



Investigation of actinomycetes inoculation on phosphorus dissolution and the effect of two selected isolates on the growth and nutritional indices of barley plant

Sana Emady¹ | Nasrin Ghorbanzadeh² | Mohammad Bagher Farhangi³ | Sina Noorizadeh⁴

1. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, 41635-1314, Iran. E-mail:

sanaemady2@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, 41635-1314, Iran. E-mail: nghorbanzadeh@guilan.ac.ir

3. Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Guilan, Rasht, 41635-1314, 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: Oct. 13, 2025

Revised: Nov. 27, 2025

Accepted: Dec. 13, 2025

Published online: Jan. 2026

Keywords:

Actinomycetes,
Biofertilizer,
Plant growth-promoting
rhizobacteria,
Phosphate solubilizer,
Sustainable agriculture

ABSTRACT

This study was conducted in two parts to investigate the ability of actinomycete strains to enhance phosphorus (P) solubility, improve soil properties, and promote barley growth. In the first part, a factorial experiment with a completely randomized design with three replications was carried out using 29 actinomycete strains and three types of culture media, GA, NBRIP, and SMM, to evaluate the effectiveness of these strains in dissolving P and altering the pH of the culture media. In the second part, barley was cultivated in a completely randomized block design under four treatments: control (C), chemical fertilizer (CF), and two actinomycete strains, S4A and S4F, with three replications. After 40 days of cultivating and harvesting barley, some soil characteristics, growth traits, and the nutritional status of the plant were evaluated. The GA medium, compared to the other two cultures, exhibited the highest average pH at 6.14, along with the highest P solubility at 172.4 mg L⁻¹. The highest soil P was found in the S4A. Additionally, there were significant increases in mineral nitrogen and available potassium in both the S4A and S4F. Stem length, root length, and shoot dry weight did not show a significant difference in the CF with two actinomycete strains. The P and iron contents in the plants in S4A and S4F showed a significant increase compared to C and CF. Using actinomycete strains as biofertilizers can enhance soil stability and fertility. Therefore, it is recommended to apply biofertilizers in conjunction with chemical fertilizers to support sustainable agriculture and environmental protection.

Cite this article: Emady, S., Ghorbanzadeh, N., Farhangi, M. B., Noorizadeh, S., (2026) Investigation of actinomycetes inoculation on phosphorus dissolution and the effect of two selected isolates on the growth and nutritional indices of barley plant, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (11),3107-3128. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.404231.670026>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.404231.670026>



EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives

Phosphorus (P) is an essential nutrient for plant growth and development. A P deficiency not only reduces plant yields but also decreases the efficiency of agricultural inputs and soil fertility. Many soils in Iran have limited P availability, leading to the excessive use of chemical fertilizers. In this context, phosphorus-solubilizing microorganisms (PSMs) offer a sustainable alternative to chemical fertilizers. Actinomycetes, in particular, play a critical role in dissolving insoluble phosphorus and enhancing nutrient absorption. This is due to their unique ability to produce secondary metabolites, hydrolytic enzymes, and organic acids. This study was conducted in two sections to investigate the ability of actinomycete strains to increase phosphorus solubility, improve soil properties, and enhance barley plant growth.

Methodology

Firstly, a factorial experiment was designed using a completely randomized design that included 29 actinomycete strains and three types of culture media (GA, NBRIP, and SMM) in triplicate. The study evaluated the ability of the strains to dissolve P and alter the pH of the culture media. Based on this analysis, the two best strains, S4A and S4F, were selected. In the second stage of the experiment, a completely randomized block design was implemented, consisting of four treatments: control (C), chemical fertilizer (CF), and two strains (S4A and S4F). Each treatment was replicated three times and applied to barley plants. After 40 days of barley cultivation and harvesting, the soil's chemical and biological properties, along with the plant growth index and morphological traits, were assessed. Additionally, to evaluate the plant's nutritional status, the concentrations of nitrogen, phosphorus, potassium, and iron in the plant shoot were measured.

Results

The results demonstrated that the effects of the culture medium, actinomycete strain, and their interaction on soluble P levels and pH were significant ($p \leq 0.01$). The pH values ranged from 4.44 to 5.81. Notably, the GA medium had the highest average pH at 6.14, which also corresponded to the highest P solubility at 172.4 mg L⁻¹, significantly different from the NBRIP and SMM media. Among the actinomycete strains, the highest P solubility was found in strain S16 at 198.16 mg L⁻¹, while the lowest was observed in strain S12A at 76.7 mg L⁻¹. Results of plant cultivation experiments indicated a significant effect of treatments on soil pH, available P, inorganic nitrogen, and organic carbon. The highest concentration of available P in the soil (29.7 mg kg⁻¹) was recorded in the S4A treatment. Additionally, both inorganic nitrogen and available potassium levels increased significantly in the S4A and S4F treatments. The S4F treatment also exhibited the highest soil available iron content at 3.7 mg kg⁻¹, which was not a significant difference from that in the S4A treatment. In terms of plant growth, measurements of stem length, root length, and shoot dry weight showed no significant differences between the C and the two actinomycete strains ($P > 0.05$). However, the levels of P and iron in plants treated with S4A and S4F were significantly higher than those in the C and CF treatments. There were no significant differences in plant potassium levels between the two types of strains and the CF treatments.

Conclusion

The results showed that using the actinomycete strains S4A and S4F as biofertilizers has a positive and significant impact on both the chemical and biological properties of the soil, as well as on the physiological characteristics of plants. Consequently, utilizing these actinomycete strains as biofertilizers can reduce the reliance on chemical fertilizers while simultaneously enhancing soil sustainability and fertility. Therefore, it is recommended to combine biological methods with chemical fertilizers to promote sustainable agriculture and protect the environment.

Author Contributions

For this research article, the individual contributions are as follows: “Conceptualization, [Author A and C]; methodology, [Author D]; software, [Author C]; validation, [Author B]; formal analysis, [Author A]; investigation, resources, data curation, writing—original draft preparation, [Author A] writing—review and editing, visualization, supervision, project administration, funding acquisition [Author A and B]. 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 reported. Data Availability Statement. The data that support the findings of this study are available.

Data Availability Statement

The data that support the findings of this study are available.

For further inquiries regarding the data, please contact author's email.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

بررسی انحلال فسفر توسط اکتینومایست‌ها و تاثیر دو جدایه منتخب بر شاخص‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه جو

سنا عمادی^۱ | نسرين قربانزاده^۲ | محمد باقر فرهنگي^۳ | سينا نوري زاده

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: sanaemady2@gmail.com

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

nghorbanzadeh@guilan.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: m.farhangi@guilan.ac.ir

۴. سازمان کشاورزی استان گیلان، مدیریت و حفاظت گیاهان، رشت، ایران. رایانامه: Sina2716@live.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۲۱	این پژوهش با هدف بررسی توانایی سویه‌های اکتینومایست در افزایش حلالیت فسفر و بهبود ویژگی‌های خاک و رشد گیاه جو در دو بخش انجام شد. در بخش اول، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۲۹ سویه اکتینومایست و سه محیط کشت GA، SMM و NBRIP در سه تکرار طراحی و توانایی سویه‌ها در انحلال فسفر و تغییر pH محیط کشت‌ها ارزیابی شد. در بخش دوم، کشت گیاه جو با چهار تیمار (شاهد (C)، کود شیمیایی (CF) و دو سویه S4A و S4F و سه تکرار در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی اجرا شد. پس از ۴۰ روز از کشت گیاه جو و برداشت آن، برخی ویژگی‌های خاک و صفات رشدی و وضعیت تغذیه‌ای گیاه مورد ارزیابی قرار گرفت. در محیط GA نسبت به دو محیط کشت دیگر، بیشترین میانگین pH (14/6) در عین حال بیشترین انحلال فسفر (۱۷۲/۴ میلی گرم بر لیتر) مشاهده شد. بیشترین مقدار فسفر خاک (۲۹/۷ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار S4A مشاهده شد و نیتروژن معدنی و پتاسیم قابل جذب خاک نیز در تیمارهای S4A و S4F به طور معنی‌داری افزایش یافتند. طول ساقه، طول ریشه و وزن خشک اندام هوایی در تیمارهای CF و دو سویه اکتینومایست اختلاف معنی‌داری نشان ندادند ($P>0.05$). مقدار فسفر و آهن گیاه در تیمارهای S4A و S4F اختلاف افزایشی معنی‌داری را با تیمارهای C و CF نشان دادند ($p<0.01$). بنابراین استفاده از سویه‌های اکتینومایست به عنوان کود زیستی می‌تواند به افزایش پایداری و حاصلخیزی خاک کمک کند و توصیه می‌شود در راستای کشاورزی پایدار و حفظ محیط‌زیست، از کودهای زیستی همراه با کودهای شیمیایی استفاده شود.
واژه‌های کلیدی: اکتینومایست، ریزوباکتری‌های ارتقا دهنده رشد گیاه، حل کننده فسفات، کود زیستی، کشاورزی پایدار	

استناد: عمادی؛ سنا، قربانزاده؛ نسرين، فرهنگي؛ محمدباقر، نوري زاده؛ سينا، (۱۴۰۴) بررسی انحلال فسفر توسط اکتینومایست‌ها و تاثیر دو جدایه منتخب بر شاخص‌های رشدی و تغذیه‌ای گیاه جو، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۱)، ۳۱۰۷-۲۱۲۸.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.404231.670026>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.404231.670026>

مقدمه

رشد جهانی جمعیت، همراه با افزایش تقاضا برای غذا و کمبود منابع آب، نیاز به پیشرفت در کشاورزی نوین را شدت بخشیده است (Park et al., 2025). کشاورزی پایدار به عنوان راهکاری برای پاسخ به چالش‌های زیست‌محیطی و امنیت غذایی، بر بهره‌برداری هوشمندانه از منابع طبیعی، کاهش ضایعات، و افزایش بهره‌وری تولید تأکید دارد (Qin et al., 2025). از مزایای کشاورزی پایدار حفاظت از منابع طبیعی است که به طور ویژه بر مدیریت بهینه منابع طبیعی مانند آب، خاک و انرژی تأکید دارد. استفاده درست از این منابع به عنوان بخشی از کشاورزی پایدار سبب جلوگیری از تخریب خاک و کمبود منابع آب می‌شود، که در کشاورزی سنتی با مصرف بی‌رویه آب و کودهای شیمیایی بیشتر مشاهده می‌شود (Chowdhuri & Pal, 2025). از دیگر مزایای مهم کشاورزی پایدار، کاهش آلودگی زیست‌محیطی است. کشاورزی پایدار با جایگزینی ورودی‌های شیمیایی با زیستی، آلودگی منابع آب و خاک را به طور چشم‌گیری کاهش می‌دهد (Qin et al., 2025) و علاوه بر پایداری زیست‌محیطی، به توزیع عادلانه منابع، معیشت پایدار کشاورزان و تقویت جوامع محلی نیز اثر گذار است (Robertson, 2015). کشاورزی نوین به طور گسترده‌ای به کودهای شیمیایی وابسته است. این کودها با وجود آن‌که ابزاری حیاتی برای تأمین امنیت غذایی جهانی، افزایش بهره‌وری محصول و حاصل‌خیزی خاک محسوب می‌شوند، تهدیدی اجتناب‌ناپذیر برای کشاورزی نیز به‌شمار می‌روند و در انواع مختلفی همچون کودهای نیتروژن‌دار، فسفردار و پتاسیم‌دار به کار می‌روند (Pahalvi et al., 2021). در این میان، فسفر (P) برای رشد گیاه و سلامت زیست‌بوم ضروری است، اما دسترسی آن در خاک‌های کشاورزی اغلب به دلیل منابع طبیعی محدود و بازایی ناکارآمد کودهای شیمیایی کاهش می‌یابد. دو چالش اصلی در رابطه با فسفر، کمبود آن و از طرفی مشکلات زیست‌محیطی ناشی از استفاده بیش از حد آن، مانند یوتروفیکاسیون (اغنی‌شدن بیش از حد مواد غذایی در آب‌ها) است. باوجود مصرف گسترده کودهای فسفره، بسیاری از محصولات زراعی همچنان با کمبود فسفر مواجه‌اند که این موضوع ناشی از ناکارآمدی در روش‌های مدیریت فعلی است (Jahan, et al 2025). کشاورزی متداول به سنگ فسفات غیر قابل تجدید به عنوان منبع فسفر وابسته است. افزایش تقاضا برای غذا منجر به افزایش مصرف فسفر شده که تأثیر منفی بر تنوع زیستی آب‌های شیرین و امنیت غذایی دارد. واردات کودهای فسفری، بسیاری از نظام‌های غذایی را در برابر ریسک‌های تأمین فسفر آسیب‌پذیر می‌سازد. بی‌ثباتی ژئوپلیتیکی ناشی از همه‌گیری و همچنین جنگ روسیه و اوکراین که منجر به افزایش ۴۰۰ درصدی قیمت کود فسفر در بازارهای جهانی شده، فرصتی برای جامعه جهانی و نهادها فراهم کرده تا چالش جهانی فسفر را پذیرفته و به سوی نظامی چرخشی‌تر حرکت کنند (Colombo et al., 2024). مقدار فسفر موجود در لایه سطحی خاک معمولاً بین ۵۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است، اما تنها حدود ۰/۱ درصد از کل فسفر برای جذب توسط گیاهان در دسترس است (Zhu et al., 2019). استفاده از کودهای شیمیایی کشاورزی برای تأمین نیاز فسفر و افزایش عملکرد محصولات زراعی سبب تخریب زیست‌بوم، کاهش سلامت خاک و برهم‌خوردن تعادل میکروبی خاک شده است. در نتیجه، نیاز به یک راه‌کار جایگزین، مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست برای تأمین فسفر ضروری است. یکی از این راه‌کارها، استفاده از ریز جانداران حل‌کننده فسفات (PSMs) است که می‌توانند فسفات‌های نامحلول را از طریق مکانیسم‌هایی نظیر ترشح اسیدهای آلی، تولید آنزیم‌ها، و ترشح سیدروفورها (مولکول‌های گیرنده فلزها) حل کنند. این ترکیب‌ها می‌توانند یون‌های فلزی را کلاته کرده و کمپلکس تشکیل دهند تا فسفات‌ها برای جذب گیاه در دسترس قرار گیرند (Rawat et al., 2021). از آن‌جا که ریز جانداران حل‌کننده فسفات (باکتری‌ها، قارچ‌ها و اکتینومایست‌ها) در محیط‌های بومی اسیدهای آلی مانند اسید اگزالیک، اسید گلوکونیک، اسید سوکسینیک و اسید سیتریک را بسته به منبع کربن موجود تولید می‌کنند (Rajpu et al, 2013)، می‌توان از آن‌ها به عنوان بهترین محرک حل‌کننده فسفات در شرایط درجا و خارج از محل استفاده کرد. استفاده از ریز جانداران حل‌کننده فسفات (PSM) به عنوان ماده تلقیحی، هنگامی که به تعداد مناسب به خاک افزوده می‌شوند، سبب افزایش جذب فسفر می‌شود. ریز جانداران متعدد با مکانیسم‌های مختلفی می‌توانند به انحلال فسفر نامحلول در خاک کمک کنند و تغذیه گیاه را بهبود دهند (Prabhu et al., 2019). در این میان اکتینومایست‌های حل‌کننده فسفات نیز دارای تنوع، تطبیق‌پذیری و سازگاری با شرایط سخت، پتانسیل تولید متابولیت بالا و مناسب بودن برای تولید کود زیستی فسفره هستند و به شکل ترکیب‌های تجاری در بازار موجود می‌باشند (Bouizgarne, 2022). اکتینومایست‌های هوازی ریز جانداران ساکن خاک هستند که در سراسر جهان وجود دارند. اکتینومایست‌ها باکتری‌های گرم-مثبت هوازی و اسپورساز هستند که متعلق به راسته اکتینومایستال‌ها هستند که با رشد میسلیم هوایی مشخص می‌شوند.

1 Eutrophication

2 Phosphate solubilizing microorganisms

3 Actinomycetales



آنها فراوانترین موجوداتی هستند که رشته‌های نخمانندی را در خاک تشکیل می‌دهند و نقش عمده‌ای در چرخه مواد آلی ایفا می‌کنند (Tolin et al., 2010). اکتینومایست‌ها می‌توانند نقش مهمی در تأمین فسفر خاک ایفا کنند. آن‌ها با تولید آنزیم‌های فسفاتاز (قلیایی و اسیدی) می‌توانند فسفات‌های آلی را به فرم‌های قابل جذب برای گیاهان تبدیل کنند. این فرآیند سبب افزایش فراهمی فسفر در خاک می‌شود، به ویژه در خاک‌هایی که فسفر به صورت نامحلول یا کم‌دسترس موجود است. اکتینومایست‌ها همچنین با تولید اسیدهای آلی مانند اسید گلوکونیک و اسید سیتریک، شرایطی را ایجاد می‌کنند که فسفر از منابع مختلف خاک آزاد شود. این ویژگی‌ها سبب می‌شود که اکتینومایست‌ها به عنوان ابزاری طبیعی برای بهبود تغذیه فسفر گیاهان و افزایش بهره‌وری خاک در کشاورزی پایدار مؤثر باشند (Tan et al., 2025). در پژوهشی به بررسی تنوع و توانایی اکتینومایست‌های حل‌کننده فسفات از خاک ریزوسفری گیاه لوبیا پرداخته و گزارش شد که از مجموع، ده سویه اکتینومایست جدا شده، تعداد سه سویه فعالیت انحلال فسفات قابل توجهی را نشان دادند. این سویه‌ها علاوه بر انحلال فسفر، قابلیت تولید ترکیب‌های محرک رشد گیاه مانند ایندول استیک اسید، سیدروفور و آنزیم ACC-دآمیناز را نیز دارا می‌باشند که می‌توانند نقش مهمی در تحریک رشد گیاه و مقاومت آن در برابر تنش‌ها ایفا نمایند (Bousselham et al., 2022). اثر اسید هیومیک و مایه‌زنی جدایه‌های اکتینومایست بر حلالیت فسفر در شرایط آزمایشگاهی و محتوای فسفر گیاه ذرت (*Zea mays L.*) با هدف بررسی تأثیر اکتینومایست‌ها و اسید هیومیک بر فراهمی فسفر برای گیاه ذرت بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن اسید هیومیک به محیط کشت، به طور قابل توجهی مقدار انحلال تری کلسیم فسفات و آزادسازی فسفر را در جدایه‌های منتخب افزایش داد و همچنین مایه‌زنی با جدایه *Streptomyces* غربال‌گری شده و کاربرد ترکیبی آن با اسید هیومیک، می‌تواند به طور مؤثری کارایی مصرف کود فسفر را بهبود بخشیده و فراهمی آن را برای گیاه ذرت افزایش دهد (خلیلی و همکاران، ۱۴۰۲). در پژوهشی نیز که به بررسی و شناسایی اکتینومایست‌های حل‌کننده فسفات از ریزوسفر گیاه ذرت پرداخت، مشخص شد که برخی ایزوله‌های اکتینومایست استخراج شده از خاک ریزوسفری ذرت، توانایی حل کردن فسفات نامحلول را دارند و می‌توانند به عنوان کود زیستی برای افزایش فسفر قابل جذب در خاک استفاده شوند (Lamuka et al., 2025). علی‌رغم پژوهش‌های بسیار متنوعی که در زمینه ریزجانداران حل‌کننده فسفات انجام شده است، اما بیشتر آنها بر باکتری‌های رایج ریزوسفری مانند *Sodomonas* و *Basilus* یا گونه‌های محدود اکتینومایست‌ها متمرکز بوده‌اند و عمدتاً سویه‌ها از گیاه میزبان مشابه با گیاه آزمایشی جداسازی شده‌اند. بنابراین به کارگیری اکتینومایست‌های ریزوسفری مرکبات که تاکنون کمتر در پژوهش‌های مرتبط با گیاهان زراعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، می‌تواند نتایج مفیدی را در رابطه با دامنه کاربرد کودهای زیستی مبتنی بر اکتینومایست‌ها ارائه دهد. بنابراین با توجه به این که فسفر عنصر غذایی اصلی مورد نیاز برای همه محصولات کشاورزی است، این پژوهش با این فرضیه‌ها که اکتینومایست‌ها با ترشح اسیدهای آلی و معدنی فسفر نامحلول را به شکل قابل جذب در محیط محلول تبدیل می‌کنند و همچنین رهاسازی فسفر توسط اکتینومایست‌ها در خاک نیز بر برخی ویژگی‌های خاک و رشد گیاه تأثیرگذار است، انجام شد. به این منظور فسفر آزاد شده توسط سویه‌های اکتینومایست جدا شده از باغ مرکبات در محیط محلول و همچنین تأثیر سویه‌های کارآمد بر ویژگی‌های خاک و رشد گیاه جو در شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان در آینده از آن‌ها به عنوان یک رویکرد مکمل و یا جایگزین قابل اعتماد کودهای شیمیایی برای سیستم‌های کشت گیاهان استفاده کرد.

مواد و روش

بازکشت اکتینومایست‌ها و بررسی توانایی انحلال فسفر

به منظور بررسی اثر مایه‌زنی سویه‌های اکتینومایست موجود در آزمایشگاه بیولوژی خاک دانشکده علوم کشاورزی بر حلالیت فسفر و تأثیر آن‌ها بر تغییر pH در محیط‌های کشت مختلف، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با فاکتورهای سویه اکتینومایست (۲۹ سویه) و محیط کشت (سه محیط کشت GA، NBRIP و SMM) در سه تکرار انجام شد. اکتینومایست‌ها از پژوهشکده مرکبات و میوه‌های نیمه گرمسیری 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. سویه‌های اکتینومایست در محیط کشت ISP2 (گرم بر لیتر: ۱۰ گرم عصاره مالت، ۴ گرم عصاره مخمر، ۴ گرم گلوکز، ۱۵ گرم آگار) و ISP7 (گرم بر لیتر: ۱۵ میلی‌لیتر گلیسرول، ۰/۵ گرم آل تیروزین، ۱ گرم آل آسپارژین، ۰/۵ گرم دی‌پتاسیم هیدروژن فسفات، ۰/۵ گرم کلرید سدیم، ۰/۵ گرم سولفات منیزیم، ۲۰ گرم آگار) بازکشت و از محیط کشت (سانتریفیوژ در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه) جداسازی شدند.

به منظور بررسی توانایی انحلال فسفر، سویه‌های اکتینومایست به سه محیط کشت GA، NBRIP و SMM به مقدار دو درصد

حجمی ($\sim 10^8$ سلول بر میلی‌لیتر) مایه‌زنی شدند. ارلن‌ها به مدت ۷ روز در شیکر انکوباتور در دمای ۲۵ تا ۲۸ درجه سلسیوس با سرعت ۱۲۰ دور بر دقیقه انکوباسیون شدند. در پایان ۷ روز، مقدار دو میلی‌لیتر از سوسپانسیون اکتینومایست برداشت و به مدت ۱۰ دقیقه در ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. سپس یک میلی‌لیتر از محلول رویی با یک میلی‌لیتر معرف آمونیوم مولیبدات و سه میلی‌لیتر آب مقطر دی‌یونیزه مخلوط و غلظت فسفر محلول در طول موج ۸۸۰ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر خوانده شد (Yu et al., 2013). مقدار pH نیز در سوسپانسیون اکتینومایست با استفاده از دستگاه pH متر مدل (A420 ORION) قرائت شد. اجزای محیط‌های غربال‌گری انحلال فسفر شامل: GA (گرم بر لیتر: آرژنین ۱، گلیسرول ۱۲/۵، تری‌کلسیم فسفات ۵، کلرید سدیم ۱، سولفات منیزیم ۰/۵، سولفات آهن ۰/۱، سولفات مس ۰/۰۰۱، سولفات منگنز ۰/۰۰۱ و سولفات روی ۰/۰۰۱)، NBRIP (گرم بر لیتر: گلوکز ۱۰، کلرید منیزیم ۵، سولفات منیزیم ۰/۲۵، کلرید پتاسیم ۰/۲، سولفات آمونیوم ۰/۲، کلرید کلسیم ۰/۵ و تری‌کلسیم فسفات ۵) و SMM (گرم بر لیتر: گلوکز ۵، نترات آمونیوم ۲، سولفات منیزیم ۰/۵، کلرید پتاسیم ۰/۵، سولفات آهن ۰/۱، تری‌کلسیم فسفات ۵) بودند. pH هر سه محیط کشت پیش از مایه‌زنی روی ۷ تنظیم شد.

نمونه‌برداری از خاک و تعیین ویژگی‌های آن

نمونه خاک از استان گیلان، شهرستان املش با طول جغرافیایی $50^{\circ}09'06''$ و عرض جغرافیایی $37^{\circ}03'53''$ و از عمق ۳۰-۰ 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 بافت به روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۲/۵ خاک به آب (Page et al., 1982)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert & Suarez, 1996)، کربن آلی (Walkley & Black, 1934)، فسفر کل (Kuo, 1996)، آهن کل (Chen & Ma, 2001)، فسفر فراهم (Olsen, 1954)، نیتروژن کل و معدنی (Rowell, 1994)، آهن فراهم (Lindsay et al., 1978) و پتاسیم کل و محلول و تبادلی (Mc Lean & Watson, 1985) خاک اندازه‌گیری شد.

مایه‌زنی اکتینومایست‌ها به خاک و کشت گیاه

به‌منظور بررسی تأثیر مایه‌زنی اکتینومایست‌ها بر رشد گیاه جو، آزمایشی گلخانه‌ای به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با چهار تیمار و سه تکرار در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان انجام شد. دو سویه از اکتینومایست‌ها بر اساس نتایج حاصل از بخش (۱-۲) و ویژگی‌های آنها انتخاب شدند. تیمارها شامل دو سویه اکتینومایست S4A (*Streptomyces* sp. S4A) با شماره دسترسی OR712441 در بانک ژن) و S4F، 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) بودند. پس از اعمال تیمارها به خاک گلدان‌ها اقدام به کشت گیاه جو گردید. تعداد ۱۲ گلدان سه کیلوگرمی انتخاب شد و در ته همه گلدان‌ها به مقدار یکسان ریگ ریخته شد. به منظور تلقیح خاک‌ها با جدایه‌های مورد نظر مقدار ۳ کیلوگرم خاک بر روی سینی‌های پلاستیکی به طور کامل پهن شدند و سپس رطوبت این مقدار خاک توسط سوسپانسیون سویه‌های اکتینومایست ($\sim 10^4$ سلول بر گرم خاک) به ۷۵ درصد ظرفیت مزرعه رسید. سوسپانسیون باکتری‌ها به طور یکنواخت بر روی خاک اسپری شد و پس از اختلاط کامل به گلدان‌های پلاستیکی منتقل شد.

بذرهای جو ابتدا استریل شدند. به این ترتیب که بذرها در هیپوکلرید سدیم ۵ درصد (حجمی / حجمی) برای مدت ۵ دقیقه غوطه‌ور شدند، سپس ۳ بار با آب مقطر استریل آبکشی شدند، دوباره در اتانول ۹۶ درصد (حجمی / حجمی) برای مدت ۵ دقیقه قرار گرفتند و پس از آن ۴ بار با آب مقطر استریل آبکشی شدند (Schikora & Schmidt, 2001). بذرها پس از 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 بهاره 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. صفات رشدی گیاه شامل، طول اندام هوایی و 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 آون با 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) با استفاده از ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد. از کل خاک درون گلدان‌ها نیز نمونه‌برداری انجام گرفت و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری و هوا خشک شدن به آزمایشگاه منتقل شدند.

اندازه‌گیری عناصر غذایی خاک

به منظور اندازه‌گیری عناصر غذایی موجود در خاک پس از کشت گیاه، مقدار pH و قابلیت هدایت الکتریکی، فسفر فراهم، پتاسیم محلول و تبدلی، نیتروژن معدنی، آهن فراهم و کربن آلی به روش‌های ذکر شده در قبل و تنفس پایه میکروبی (Anderson & Domsch, 1993) و کربن زیست توده میکروبی (Jenkinson & Ladd, 2021) اندازه‌گیری شد.

اندازه‌گیری عناصر غذایی اندام هوایی گیاه

اندام هوایی گیاه پس از خشک نمودن در دمای ۶۵ تا ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت، آسیاب شدند. ۵/۰ گرم از پودر گیاه (عبور داده شده از الک ۰/۵ میلی‌متر) برداشته و مقدار ۵ میلی‌لیتر HNO_3 غلیظ به آن افزوده و نمونه در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. سپس یک میلی‌لیتر پراکسید هیدروژن (H_2O_2) به نمونه افزوده شد و بار دیگر در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. پس از سرد شدن، حجم نمونه با آب مقطر به ۵۰ میلی‌لیتر رسانده و محلول با کاغذ صافی صاف شد. فسفر گیاه به روش رنگ‌سنجی وانادات مولیبدات توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۴۳۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Estefan et al., 2013). نیتروژن گیاه با استفاده از کج‌دال (Gupta, 1999)، پتاسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر و قرائت آهن با دستگاه جذب اتمی مدل Varian 220 صورت گرفت.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

این پژوهش در بخش اول در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در فاز محلول با ۳ تکرار انجام شد و فاکتورهای آزمایش شامل ۳ محیط کشت و ۲۹ سویه اکتینومایست بودند. در بخش دوم، آزمایش در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی با ۴ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. نتایج به دست آمده از تمامی آزمایش‌ها 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

کشت اکتینومایست

نتایج تجزیه واریانس پیامد محیط کشت، سویه اکتینومایست و برهم‌کنش آنها بر مقدار فسفر و pH در جدول ۱ آورده شده است. پیامد محیط کشت و سویه اکتینومایست به طور جداگانه و برهم‌کنش آنها بر ویژگی‌های مورد مطالعه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$).

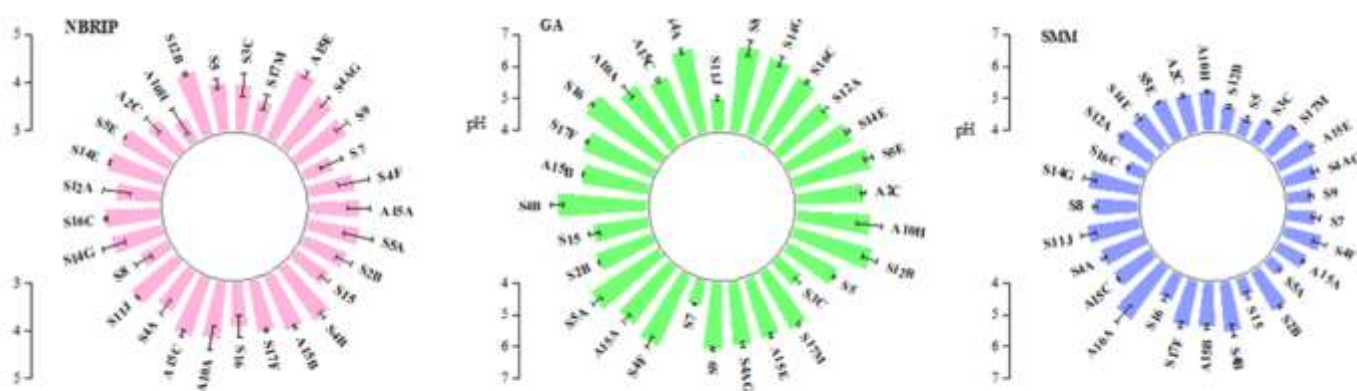
جدول ۱- تجزیه واریانس پیامد محیط کشت، سویه اکتینومایست و برهم‌کنش آنها بر ویژگی -

منابع تغییرات			درجه آزادی		میانگین مربعات	
			pH		فسفر	
محیط کشت	۲	۹۵/۵۰**	۱۹۲۹۳۷/۱۸**			
سویه	۲۸	۰/۵۷۵**	۱۰۷۳۴/۷۱**			
محیط کشت × سویه	۵۶	۰/۴۰۳**	۸۹۲۲/۹۳**			
خطا	۱۷۴	۰/۰۷۰	۲۵۳/۹۲			
ضریب تغییرات	-	۵/۱۹	۱۲/۷۷			

** معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.

پیامد سویه‌های اکتینومایست بر pH محیط کشت‌های مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار pH معادل ۶/۸۶ مربوط به سویه S4B در محیط GA بود و کمترین مقدار pH ۳/۵۴ بود که در سویه A10H در محیط NBRIP مشاهده شد (شکل ۱). تفاوت‌ها در نوع فعالیت سویه‌های مختلف تاثیر متفاوتی بر تغییر pH محیط کشت داشت (Jorquera et al., 2012).

میانگین pH ایجاد شده توسط سویه‌ها در سه محیط کشت GA، NBRIP و SMM به ترتیب ۴/۰۵، ۶/۱۵ و ۵/۱۶ بود. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی محیط GA و منابع کربن، ممکن است به گونه‌ای باشد که منجر به کاهش تولید اسید توسط سویه‌ها شود و در نتیجه pH اولیه محیط کم نشود. منبع کربن در محیط GA، به جای قند گلوکز، آمینواسید و گلیسرول می‌باشد و هیدرولیز آرژنین منجر به تولید آمونیوم می‌شود و گلیسرول عامل تولید یون هیدروکسیل است که هر دو گونه سبب مقاومت در برابر کاهش pH محیط می‌شوند (Sashidhar & Podile, 2010). بر خلاف آن، محیط NBRIP کمترین میانگین pH را نشان داد که ممکن است به دلیل تولید زیاد اسیدهای آلی به عنوان مکانیسم انحلال فسفات نامحلول توسط باکتری‌ها باشد (Illmer & Schinner, 1992). محیط SMM نیز مقدار متوسطی از pH را دارا بود، اما تفاوت‌های معنی‌داری با دو محیط دیگر داشت که بیانگر نقش محیط کشت در تنظیم مقدار اسیدیته می‌باشد. با توجه به میانگین pH سه محیط کشت که ۵/۱۲ بود، ۱۶ سویه pH کمتری از میانگین ثبت کردند. تفاوت قابل توجه در مقدار pH بین سویه‌ها را می‌توان ناشی از تفاوت در ترکیب‌های متابولیکی تولید شده توسط هر سویه دانست که شامل اسیدهای آلی، آمین‌ها، یا مواد بازی می‌باشد (Richardson et al., 2009). این نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب صحیح محیط کشت، به همراه سویه مناسب، نقش کلیدی در کنترل pH و به تبع آن در توانایی انحلال فسفات دارد.



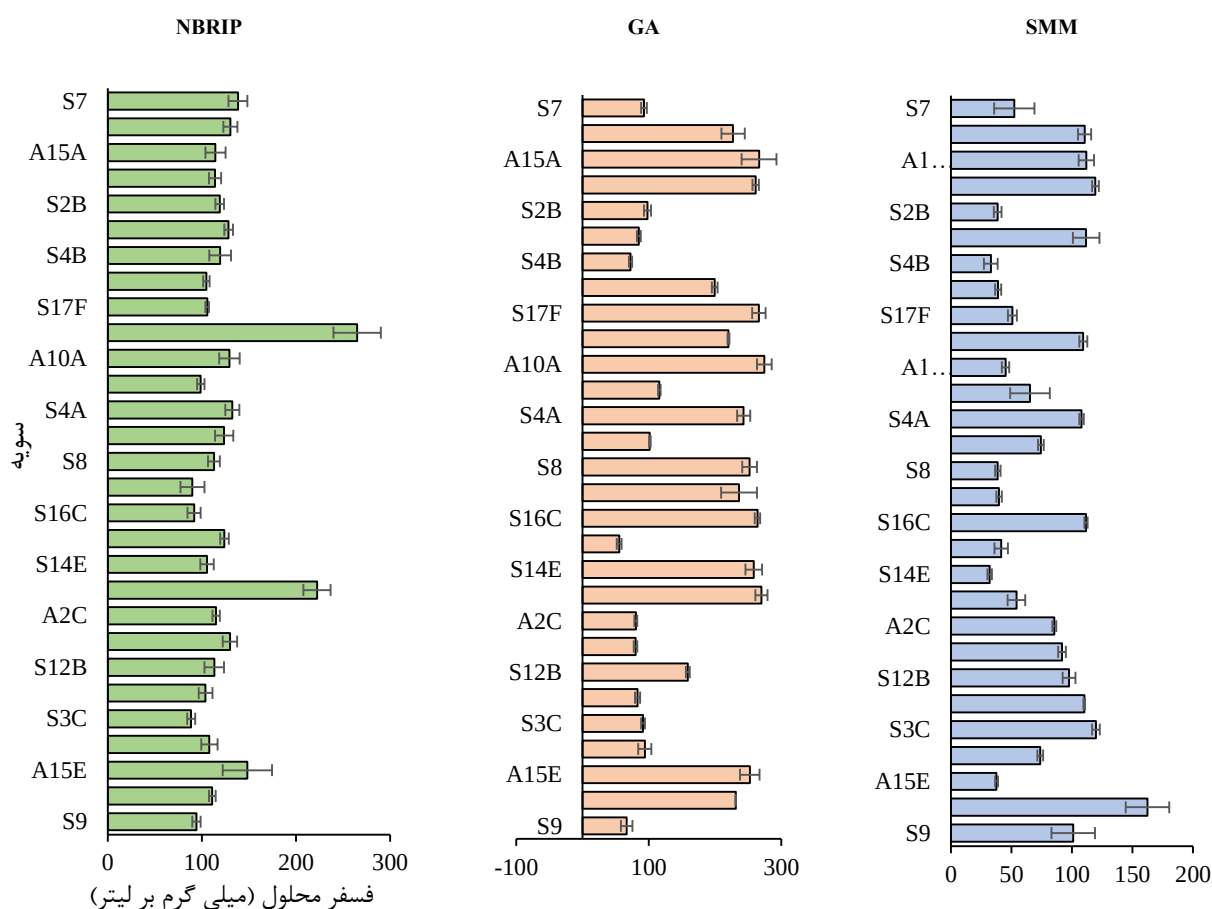
شکل ۱- پیامد سویه‌های اکتینومایست بر pH محیط کشت‌های مختلف. میله‌های خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند (n=3).

تغییرات فسفر محلول در محیط کشت

پیامد سویه‌های اکتینومایست بر مقدار فسفر محلول در سه محیط کشت مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان داد سویه‌های مختلف توانایی متفاوتی در انحلال فسفر از منبع نامحلول فسفر دارند، که این اختلاف عمدتاً به تفاوت در مکانیسم‌های بیوشیمیایی و فیزیولوژیکی هر سویه مانند ترشح اسیدهای آلی یا عدم سازگاری متابولیکی با شرایط محیط کشت مورد استفاده مرتبط است (Zaidi et al., 2009). میانگین فسفر محلول توسط سویه‌ها در سه محیط کشت GA، NBRIP و SMM به ترتیب ۱۲۳/۵۲، ۱۷۲/۳۶ و ۷۸/۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. این نتیجه احتمالاً ناشی از شرایط تغذیه‌ای مناسب‌تر محیط GA برای رشد و متابولیسم سویه‌ها به‌ویژه حضور منابع کربنی قابل دسترس می‌باشد (Nautiyal, 1999). انحلال بیشتر فسفر معمولاً به ترشح مقادیر بالاتر اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک، گلوکونیک و لاکتیک مربوط است که با کاهش pH محیط و کلات کردن کاتیون‌هایی مانند Ca^{2+} سبب آزادسازی فسفر نامحلول می‌شوند (Sharma et al., 2013). افزایش مقدار فسفر محلول در محیط کشت GA با وجود pH بالاتر را می‌توان به ترکیب شیمیایی این محیط نسبت داد. محیط GA حاوی اسید آمینه آرژنین به عنوان منبع کربن است که توسط باکتری‌ها به سرعت متابولیزه شده و سبب تولید اسیدهای آلی می‌شود (Illmer & Schinner, 1992). این اسیدهای آلی قادرند با ایجاد کمپلکس با کاتیون Ca^{2+} که فسفات را تثبیت کرده‌اند، سبب آزادسازی فسفر شوند، حتی اگر pH محیط نسبتاً بالا باشد (Whitelaw, 1999). میانگین درصد آزادسازی فسفر از سه محیط کشت GA، NBRIP و SMM به ترتیب ۱۲/۴، ۱۷/۳ و ۷/۸ بود، بیشترین درصد آزادسازی فسفر در سه محیط کشت NBRIP، GA و SMM به ترتیب در سویه‌های S16 (۲۶/۵)، A10A (۲۷/۲) و S4AG (۱۶/۲) مشاهده شد. یکی از عوامل کلیدی در برتری



محیط GA، نسبت بهینه کربن به فسفر (C:P) و نوع منبع کربنی آن است. وجود منابع کربنی ساده، علاوه بر تأمین سریع انرژی، موجب فعال شدن مسیرهای متابولیکی تولید اسیدهای آلی می‌شود (Alori et al., 2017). انحلال کمتر فسفر توسط سویه‌ها در محیط کشت SMM ممکن است به سبب عدم تولید مؤثر اسیدهای آلی، یا عدم سازگاری سویه‌ها در محیط کشت باشد (Chen et al., 2006). دو سویه باکتریایی S4F و S4A بر اساس نتایج انحلال فسفر در محیط کشت و آزمون‌های بیوشیمیایی اولیه (جدول ۲) انتخاب شدند (Noorizadeh et al., 2025). بر اساس نتایج جدول ۲، هر دو سویه توانایی تولید ایندول-۳-استیک اسید (IAA) را نشان دادند که یکی از مهم‌ترین فیتوهورمون‌ها برای تحریک رشد ریشه و افزایش جذب عناصر غذایی است. توانایی تولید سیدروفور و شاخص حل‌کنندگی فسفات نیز در هر دو سویه مثبت گزارش شد که بیانگر پتانسیل بالای آن‌ها در بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه می‌باشد. علاوه بر این، هر دو سویه، دارای فعالیت آنزیم ACC دآمیناز می‌باشند که با کاهش سطح اتیلن در گیاه، تحمل به تنش‌های محیطی را افزایش می‌دهد.



شکل ۲- پیامد سویه‌های اکتینوماست بر فسفر محلول در محیط کشت‌های مختلف. محور عمودی در سه نمودار سویه و محور افقی فسفر محلول می‌باشد. میله‌های خطا نشان‌دهنده خطای استاندارد هستند (n=3).

جدول ۲- ویژگی‌های دو سویه اکتینوماست انتخاب شده (Noorizadeh et al., 2025)

ویژگی		سویه
S4F	S4A	
+	+	تولید آمونیم
+	+	استیل کربوکسیلاز (ACC)
+	+	ایندول استیک اسید (IAA)
+	+	تثبیت نیتروژن
+	+	انحلال فسفر
+	+	تولید سیدروفور

فعالیت‌های ارتقا دهنده رشد گیاه

علامت مثبت و منفی به ترتیب بیانگر توانایی سویه و عدم توانایی سویه در تولید شاخص‌ها و فعالیت‌های مورد نظر است.

برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است. خاک مورد مطالعه دارای بافت لومی رسی سیلتی و فسفر فراهم ۹/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که نشان‌دهنده مقدار محدود فسفر قابل جذب توسط گیاه می‌باشد (Elbasiouny et al., 2022). مقدار کربنات کلسیم معادل خاک ۷/۲ درصد و pH (۷/۸۱) نشان‌دهنده قلیایی بودن خاک می‌باشد.

ویژی	pH	EC	CCE	OC	NT	PT	KT	Fe _T	N _{ino}	P _{ava}	K _{ava}	Fe _{ava}	بافت
واحد	dS m ⁻¹	g 100g ⁻¹			mg kg ⁻¹								
	۷/۸۱	۰/۲۳۴	۷/۲	۰/۸۴۴	۰/۰۷۳	۰/۰۴۹	۰/۴۵	۴/۲۳	۱/۲۶	۹/۵	۱۵۰	۱/۵۷	Silty clay loam

EC: قابلیت هدایت الکتریکی، CCE: کربنات کلسیم معادل، OC: کربن آلی، NT: نیتروژن کل، PT: فسفر کل، KT: پتاسیم کل، Fe_T آهن کل، N_{ino}: نیتروژن معدنی، P_{ava}: فسفر فراهم، K_{ava}: پتاسیم قابل دسترس، Fe_{ava}: آهن فراهم

نتایج تجزیه واریانس پیامد تیمار بر ویژگی‌های مورد بررسی در خاک در جدول ۴ آورده شده است. اثر تیمار بر ویژگی‌های مورد بررسی به استثنای قابلیت هدایت الکتریکی و تناسیم در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$).

درجه آزادی									منابع تغییرات
میانگین مربعات									
pH	EC	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن	کربن آلی	تنفس پایه	کربن زیست توده	
۰/۳۶**	۷۴۸/۵۷ ^{ns}	۱۲۴/۷**	۲۱۱/۴۶**	۳۴/۷۵ ^{ns}	۴/۷۴**	۰/۶۶**	۰/۰۲۵**	۷۹/۲۰**	
۰/۰۰۶	۴۰۴/۸	۰/۸۶	۰/۷۹	۳۱/۸۳	۰/۲۴	۰/۰۰۰۹۹	۰/۰۰۰۵۷	۰/۵۳	
۱/۰۰۶	۸/۰۶	۳/۸۱	۵/۲۸	۳/۴۸	۱۹/۱۱	۳/۲۷	۸/۱۹	۷/۲۷	

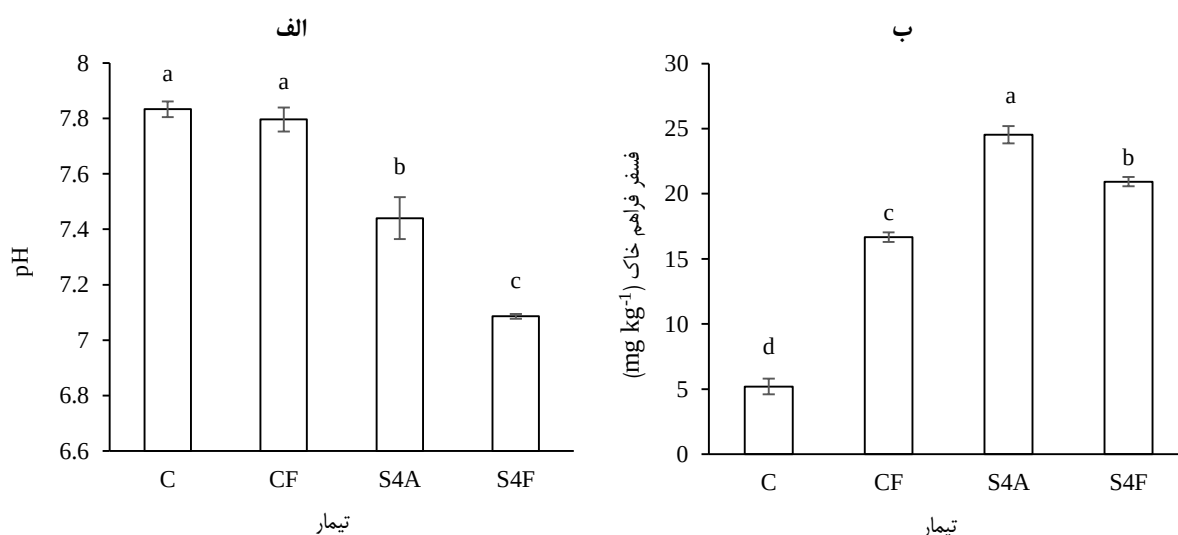
** و ^{ns} به ترتیب معنی داری در سطح احتمال یک درصد و عدم معنی داری می باشد.

پایامد تیمارهای مختلف بر pH و فسفر فراهم خاک در شکل ۳ الف و ب نشان داده شده است. بیشترین pH (۷/۸۳) در تیمار C مشاهده شد که با تیمار CF اختلاف معنی‌داری نداشت ($P > 0.05$) و کمترین pH در تیمار S4F دیده شد که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌داری نشان داد ($p < 0.01$) (شکل ۳ الف) که نشان‌دهنده توان این سویه در تغییر pH خاک احتمالاً با تولید اسیدهای آلی همچون اسید گلوکونیک اسید، لاکتیک اسید و سیتریک می‌باشد که سبب انحلال ترکیب‌های معدنی و آزادسازی فسفر و سایر عناصر غذایی می‌شود (Sun et al., 2021). سویه S4A نیز سبب کاهش pH خاک شد، هرچند این کاهش کمتر از S4F بود. تفاوت در دو سویه می‌تواند به نوع و غلظت متابولیت‌های ترشح‌شده، فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز و شرایط محیطی خاک مرتبط باشد. بنابراین تفاوت بین سویه‌های میکروبی، می‌تواند اثرات متفاوتی بر تغییر pH خاک داشته باشد که این امر به ظرفیت متابولیکی، کارایی سیستم‌های ترشحی و تعامل با ترکیب‌های آلی موجود در خاک وابسته است (Gonçalves et al., 2025; Iteima et al., 2018). به نظر می‌رسد در تیمار C و CF، فعالیت زیستی محدود یا مکانیسم‌های بافری خاک شامل تبادل یونی با کاتیون‌های قلیایی، تشکیل کمپلکس‌های پایدار و کاهش انحلال ترکیب‌های معدنی اسیدی، مانع از کاهش pH می‌شوند (Franko et al., 2017). در واقع، در نبود متابولیسم میکروبی فعال، خاک تمایل بیشتری به حفظ بازگشت به تعادل قلیاء، اولیه خود دارد (Goncalves et al., 2025).

به کار بردن سویه‌های حل‌کننده فسفر سبب افزایش فسفر فراهم در خاک شد که این افزایش تفاوت معنی‌داری را در تمامی تیمارها با تیمار C ایجاد کرد ($p < 0.01$) (شکل ۳ ب). تیمارهای دارای سویه‌های S4A و S4F به ترتیب سبب افزایش ۴/۷ و ۴ برابری فسفر فراهم نسبت به تیمار C شدند. این افزایش فسفر نشان‌دهنده کارایی بالای سویه‌های به کار رفته در آزادسازی فسفر نامحلول خاک و تبدیل

آن به فرم فراهم است، سویه‌های حل‌کننده فسفر با ترشح اسیدهای آلی سبب اسیدی شدن موضعی خاک شده (شکل ۳ الف) و پیوندهای شیمیایی فسفر با عناصر فلزی مانند کلسیم، آهن و آلومینیوم را می‌شکنند و در نتیجه فسفر به فرم فراهم تبدیل می‌شود (Sun et al., 2021). کارایی باکتری‌های حل‌کننده فسفر به ترکیب و شرایط خاک و فعالیت آنزیم‌های ترشح شده از آن‌ها وابسته است (Bhattacharyya et al., 2012). تفاوت در دو سویه می‌تواند ناشی از اختلاف در توان متابولیکی، نوع و غلظت اسیدهای آلی ترشح شده یا فعالیت آنزیمی بین سویه‌ها باشد.

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که حتی در میان اکتینومایست‌های هم‌جنس، تنوع ژنتیکی و بیوشیمیایی می‌تواند منجر به تفاوت در کارایی انحلال فسفر شود (Thepbandit et al., 2024). همچنین، تفاوت در بیان ژن‌های مرتبط با فسفاتازهای اسیدی و قلیایی در سویه‌های مختلف، یکی از عوامل مهم در این تفاوت محسوب می‌شود (Alori et al., 2017). در تیمار CF، مقدار فسفر فراهم نسبت به C بیشتر اما به طور معنی‌داری از تیمارهای حاوی اکتینومایست کمتر بود. افزودن کود شیمیایی، فعالیت محدود سویه‌های غیراکتینومایستی یا ترشح ترکیب‌های حل‌کننده فسفر توسط ریز جانداران بومی خاک، می‌تواند عامل بیشتر بودن فسفر فراهم در تیمار CF نسبت به C می‌باشد (Wang et al., 2025). کود شیمیایی می‌تواند به طور موقت فسفر فراهم خاک را افزایش دهد، ولی اثرات آن محدود بوده و به مرور زمان با تثبیت فسفر در خاک کاهش می‌یابد. در مقابل، فعالیت زیستی اکتینومایست‌ها از طریق آزادسازی مداوم فسفر از منابع نامحلول، تأثیر پایدارتر و کارآمدتری ایجاد می‌کند (Sharma et al., 2013).



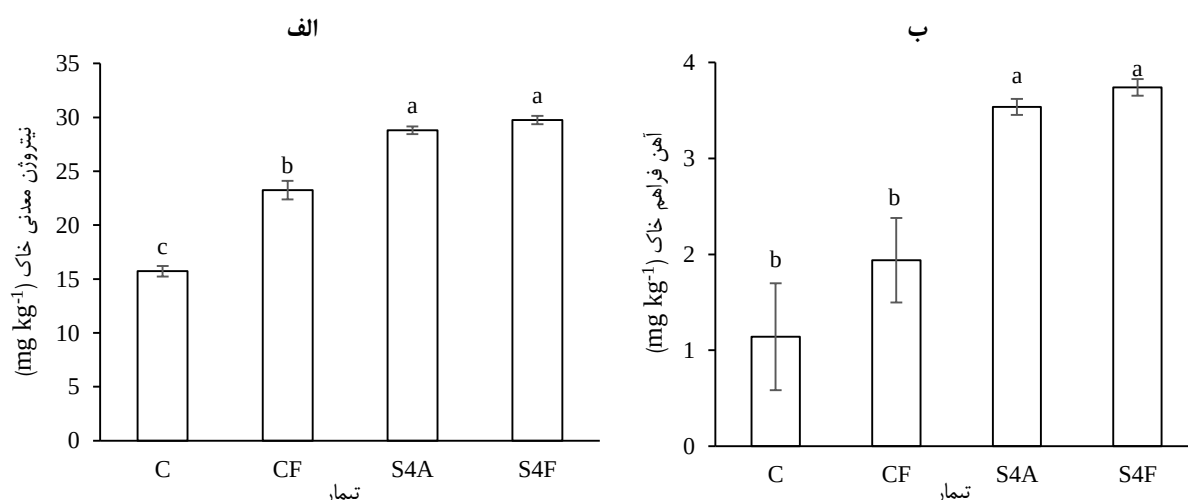
شکل ۳- پیامد تیمارهای مختلف بر pH (الف) و فسفر فراهم (ب) خاک. C و CF به ترتیب تیمار شاهد و کود شیمیایی می‌باشند. حروف یکسان بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است. نوارهای خطا، خطای استاندارد می‌باشند (n=3).

تغییرات نیتروژن معدنی و آهن فراهم خاک

پیامد تیمارهای مختلف بر مقدار نیتروژن معدنی و آهن فراهم خاک در شکل ۴ الف و ب نشان داده شده است. مقدار نیتروژن معدنی در تیمارهای S4A و S4F اختلاف معنی‌داری نشان نداد ولی این دو تیمار با تیمارهای C و CF اختلاف افزایشی معنی‌داری را نشان دادند ($p < 0.01$) (شکل ۴ الف). تفاوت در سویه‌ها می‌تواند ناشی از اختلاف در عملکرد زیستی سویه‌ها، توانایی ترشح آنزیم‌های مرتبط با چرخه نیتروژن یا سازگاری با شرایط خاک باشد (de Lima et al., 2024). باکتری‌های حل‌کننده فسفر می‌توانند با تغییراتی که در محیط انجام می‌دهند سبب افزایش نیتروژن در خاک می‌شوند. بر اساس داده‌های جدول ۱، هر دو سویه اکتینومایست S4A و S4F دارای توانایی تثبیت نیتروژن هستند که نشان می‌دهد هر دو می‌توانند به شکل مؤثری نیتروژن اتمسفری را تثبیت کرده و در دسترس گیاه قرار دهند. تثبیت نیتروژن اتمسفری توسط آنزیم نیتروژناز، معدنی‌سازی 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 (Martínez-Hidalgo & Hirsch, 2017).

به کار بردن تیمارهای دارای سویه‌های حل‌کننده فسفر، سبب افزایش آهن در خاک شد که این افزایش تفاوت معنی‌داری با دو تیمار C و CF نشان داد ($p < 0.01$) (شکل ۴ ب). بیشترین مقدار آهن (۳/۷۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار S4F دیده شد که با تیمار

S4A تفاوت معنی‌داری نشان نداد ($P>0.05$). این نتایج نشان‌دهنده ظرفیت بالای سوبه‌های به‌کار رفته در فراهم‌سازی عناصر ریزمغذی مانند آهن است. یکی از مکانیسم‌های اصلی در افزایش جذب آهن توسط باکتری‌ها، ترشح اسیدهای آلی و ترکیب‌های کلات‌کننده مانند سیدروفورها است که یون‌های آهن سه‌ظرفیتی نامحلول را به فرم‌های قابل جذب برای گیاهان تبدیل می‌کنند. همچنین، این ترکیب‌ها با کاهش pH خاک و کلاته کردن آهن در ساختارهای آلی-فلزی، فراهمی آهن خاک را افزایش می‌دهند (Sun et al., 2021). بر اساس داده‌های جدول ۱، هر دو سوبه‌ی S4A و S4F دارای توانایی تولید سیدروفور هستند. سیدروفورها ترکیب‌های آلی با وزن مولکولی پایین و میل ترکیبی بسیار بالا به یون‌های آهن سه‌ظرفیتی (Fe^{3+}) بوده که به‌عنوان عامل‌های کلاته‌کننده عمل می‌کنند. شرایطی که آهن به‌دلیل pH بالا یا حضور ترکیب‌های اکسیدی و هیدروکسیدی در خاک به فرم نامحلول وجود دارد، ترشح سیدروفور توسط این اکتینومایست‌ها موجب تشکیل کمپلکس‌های محلول آهن-سیدروفور می‌شود. کاربرد سوبه‌های تولیدکننده سیدروفور در خاک‌های آهنی یا قلیایی می‌تواند غلظت آهن فراهم را تا دو برابر افزایش دهد (El-Khouly et al., 2024).



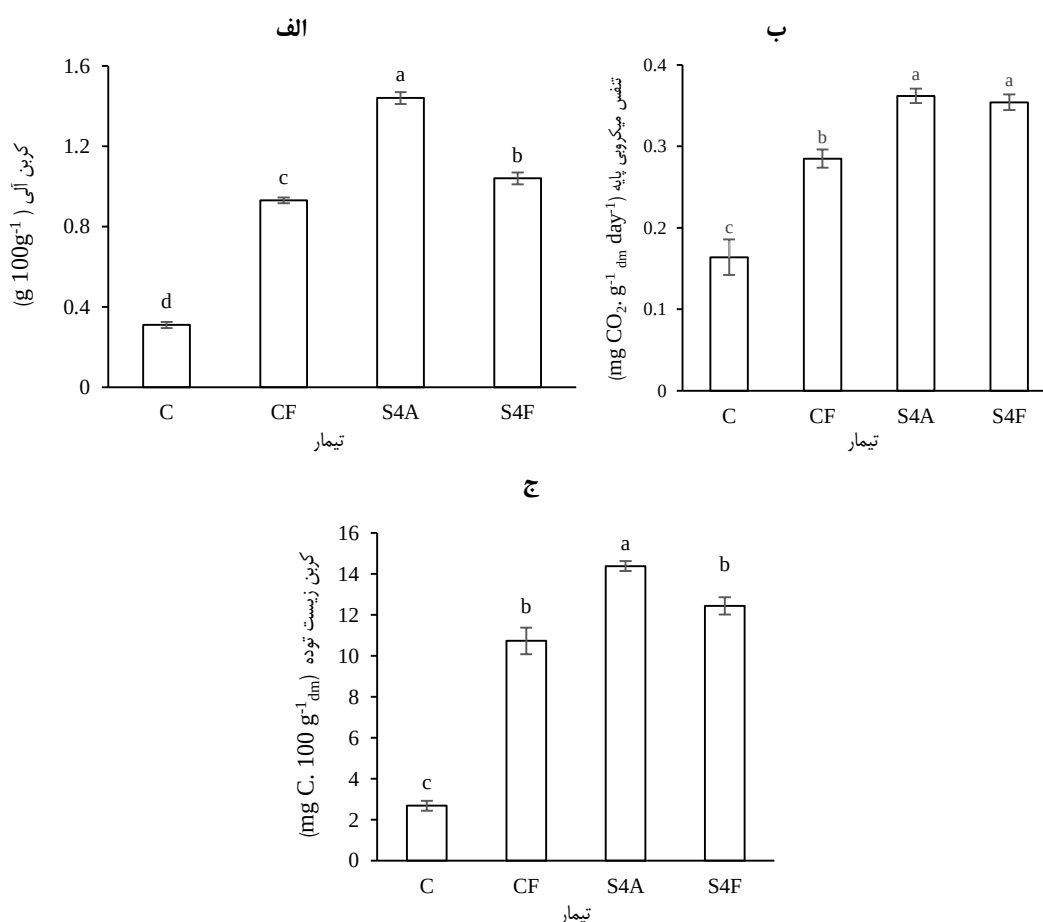
شکل ۴- پیامد تیمارهای مختلف بر نیتروژن معدنی (الف) و آهن فراهم (ب) خاک. C و CF به ترتیب تیمار شاهد و کود شیمیایی می‌باشند. حروف یکسان بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است. نوارهای خطا، خطای استاندارد می‌باشند ($n=3$).

تغییرات کربن آلی، تنفس میکروبی پایه و کربن زیست توده میکروبی خاک

پیامد تیمارهای مختلف بر مقدار کربن آلی، تنفس میکروبی پایه و کربن زیست توده میکروبی خاک در شکل ۵ الف، ب و ج نشان داده شده است. سوبه S4A مقدار کربن آلی خاک را افزایش داد به گونه‌ای که نسبت به تیمار شاهد ۴/۶ برابر افزایش نشان داد (شکل ۵ الف). این افزایش با توجه به همبستگی مثبت و معنی‌دار ($R^2=0.98$, $p<0.01$) کربن آلی و کربن زیست توده میکروبی خاک دور از انتظار نیست. ضمن این‌که ترشحات ریشه گیاه و سوبه اکتینومایست نیز می‌تواند سبب افزایش کربن آلی خاک شود. این یافته‌ها با پژوهشی که گزارش نمود کاربرد باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند به طور متوسط تا ۵-۲ برابر کربن آلی خاک را در طی یک فصل کشت افزایش دهد هم‌راستا است (Li et al., 2023). تیمار CF نیز نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری در مقدار کربن آلی خاک نشان داد ($p<0.01$), اما این افزایش کمتر از تیمارهای حاوی اکتینومایست بود. این یافته نشان می‌دهد که هرچند کود شیمیایی می‌تواند به رشد گیاه و افزایش ترشحات ریشه کمک کند، اما فاقد اثرات مستقیم و پایدار میکروبی در افزایش ذخیره کربن آلی خاک است (Adesemoye et al., 2009). تیمار S4F نیز با وجود تأثیر مثبت، اختلاف کاهشی معنی‌داری را با تیمار S4A در مقدار کربن آلی نشان داد. این نتایج احتمالاً ناشی از تفاوت در مقدار زیست‌توده میکروبی، تنوع سوبه‌ها و مقدار ترشح متابولیت‌های تثبیت‌کننده کربن در هر سوبه باشد (Ali et al., 2023). سوبه‌های مفید می‌توانند پایداری کربن آلی را در خاک افزایش داده (Babaniyi et al., 2024) و با افزایش فعالیت‌های متابولیکی و ترشح پلی‌ساکاریدها به بهبود وضعیت مواد آلی خاک کمک کنند (Imran et al., 2025). تفاوت معنی‌دار مقدار کربن آلی خاک در دو سوبه، احتمالاً ناشی از تفاوت در مقدار زیست‌توده میکروبی، تنوع سوبه‌ها و مقدار ترشح متابولیت‌های تثبیت‌کننده کربن در هر تیمار باشد (Ali et al., 2023).

تیمارهای دارای سوبه‌های اکتینومایست سبب افزایش تنفس میکروبی خاک شده‌اند، به گونه‌ای که بیشترین مقدار تنفس میکروبی

در تیمار S4A دیده شد که با تیمار S4F تفاوت معنی‌داری نشان نداد ($P>0.05$) (شکل ۵ ب). افزایش تنفس در حضور باکتری‌های فعال، نشان‌دهنده‌ی تحریک جمعیت میکروبی و افزایش چرخه‌های زیستی به‌ویژه چرخه‌ی کربن و فسفر است. در تیمارهای S4A و S4F، احتمالاً ترشح اسیدهای آلی و سایر متابولیت‌های زیستی موجب افزایش دسترسی به منابع غذایی و رشد جمعیت میکروبی و افزایش تنفس شده است (Sharma et al., 2013). همچنین گزارش شده که سویه‌های حل‌کننده فسفر از طریق افزایش زیست‌توده میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی، می‌توانند به طور مستقیم نرخ تنفس خاک را افزایش دهند (Sun et al., 2021). مقدار تنفس در تیمار CF نیز به طور معنی‌داری از تیمار شاهد بیشتر اما از تیمارهای حاوی اکتینومایست کمتر بود. علت اصلی این موضوع به افزایش مواد غذایی معدنی قابل دسترس در اثر افزودن کود شیمیایی بازمی‌گردد. کودهای شیمیایی حاوی نیتروژن، فسفر و پتاسیم، موجب بهبود رشد ریز جانداران خاک و افزایش فعالیت متابولیکی آن‌ها می‌شوند (Kuzyakov, 2010). افزایش نیتروژن معدنی (به‌صورت نترات یا آمونیوم) می‌تواند رشد جمعیت میکروبی را تحریک کند، زیرا نیتروژن یکی از عناصر کلیدی برای سنتز پروتئین‌ها و آنزیم‌های سلولی است. این امر سبب افزایش نرخ متابولیسم و در نتیجه تولید بیشتر دی‌اکسید کربن از طریق فرایندهای تنفس میکروبی می‌شود (Fierer et al., 2003). همچنین، کود شیمیایی می‌تواند تجزیه مواد آلی موجود در خاک را از طریق پدیده اثر پرایمینگ تحریک کند، که این امر نیز موجب افزایش آزادسازی دی‌اکسید کربن می‌شود (Blagodatskaya & Kuzyakov, 2008). کم بودن تنفس میکروبی در تیمار شاهد نیز بیانگر فقدان یا فعالیت کم زیستی در خاک‌های فاقد سویه‌های محرک رشد و کود شیمیایی می‌باشد.



شکل ۵- پیامد تیمارهای مختلف بر کربن آلی (الف)، تنفس میکروبی پایه (ب) و کربن زیست‌توده میکروبی (ج) خاک. C و CF به ترتیب تیمار شاهد و کود شیمیایی می‌باشند. حروف یکسان بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است. نوارهای خطا، خطای استاندارد می‌باشند ($n=3$).

بیشترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی ($14/386 \text{ mg C } 100\text{g}^{-1}\text{dm}$) در تیمار S4A مشاهده شد و با سایر تیمارها تفاوت معنی‌داری نشان داد ($p<0.01$) که بیانگر فعالیت بالای میکروبی و افزایش تجمع زیست‌توده در حضور این سویه است. کمترین مقدار نیز

در تیمار C با اختلاف کاهشی معنی‌داری با سایر تیمارها مشاهده شد (شکل ۵ ج). سویه‌های S4A و S4F به ترتیب ۵/۳۵ و ۴/۶۳ برابر کربن زیست توده خاک را نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند. این افزایش قابل توجه می‌تواند بیانگر فعالیت سویه‌ها و رشد جمعیت میکروبی ناشی از فراهمی بیشتر عناصر غذایی مانند فسفر و کربن خاک باشد (Itelima et al., 2018). تفاوت در سویه‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در سرعت رشد میکروبی، یا توانایی تولید زیست‌توده توسط آن‌ها باشد (de Lima et al., 2024). این اثر می‌تواند ناشی از توانایی اکتینومایست‌ها در استفاده کارآمد از منابع کربنی، ترشح ترکیب‌های زیست‌فعال محرک رشد ریز جانداران بومی و همچنین بهبود شرایط فیزیکی شیمیایی خاک باشد (Tolin et al., 2010; Sáhó et al., 2024). تیمار CF که تنها کود شیمیایی دریافت کرده بود، نسبت به شاهد افزایش قابل توجهی در کربن زیست‌توده داشت، اما این افزایش به طور معنی‌داری از تیمارهای حاوی اکتینومایست کمتر بود. این امر بیانگر آن است که در پی کاربرد کود شیمیایی عناصر غذایی معدنی، به‌ویژه نیتروژن، فسفر و پتاسیم سریع و مستقیم در اختیار ریز جانداران خاک قرار گرفته و سبب تحریک رشد و افزایش فعالیت آن‌ها می‌شود. کم بودن مقدار کربن زیست‌توده در تیمار شاهد نیز نشان‌دهنده فعالیت میکروبی پایین است که سبب کاهش ظرفیت زیستی خاک می‌شود (Fierer et al., 2003).

کشت گلدانی گیاه جو

نتایج تجزیه واریانس پیامد تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های مورد بررسی گیاه جو در جدول ۵ آورده شده است. اثر تیمار بر ویژگی‌های طول اندام هوایی، طول ریشه و وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$). ولی بر وزن تر اندام هوایی و وزن خشک ریشه اثر معنی‌داری نداشت. همچنین نتایج تجزیه واریانس پیامد تیمارهای مختلف بر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و آهن در گیاه جو نشان داد که اثر تیمار بر روی این عناصر در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود ($p < 0.01$).

جدول ۵- تجزیه واریانس پیامد تیمار بر ویژگی‌های گیاه جو

منابع تغییرات		درجه آزادی								
میانگین مربعات										
		طول اندام هوایی	طول ریشه	وزن تر اندام هوایی	وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	نیتروژن	فسفر	پتاسیم	آهن
تیمار	۳	۳۸/۲۴**	۳۶/۹۶**	۶/۵۳ ^{ns}	۰/۱۳**	۰/۰۰۱ ^{ns}	۱/۶۹**	۰/۰۴۶**	۲/۳۹**	۳۶۵۹/۲۲**
خطا	۸	۵/۲۲	۵/۰۴	۱/۶۴	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۳	۰/۰۳۰	۸/۱۲
ضریب تغییرات (%)	–	۸/۰۹	۱۱/۵۵	۳۲/۰۱	۲۸/۴۵	۴۵/۴۰	۴/۸۰	۸/۶۹	۷/۱۸	۴/۷۰

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

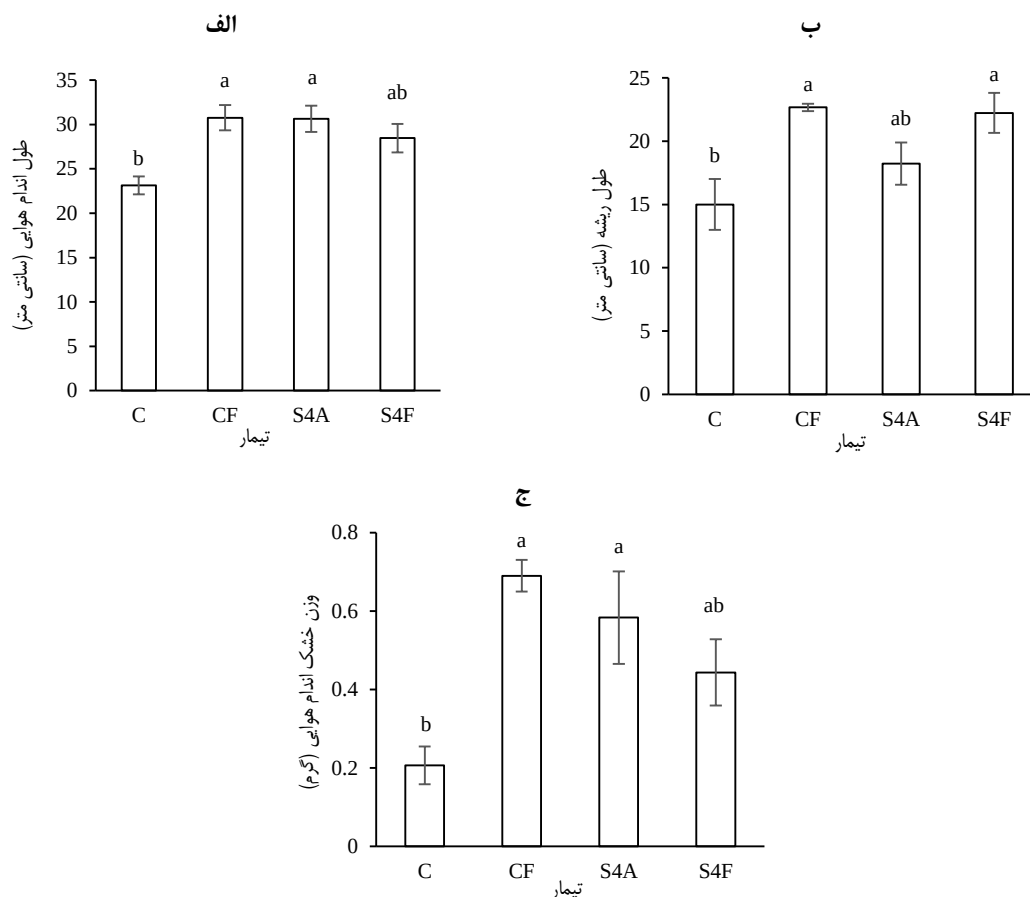
اثر تیمارها بر طول اندام هوایی، طول ریشه و وزن خشک اندام هوایی گیاه جو

پیامد تیمارهای مختلف بر طول اندام هوایی، طول ریشه و وزن خشک اندام هوایی گیاه جو در شکل ۶ الف، ب و ج نشان داده شده است. بیشترین طول اندام هوایی گیاه ($30/76$ سانتی‌متر) در تیمار CF مشاهده شد که با تیمارهای S4A و S4F تفاوت معنی‌داری نداشت ($P > 0.05$) و کمترین طول اندام هوایی در تیمار C مشاهده شد (شکل ۶ الف). افزایش رشد گیاه به‌ویژه در بخش‌های هوایی می‌تواند ناشی از بهبود تغذیه گیاه، تحریک رشد ریشه، افزایش دسترسی به عناصر غذایی (به ویژه فسفر) و ترشح ترکیب‌های تنظیم‌کننده رشد مانند اکسین، جیبرلین و سیدروفورها توسط سویه‌های محرک رشد گیاه باشد (Saharan & Nehra, 2011). در این پژوهش نیز، تیمارهای حاوی سویه‌های حل‌کننده فسفر موجب افزایش رشد رویشی گیاه شده‌اند. افزایش رشد اندام هوایی، سطح برگ و زیست‌توده خشک در محصولات زراعی بر اثر استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاه گزارش شده است (Bharti et al., 2025).

بیشترین طول ریشه و وزن خشک اندام هوایی گیاه نیز در تیمار CF مشاهده شد که با تیمارهای S4A و S4F تفاوت معنی‌داری نداشت ($P > 0.05$) و کمترین طول ریشه در تیمار C بدست آمد (شکل ۶ ب و ج). بکار بردن کود یا سویه‌های حل‌کننده فسفر سبب افزایش طول ریشه در گیاه شده است. در تیمار شاهد نیز محدودیت‌های تغذیه‌ای خاک مانع از رشد بهینه ریشه‌ها شده است (Glick, 2012). افزایش طول ریشه می‌تواند به تأثیر مستقیم سویه‌ها در بهبود ساختمان خاک، افزایش جذب فسفر و تولید ترکیب‌های هورمونی مانند اکسین مرتبط باشد (Saharan & Nehra, 2011). در واقع، سویه‌های حل‌کننده فسفر با ایجاد شرایط مناسب‌تر برای جذب عناصر غذایی، نه تنها سبب افزایش طول اندام هوایی گیاه شده‌اند، بلکه موجب توسعه بیشتر ریشه نیز می‌شوند (Bhattacharyya & Jha, 2011).



(2012) افزایش وزن خشک اندام هوایی نشان‌دهنده بهبود زیست‌توده گیاه و کارایی در جذب و مصرف عناصر غذایی است. این شاخص، از مهم‌ترین عوامل مرتبط با رشد پایدار گیاه در شرایط خاکی می‌باشد و تحت تأثیر عواملی چون دسترسی به فسفر، نیتروژن و آب قرار دارد (Saharan & Nehra, 2011; Sharma et al., 2013).



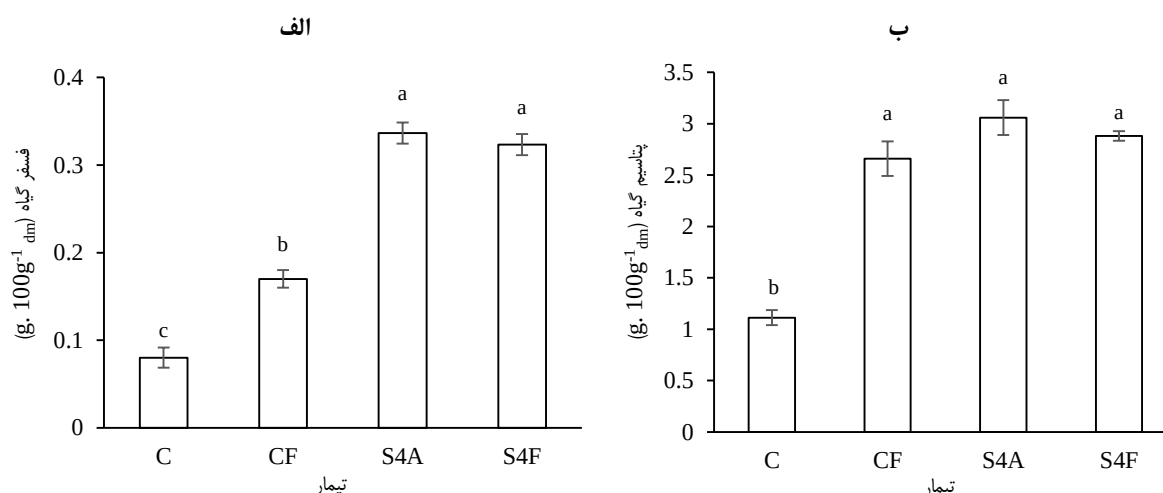
شکل ۶- پیامد تیمارهای مختلف بر طول اندام هوایی (الف)، طول ریشه (ب) و وزن خشک اندام هوایی (ج) گیاه. C و CF به ترتیب تیمار شاهد و کود شیمیایی می‌باشند. حروف یکسان بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است. نوارهای خطا، خطای استاندارد می‌باشند (n=3).

فسفر و پتاسیم گیاه

پیامد تیمارهای مختلف بر فسفر و پتاسیم گیاه جو در شکل ۷ الف و ب نشان داده شده است. به کار بردن سویه‌های حل‌کننده فسفر سبب افزایش مقدار فسفر در گیاه جو شد که این افزایش تفاوت معنی‌داری را با تیمار C و CF نشان داد ($p < 0.01$) (شکل ۷ الف). فسفر از عناصر حیاتی برای رشد گیاه است و در فرآیندهایی مانند انتقال انرژی، تقسیم سلولی، تشکیل ریشه‌های جانبی و رشد جوانه‌ها نقش اساسی دارد. به همین دلیل، افزایش فسفر در گیاه با بهبود عملکرد رشد و تولید زیست‌توده همراه است (Richardson & Simpson, 2011). پژوهش‌ها تایید 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 (Mitra et al., 2022; de Lima et al., 2024).

بیشترین مقدار پتاسیم در تیمار S4A مشاهده شد که با تیمارهای S4F و CF تفاوت معنی‌داری نداشت ($P > 0.05$). بکار بردن کود یا سویه‌های حل‌کننده فسفر سبب افزایش پتاسیم در گیاه شده است (شکل ۷ ب). افزایش جذب پتاسیم معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که خاک محیط ریشه از نظر اسیدیته، در دسترس بودن کاتیون‌ها، و ساختمان بهبود یابد که این ویژگی‌ها توسط باکتری‌های محرک رشد و حل‌کننده فسفر بهبود می‌یابند (Ramesh et al., 2014). اگرچه سویه‌های اعمال شده در این پژوهش مستقیماً به‌عنوان حل‌کننده پتاسیم معرفی نشده‌اند، اما به نظر می‌رسد با افزایش زیست‌توده میکروبی، اسیدی شدن موضعی خاک، ترشح اسیدهای آلی و افزایش فعالیت آنزیم‌های خاک، شرایط مناسب‌تری برای جذب پتاسیم توسط گیاه فراهم شده است (Khan et al., 2009). به‌ویژه سویه S4A که دارای پتانسیل بیشتری در انحلال فسفر است و به احتمال زیاد سبب افزایش جذب سایر عناصر از جمله پتاسیم توسط گیاه شده است. هم‌راستا

با نتایج این پژوهش گزارش شده است که استفاده از تیمارهای زیستی حاوی باکتری‌های ارتقا دهنده رشد گیاه می‌تواند سبب افزایش جذب پتاسیم در گیاه، حتی بدون استفاده از منابع کود پتاسیمی، شود (Chen et al., 2024).

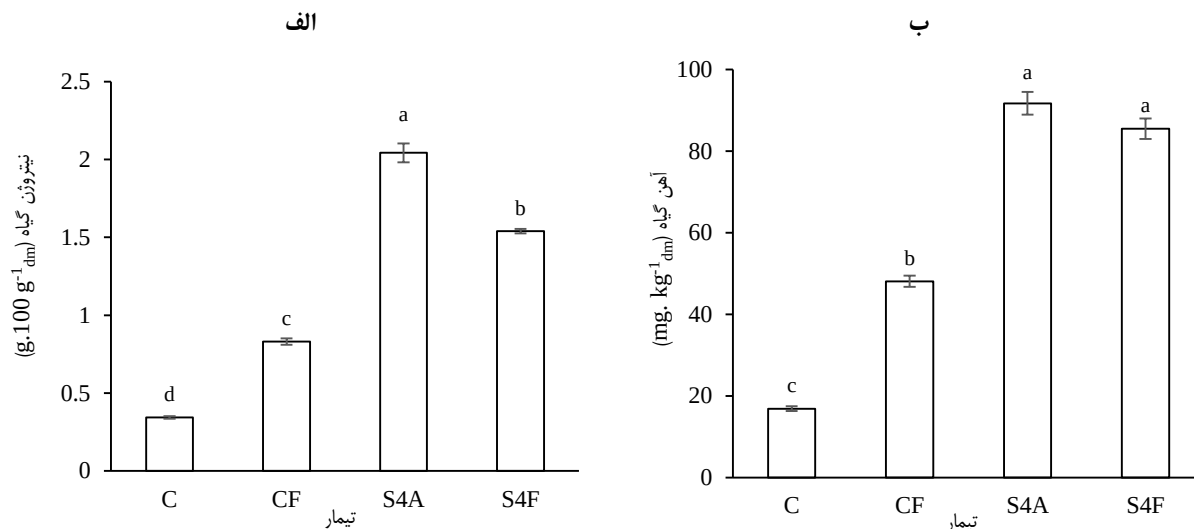


شکل ۷- پیامد تیمارهای مختلف بر فسفر (الف) و پتاسیم (ب) گیاه. C و CF به ترتیب تیمار شاهد و کود شیمیایی می‌باشند. حروف یکسان بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است. نوارهای خطا، خطای استاندارد می‌باشند (n=3).

نیتروژن و آهن گیاه

پیامد تیمارهای مختلف بر نیتروژن و آهن گیاه جو در شکل ۸ الف و ب نشان داده شده است. در تیمار S4A مقدار نیتروژن در گیاه بیشترین مقدار است و اختلاف معنی‌داری را با سایر تیمارها نشان داد ($p < 0.01$). مقدار نیتروژن گیاه در تیمار S4F نیز نسبت به تیمارهای C و CF اختلاف افزایش معنی‌داری را نشان داد (شکل ۸ الف). سویه‌های اکتینومایست از طریق توانایی در تثبیت نیتروژن اتمسفری (جدول ۱)، افزایش معدنی‌سازی نیتروژن آلی و بهبود قابلیت جذب نیتروژن موجود در خاک، می‌توانند تغذیه نیتروژنی گیاه را بهبود بخشند (Glick, 2012). سویه‌های حل‌کننده فسفر همچنین می‌توانند با فراهم‌سازی بهتر فسفر در ناحیه ریزوسفری، موجب افزایش کارایی جذب نیتروژن توسط گیاه شوند، زیرا فسفر نقش مهمی در سوخت‌وساز نیتروژن و ساخت اسیدهای نوکلئیک دارد (Sharma et al., 2013). این مکانیسم دوگانه در تیمار S4A و S4F که شامل سویه‌های حل‌کننده فسفر است، می‌تواند دلیل افزایش نیتروژن در گیاه نسبت به دو تیمار دیگر باشد. در پژوهشی نیز گزارش شد که استفاده از ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند جذب نیتروژن را در گیاهان زراعی تا دو برابر افزایش دهد که با نتایج این پژوهش هم‌راستا است (Kumar et al., 2001).

به کار بردن سویه‌های اکتینومایست سبب افزایش مقدار آهن در گیاه جو شده است که تفاوت معنی‌داری را با تیمارهای C و CF نشان داد (شکل ۸ ب). بیشترین مقدار آهن (۹۱/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار S4A دیده شد که با تیمار S4F تفاوت معنی‌داری نشان نداد ($P > 0.05$). هر دو سویه S4A و S4F دارای توانایی تولید سیدروفور هستند (جدول ۲) که سبب افزایش قابلیت جذب آهن توسط گیاه می‌شوند. در پژوهش حاضر، تیمار S4A که بالاترین تأثیر را بر زیست‌توده میکروبی و تنفس خاک داشت، توانست سبب بیشترین مقدار جذب آهن توسط گیاه شود. این موضوع تأیید می‌کند که فعالیت بالای میکروبی در ریزوسفری می‌تواند مستقیماً جذب عناصر کم‌مصرف را حتی در غیاب کودهای شیمیایی آهن بهبود بخشد. تأثیر مثبت باکتری‌های محرک رشد گیاه که توانایی انحلال فسفر و تولید سیدروفور را داشتند بر افزایش جذب آهن در گیاه برنج گزارش شده است (Sharma et al., 2013). بر اساس ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی خاک اولیه (جدول ۱)، مقدار آهن کل در خاک نسبتاً بالا و مقدار آهن فراهم خاک بسیار پایین است که این امر نشان‌دهنده حضور آهن در فرم‌های نامحلول (اکسیدها و هیدروکسیدها) و محدودیت آن برای جذب توسط گیاه می‌باشد. تولید سیدروفور با میل ترکیبی بسیار بالا به آهن فریک، آهن نامحلول را کلاته کرده و آن را به فرم کمپلکس‌های محلول آهن-سیدروفور تبدیل می‌کنند که یا مستقیماً توسط سیستم‌های جذب ریشه وارد گیاه شده و یا پس از آزادسازی آهن، به‌صورت یون‌های آهن دو و سه ظرفیتی جذب می‌گردد (Ahmed and Holmström, 2014).



شکل ۸- پیامد تیمارهای مختلف بر نیتروژن (الف) و آهن (ب) گیاه. C و CF به ترتیب تیمار شاهد و کود شیمیایی می‌باشند. حروف یکسان بر روی ستون‌ها بیانگر نبود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد است. نوارهای خطا، خطای استاندارد می‌باشند (n=3).

نتایج بررسی ویژگی‌های مورفولوژیکی گیاه جو حاکی از آن است که استفاده از کود شیمیایی سبب بهبود آنها شده است، اگرچه استفاده از سویه‌های اکتینومایست نیز نتایج یکسانی را با کود شیمیایی نشان دادند، اما این سویه‌ها در بهبود وضعیت عناصر غذایی در خاک موثرتر بودند و به نظر می‌رسد اثر طولانی مدت تا پایان رشد گیاه داشته باشند و عملکرد گیاه را بهبود دهند.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از سویه‌های اکتینومایست S4A و S4F به‌عنوان کودهای زیستی می‌توانند تأثیرات مثبت و معنی‌داری بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک و فیزیولوژیکی گیاه داشته باشند. نتایج کشت گیاه بیانگر این بود که اثر تیمارها بر pH خاک، فسفر فراهم، نیتروژن معدنی و کربن آلی معنی‌دار بود. بیشترین مقدار فسفر فراهم خاک (۲۴/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار S4A مشاهده شد. نیتروژن معدنی و پتاسیم قابل جذب نیز در تیمارهای S4A و S4F به طور معنی‌داری افزایش یافتند. همچنین بیشترین مقدار آهن فراهم خاک (۳/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار S4F مشاهده شد که با تیمار S4A تفاوت معنی‌داری نشان نداد. نتایج کاشت گیاه نشان داد که مقدار نیتروژن، فسفر و آهن گیاه در تیمارهای S4A و S4F اختلاف افزایشی معنی‌داری را با تیمارهای C و CF نشان دادند. این سویه‌ها با تولید سیدروفور، تثبیت نیتروژن و انحلال فسفر فراهمی عناصر غذایی را در خاک بهبود بخشیده و در نتیجه رشد و عملکرد گیاه جو را افزایش دهند. تأثیرات مثبت این تیمارها در افزایش آهن، فسفر، نیتروژن و پتاسیم فراهم خاک، نشان‌دهنده اهمیت استفاده از این سویه‌ها در سیستم‌های کشاورزی پایدار است. همچنین، اثرات زیستی این باکتری‌ها در بهبود ویژگی‌های خاک از جمله افزایش کربن زیست‌توده و تنفس میکروبی، نشان‌دهنده ارتقای فعالیت‌های میکروبی و بهبود سلامت خاک است. این پژوهش تأکید می‌کند که استفاده از سویه‌های اکتینومایست به‌عنوان کود زیستی نه تنها می‌تواند نیاز به استفاده از کودهای شیمیایی را کاهش دهد، بلکه به افزایش پایداری و حاصلخیزی بلند مدت خاک کمک می‌کند. اما از آنجا که در بسیاری از مواقع، سویه‌های میکروبی در شرایط واقعی مزرعه نتایج متفاوتی از شرایط آزمایشگاهی و گلخانه نشان می‌دهند لازم است که قابلیت و توانمندی این سویه‌ها در شرایط مزرعه مورد ارزیابی قرار گیرد تا امکان استفاده از آنها به عنوان کود زیستی در راستای کشاورزی پایدار و حفظ محیط‌زیست مشخص شود که در این زمینه جداسازی سویه‌های اکتینومایست ارتقا دهنده رشد گیاه از ریزوسفر گیاهان بومی منطقه مفید واقع می‌شود.

"هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

خلیلی، نیلوفر؛ قربانی نصرآبادی، رضا؛ بارانی مطلق، محتبی و خدادادی، رضا (۱۴۰۲). اثر اسید هیومیک و مایه‌زنی جدایه‌های اکتینومایست بر حلالیت فسفر در شرایط آزمایشگاهی و محتوای فسفر گیاه ذرت (*Zea mays* L.). نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، ۱۳(۲)، ۷۵-۹۴.

REFERENCES

- Adesemoye AO, Torbert HA, & Kloepper JW. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology*, 58(4), pp. 921-929. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9531-y>.
- Ahmed E, & Holmström SJ. (2014). Siderophores in environmental research: roles and applications. *Microbial Biotechnology*, 7(3), pp. 196-208. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12117>.
- 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>.
- Alori ET, Glick BR, & Babalola OO. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in microbiology*, 8, p. 971. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>.
- Anderson TH, & Domsch KH. (1993). The metabolic quotient for CO₂ (q CO₂) 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).
- Babaniyi BR, Olaide TH, Apra IB, Ajibola OK, Olaoluwa DO, & Bisi-Omotosho A. (2024). Soil microbes and climate change mitigation. In *Soil Microbiome in Green Technology Sustainability*, 229-254. Cham: Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-71844-1-9>.
- Bharti C, Mishra P, Verma P, Bhattacharya A, Arora P, & Arora NK. (2025). Microorganisms for Sustainable Agriculture & Food Security. In *Environmental Sustainability & Biotechnology: Opportunities & Challenges* (pp. 53-94). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-9025-1_2.
- Bhattacharyya PN, & Jha DK. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of microbiology & biotechnology*, 28(4), pp.1327-1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>.
- Blagodatskaya E, & Kuzyakov Y. (2008). Mechanisms of real & apparent priming effects & their dependence on soil microbial biomass & community structure: critical review. *Biology & Fertility of Soils*, 45(2), pp.115-131. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0334-y>.
- Bouizgarne B. (2022). Phosphate-solubilizing actinomycetes as biofertilizers & biopesticides: bioformulations for sustainable agriculture. In *Microbial BioTechnology for Sustainable Agriculture*, 1, p. 407-428. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4843-4_13.
- Bousselham M, Lemriss S, Dhiba D, Aallam Y, Souiri A, Abbas Y, Saïdi N, Boukcim H, & Hamdali H. (2022). Streptomycetaceae and Promicromonosporaceae: two actinomycetes families from Moroccan oat soils enhancing solubilization of natural phosphate. *Microorganisms*, 10(6), p.1116. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061116>.
- Chen M, & Ma LQ. (2001). Comparison of three aqua regia digestion methods for twenty Florida soils. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), pp.491-499. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652491x>.
- Chen YP, Rekha PD, Arun AB, Shen FT, Lai WA, & Young CC. (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied soil ecology*, 34(1), pp.33-41. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.12.002>.
- Chen Q, Song Y, An Y, Lu Y, & Zhong G. (2024). Mechanisms and impact of rhizosphere microbial metabolites on crop health, traits, functional components: a comprehensive review. *Molecules*, 29(24), p.5922. <https://doi.org/10.3390/molecules29245922>.
- Chowdhuri I, and Pal SC. (2025). Challenges and potential pathways towards sustainable agriculture crop production: A systematic review to achieve sustainable development goals (SDGs). *Soil & Tillage Research*, 248, p.106442. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106442>.
- Colombo F, Pesenti M, Araniti F, Pili SR, & Nocito FF. (2024). An Integrated and multi-stakeholder approach for sustainable phosphorus management in agriculture. *Agronomy*, 14(4), p.780. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040780>.
- de Lima JD, de Souza AJ, Nunes ALP, Rivadavea WR, Zaro GC, & da Silva GJ. (2024). Expanding agricultural potential through biological nitrogen fixation: Recent advances and diversity of diazotrophic bacteria. *Australian Journal of Crop Science*, 18(6), pp. 324-333. <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.06.p4104>.
- Elbasiouny H, Elbehiry F, El-Ramady H, & Brevik EC. (2020). Phosphorus availability and potential environmental risk assessment in alkaline soils. *Agriculture*, 10(5), p.172.



<https://doi.org/10.3390/agriculture10050172>.

- El-Khouly N, Fergani M, El-temsah M, El-Saady K, & Shahin M. (2024). Impact of integration between soil application of phosphorus and foliar spraying of nano potassium, iron, and boron on the productivity and quality of peanuts. *Egyptian Journal of Botany*, 64(3), pp.130-147. <https://doi.org/10.21608/ejbo.2024.213993.2356>
- Estefan G, Sommer R, & Ryan J. (2013). Methods of soil, plant, and water analysis: a manual for the West Asia and North Africa region.
- Fierer N, Allen AS, Schimel JP, & Holden PA. (2003). Controls on microbial CO₂ production: a comparison of surface and subsurface soil horizons. *Global Change Biology*, 9(9), pp.1322-1332. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00663.x>.
- Franko U, & Merbach I. (2017). Modelling soil organic matter dynamics on a bare fallow Chernozem soil in Central Germany. *Geoderma*, 303, pp.93-98. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.05.013>.
- Gee GW, & Bauder JW. (1986). Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis: Part 1. Agronomy Handbook, No 9, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 383-411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>.
- Glick BR. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012(1), p.963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.
- Gonçalves JO, Leones AR, de Farias BS, da Silva MD, Jaeschke DP, Fernandes SS, Ribeiro AC, Cadaval Jr TRS, & Pinto LADA. (2025). A Comprehensive review of agricultural residue-derived bioadsorbents for emerging contaminant removal. *Water*, 17(14), p.2141. <https://doi.org/10.3390/w17142141>.
- Gupta BK. (2007). Soil, plant, water and fertilizer analysis. Agrobios (India). <https://doi.org/10.1007/BF02841332>.
- Illmer P, & Schinner F. (1992). Solubilization of inorganic phosphates by microorganisms isolated from forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 24, p. 389–395. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90199-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90199-8).
- Imran A. (2025). Carbon cultivation for sustainable agriculture, ecosystem resilience, and climate change mitigation. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 56(9), pp.1430-1456. <https://doi.org/10.1080/00103624.2025.2453996>.
- Itelima JU, Bang WJ, Onyimba IA, & Oj E. (2018). A review: biofertilizer, a key player in enhancing soil fertility and crop productivity. *Journal of Microbiology and Biotechnolog*, 2(1), pp.22-28. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>.
- Jahan N, Mahmud U, & Khan MZ. (2025). Sustainable plant-soil phosphorus management in agricultural systems: challenges, environmental impacts & innovative solutions. *Discover Soil*, 2(1), pp.1-8. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00039-2>.
- Jenkinson DS, & Ladd JN. (2021). Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In *Soil biochemistry*, pp. 415-472). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003064763>.
- Jorquera MA, Shaharoon B, Nadeem SM, de la Luz Mora M, & Crowley DE. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria associated with ancient clones of creosote bush (*Larrea tridentata*). *Microbial ecology*, 64(4), pp.1008-1017. <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0071-5>.
- Khalili N, Ghorbani Nasrabadi R, Baranimotlagh M, & Khodadadi R. (2023). The effect of humic acid and inoculation of actinomycetes isolates on phosphorus solubilization in laboratory conditions and phosphorus content in maize (*Zea mays*). *Journal of Soil Management & Sustainable Production*, 13(2), pp.75-94. <https://doi.org/10.22069/ejsms.2023.21253.2096>. (In Persian).
- Khan MS, Zaidi A, & Wani PA. (2009). Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture-a review. *Sustainable agriculture*, pp.551-570. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_34.
- Kumar V, Behl RK, & Narula N. (2001). Establishment of phosphate-solubilizing strains of *Azotobacter chroococcum* in the rhizosphere and their effect on wheat cultivars under greenhouse conditions. *Microbiological research*, 156(1), pp.87-93. <https://doi.org/10.1078/0944-5013-00081>.
- Kuo SM, & Morgan DR. (1996). Active noise control systems. (Vol. 4). Wiley, New York. <http://dx.doi.org/10.1109/5.763310>.
- Kuzyakov Y. (2010). Priming effects: interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 42(9), pp.1363-1371. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.04.003>.
- Lamuka AP, Retnowati Y, Katili AS, Kandowangko NY, & Uno WD. (2025). Phosphate solubilizing actinomycetes in the rhizosphere of corn (*Zea mays*) in Gorontalo. *MIKHAYLA: Journal of Advanced Research*, 2(1), pp.1-10. <https://doi.org/10.61579/mikhayla.v2i1.282>.
- Lindsay WL, & Norvell W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and

- copper. *Soil Science Society of America journal*, 42(3), pp.421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
- Li L, Hu Z, Tan G, Fan J, Chen Y, Xiao Y, Wu S, Zhi Q, Liu T, Yin H, & Tang Q. (2023). Enhancing plant growth in biofertilizer-amended soil through nitrogen-transforming microbial communities. *Frontiers in Plant Science*, 14, p.1259853. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1259853>.
- Loeppert RH, & Suarez DL. (1996). Carbonate and gypsum. *Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods*, 5, pp.437-474. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15>.
- Martínez-Hidalgo P, & Hirsch AM. (2017). The nodule microbiome: N₂-fixing rhizobia do not live alone. *Phytobiomes Journal*, 1(2), pp.70-82. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-12-16-0019-RVW>.
- Mc Lean EO, & Watson ME. (1985). Soil measurements of plant-available potassium. *Potassium in agriculture*, pp.277-308. <https://doi.org/10.2134/1985.potassium.c10>.
- Mitra D, Mondal R, Khoshru B, Senapati A, Radha TK, Mahakur B, Uniyal N, Myo EM, Boutaj H, Sierra BEG, & Pannierselvam P. (2022). Actinobacteria-enhanced plant growth, nutrient acquisition, and crop protection: Advances in soil, plant, and microbial multifactorial interactions. *Pedosphere*, 32(1), pp.149-170. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60042-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60042-5).
- Nautiyal CS. (1999). An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS microbiology Letters*, 170(1), pp.265-270. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1999.tb13383.x>.
- 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*, <https://doi.org/10.1007/s42161-025-02043-5>.
- 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 & Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1159. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c33>.
- Pahalvi HN, Rafiya L, Rashid S, Nisar B & Kamili AN. (2021). Chemical fertilizers and their impact on soil health. In *Microbiota & biofertilizers, Vol 2: Ecofriendly tools for reclamation of degraded soil environs* (pp. 1-20). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61010-4_1.
- Park J, Guan W, & Yu G. (2025). Smart Hydrogels for Sustainable Agriculture. *EcoMat*, 7(4), p.e70011. <https://doi.org/10.1002/eom2.70011>.
- Prabhu N, Borkar S, & Garg S. (2019). Phosphate solubilization by microorganisms: overview, mechanisms, applications, and advances. *Advances in Biological Science Research*, pp. 161-176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817497-5.00011-2>.
- Qin YM, Tu YH, Li T, Ni Y, Wang RF, & Wang H. (2025). Deep Learning for sustainable agriculture: A systematic review on applications in lettuce cultivation. *Sustainability*, 17(7), p.3190. <https://doi.org/10.3390/su17073190>.
- Rajput MS, Naresh Kumar G, & Rajkumar S. (2013). Repression of oxalic acid-mediated mineral phosphate solubilization in rhizospheric isolates of *Klebsiella pneumoniae* by succinate. *Archives of microbiology*, 195(2), pp.81-88. <https://doi.org/10.1007/s00203-012-0850-x>.
- Ramesh A, Sharma SK, Sharma MP, Yadav N, & Joshi OP. (2014). Plant growth-promoting traits in *Enterobacter cloacae* subsp. Dissolvent MDSR9 isolated from soybean rhizosphere and its impact on the growth and nutrition of soybean and wheat upon inoculation. *Agricultural Research*, 3(1), pp.53-66. <https://doi.org/10.1007/s40003-014-0100-3>.
- 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 & Plant Nutrition*, 21(1), pp.49-68. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>.
- Richardson AE, & Simpson RJ. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant physiology*, 156(3), pp.989-996. <https://doi.org/10.1104/pp.111.175448>.
- Richardson AE, Barea JM, McNeill AM, & Prigent-Combaret C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321(1-2), pp. 305-339. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2>.
- Robertson GP. (2015). A sustainable agriculture? *Daedalus*, 144(4), pp.76-89. https://doi.org/10.1162/DAED_a_00355.
- Rowell DI. (1994). *Soil Science: Methods and Applications*. Longman Group.



<https://doi.org/10.4324/9781315844855>.

- Saharan BS, & Nehra V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *International Journal of Life Science and Medical Research*, 21(1), p.30. <https://doi.org/10.12691/wjar-10-2-2>
- Sáhó A, Karikás V, Ásványi B, Lakatos E, Varga L, & Greff B. (2024). Bioactive potential of actinobacteria Strains isolated from the rhizosphere of lavender, lemon balm, and oregano. *Agriculture*, 14(10), p.1758. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101758>.
- Sashidhar B, & Podile AR. (2010). Mineral phosphate solubilization by rhizosphere bacteria and scope for manipulation of the direct oxidation pathway involving glucose dehydrogenase. *Journal of applied microbiology*, 109(1), pp.1-12. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2009.04654.x>.
- 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, pp.1679–1687. <https://doi.org/10.1104/pp.125.4.1679>.
- Sharma SB, Sayyed RZ, Trivedi MH, & Gobi TA. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), p.587. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>.
- Sun A, Jiao XY, Chen Q, Wu AL, Zheng Y, Lin YX, He JZ, & Hu HW. (2021). Microbial communities in crop phyllosphere and root endosphere are more resistant than soil microbiota to fertilization. *Soil Biology & Biochemistry*, 153, p.108113. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108113>
- Tan M, Feng T, Wang C, Hao X, & Yu H. (2025). Effects of microbial agents on soil improvement: A Review and Bibliometric Analysis. *Agronomy*, 15(5), p.1223. <https://doi.org/10.3390/agronomy15051223>.
- Thepbandit W, & Athinuwat D. (2024). Rhizosphere microorganisms supply availability of soil nutrients and induce plant defense. *Microorganisms*, 12(3), p.558. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030558>.
- Tolin S, De Franceschi G, Spolaore B, Frare E, Canton M, Polverino de Laureto P, & Fontana A. (2010). The oleic acid complexes of proteolytic fragments of α -lactalbumin display apoptotic activity. *The FEBS journal*, 277(1), pp.163-173. <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2009.07466.x>.
- 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), pp.29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
- Wang X, Liu Y, Tian X, Guo J, Luan Y, & Wang D. (2025). Root exudates mediate the production of reactive oxygen species in rhizosphere soil: Formation mechanisms and ecological effects. *Plants*, 14(9), p.1395. <https://doi.org/10.3390/plants14091395>.
- Whitelaw MA. (1999). Growth promotion of plants inoculated with phosphate-solubilizing fungi. *Advances in agronomy*, 69, pp.99-151. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60948-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60948-7)
- Yu Y, Zhang M, Lin S, Wang L, Liu J, Jones G, & Huang HC. (2013). Assessment the levels of tartrate-resistant acid phosphatase (TRAP) on mice fed with eggshell calcium citrate malate. *International Journal of Biological Macromolecules*, 58, pp. 253-257. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.04.027>.
- Zaidi A, Khan MS, Ahemad M, Oves M, & Wani PA. (2009). Recent advances in plant growth promotion by phosphate-solubilizing microbes. *Microbial strategies for crop improvement*, pp.23-50. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01979-1_2.
- Zhu X, Lee SY, Yang WT, Lee SW, Baek D, Li M, & Kim DH. (2019). The Burkholderia pyrrocinia purple acid phosphatase Pap9 mediates phosphate acquisition in plants. *Journal of Plant Biology*, 62(5), pp.342-350. <https://doi.org/10.1007/s12374-019-0161-8>.