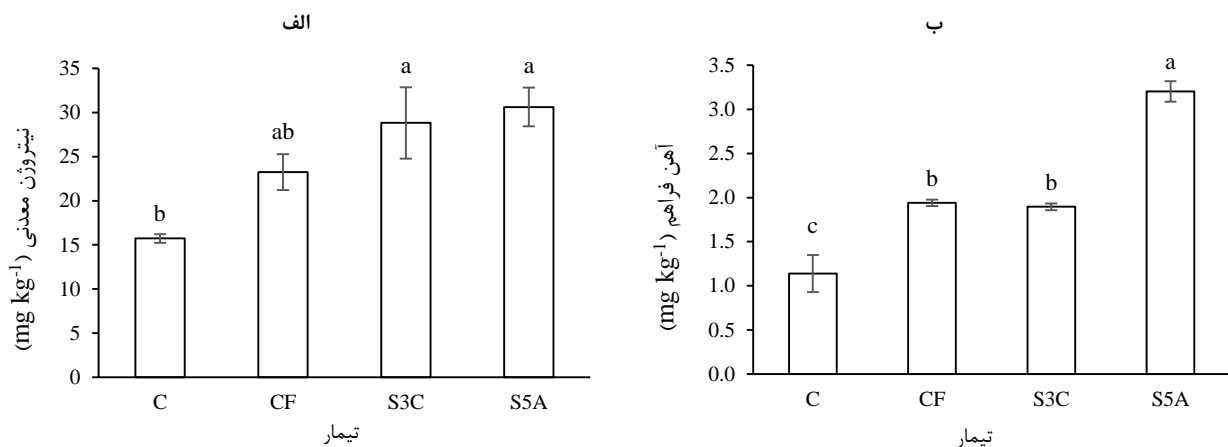
شکل ۴- اثر تیمارهای مختلف بر مقدار فسفر (الف) و پتاسیم فراهم (ب) خاک. حروف مشابه بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت آماری معنی دار است و نوارها، انحراف استاندارد می‌باشند ($n=3$).

تغییرات نیتروژن معدنی و آهن فراهم خاک

پیامد تیمارهای مختلف بر نیتروژن معدنی و آهن فراهم خاک در شکل ۵ الف و ب نشان داده شده است. بیشترین مقدار نیتروژن معدنی خاک در تیمار S5A مشاهده شد که با دو تیمار S3C و CF اختلاف معنی داری را نشان نداد ($P > 0.05$) (شکل ۵ الف). بر اساس جدول ۱، هر دو جدایه اکتینومیست دارای توانایی تثبیت نیتروژن هستند که نشان می‌دهد هر دو می‌توانند به شکل مؤثری نیتروژن اتمسفری را تثبیت و سبب افزایش نیتروژن معدنی خاک شوند. تثبیت نیتروژن اتمسفری توسط آنزیم نیتروژناز، معدنی سازی مواد آلی و آزادسازی آمونیوم، و همچنین تغییر ویژگی‌های شیمیایی خاک می‌تواند سبب افزایش نیتروژن قابل استفاده در خاک شده و جذب نیتروژن توسط گیاه را بهبود بخشد (Sharma et al., 2016). Meena و همکاران (۲۰۱۲) نیز بهبود دسترسی به نیتروژن را در خاک‌های تیمار شده با ریزجانداران حل کننده پتاسیم گزارش نمودند و آن را به افزایش معدنی شدن نیتروژن و ترشح هورمون‌های محرک رشد در حضور این ریزجانداران نسبت دادند.

بیشترین مقدار آهن فراهم خاک در تیمار S5A مشاهده شد که با سایر تیمارها اختلاف افزایش معنی داری را نشان داد ($p < 0.01$) و کمترین مقدار آهن فراهم خاک نیز در تیمار C مشاهده شد و در تیمارهای S3C و CF اختلاف معنی داری مشاهده نشد ($P > 0.05$) (شکل ۵ ب). یکی از مکانیسم‌های اصلی در افزایش آهن فراهم خاک توسط ریزجانداران، ترشح اسیدهای آلی و ترکیب‌های کلات کننده مانند سیدروفورها است که توسط باکتری‌ها برای کاهش استرس کمبود آهن سنتز می‌شوند و در نتیجه رشد و نمو گیاه را تقویت می‌کنند. سیدروفورهای تولید شده توسط GPBها میل ترکیبی فوق العاده زیاد برای Fe^{3+} دارند. پس از تشکیل کمپلکس آهن-سیدروفور،

توسط گیرنده‌های خاصی روی سطح سلول‌های باکتریایی یا گیاهی شناسایی شده، به درون سلول‌ها نفوذ کرده و متعاقباً به آهن دو ظرفیتی احیا شده یا پس از تخریب سیدروفور آزاد می‌شوند و آهن را برای متابولیسم سلولی در دسترس زیستی قرار می‌دهند (Maciel-Rodriguez et al., 2025). بر اساس داده‌های جدول ۲ (Noorizadeh et al., 2025)، جدایه S5A دارای توانایی تولید سیدروفور است. اگرچه گیاهان گرامینه مانند جو نیز در شرایط کمبود آهن توانایی تولید سیدروفور را دارد اما نکته مهم این است که سیدروفورهای تولید شده توسط PGPBها در مقایسه با سیدروفورهای سنتز شده توسط گیاهان یا قارچها، تمایل بیشتری برای اتصال به آهن نشان می‌دهند و این ویژگی، جذب آهن را در شرایط محدود کننده افزایش می‌دهد و به حفاظت از گیاه کمک می‌کند (Saha et al., 2016). جدایه S5A، مقدار آهن فراهم خاک را نسبت به تیمار شاهد ۲/۸ برابر افزایش داد که با یافته‌های ژائو و همکاران (۲۰۲۳) هم‌سو است. این پژوهش‌گران گزارش نمودند که کاربرد سویه‌های تولیدکننده سیدروفور در خاک‌های آهنی یا قلیایی می‌تواند غلظت آهن فراهم را تا دو برابر افزایش دهد (Zhao et al., 2024). بنابراین، استفاده از چنین سویه‌هایی در مناطق با کمبود آهن می‌تواند یک راه‌کار مؤثر زیستی برای رفع کمبود آهن در محصولات زراعی باشد.



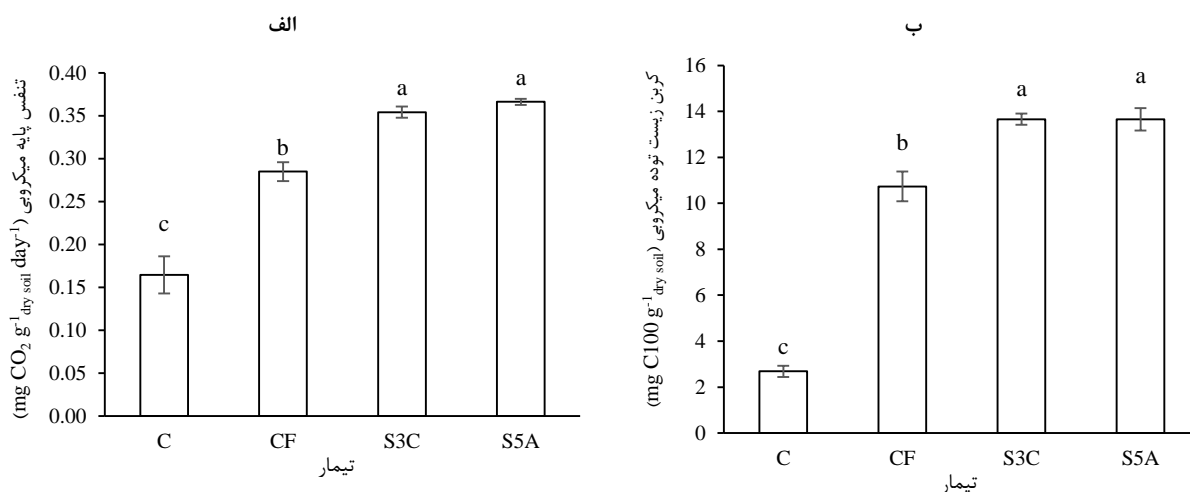
شکل ۵- اثر تیمارهای مختلف بر مقدار نیتروژن معدنی (الف) و آهن فراهم (ب) خاک. C و CF به ترتیب تیمار شاهد منفی و کود شیمیایی می‌باشند. حروف مشابه بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت آماری معنی‌دار است و نوارها، انحراف استاندارد می‌باشند (n=3).

تغییرات تنفس پایه و کربن زیست توده میکروبی خاک

پیامد تیمارهای مختلف بر تنفس پایه و کربن زیست توده میکروبی خاک در شکل ۶ الف و ب نشان داده شده است. بیشترین مقدار تنفس پایه و کربن زیست توده میکروبی در تیمارهای دارای اکتینومیست مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری را با تیمار C و CF نشان دادند ($p < 0.01$). کاربرد کودهای زیستی فراوانی کل باکتری‌ها و قارچها را در مقایسه با تیمار کود شیمیایی به طور معنی‌داری افزایش می‌دهد که خود می‌تواند سبب افزایش تنفس میکروبی و فعالیت موجودات زنده و فرآیندهای متابولیک آن‌ها در خاک باشد (Xiong et al., 2017). تیمار CF که تنها کود شیمیایی دریافت کرده بود، نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری در تنفس پایه و کربن زیست توده نشان داد. این افزایش را می‌توان ناشی از تأمین سریع و مستقیم عناصر غذایی معدنی، به‌ویژه نیتروژن، فسفر و پتاسیم، دانست که به سرعت در اختیار ریزجانداران خاک قرار گرفته و سبب تحریک رشد و افزایش فعالیت آن‌ها می‌شود (Tahat et al., 2020). گزارش شده است که کود شیمیایی می‌تواند با تأمین سریع عناصر غذایی، به‌طور موقت رشد میکروبی را تحریک کند، اما فاقد اثرات پایداری است که از طریق فعالیت زیستی مداوم اکتینومیست‌ها حاصل می‌شود (Adesemoye et al., 2009).

تاثیر تیمارها بر ویژگی‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه

نتایج تجزیه واریانس پیامد تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های مورد بررسی در گیاه جو در جدول ۶ آورده شده است. همان‌گونه که در جدول مشخص است اثر تیمار بر ویژگی‌های طول اندام هوایی، طول ریشه و وزن تر و خشک اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$)؛ ولی بر وزن خشک اثر معنی‌داری نداشت. همچنین در نتایج تجزیه واریانس بر روی عناصر مورد بررسی گیاه جو مشخص شد که اثر تیمار بر روی این صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$).



شکل ۶- اثر تیمارهای مختلف بر مقدار تنفس پایه میکروبی (الف) و کربن زیست توده میکروبی (ب) خاک. C و CF به ترتیب تیمار شاهد منفی و کود شیمیایی می‌باشند. حروف مشابه بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت آماری معنی‌دار است و نوارها، انحراف استاندارد می‌باشند (n=3).

جدول ۶- تجزیه واریانس پیامد تیمار بر ویژگی‌های مورد بررسی گیاه

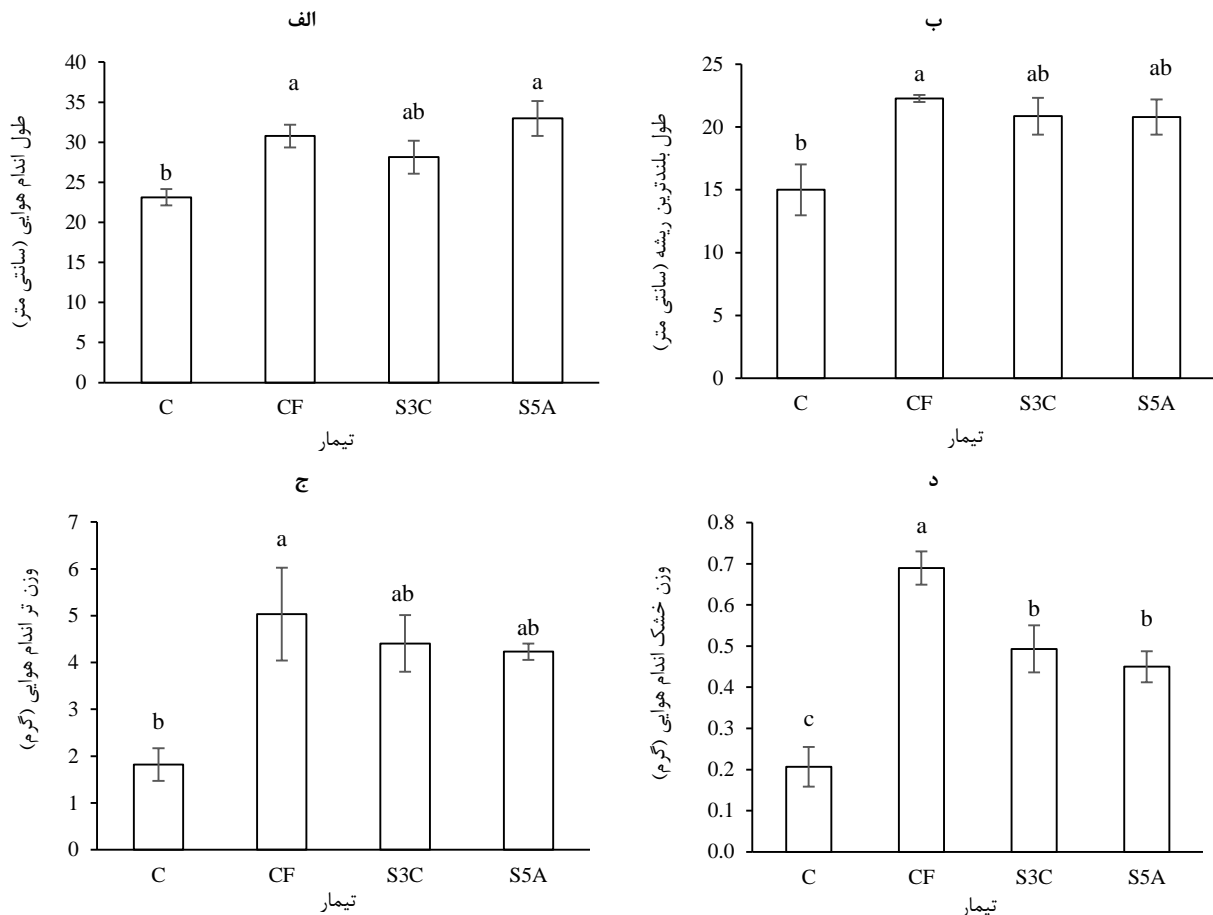
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات								
		طول اندام هوایی	طول ریشه	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	نیترژن	فسفر	پتاسیم	آهن
تیمار	۳	۵۳/۷۷*	۳۱/۲۴*	۵/۹۷*	۰/۱۲**	۰/۰۰۲ ^{ns}	۱/۱۷**	۰/۰۲**	۳/۴۹**	۱۱۰۴/۰۹**
خطا	۸	۷/۴۷	۶/۲۱	۱/۱۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۱۷	۶/۴۷
ضریب تغییرات (%)	-	۹/۵۱	۱۲/۶۳	۲۷/۴	۱۷/۴۸	۴۶/۲۸	۶/۶۸	۹/۷۵	۴/۹	۶/۳۷

**، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

برخی از مولفه‌های رشدی گیاه

پیامد تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه جو در شکل ۷ نشان داده شده است. بیشترین طول اندام هوایی گیاه در تیمار S5A بدست آمد که با تیمارهای S3C و CF تفاوت معنی‌داری نداشت ($P > 0.05$) و کمترین طول اندام هوایی در تیمار C مشاهده شد (شکل ۷ الف). طول بلندترین ریشه در تیمارهای دارای اکتینومایست و کود شیمیایی (CF) نسبت به تیمار شاهد (C) افزایش نشان داد که بیانگر محدودیت تغذیه‌ای و رشد برای گیاه در تیمار شاهد است. اگرچه مجموع طول ریشه که انبوهی و مقدار انشعاب بندی ریشه را نشان می‌دهد، اندازه گیری نشد که دارای اهمیت است. افزایش رشد گیاه به‌ویژه در بخش‌های هوایی می‌تواند ناشی از بهبود تغذیه گیاه، تحریک رشد ریشه، افزایش دسترسی به عناصر غذایی و ترشح ترکیب‌های تنظیم‌کننده رشد مانند اکسین، جیبرلین و سیدروفورها توسط جدایه‌های محرک رشد گیاه باشد (Saharan and Nehra, 2011). در پژوهش Noorizadeh و همکاران (۲۰۲۵) مشخص شد که جدایه S3C علاوه بر داشتن قابلیت حل‌کنندگی فسفات و تثبیت نیترژن، دارای فعالیت ACC دامیناز و تولید IAA نیز بوده است. ایندول-۳-استیک اسید یک هورمون محرک رشد ریشه است که موجب افزایش سطح تماس ریشه با خاک و بهبود جذب آب و عناصر غذایی می‌شود (Spaepen et al., 2007). فعالیت ACC دامیناز نیز با کاهش سطح اتیلن در گیاه، استرس‌های محیطی را کاهش داده و کارایی جذب عناصر را بهبود می‌بخشد. Noorizadeh و همکاران (۲۰۲۵) همچنین گزارش نمودند که جدایه S5A نیز از طریق ترکیبی از مکانیسم‌های بیوشیمیایی شامل تجزیه مواد آلی از طریق تولید آنزیم‌های سلولاز، کیتیناز، پکتیناز و پروتاز، حل‌کنندگی فسفات و تثبیت زیستی نیترژن (جدول ۲) قادر به ارتقای فراهمی فسفر، نیترژن و آهن در خاک است که این امر بهبود رشد و عملکرد گیاه را در پی دارد. Soumare و همکاران (۲۰۲۰) افزایش طول ریشه گیاه را به سبب اثر ترکیبی مقدار بالای IAA تولید شده توسط *Streptomyces griseorubens* BC10 و انحلال فسفر و پتاسیم به ترتیب از سنگ فسفات و میکا گزارش و همچنین بیان نمودند که

سویه های *Streptomyces griseorubens* BC10 و *Nocardioopsis alba* BC11 در بهبود رشد گیاه گندم و ذرت مؤثر بودند. بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی در تیمار CF مشاهده شد که در وزن تر اختلاف معنی داری با تیمارهای اکتینومایست نداشت و در وزن خشک اختلاف معنی داری را نشان داد (شکل ۷ ج و د). وزن تر و خشک اندام هوایی گیاه در تیمارهای دارای اکتینومایست نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی داری را نشان داد ($p < 0.01$). اکتینومایست ها ظرفیت بالایی برای کلونیزه کردن ریشه های گیاهان دارند. این ناحیه به دلیل تراوش، ترشح و رسوب ترکیب های مهم مانند اسیدهای آمینه، اسیدهای چرب، اسیدهای آلی، فنول ها، استرول ها، قندها و ویتامین ها توسط ریشه ها، ارزش غذایی بالاتری دارد. به همین دلیل، اکتینومایست هایی که ریزوسفر را کلونیزه می کنند، احتمال بیشتری برای دریافت مواد غذایی دارند و فعالیت بیشتر و افزایش جذب عناصر غذایی و زیست توده گیاه می شوند (Silva et al., 2022).



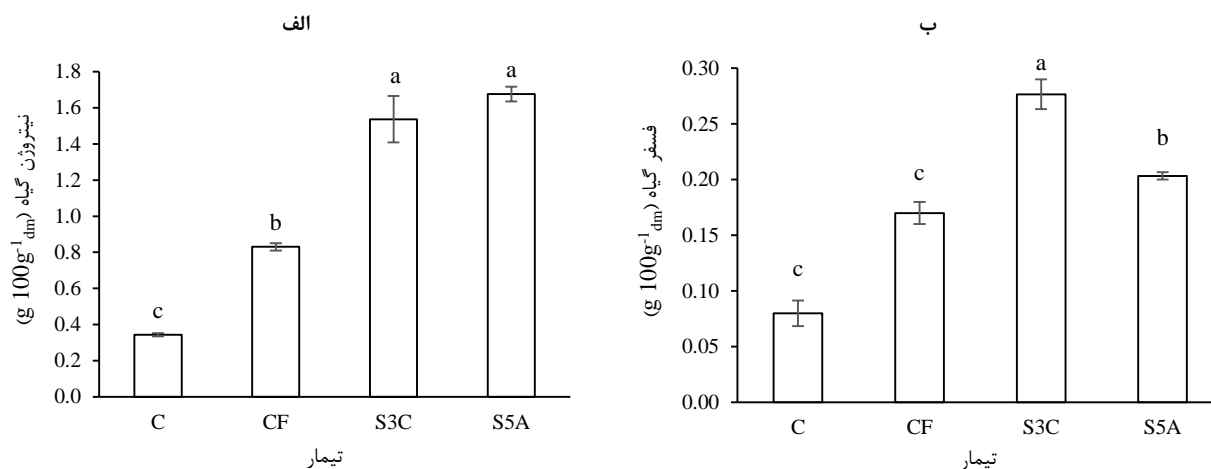
شکل ۷- پیامد تیمارهای مختلف بر ویژگی های مورفولوژیک گیاه جو. C و CF به ترتیب تیمار شاهد منفی و کود شیمیایی می باشند. حروف مشابه بر روی ستون ها بیانگر نبود تفاوت آماری معنی دار است و نوارها، انحراف استاندارد می باشند (n=3).

نیتروژن و فسفر گیاه

پیامد تیمارهای مختلف بر نیتروژن و فسفر گیاه جو در شکل ۸ الف و ب نشان داده شده است. مقدار نیتروژن در تیمارهای دارای اکتینومایست بیشترین و اختلاف معنی داری را با تیمارهای CF و C نشان دادند. هر دو جدایه اکتینومایست S5A و S3C علاوه بر توانایی انحلال پتاسیم دارای توانایی بالای تثبیت نیتروژن هستند (جدول ۲). همچنین پژوهش ها نشان دادند که افزایش پتاسیم در خاک رشد گیاهان را تحریک می کند که شامل توانایی پتاسیم در افزایش فتوسنتز و بهبود تثبیت نیتروژن می باشد (Etesami and Adl, 2020; Damathia et al., 2025).

بیشترین مقدار فسفر گیاه در تیمار S3C مشاهده شد که با سایر تیمارها اختلاف معنی داری را نشان داد که با توجه به عدم توانایی جدایه S5A در انحلال فسفات (جدول ۲) قابل قبول می باشد. با این وجود مقدار فسفر در تیمار S5A نیز اختلاف افزایشی معنی داری را با تیمارهای CF و C نشان داد ($p < 0.01$) که می تواند ناشی از فراهم آوردن سایر شرایط مطلوب در خاک برای رشد گیاه توسط این جدایه باشد. مقدار فسفر گیاه در جدایه S3C و S5A نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۳/۴ و ۲/۵ برابر افزایش نشان داد. پژوهش ها تأیید

نموده‌اند که کاربرد باکتری‌های حل‌کننده فسفر می‌تواند تا دو برابر فسفر جذب شده توسط گیاه را به‌ویژه در خاک‌های آهکی با فسفر فراهم اندک افزایش دهند (Raymond et al., 2020).



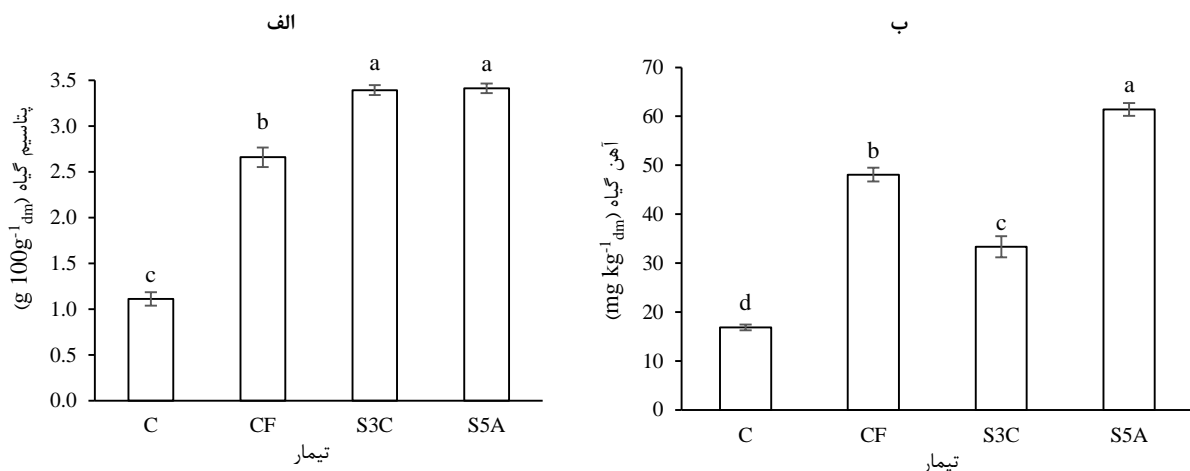
شکل ۵- پیامد تیمارهای مختلف بر نیتروژن و فسفر گیاه جو. C و CF به ترتیب تیمار شاهد منفی و کود شیمیایی می‌باشند. حروف مشابه بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت آماری معنی‌دار است و نوارها، انحراف استاندارد می‌باشند (n=3).

پتاسیم و آهن گیاه

پیامد تیمارهای مختلف بر پتاسیم و آهن گیاه جو در شکل ۹ الف و ب نشان داده شده است. مقدار پتاسیم گیاه در دو تیمار دارای اکتینومایست بیشترین مقدار بود و با تیمارهای C و CF اختلاف معنی‌داری را نشان دادند ($p < 0.01$). جذب پتاسیم توسط گیاه به سبب بهبود خاک محیط ریشه از نظر pH و در دسترس بودن کاتیون‌ها در تیمارهای جدایه‌های حل‌کننده پتاسیم افزایش می‌یابد (Ahemad and Kibret, 2013). به نظر می‌رسد با افزایش تنفس خاک، افزایش زیست توده میکروبی، کاهش pH خاک، ترشح اسیدهای آلی و افزایش فعالیت آنزیم‌های خاک (Khan et al., 2007)، شرایط مناسب‌تری برای جذب پتاسیم توسط گیاه فراهم شده است. همبستگی مثبت و معنی‌دار بین پتاسیم گیاه و تنفس میکروبی ($R^2 = 0.96, p < 0.01$) و کربن زیست توده میکروبی ($R^2 = 0.98, p < 0.01$) مشاهده شد. تولید پلیمرهای خارج سلولی مختلف (عمدتاً پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها) می‌تواند سبب آزادسازی پتاسیم از کانی‌های پتاسیم‌دار برای جذب توسط گیاه شود. همچنین تشکیل بیوفیلم روی آلومینوسیلیکات‌ها در خاک زمان ماندگاری آب را در مقایسه با زمان ماندگاری در سطح کانی لخت افزایش می‌دهد و هوازدگی کانی پتاسیم‌دار را تشدید می‌کند. علاوه بر این، تشکیل بیوفیلم روی سطح کانی، خوردگی شیل غنی از پتاسیم و آزادسازی پتاسیم، سیلیسیوم و آلومینیوم را در مدل تماس باکتری-کانی افزایش می‌دهد (Man et al., 2014).

بیشترین مقدار آهن گیاه در تیمار S5A مشاهده شد که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری را نشان داد ($p < 0.01$). بر اساس نتایج جدول ۲ (Noorizadeh et al., 2025)، جدایه S5A دارای توانایی تولید سیدروفور است که سبب افزایش قابلیت جذب آهن توسط گیاه می‌شود. Sharma و همکاران (۲۰۱۳) نیز تأثیر مثبت باکتری‌های محرک رشد گیاه که توانایی تولید سیدروفور را داشتند بر افزایش جذب آهن در گیاه برنج گزارش نمودند. مقدار جذب آهن توسط گیاه در تیمار S3C نیز علی‌رغم عدم توانایی در تولید سیدروفور نسبت به تیمار شاهد ۲ برابر افزایش نشان داد. این افزایش را می‌توان به تولید اسیدهای آلی توسط جدایه S3C نسبت داد که به طور مؤثر آهن را از ذخایر خاک کلات کرده و پویا می‌کنند. این اسیدها pH خاک را در ریزمحیط‌ها کاهش می‌دهند، انحلال آهن را تسهیل می‌کنند و در دسترس بودن آن را برای گیاه افزایش می‌دهند (Kavya et al., 2025). Prasad و همکاران (۲۰۱۰) نیز به نقش اسیدهای آلی میکروبی را در فراهمی آهن و افزایش مواد غذایی در خاک گزارش نمودند. علاوه بر این گزارش شده است که افزایش پتاسیم در خاک جذب آهن توسط گیاه را افزایش می‌دهد (Zhang et al., 2019).

نتایج کاشت گیاه حاکی از آن است که استفاده از کود شیمیایی سبب بهبود ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه جو شده است، اگرچه استفاده از جدایه‌های اکتینومایست نیز نتایج یکسانی را با کود شیمیایی نشان دادند، اما این جدایه‌ها در بهبود وضعیت عناصر غذایی در خاک نسبت به تیمار کود شیمیایی موثرتر بودند و به نظر می‌رسد اثر طولانی مدت تا پایان رشد گیاه داشته باشند و سبب بهبود عملکرد کمی و کیفی گیاه شوند.



شکل ۹- پیامد تیمارهای مختلف بر پتاسیم و آهن گیاه جو. C و CF به ترتیب تیمار شاهد منفی و کود شیمیایی می باشند. حروف مشابه بر روی ستون-ها بیانگر نبود تفاوت آماری معنی دار است و نوارها، انحراف استاندارد می باشند (n=3).

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که استفاده از جدایه های اکتینومیست S3C و S5A می توانند اثرات مثبت و معنی داری بر ویژگی های شیمیایی، زیستی خاک و فیزیولوژیک گیاه داشته باشند. اکتینومیست های حل کننده پتاسیم نه تنها قابلیت دسترسی به پتاسیم را برای گیاه افزایش دادند، بلکه جذب سایر عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از جمله نیتروژن، فسفر و آهن را نیز بهبود بخشیدند. از سوی دیگر، با تحریک تنفس میکروبی خاک و زیست توده میکروبی، بر کربن آلی خاک نیز اثر مثبت داشتند. این نتایج از پتانسیل جدایه های اکتینومیست به عنوان کودهای زیستی برای افزایش بهره‌وری محصول، کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از مصرف کودهای شیمیایی و ترویج شیوه های کشاورزی پایدار پشتیبانی می کند. اگرچه بررسی پتانسیل آنها در مزرعه برای تبدیل این یافته ها به توصیه های زراعی امری ضروری است.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی:

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه گیلان، دانشکده علوم کشاورزی در قالب پژوهانه پایان نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده ها، تجزیه و تحلیل آماری داده ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله مشارکت داشتند.

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: رضا طالبی: تهیه و آماده سازی نمونه ها، انجام آزمایش و گردآوری داده ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش نویس مقاله

نویسنده دوم: نسرين قربانزاده، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی سازی مقاله

نویسنده سوم: محمد باقر فرهنگی، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسنده چهارم: سینا نوری زاده، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

نویسندگان از ابزارهای هوش مصنوعی مولد و فناوری های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش مقاله استفاده ننموده اند.

بیانیه دسترسی به داده ها و سیاست اشتراک گذاری داده ها: داده های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی

است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

ناهیدان، صفورا؛ هاشمی، سیده شمسی و ظفری، دوستمراد (۱۳۹۸). ارزیابی توان تعدادی از گونه‌های تریکودرما در انحلال فسفات و آزادسازی پتاسیم در شرایط درون شیشه‌ای. *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۰(۵)، ۱۲۴۲-۱۲۳۱.

REFERENCES

- Adesemoye AO, Torbert HA, & Kloepper JW. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology*, 58(4): 921–929. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9531-y>.
- Adnan M, Fahad S, Saleem, MH, Ali B, Mussart, M, & Ullah R. (2022). Comparative efficacy of phosphorous supplements with phosphate solubilizing bacteria for optimizing wheat yield in calcareous soils. *Scientific Reports*, 12, 11997. doi: 10.1038/s41598-022-16035-3.
- Adnan M, Shah Z, Fahad S, Arif M, Alam M, Khan IA, Mian IA, Basir, A, Ullah H, & Arshad M. (2017). Phosphate-solubilizing bacteria nullify the antagonistic effect of soil calcification on bioavailability of phosphorus in alkaline soils. *Scientific Reports*, 7: 16131. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16537-5>.
- Ahemad M, & Kibret M. (2013). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University*, 26(1). DOI: 10.1016/j.jksus.2013.05.001.
- Ali A, Karim H, Julhijjah R, Wahyuni S, Anita Sari F, Rante H, Hala Y, & Jumadi O. (2023). Plant growth-promotion and Fusarium biocontrol by culturable indigenous actinomycetes isolated from Indonesian onion cultivar. Available at SSRN 4376013. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4376013>.
- Anderson TH, & Domsch KH. (1993). The metabolic quotient from CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(3): 393-395. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7).
- Babar S, Baloch A, Qasim M, Wang J, Wang X, Li Y, Khalid S, & Jiang C. (2024). Unearthing the soil-bacteria nexus to enhance potassium bioavailability for global sustainable agriculture: A mechanistic preview. *Microbiological Research*, 288: 127885. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127885>.
- Bahadur I, Maurya R, Roy P, & Kumar A. (2019). Potassium-solubilizing bacteria (KSB): a microbial tool for K-solubility, cycling, and availability to plants. *Plant Growth Promot. Rhizobact. Agric. Sustain. Theory and Practice*, 257–265. doi: 10.1007/978-981-13-7553-8_13.
- Boubekri K, Soumare A, Mardad I, Lyamlouli K, Hafidi M, Ouhdouch Y, & Kouisni L. (2021). The screening of potassium- and phosphate-solubilizing actinobacteria and the assessment of their ability to promote wheat growth parameters. *Microorganisms*, 9: 470. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9030470>.
- Chen M, & Ma, LQ. (2001). Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty Florida soils. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2): 491-499.
- Damathia B, Pathania D, Jha A, Sable H, Singh P, Singh V, Rustagi S, & Chaudhary V. (2025). Emergence of potassium solubilizing microbes-assisted crop processing for sustainable food production and microbial complexities. *Food and Bioproducts Processing*, 135: 521-535. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652491x>.
- El-Egami HM, Hegab RH, Montaser H, El-Hawary MM, & Hasanuzzaman M. (2024). Impact of potassium-solubilizing microorganisms with potassium sources on the growth, physiology, and productivity of wheat crop under salt-affected soil conditions. *Agronomy*, 14: 423. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030423>.
- Estefan, G. (2013). *Methods of soil, plant, and water analysis: a manual for the West Asia and North Africa region*.
- Etesami H, & Adl SM. (2020). Can interaction between silicon and non-rhizobial bacteria help in improving nodulation and nitrogen fixation in salinity-stressed legumes? A review. *Rhizosphere*, 15, 100229. <https://doi.org/10.1016/J.RHISPH.2020.100229>.
- Etesami H, Emami S, & Ali Alikhani H. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects - a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17 (4): 897-911. Doi. 10.4067/S0718-95162017000400005.
- FAO. *The State of Agricultural Commodity Markets—2018. Agricultural Trade, Climate Change and Food Security*; FAO: Rome, Italy, 2018; ISBN 978-92-5-130565-2.
- Ghimirey V, Chaurasia J, Acharya N, Dhungana R, & Chaurasiya S. (2024). Biofertilizers: A sustainable strategy for

- enhancing physical, chemical, and biological properties of soil. *Innovations in Agriculture*, 7: 1–11. doi: 10.3897/ia.2024.128697.
- Ghimirey V, Chaurasia J, Acharya N, Dhungana R, & Chaurasiya S. (2024). Biofertilizers: A sustainable strategy for enhancing physical, chemical, and biological properties of soil. *Innovations in Agriculture*, 7: 1–11. doi: 10.3897/ia.2024.128697.
- Gong Y, Bai JL, Yang HT, Zhang WD, Xiong YW, Ding P, & Qin S. (2018). Phylogenetic diversity and investigation of plant growth-promoting traits of actinobacteria in coastal salt marsh plant rhizospheres from Jiangsu. China. *Systematic and Applied Microbiology*, 41: 516–527. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2018.06.003>.
- Gupta Pk. (1999). Soil, plant, water and fertilizer analysis. Published by Agrobios (INDIA).
- Havlin JL, Tisdale, SL, Nelson WL, & Beaton JD. (2014). Soil Fertility and Fertilizers.
- Heydari L, Bayat H, & Hamzei J. (2020). Short-term effects of bio-fertilizers application on some soil physical and chemical properties. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(1): 71–89. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.16986.3238>.
- Jenkinson DS, & Ladd JN. (1981). Microbial biomass in soil: measurement and turnover. in: Paul, E. A. and Ladd, J. N. (ed.) *Soil biochemistry: Volume 5* New York Marcel Dekker, Inc. pp. 415–471.
- Kavya V, Jayaprakash R, & Shankar M. (2025). Effect of potassium solubilizing bacteria and foliar application of potassium on soil nutrient status and soil biological properties in paddy (*Oryza sativa*) in coastal acid soils of Karnataka. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(1): 403–408.
- Khan MS, Zaidi A, & Wani PA. (2007). Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture—A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 27: 29–43. <https://doi.org/10.1051/agro:2006011>.
- Khosro M, & Yousef S. (2012). Bacterial biofertilizers for sustainable crop production: A Review. *Journal of Agriculture and Biological Sciences*. 7: 307–316.
- Kuo SM, & Morgan DR. (1996). Active noise control systems (Vol. 4). Wiley, New York
- Lindsay WL, & Norvell WA. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42: 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
- Loeppert RH, & Suarez DL. 1996. Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*. 5: 437–474.
- Maciel-Rodriguez M, Moreno-Valencia FD, & Plascencia-Espinosa M. (2025). The role of plant growth-promoting bacteria in soil restoration: A strategy to promote agricultural sustainability. *Microorganisms*, 13: 1799. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13081799>
- Man LY, Cao XY, & Sun DS. (2014). Effect of potassium-solubilizing bacteria-mineral contact mode on decomposition behavior of potassium-rich shale. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 24: 48–52.
- McLean EO, & Watson ME. (1985). Soil measurements of plant-available potassium. In *Potassium in Agriculture*. 277–308.
- Meena KK, Kumar M, Kalyuzhnaya MG, Yandigeri MS, Singh DP, & Saxena AK. (2012). Epiphytic pink-pigmented methylotrophic bacteria enhance germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum*) by producing phytohormone. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 101:777–786. <https://doi.org/10.1007/s10482-011-9692-9>.
- Meena RK, Singh RK, Singh NP, Meena SK, & Meena V.S. (2015). Isolation of low temperature surviving plant growth—promoting rhizobacteria (PGPR) from Pea (*Pisum sativum* L.) and documentation of their plant growth promoting traits. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 4: 806–811. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2015.08.006>.
- Meena VS, Bahadur I, Maurya BR, Kumar A, Meena RK, & Meena SK. (2016). Potassium-solubilizing microorganism in evergreen agriculture: an overview. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 1–20. doi: 10.1007/978-81-322-2776-2.
- Nahidan S, Hashemi S, & Zafari D. (2019). Evaluation of Phosphate Solubilizing and Potassium Releasing Ability of Some Trichoderma Species under in-vitro Conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(5): 1231–1242. [10.22059/ijswr.2019.269564.668057](https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.269564.668057). (In Persian).
- Nawaz A, Qamar ZU, Marghoob MU, Imtiaz M, Imran A, & Mubeen F. (2023). Contribution of potassium solubilizing bacteria in improved potassium assimilation and cytosolic K⁺/Na⁺ ratio in rice (*Oryza sativa* L.) under saline-sodic conditions. *Frontiers in Microbiology*, 14:1196024. doi: 10.3389/fmicb.2023.1196024.
- Noorizadeh S, Golmaohamadi M, Farhangi MB, Banihashemian SN, Mahdavi V, Atighi MR, & Unc A. (2025). Antibacterial properties and plant growth-promoting effect of actinobacteria obtained from citrus orchards in Iran. *Journal of Plant Pathology*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s42161-025-02043-5>.
- Olaniyan FT, Alori ET, Adekiya, AO, Ayorinde BB, Daramola FY, & Osemwegie OO. (2022). The use of soil microbial potassium solubilizers in potassium nutrient availability in soil and its dynamics. *Annual Microbiology*, 72, 45. doi: 10.1186/s13213-022-01701-8.
- Olsen SR. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.
- Page AL, Miller RH, & Keeney DR. (1982). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1159.
- Prasad J, Karmakar S, Kumar R, & Mishra B. (2010). Influence of integrated nutrient management on yield and soil properties in maize-wheat cropping system in an Alfisol of Jharkhand. *Journal of the Indian Society of Soil Science*,

58(2): 200-204.

- Ramalakshmi K, Kubra IR, & Rao LJM. (2008). Antioxidant potential of low-grade coffee beans. *Food Research International*, 41(1): 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.10.003>.
- Rawat P, Das S, Shankhdhar D, & Shankhdhar SC. (2021). Phosphate-solubilizing microorganisms: Mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21: 49–68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>.
- Raymond NS, Gómez-Muñoz B, van der Bom FJT, Nybroe O, Jensen LS, Müller-Stöver DS, Oberson A, & Richardson AE. (2020). Phosphate-solubilising microorganisms for improved crop productivity: a critical assessment. *New Phytologist*, 229(3). 1268-1277. <https://doi.org/10.1111/nph.16924>.
- Rowell DI. (1994). Soil science method and application, longmangrop, Limitation Score. *Computers and Geosciences*, 33, 1316-1326.
- Saha M, Sarkar S, Sarkar B, Sharma BK, Bhattacharjee S, & Tribedi, P. (2016). Microbial siderophores and their potential applications: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 23: 3984–3999. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4294-0>.
- Saharan BS, & Nehra V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: A critical review. *Life Sciences and Medicine Research*, 21: 1–30.
- Saiyad SA, Jhala YK, & Vyas RV. (2015). Comparative efficiency of five potash and phosphate solubilizing bacteria and their key enzymes useful for enhancing and improvement of soil fertility. *International Journal of Scientific Research*, 5: 1-6.
- Schikora A, & Schmidt W. (2001). Iron stress-induced changes in root epidermal cell fate are regulated independently from physiological responses to low iron availability. *Plant Physiology*, 125: 1679–1687. doi: 10.1104/pp.125.4.1679.
- Sharma A, Shankhdhar D, & Shankhdhar SC. (2013). Enhancing grain iron content of rice by the application of plant growth promoting rhizobacteria. *Plant, Soil and Environment*, 59(2):89. DOI: 10.17221/683/2012-PSE.
- Sharma P, Kumawat KC, & Kaur S. (2016). Plant Growth Promoting Rhizobacteria in Nutrient Enrichment: Current Perspectives. In: Singh, U., Praharaj, C., Singh, S., Singh, N. (eds) *Biofortification of Food Crops*. Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8_20.
- Sharma R, Sindhu SS, & Glick, BR. (2024). Potassium solubilizing microorganisms as potential biofertilizer: A sustainable climate resilient approach to improve soil fertility and crop production in agriculture. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43:2503–2535. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11297-9>.
- Silva GC, Kitano IT, Ribeiro IAF, & Lacava PT. (2022). The Potential Use of Actinomycetes as Microbial Inoculants and Biopesticides in Agriculture. *Frontiers in Soil Science*, 2:833181. doi: 10.3389/foisl.2022.833181.
- Soumare, A., Boubekri, K., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. 2020. Efficacy of phosphate solubilizing Actinobacteria to improve rock phosphate agronomic effectiveness and plant growth promotion. *Rhizosphere*. 17: 100284.
- Soumare A, Djibril SA, & Diédhiou AG. (2022). Potassium sources, microorganisms, and plant nutrition—challenges and future research directions: a review. *Pedosphere*, 33, 105–115. doi: 10.1016/j.pedsph.2022.06.025.
- Spaepen S, Vanderleyden J, & Remans R. (2007). Indole-3-acetic acid in microbial and microorganism–plant signaling. *FEMS Microbiology Reviews*, 31(4): 425–448. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2007.00072.x>.
- Sugumaran P, & Janarthana B. (2007). Solubilization of Potassium containing minerals by bacteria and their effect of plant growth. *World Journal of Agricultural Sciences*, 3(3). 350-355. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2017.09.011>.
- Sun F, Ou Q, Wang N, Guo Z, Ou Y, Li N, & Peng C. (2020). Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from Mikania micrantha rhizospheric soil and their effect on M. micrantha plants. *Global Ecology and Conservation*, 23 (e01141). <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01141>.
- Tahat MM, Alananbeh KM, Othman YA, & Leskovar D.I. (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, 12: 4859. doi:10.3390/su12124859.
- Walkley A, & Black IA. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1): 29–38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
- Xiong W, Guo S, Jousset A, Zhao Q, Wu H, Li R, George A, & Shen, Q. (2017). Bio-fertilizer application induces soil suppressiveness against Fusarium wilt disease by reshaping the soil microbiome. *Soil Biology and Biochemistry*, 114: 238-247. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.07.016>Get rights and content.
- Yadav N, & Yadav AN. (2019). Actinobacteria for sustainable agriculture. *Journal of Applied Biotechnology and Bioengineering*, 6: 48–51.
- Zhang Y, Liang Y, Zhao X, Jin X, Hou L, Shi Y, & Ahammed, GJ. (2019). Silicon compensates phosphorus deficit-induced growth inhibition by improving photosynthetic capacity, antioxidant potential, and nutrient homeostasis in tomato. *Agronomy*, 9: 733. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY9110733>.
- Zhao Y, Liang H, Zhang J, Chen Y, Dhital YP, Zhao T, & Wang Z. (2024). Isolation and characterization of potassium-solubilizing rhizobacteria (KSR) promoting cotton growth in saline-sodic regions. *Microorganisms*, 12, 1474. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12071474>.