



Effect of Soil-Isolated Cyanobacteria as a Growth-promoting on the Growth and Quality of Potato Mini-Tubers (*Solanum tuberosum* L.) under Greenhouse Cultivation

Azam Kheirollahi Najafabadi¹ | Saheb Soodaee Mashae² | Rahim Barzegar³ | Sadegh Mousavi-Fard³

1. Department of Horticulturer Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Charmahal-va-Bakhtiari, Iran.

E-mail: Azamkheirollahi@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Charmahal-va-Bakhtiari, Iran. E-mail: Soodaie@sku.ac.ir

3. Department of Horticulturer Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Charmahal-va-Bakhtiari, Iran. E-mail: Barzegar56@yahoo.com

4. Department of Horticulturer Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Charmahal-va-Bakhtiari, Iran. E-mail: Mousavifard.S@sku.ac.ir

Article Info

ABSTRACT

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 23, 2025

Revised: Jan. 10, 2026

Accepted: Apr. 22, 2026

Published online: April. 2026

Keywords:

Foliar application of cyanobacterial extract,

Nitrogen,

Nostoc,

Potato tuber,

Pseudomonas.

This study investigates the effects of cyanobacteria-based growth stimulants isolated from soil on the growth and quality of potato minitubers (*Solanum tuberosum* L.) grown in greenhouse soil culture. Cyanobacterial strains were cultivated and isolated from soil, their physiological characteristics and biomass production were determined, and their extracts were prepared. An experiment was conducted in a randomized complete-block design with four treatments and three replicates in 2025. Growth characteristics and plant nutrient concentrations were assessed. Morphological and filamentous-cell analyses indicated that the isolates correspond to two cyanobacterial strains in the genera *Anabaena* and *Nostoc*. Both strains exhibited significant capacities for atmospheric nitrogen fixation, tricalcium phosphate solubilization, and production of indole-3-acetic acid (IAA). All treatments enhanced growth traits of potato plants relative to the untreated control. Stem length and diameter, leaf number, total tuber number, and leaf concentrations of phosphorus, iron, and zinc were higher in the cyanobacterial extract foliar-spray treatment than in the control. Total tuber weight increased by 24.46% under root inoculation with cyanobacteria compared with the control. Total tuber number, along with the counts of medium and small tubers, showed positive and significant correlations at $p \leq 0.01$, while the number of large tubers and the weight of medium tubers correlated positively at $p \leq 0.05$. Leaf chlorophyll content (SPAD) correlated positively and significantly with leaf nitrogen concentration ($r = 0.72$, $p \leq 0.01$), and leaf nitrogen concentration correlated positively with leaf potassium concentration ($r = 0.66$, $p \leq 0.05$). These findings underscore the growth-promoting activity of soil-isolated cyanobacteria as a plant-growth-enhancing treatment and support the use of cyanobacterial bio-extracts as sustainable tools to improve the growth and quality of potato tubers.

Cite this article: Kheirollahi-Najafabadi, A., Soodaee-Mashae, S., Barzegar, R., & Mousavi-Fard, S. (2026). Effect of Soil-Isolated Cyanobacteria as a Growth-promoting on the Growth and Quality of Potato Mini-Tubers (*Solanum tuberosum* L.) under Greenhouse Cultivation., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (2), 375-391. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408464.670076>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408464.670076>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Cyanobacteria-based bioinoculants offer a sustainable strategy to enhance soil fertility and crop yield. The adoption of green-technology practices that employ cyanobacteria in agriculture can mitigate the reliance on chemical fertilizers. Experimental investigations into the interactions between cyanobacteria and key crops have yielded promising findings. Therefore, the present study aimed to (i) assess the effects of cyanobacterial extracts and biofertilizer inoculation with native soil cyanobacteria (*Nostoc* sp. and *Anabaena* sp.) on growth and yield, (ii) evaluate a suite of physiological, biochemical, and nutritional traits, and (iii) determine the quality parameters of potato minitubers grown under greenhouse conditions.

Method

The cultivation and isolation of cyanobacterial strains from soil, determination of their physiological characteristics and biomass production, and preparation of their extracts were conducted. Greenhouse soil was sampled, and comprehensive physical and chemical analyses were performed. The study was organized as a randomized complete block design with four treatments (1) control (no inoculation), (2) root inoculation with cyanobacteria, (3) foliar application of cyanobacterial extract, and (4) root inoculation with *Pseudomonas putida*, with three replicates under greenhouse conditions in Najafabad, Isfahan (approximately 51°23'9.28" E, 32°34'34.17" N). Potato seedlings of the Santé cultivar were prepared and subjected to a 20-minute pre-treatment in a suspension containing a mixture of two cyanobacteria and *Pseudomonas*; these were then planted in the designated treatment plots row-wise. Cyanobacterial extract, at a concentration of 5%, was applied as a spray in two applications at 15 and 30 day intervals after planting. Thirteen weeks after planting, growth parameters including plant height, number of leaves, leaf area index, and fresh and dry shoot weights were measured, followed by topping (complete removal of the shoots) in all treatments. One week after topping, the total minituber number and minituber weight per treatment were recorded. To assess the impact of treatments on nutrient uptake, leaf tissue analyses were performed.

Results

The results of the morphological and filamentous-cell characteristics of these two cyanobacteria showed that they were related to two strains of *Anabaena* and *Nostoc*. Both strains showed significant abilities in atmospheric nitrogen fixation, tricalcium phosphate solubilization and production of the plant hormone indole-3-acetic acid (IAA). The results showed that all treatments increased the growth characteristics of potato plants compared to untreated plants. In the foliar cyanobacterial extract treatment, the shoot length and stem diameter, leaf number, total minituber number, and leaf concentration of phosphorus, iron and zinc were higher than in the control. The root inoculation with cyanobacteria increased total minituber mass by 24.46% compared with the control. Total minitubers number showed a positive and significant correlation with the numbers of medium minitubers and small minitubers at the 1% significance level ($p \leq 0.01$), and with the number of large minitubers and the weight of medium minitubers at the 5% significance level ($p \leq 0.05$). SPAD-derived chlorophyll content (SPAD) correlated positively and strongly with leaf nitrogen concentration ($r = 0.72$, $p \leq 0.01$). Leaf nitrogen concentration showed a positive and significant correlation with leaf potassium concentration ($r = 0.66$, $p \leq 0.05$).

Conclusions

These findings underscore the growth-promoting activity of soil-isolated cyanobacteria as plant growth-enhancing treatments and support the use of cyanobacterial bio-extracts as sustainable tools to improve the growth and quality of potato tubers. Evaluation of physiological traits indicated that the two heterocystous filamentous cyanobacteria possess substantial potential to enhance soil fertility and promote plant growth. The study demonstrates that the application of cyanobacteria and their bio-extracts as plant growth promoters was more effective than both *Pseudomonas* sp. inoculation and the untreated control in improving the growth and yield of potato tubers. Cyanobacteria and their extracts are frequently used as bio-stimulants and can mitigate abiotic stresses while promoting growth across a range of agricultural crops. Collectively, these findings suggest that such formulations offer a cost-effective strategy for greenhouse-oriented potato cultivation and constitute a sustainable alternative within integrated and optimized fertilizer management.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Authorship contribution

Azam Kheirollahi Najafabadi: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft and Editing. Saheb Soodaee Mashae: Conceptualization, Validation, Resources, Supervision, project administration, funding acquisition, Writing - Review and Editing. Rahim Barzegar: Supervision, Validation, project administration, Writing - Review and Editing. Sadeg Mousavi-Fard: Supervision, Validation, Review and Editing. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

This paper is published as part of a master's thesis supported by the Vice Chancellor for Research and Technology, Shahrekord University, Iran. In addition, this research was conducted in Mr. Noormohammadi's personal greenhouse located in Najafabad, Isfahan. The authors would like to thank all participants of the present study. The authors would like to thank anonymous referees for their constructive comments.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

تأثیر محرک رشدی سیانوباکتری جداسازی شده از خاک بر رشد و کیفیت غده‌چه سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum L*) در کشت گلخانه‌ای

اعظم خیرالهی نجف‌آبادی^۱ | صاحب‌سودائی‌مشائی^۲ | رحیم برزگر^۳ | صادق موسوی‌فرد^۴

۱. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه:

Azamkheirollahi@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران.

رایانامه: Soodaie@sku.ac.ir

۳. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه:

Barzegar56@yahoo.com

۴. گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، چهارمحال و بختیاری، ایران. رایانامه:

Mousavifard.S@sku.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش به منظور بررسی تأثیر محرک‌های رشدی سیانوباکتری‌های جداسازی شده از خاک بر کیفیت رشد غده‌چه سیب‌زمینی در کشت بستر خاکی گلخانه انجام شد. کشت و جداسازی سویه‌های سیانوباکتری از خاک، تعیین ویژگی‌های فیزیولوژیکی و تولید زیست توده و تهیه عصاره آنها و سپس آزمایش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تیمار و سه تکرار در سال ۱۴۰۳ انجام شد. برخی خصوصیات رشدی و غلظت عناصر غذایی گیاه ارزیابی شد. نتایج بررسی ویژگی‌های مورفولوژیک و رشته‌های سلول این دو سیانوباکتری نشان داد که مربوط به دو سویه آنابنا و نوستوک می‌باشند. هر دو سویه توانایی‌های قابل توجهی در تثبیت نیتروژن اتمسفری، حل‌کنندگی تری‌کلسیم فسفات و تولید هورمون گیاهی ایندول-۳-استیک اسید (IAA) نشان دادند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر تیمارها بر بیشتر صفات اندازه‌گیری شده از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری داشت. نتایج نشان داد که همه تیمارها ویژگی‌های رشد گیاهان سیب‌زمینی را در مقایسه با گیاهان تیمار نشده افزایش دادند. طول و قطر ساقه، تعداد برگ، تعداد کل غده‌چه‌ها، غلظت فسفر آهن و روی برگ در تیمار محلولپاشی عصاره سیانوباکتری بیشتر از تیمار شاهد بود. وزن کل غده‌چه‌ها در تیمار تلقیح ریشه با سیانوباکتری با افزایش ۲۴/۴۶ درصد نسبت به تیمار شاهد مشاهده شد. تعداد کل غده‌چه‌ها با تعداد غده‌چه‌های متوسط و تعداد غده‌چه‌های کوچک همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد و غلظت نیتروژن برگ با غلظت پتاسیم برگ ($r=0.66^*$) همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد. این یافته‌ها، فعالیت محرک رشدی سیانوباکتری‌های جدا شده از خاک را به عنوان تیمار بهبود دهنده رشد گیاه و همچنین کاربرد عصاره زیستی را به عنوان ابزارهای پایدار برای افزایش رشد و کیفیت غده‌چه‌های سیب‌زمینی برجسته کرد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۲

تاریخ انتشار: اردیبهشت ۱۴۰۵

واژه‌های کلیدی:

محلول‌پاشی عصاره

سیانوباکتری،

نیتروژن،

نوستوک،

غده‌چه سیب‌زمینی،

سودوموناس

استناد: خیرالهی نجف‌آبادی، اعظم؛ سودائی‌مشائی، صاحب؛ برزگر، رحیم؛ و موسوی‌فرد، صادق (۱۴۰۴). تأثیر محرک رشدی سیانوباکتری جداسازی شده از خاک بر رشد و کیفیت غده‌چه سیب‌زمینی (*Solanum tuberosum L*) در کشت گلخانه‌ای، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*،



۵۷ (۲)، ۳۹۱-۳۷۵. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408464.670076>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.408464.670076>

مقدمه

سیبزمینی (*Solanum tuberosum* L.) از خانواده Solanaceae است و پس از گندم، ذرت و برنج، مهم‌ترین محصول غذایی جهان محسوب می‌شود، زیرا غده‌های این گیاه ارزش غذایی بالایی دارند (Mushtaq et al., 2022). تولید مقادیر زیادی غده‌چه (با کیفیت بالا و هزینه کم، در مدت زمان نسبتاً کوتاه و به روشی سازگار با محیط زیست، در بسیاری از کشورها یک چالش محسوب می‌شود (Wasilewska-Nascimento et al., 2020) زیرا غده‌های سیبزمینی می‌توانند حامل بسیاری از ارگاناسم‌های بیماری‌زا باشند که یا مستقیماً به قسمت‌های زیرزمینی گیاه حمله می‌کنند یا ابتدا برگ‌ها را آلوده کرده و سپس در غده‌ها تجمع می‌یابند (Mushtaq et al., 2022). غده‌چه‌ها را می‌توان در آزمایشگاه به تعداد زیاد در طول سال تولید و ذخیره کرد و می‌توان آنها را بدون انتقال به محیط جدید، مستقیماً به بازار منتقل کرد. علاوه بر این، می‌توان آنها را مستقیماً در مزرعه بدون نیاز به سازگاری کشت کرد (Wasilewska-Nascimento et al., 2020). عوامل فیزیکی و محیطی متعددی از جمله نوع مواد گیاهی منشاء، تراکم بوته، روش مورد استفاده، قطر ریزغده، مدت زمان دوره خواب ریزغده، نوع و کیفیت بستر کشت، عملکرد غده‌چه‌ها و کیفیت آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهند و گزارشات متعددی در مورد بهینه‌سازی این عوامل با هدف افزایش عملکرد وجود دارد (Bolandi, 2007).

کمبود عناصر غذایی، یکی از چالش‌هایی است که گیاه سیبزمینی هنگام تلاش برای رشد با آن مواجه می‌شود. میکروارگاناسم‌های مفید خاک می‌توانند ریزوسفر را بهبود بخشیده و به تغذیه گیاه کمک کنند (Fasusi et al., 2021). کودهای زیستی حاوی مجموعه‌ای از میکروارگاناسم‌های زنده مفید هستند که وقتی روی سطح گیاه، بذر یا خاک استفاده می‌شوند، می‌توانند ریزوسفر یا قسمت داخلی گیاه میزبان را کلونیزه کرده و با افزایش دسترسی به عناصر غذایی، رشد گیاه را افزایش دهند (Riaz et al., 2021). ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) می‌توانند به طور قابل توجهی حلالیت فسفر، تثبیت زیستی نیتروژن اتمسفری، تولید آنتی‌بیوتیک، تولید سیدروفور، سنتز آنزیم‌های دخیل در تولید اتیلن، افزایش آزادسازی و جذب منگنز، روی و بهبود شرایط رشد را افزایش دهند (Fasusi et al., 2021). در میان محرک‌های زیستی، محرک‌های زیستی مبتنی بر سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌ها کاربرد خود را به عنوان تقویت‌کننده‌های گیاه ثابت کردند. کودهای زیستی سیانوباکتری به دلیل مزایای بی‌شمارشان، مانند راندمان بالای فتوسنتز و تولید متابولیت‌های مفید برای کشاورزی و مواد محرک رشد گیاه مانند فیتوهورمون‌ها، پلی‌ساکاریدها و اسیدهای آمینه، توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده‌اند. علاوه بر این، آنها فعالیت میکروبی خاک را افزایش داده و تعدیل می‌کنند، کیفیت و حاصلخیزی خاک را بهبود می‌بخشند و بهره‌وری محصول را افزایش می‌دهند (Alvarez et al., 2024; Hakkoum et al., 2025; Jose et al., 2024). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که سیانوباکتری‌ها، به ویژه آنهایی که نیتروژن را در جنس‌های *Anabaena* و *Nostoc* تثبیت می‌کنند، می‌توانند به عنوان کودهای زیستی پایدار برای افزایش بهره‌وری در کشاورزی مورد استفاده قرار گیرند (Kholssi et al., 2022; Jose et al., 2024; Kollmen and Strieth, 2022).

Chabli et al. (2025) با بررسی اثرات محرک زیستی عصاره‌های زیستی تهیه شده از سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌های بر جوانه‌زنی بذر گندم، نشان دادند که عصاره‌های زیستی دارای مقادیر قابل توجهی از مولکول‌های زیست‌فعال، عمدتاً ایندول-۳-استیک-اسید (IAA) و پلی‌فنول‌ها بودند و باعث افزایش قابل توجهی در شاخص‌های جوانه‌زنی و همچنین طول ساقه‌چه و ریشه‌چه گندم شد. این یافته‌ها، در درجه اول، فعالیت محرک زیستی ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌های جدا شده از خاک را به عنوان تیمار بذر و همچنین کاربرد عصاره‌های زیستی آنها را به عنوان ابزارهای پایدار برای افزایش جوانه‌زنی و بنیه بذر برجسته کرد (Chabli et al., 2025). کاربرد عصاره جلبک دریایی در پیاز، باعث افزایش ارتفاع بوته، تعداد و اندازه پیاز، درصد گوگرد و پروتئین در پیاز، غلظت کلروفیل و کارتنوئید برگ شد (Hidangmayum and Sharma, 2017). Hakkoum et al. (2025) با بررسی پتانسیل کوددهی زیستی دو سویه بومی سیانوباکتری (*Anabaena cylindrica* و *Nostoc punctiforme*) بر رشد گوجه‌فرنگی نشان دادند که همه تیمارهای زیستی، حاصلخیزی خاک، رشد گیاه و عملکرد و یا کیفیت میوه را در مقایسه با شاهد بهبود بخشیدند. تجزیه و تحلیل همبستگی، ارتباط مثبت قوی بین رنگدانه‌های فتوسنتزی، بهره‌وری گیاه و صفات بیوشیمیایی میوه را نشان داد که نشان‌دهنده پاسخ‌های فیزیولوژیکی هماهنگ تحت تیمارهای اعمال شده بود. نتایج نشان داد که کنسرسیوم سیانوباکتری‌های حاکی دی‌ازوتروف دارای خواص کود زیستی بود که می‌تواند به طور مؤثر در تولید گوجه‌فرنگی مورد استفاده قرار گیرد (Hakkoum et al., 2025). Chamizovet et al. (2018) دو گونه سیانوباکتری (*Phormidium*

ambiguum و *Scytonema javanicum*) را در انواع خاک لومی، لومی شنی، ماسه لومی و انواع خاک شنی تلقیح کردند. پس از ۹۰ روز تلقیح نتایج نشان دادند محتوای کل آگزوپلی ساکارید و مقاومت به نفوذ خاک با *P. ambiguum* بهبود یافت، در حالی که کل محتوای آلی کربن و نیتروژن با *S. javanicum* با سطوح متغیر در انواع مختلف خاک افزایش یافت. Lal et al., (2022) با مطالعه تأثیر باکتری سودوموناس علیه بیماری‌های خاکزاد و غده‌زایی سیب زمینی نشان دادند که این جدایه‌های سودوموناس (pf14) راندمان حل‌کنندگی فسفر بالاتری داشته است. در شرایط مزرعه، فرمولاسیون Pf14 بر پایه تالک، ویژگی‌های زراعی سیب‌زمینی را بهبود بخشید و شدت بیماری را تا ۶۷/۵۹ درصد مهار کرد. همچنین بالاترین عملکرد غده (۲۱/۹۰ تن در هکتار) را با افزایش ۱۵/۳۸ درصد نسبت به تیمار شاهد ثبت کرد.

امروزه، کشاورزی یکی از مهمترین دلایل آلودگی محیط زیست است که با تولید بیشتر مواد غذایی، رشد تقاضای جمعیت جهان را تسریع کرده است. سازمان بهداشت جهانی (WHO) تخمین زده است که تولید مواد غذایی جهان در سال ۲۰۲۹، باید ۵۰ درصد افزایش یابد (Chittora et al., 2020). شیوه‌های فناوری سبز با کاربرد سیانوباکتری‌ها در کشاورزی، خطر استفاده از کودهای شیمیایی در کشاورزی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، یکی از مهمترین مزایای کودهای زیستی مبتنی بر سیانوباکتری‌ها، توانایی آنها در افزایش کربن آلی خاک است، مزیتی که با کودهای شیمیایی قابل دستیابی نیست (Just et al., 2024) و مزایای دیگری مانند ترسیب مداوم عناصر غذایی در طول مراحل رشد گیاه، تأمین مواد آلی، کاهش فرسایش خاک، جلوگیری از آبخوبی عناصر غذایی و حفظ ساختمان و حاصلخیزی خاک را به همراه دارند (Chamizo et al., 2019; Kholssi et al., 2022). مطالعات تجربی در مورد ارتباط بین سیانوباکتری‌ها و محصولات مهم زراعی نتایج امیدوارکننده‌ای به همراه داشته است. بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف ارزیابی اثر عصاره سیانوباکتریایی و تلقیح کود زیستی سیانوباکتری بومی خاک (*Anabaena* sp. و *Nostoc* sp.)، بر رشد و عملکرد؛ صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و تغذیه‌ای؛ و کیفیت غده‌چه سیب‌زمینی در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. این مطالعه به منظور بررسی رشد سیب‌زمینی، عملکرد غده‌چه و حاصلخیزی خاک با استفاده از این سیانوباکتری نسبت به شاهد انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش

کشت و جداسازی سویه‌های سیانوباکتری

برای جداسازی دو سویه سیانوباکتری *Anabaena* sp. و *Nostoc* sp. از کشت‌های خاک شالیزار شمال ایران با استفاده از رقت سریالی و کشت مکرر رو محیط کشت جامد BG11₀ استفاده شد (Rippka et al., 1979). این محیط کشت شامل (در ۱۰۰ میلی‌لیتر) $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ (۰/۴ گرم)، $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (۰/۷۵ گرم)، $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (۰/۳۶ گرم)، Na_2CO_3 (۰/۲ گرم)، Na_2EDTA (۰/۰۱ گرم)، اسید سیتریک (۰/۰۶ گرم)، فریک آمونیوم سترات (۰/۰۶ گرم) و محلول عناصر ریز مغذی بود (Rippka et al., 1979). محلول عناصر ریز مغذی شامل H_3BO_3 (۰/۶۱ میلی‌گرم)، $MnSO_4 \cdot H_2O$ (۱۶۹ میلی‌گرم)، $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (۲۸۷ میلی‌گرم)، $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (۲/۵ میلی‌گرم)، $(NH_4)_6 Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ (۱۲/۵ میلی‌گرم) و $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ (۱۵/۵ میلی‌گرم) بود. کشت‌ها تحت شرایط کنترل شده در دمای 20 ± 2 درجه سلسیوس، با شدت نور ۶۰ فوتون بر متر مربع بر ثانیه، چرخه روشنایی/تاریکی ۸/۱۶ ساعت و هوادهی مداوم توسط پمپ هوایی نگهداری شدند (شکل ۱). جدایه‌های تک‌کشتی از طریق انتقال‌های متوالی به محیط کشت جامد تازه بدست آمدند. سپس مقداری از کلنی خالص در کشت جامد به ارلن‌های ۱۰۰ میلی‌لیتری حاوی محیط کشت مایع (BG11₀) منتقل شده (شکل ۱) و به مدت سه هفته در اتاقک رشد قرار داده شدند (Johansson and Bergman, 1994). برای شناسایی جدایه‌ها به روش مورفولوژیک، با تهیه لام نیمه دائمی از کلنی‌ها (شکل ۱) و با استفاده از میکروسکوپ نوری (Xiamen, Motiic BA210) و کلیدهای شناسایی سیانوباکتری‌ها، مشخصات میکروسکوپی و ماکروسکوپی نمونه‌های مورد نظر شناسایی و تعیین شدند (Komárek, 2013؛ John et al., 2003). برای تلقیح سیانوباکتری تازه به خاک گلدان جمعیت با روش چگالی نوری (OD_{750}) توسط اسپکتروفتومتر روی ۰/۵ تنظیم گردید.

ویژگی‌های فیزیولوژیکی سویه‌های سیانوباکتری

برخی از ویژگی‌های فیزیولوژیکی دو سویه *Anabaena* sp. و *Nostoc* sp. از جمله توانایی آنها در تولید ایندول-۳-استیک اسید (IAA)، تثبیت زیستی نیتروژن اتمسفری (N_2) و حل کردن فسفات ارزیابی شدند. توانایی تولید IAA هر سویه از طریق سنجش رنگ‌سنجی با معرف سالکوفسکی اندازه‌گیری شد. پس از انکوباسیون ۱۵ روزه، ۲ میلی‌لیتر از معرف سالکوفسکی با ۱ میلی‌لیتر از مایع رویی کشت دو سویه (در محیط کشت BG11₀ حاوی ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر L-تریپتوفان) مخلوط شد. محلول حاصل سپس به صورت اسپکتروفتومتری

برای تعیین کمیت محتوای IAA مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Glickmann and Dessaux, 1995). توانایی تثبیت نیتروژن با استفاده از یک سنجش کیفی با محیط مایع BG110 (بدون نیتروژن) اندازه‌گیری شد. رشد سویه‌ها برای بررسی توانایی آنها در تثبیت نیتروژن جوی (N_2) تحت کنترل بود (Mazhar and Hasnain, 2011). قدرت حل‌کنندگی فسفات نامحلول با استفاده از یک سنجش کیفی ارزیابی شد. سویه‌ها روی ظروف پتری آگار BG110 حاوی ۰/۳ درصد (وزنی/حجمی) تری کلسیم فسفات به عنوان منبع فسفات نامحلول کشت داده شدند. سپس ظروف پتری به مدت ۱۵ روز در دمای 26 ± 2 درجه سانتیگراد گرماگذاری شدند. حل شدن فسفات با ظهور هاله‌های شفاف در اطراف کلونی‌های سیانوباکتری نشان داده شد که نشان‌دهنده انحلال تری کلسیم فسفات به شکل محلول است (Yandigeri et al., 2011).



شکل ۱: از سمت چپ تصویر، کشت اولیه خاک برای جداسازی سیانوباکتری، کشت مایع و شناسایی زیر میکروسکوپ (بالا سویه نوستوک و پایین آنابنا).

تولید زیست توده و تهیه عصاره سیانوباکتری

تولید زیست توده در یک سیستم بسته و استریل درون ارلن مایر دو لیتری حاوی محیط کشت مایع BG110 انجام شد (Massey and Davis, 2023). زیست توده حاصل شده از دو سویه بصورت مخلوط برای خشک کردن انجمادی در نظر گرفته شد قبل از آن با آب مقطر استریل چندبار شسته شدند، و سپس برای تهیه عصاره، محلول به مدت ۳ دقیقه تحت فرآیند اولتراسونیک با دامنه ۴۰ درصد به مدت ۱۵ دقیقه قرار گرفت (Branson Digital Sonifier SFX 150). عصاره‌ها به مدت ۱۰ دقیقه با سرعت ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد و محلول‌های رویی تا زمان استفاده در یک محفظه سرد با دمای ۴ درجه سانتیگراد نگهداری شدند. از حلال آب مقطر برای تهیه عصاره استفاده گردید. عصاره ذخیره شده در زمان مصرف برای محلول‌پاشی در آب مقطر استریل رقیق شد (Toribio et al., 2021). عصاره تهیه شده دارای قابلیت هدایت الکتریکی (EC) ۱۰/۷ دسی‌زیمنس بر متر و pH برابر ۶/۱۱ داشت.

آماده‌سازی بستر کشت در گلخانه، نمونه‌برداری خاک و تجزیه فیزیکی و شیمیایی

خاک بستر گلخانه قبل از استفاده از کودهای مرسوم نمونه‌برداری شد و در هوا خشک و الک (کمتر از ۲ میلی‌متر) شد. تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک با روش‌های مرسوم در آزمایشگاه انجام گردید (امامی، ۱۳۷۵؛ Thomas, 1996). بافت خاک لومی رسی (شامل ۳۰ درصد رس، ۲۴ درصد سیلت و ۴۶ درصد شن) بود. خاک بستر گلخانه دارای pH کمی قلیایی (۷/۲)، قابلیت هدایت الکتریکی کم (۰/۶۱ دسی‌زیمنس بر متر)، محتوای کربن آلی خوب (۲/۲۴ درصد)، نیتروژن کل (۰/۲۱ درصد)، فسفر قابل جذب زیاد (۱۱۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، پتاسیم قابل جذب (۸۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و سدیم (۰/۳۲ میلی‌گرم بر لیتر) بود. قبل از کشت مقدار ۲۰ کیلوگرم کود دامی پوسیده، ۱۰۰ گرم کود اوره و ۱۰۰ گرم گوگرد معدنی در متر مربع در خاک بستر گلخانه مورد استفاده قرار گرفت سپس برای ضدعفونی خاک از روش نور خورشید (Solarization) و پلاستیک گذاری به مدت یک ماه انجام شد.

اجرای طرح آزمایشی، اعمال تیمارها و کاشت گیاهچه

این پژوهش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با چهار تیمار (۱- شاهد (بدون تلقیح)، ۲- تلقیح ریشه با سیانوباکتری، ۳- محلول‌پاشی عصاره سیانوباکتری و ۴- تلقیح ریشه با سودوموناس پوتیدا) در سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای در نجف آباد اصفهان (E 51°23' 9.28")

"N 32°34'34.17" انجام گردید. گیاهچه‌های سیب زمینی (رقم سانته) از آزمایشگاه کشت بافت اصفهان (شرکت پویا بذر سبز سپاهان) تهیه گردید و به مدت ۱۴ روز جهت سازگاری در گلخانه نگهداری شدند. قبل از کاشت، بستر کشت بصورت بلوک شامل پشته‌ای به طول ۱۰ متر و عرض ۱/۲ متر پیاده‌سازی شد. هر واحد آزمایشی شامل یک قطعه پشته به عرض ۱/۲ و طول یک متر بوده که فاصله گیاهچه‌ها بین ردیف ۲۰ سانتی‌متر و روی ردیف‌ها ۷ سانتی‌متر با تراکم ۳۰ بوته در متر مربع در نظر گرفته شد. به منظور حذف اثر حاشیه، بین تیمارها دو ردیف و بین بلوک‌ها یک متر فاصله گذاشته شد. گیاهچه‌های سیب‌زمینی به مدت ۲۰ دقیقه در سوسپانسیون مخلوط دو سیانوباکتری تهیه شده و باکتری سودوموناس تلقیح شد و سپس در محل مربوط به تیمار روی ردیف کاشته شدند. عصاره سیانوباکتری با غلظت ۵ در هزار طی دو مرحله به فاصله ۱۵ و ۳۰ روز بعد از کاشت محلول‌پاشی شد. مراقبت‌های زراعی معمول در حین دوره کشت در گلخانه شامل کنترل دما و رطوبت نسبی، آبیاری به روش قطره‌ای (تیپ)، مبارزه با علف‌های هرز به صورت فیزیکی انجام شد.

اندازه‌گیری صفات رشد، عملکرد و جذب عناصر غذایی گیاه

در اواخر دوره رشد، ۱۳ هفته پس از کاشت، اندازه‌گیری صفات رشدی مانند ارتفاع بوته، تعداد برگ، شاخص سطح برگ، وزن تر و خشک اندام هوایی اندازه‌گیری گردید و سپس قطع کامل اندام هوایی گیاه (سرزنی) در همه تیمارها انجام شد. پس از یک هفته، تعداد کل غده‌چه‌های در متر مربع برداشت شده از یک تیمار شمارش و توزین شد. سپس کیفیت غده‌چه‌های برداشت شده از لحاظ اندازه بر مبنای اندازه بزرگ‌تر از ۲۵ میلی‌متر، اندازه بین ۱۵-۲۵ میلی‌متر و اندازه کوچک‌تر از ۱۵ میلی‌متر درجه‌بندی و توزین شدند (حسینی و همکاران، ۱۳۸۶). اندازه‌گیری شاخص کلروفیل برگ با استفاده از کلرفیل سنچ مینولتا مدل SPAD502 و اندازه‌گیری شد (مجیدی، ۱۳۹۳). به منظور بررسی تأثیر تیمارها بر جذب عناصر غذایی، تجزیه برگ گیاه انجام شد، برای این منظور نمونه‌ها توسط آسیاب برقی پودر گردیدند. جهت تهیه عصاره، یک گرم از نمونه‌های پودر شده ریشه و اندام هوایی در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد به روش خشک‌سوزانی خاکستر شده و با استفاده از اسید کلریدریک دو نرمال عصاره‌گیری شدند. عنصر نیتروژن به روش هضم تر با استفاده از روش کج‌لدال (۰/۱ گرم از نمونه آزمایشی توزین و به همراه اسید سولفوریک غلیظ در دمای ۳۶۰ درجه سانتیگراد به همراه کاتالیزور هضم شده و سپس درصد نیتروژن به کمک دستگاه کج‌لدال اتوماتیک ۳۲۰۰) اندازه‌گیری شد (Goos, 1995)، مقدار آهن و روی به وسیله دستگاه جذب اتمی (Kalra, 1997)، پتاسیم به وسیله فلیم فتومتر (Kalra, 1997) و فسفر بوسیله اسپکتروفتومتر (Kalra, 1997) اندازه‌گیری شدند.

تجزیه و تحلیل آماری

به منظور بررسی آماری نتایج حاصل از داده‌های پژوهش، ابتدا پیش شرط‌های تجزیه واریانس شامل همگن بودن واریانس خطا و توزیع نرمال باقیمانده‌ها بررسی و در صورت لزوم، تبدیل داده‌ها با روش‌های معمول انجام گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS (ver. 24) و در پایان مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

یافته‌های پژوهش و بحث

ویژگی‌های سویه‌های سیانوباکتری

مورفولوژی دو سویه زیر میکروسکوپ مشاهده شد و ویژگی‌های رشته‌ای سلول این سیانوباکتری‌ها همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مربوط به دو سویه آنابنا و نوستوک می‌باشد (John et al., 2003). آنابنا، سیانوباکتری‌های رشته‌ای و اغلب بصورت دسته‌ای بوده برخی در توده‌های ژلاتینی بی‌شکل قرار می‌گیرند. اغلب ایجاد لایه ژلاتینی توسعه یافته‌ای بر سطح بستره مرطوب می‌نمایند. تریکوم‌ها تک ردیفه و در غالب موارد دانه تسبیحی بوده، مستقیم، خمیده یا بصورت مارپیچ هستند که ممکن است بصورت غلافدار یا فاقد غلاف مشاهده گردند. سلول‌ها اندکی متورم و در تعدادی از گونه‌ها استوانه‌ای شکل‌اند. اکینت‌ها پاراهتروسیتیک بوده، مدور، تخم مرغی یا استوانه‌ای و در پاره‌ای از موارد به شکل بیضی کشیده‌اند و در مجاورت هتروسیست یا بصورت فاصله‌دار واقع شده‌اند (Komárek, 2013). نوستوک، دارای رشته‌های مارپیچ نامنظم و بصورت توده‌ای فشرده یا غیر فشرده می‌باشند، دارای غلاف‌هایی در اطراف تریکوم‌ها هستند اما معمولاً غلاف‌ها تنها در حاشیه کلنی یا در کلنی‌های جوان قابل مشاهده‌اند. غلاف‌ها عریض یا موسیلاژی ظریف و در ارتباط با لایه موسیلاژی، به شکل کلنی بوده گاه به رنگ زرد-قهوه‌ای مشاهده می‌گردند. سلول‌ها استوانه‌ای شکل، بشکله‌ای شکل و تقریباً مدورند (تریکوم‌های تسبیح مانند‌ی ایجاد می‌کنند) هتروسیست‌ها منفرد بوده و در تریکوم‌ها بصورت میانی یا انتهایی تمایز یافته‌اند.

اکینت‌ها آپوهتروسیتیک بوده، بیضوی کوتاه و اندکی بزرگتر از سلول‌های رویشی هستند، تقریباً تمام سلول‌های مابین هتروسیت‌ها به مرور به سمت هتروسیت‌ها بصورت اکینت متمایز می‌شوند (Komarek et al., 2014).

ارزیابی ویژگی‌های فیزیولوژیکی خاص نشان داد که هر دو سیانوباکتری رشته‌ای هتروسیت‌دار پتانسیل قابل توجهی برای افزایش حاصلخیزی خاک و افزایش رشد گیاه دارند. هر دو سویه توانایی‌های قابل توجهی در تثبیت نیتروژن اتمسفری، حل‌کنندگی تری‌کلسیم فسفات و تولید هورمون گیاهی ایندول-۳-استیک اسید (IAA) نشان دادند (جدول ۱). سویه نوستوک در مقایسه با آنابنا قابلیت‌های بالاتری در سنتز IAA و حل‌کنندگی فسفات نامحلول نشان داد و سویه آنابنا توانایی تثبیت نیتروژن بیشتری نسبت به نوستوک نشان داد. هاکووم و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از سیانوباکتری، بهبود قابل توجهی در خواص فیزیکوشیمیایی خاک مشاهده کردند. تیمارهای سیانوباکتری منجر به افزایش قابل توجه کربن آلی و محتوای عناصر غذایی پرمصرف شد. قابل توجه‌ترین پیشرفت‌ها در خاک‌هایی مشاهده شد که با ترکیبی از دو گونه آنابنا و نوستوک همراه با ۵۰ درصد کمپوست یا ۵۰ درصد کودهای NPK تیمار شده بودند. این تغییرات در ریزوسفر گیاه، بینش ارزشمندی در مورد توانایی سیانوباکتری‌ها در کاهش کمبود عناصر غذایی و افزایش رشد محصول ارائه می‌دهد. کاهش pH خاک ممکن است به ترشح مواد خارج سلولی مانند پلی‌ساکاریدها، پپتیدها و اسیدهای آلی نسبت داده شود که در خنثی‌سازی خاک نقش دارند (El-Ayouty ET AL., 2004). سیانوباکتری‌ها می‌توانند نیتروژن هوا را تثبیت کنند و فراوانی آنها در برنجزارها اهمیت بسیاری دارد، از آنجایی که اثبات شده است که نزدیک ۴۰ درصد نیتروژن تثبیت شده سیانوباکتری‌ها توسط گیاه برنج مصرف می‌شود (Vaishampayan et al., 1998). گزارشات متعددی تولید فیتوهورمون IAA توسط سویه‌های سیانوباکتریایی آزادزی و همزیست را نشان داده‌اند. سرگیوا و همکاران (Sergeeva et al., 2002) نیز در بررسی‌های خود با سویه‌های *Nostoc* آزادزی و همزیست آزاد شدن IAA را گزارش دادند.

جدول ۱: مقادیر فعالیت حل‌کنندگی فسفات، تولید ایندول استیک اسید و تثبیت زیستی نیتروژن دو سویه سیانوباکتری

سیانوباکتری	فسفر معدنی (میلی‌گرم بر لیتر)	تولید ایندول استیک اسید (میلی‌گرم بر لیتر)	توانایی تثبیت نیتروژن (میکروگرم نیتروژن در گرم محیط کشت)
<i>Anabaena</i> sp.	۱۱۷/۲	۱۰/۸	۳۸/۵۶
<i>Nostoc</i> sp.	۱۴۵/۶	۱۴/۳	۱۶/۹

اثر تیمارها بر خصوصیات رشدی گیاه

نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده سیب‌زمینی در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر تیمار آزمایش بر وزن تازه اندام هوایی، سطح برگ، وزن کل غده‌چه‌ها، تعداد غده‌چه‌های بزرگ (بزرگ‌تر از ۲۵ میلی‌متر)، تعداد غده‌چه‌های متوسط (بین ۱۵-۲۵ میلی‌متر)، وزن غده‌چه‌های متوسط، کلروفیل (SPAD) و غلظت نیتروژن برگ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود ($p < 0.05$). اثر تیمار آزمایش بر بقیه صفات اندازه‌گیری شده از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نشان نداده است.

نتایج نشان داد که همه تیمارها پارامترهای رشد گیاهان سیب‌زمینی را در مقایسه با گیاهان تیمار نشده افزایش دادند. نتایج نشان داد که بیشترین وزن تازه اندام هوایی در تیمار شاهد مشاهده شد که از لحاظ آماری با تیمار تلقیح سیانوباکتری و محلول‌پاشی عصاره سیانوباکتری تفاوت معنی‌داری نداشت (شکل ۲). این نتایج نشان می‌دهد استفاده از تیمارهای سیانوباکتری و عصاره آن بر رشد رویشی گیاه در این شرایط تأثیری نداشته است. با این حال ارتفاع بوته یا طول ساقه (۴۸/۱۷ سانتی‌متر) و قطر ساقه اصلی (۶/۱۲ میلی‌متر) در تیمار محلول‌پاشی عصاره سیانوباکتری بیشتر از تیمار شاهد به ترتیب ۴۶/۴۸ سانتی‌متر و ۵/۹۴ میلی‌متر بوده است که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نشان نداده است. محتوای ماده خشک در برگ‌ها به موازات فرآیند غده‌زایی در تمام تیمارها کاهش می‌یابد و نسبت کاهش در مرحله رشد غده از ۳ تا ۱۸ درصد متغیر است؛ که با انتقال مجدد مواد معدنی از برگ‌ها به غده‌چه‌ها در پایان دوره رویشی توضیح داده می‌شود (Kolbe and Stephan-Beckmann, 1997). طبق پژوهش Lee and Ryu (2021)، استفاده از جلبک سبز یوکاریوتی (کلرلا ولگاریس) به عنوان کود زیستی، وزن تر و خشک را افزایش داده و محتوای ماده خشک در برگ‌ها را افزایش می‌دهد.

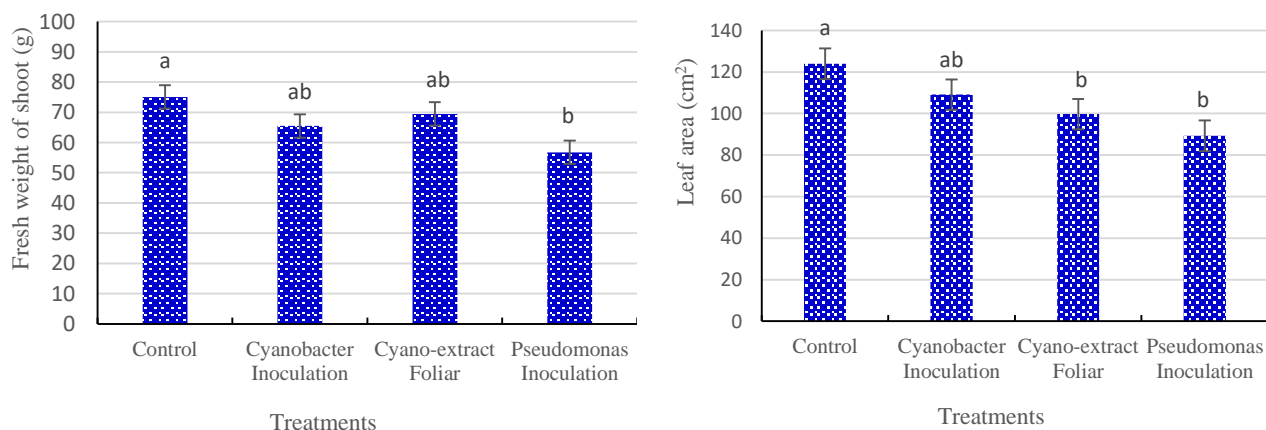
سطح برگ در تیمار شاهد بیشتر از تیمارهای آزمایشی نشان داد که با تیمار تلقیح ریشه با سیانوباکتری از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری نشان نداده است. اگر تیمار میکروبی، دینامیک منبع-مخزن را به سمت سیستم‌های ریشه‌ای یا شروع غده تغییر دهد، رشد شاخه و سطح برگ ممکن است به عنوان یک تعامل کاهش یابد. سیانوباکتری‌ها و عصاره‌های آنها اغلب به عنوان محرک زیستی استفاده می‌شوند و تنش غیرزیستی را کاهش داده و رشد را در بسیاری از محصولات کشاورزی افزایش می‌دهند. با این حال، تحت شرایط خاص،

آنها می‌توانند اثرات خنثی یا منفی داشته باشند، به خصوص اگر عدم تعادل عناصر غذایی بویژه ریزمغذی‌ها رخ دهد و یا تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) توسط گیاه به طور کافی مدیریت نشود و باعث ایجاد پاسخ‌های تنش شود که منابع را حفظ کرده و گسترش برگ را کاهش می‌دهد (Chabili et al., 2024). گونه‌های سودوموناس شامل سویه‌هایی هستند که از طریق هورمون‌های گیاهی (اکسین، سیتوکینین)، تولید سیدروفور و سرکوب بیماری، رشد را تقویت می‌کنند. محققان نشان دادند که تقریباً ۵۰ درصد از سودوموناس‌های ریزوسفر سیب‌زمینی در شرایط آزمایشگاهی سیانید تولید می‌کنند و فرضیه‌ای مبنی بر اینکه رشد گیاه سیب‌زمینی در خاک‌های با تناوب کوتاه سیب‌زمینی توسط تولید میکروبی سیانید در ریزوسفر کاهش می‌یابد (Lal et al., 2022; Bakker and Schippers, 1987). سیانوباکتری‌ها و سودوموناس‌ها می‌توانند به طور غیرمستقیم بر تعادل هورمون‌های گیاهی تأثیر بگذارند برخی از عصاره‌های سیانوباکتری حاوی القاکنده‌هایی هستند که تغییراتی در سیگنال‌دهی سیتوکینین‌ها، اکسین‌ها، اسید آبسزیک یا اتیلن هستند. افزایش اتیلن تحت تعامل میکروبی می‌تواند مانع از گسترش برگ شود (Santini et al., 2021).

جدول ۲: نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) متغیرهای اندازه‌گیری شده در تیمارهای آزمایشی در کشت غده‌چه‌های سیب‌زمینی

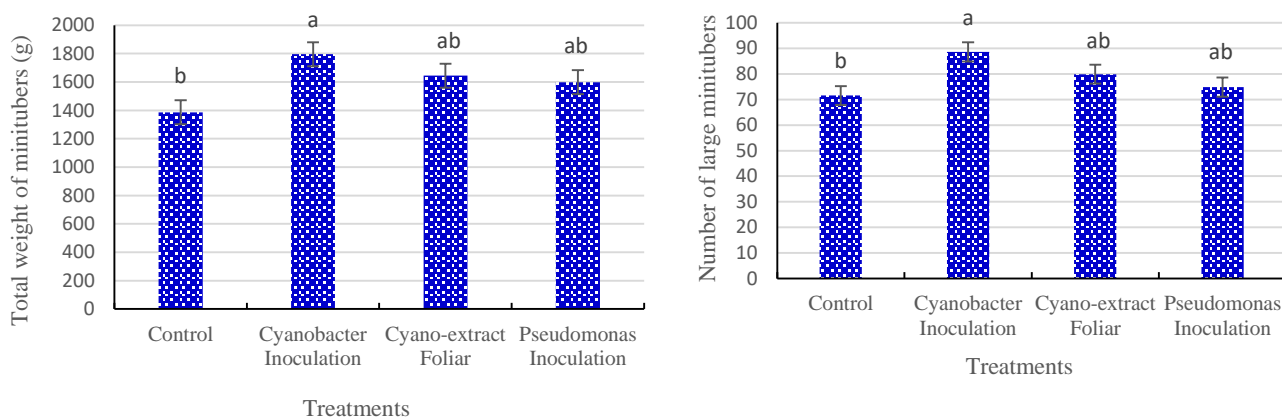
متغیرها	بلوک	تیمار	اشتباه آزمایشی	ضریب تغییرات
درجه آزادی	۲	۳	۴	-
طول ساقه (ارتفاع بوته)	۲۰/۰۲	۲۳/۰۷	۲۲/۷۹	۱۰/۴
قطر ساقه اصلی	۰/۵۳	۰/۰۶	۰/۲۹	۹/۱
وزن تازه اندام هوایی	۴۲/۳۱	۱۷۸/۴*	۴۳/۱۵	۹/۸
وزن خشک اندام هوایی	۰/۰۸	۰/۴۱	۰/۲۴	۱۴/۸
تعداد برگ	۰/۲۵	۰/۹۵	۰/۳۸	۶/۷
سطح برگ	۳۹/۸۱	۶۵۱/۳*	۱۰۱/۱۰	۹/۵
وزن کل غده‌چه‌ها	۶۵۷۵۴/۸	۸۵۳۴۰/۱*	۳۲۴۶۷/۱	۱۱/۲
تعداد کل غده‌چه‌ها	۳۰۸۶/۰	۱۲۰۳/۵	۶۱۰/۱	۱۴/۱
تعداد غده‌چه‌های بزرگ	۱۰۳/۵	۱۶۳/۸*	۴۶/۷۵	۸/۶
وزن غده‌چه‌های بزرگ	۱۵۴۵۸/۲	۶۳۷۰/۱۰	۱۱۰۹۸/۲	۷/۹
تعداد غده‌چه‌های متوسط	۲۹۰/۶	۸۵۹/۵*	۱۴۲/۷	۲۲/۵
وزن غده‌چه‌های متوسط	۱۱۱۸۶/۱	۱۴۶۹۵/۶*	۱۷۱۷/۱	۲۰/۱
تعداد غده‌چه‌های کوچک	۱۱۶۵/۳	۱۰۶/۵	۳۵۱/۲	۲۱/۶
وزن غده‌چه‌های کوچک	۲۲۱۸/۹	۵۴۴/۷	۲۵۴/۷	۲۳/۷
کلروفیل (SPAD)	۰/۵۸	۴/۴۵*	۰/۶۲	۱۲/۵
غلظت نیتروژن برگ	۰/۰۱	۱/۰۸*	۰/۳۲	۱۲/۳
غلظت فسفر برگ	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۶/۰
غلظت پتاسیم برگ	۰/۰۵	۰/۲۱۸	۰/۳۲	۹/۲
غلظت آهن برگ	۶۹۵۲/۶	۲۲۸۸/۸	۳۲۰۰/۲	۱۱/۸
غلظت روی برگ	۳/۰۰	۱۱/۴۱	۵/۳۸	۴/۸

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد



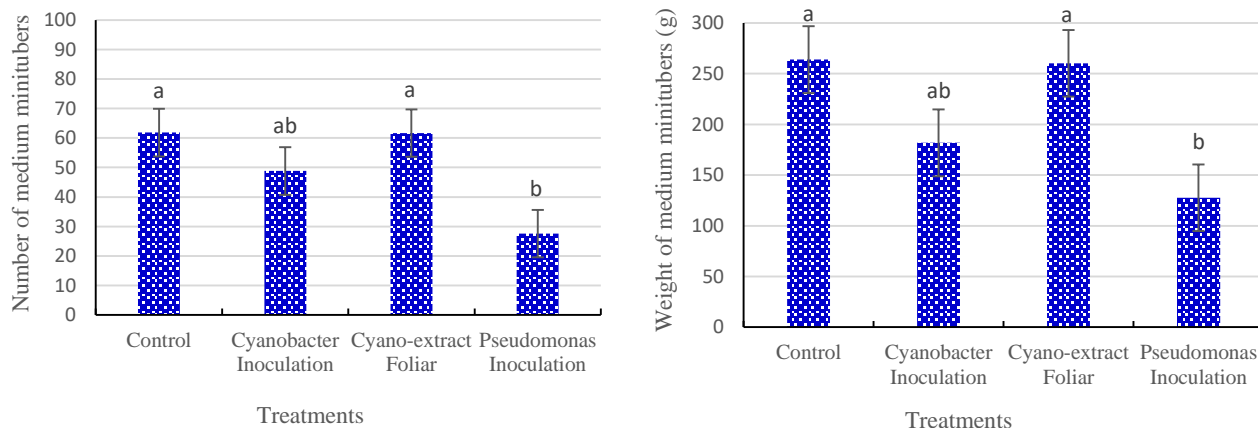
شکل ۲: اثر تیمارهای آزمایشی بر وزن تازه اندام هوایی (چپ) و سطح برگ (راست) سیب‌زمینی در شرایط گلخانه‌ای

نتایج نشان داد که بیشترین وزن کل غده‌چه‌ها در تیمار تلقیح ریشه با سیانوباکتری مشاهده شد که باعث افزایش ۲۴/۴۶ درصد افزایش وزن کل غده‌چه‌ها نسبت به تیمار شاهد شد و این تیمار از لحاظ آماری با تیمار محلول پاشی عصاره سیانوباکتری و تلقیح ریشه با سودوموناس پوتیدا تفاوت معنی‌داری نشان نداد (شکل ۳). در تعداد غده‌چه‌های بزرگ (قطر بیش از ۲۵ میلی‌متر) نیز تیمار تلقیح سیانوباکتری (۸۸/۶ عدد) افزایش ۲۳/۸۵ درصد نسبت به تیمار شاهد (۷۱/۵ عدد) نشان داد (شکل ۳). وزن غده‌چه‌های بزرگ (۱۵۶۹/۰ گرم) هم در این تیمار نسبت به تیمار شاهد (۱۲۸۰/۰ گرم) ۲۲/۵۸ درصد افزایش نشان داده است که این تفاوت از لحاظ آماری معنی‌دار نبود.



شکل ۳: اثر تیمارهای آزمایش بر وزن کل غده‌چه‌ها (چپ) و تعداد غده‌چه‌های بزرگ (راست) سیب‌زمینی در شرایط گلخانه‌ای

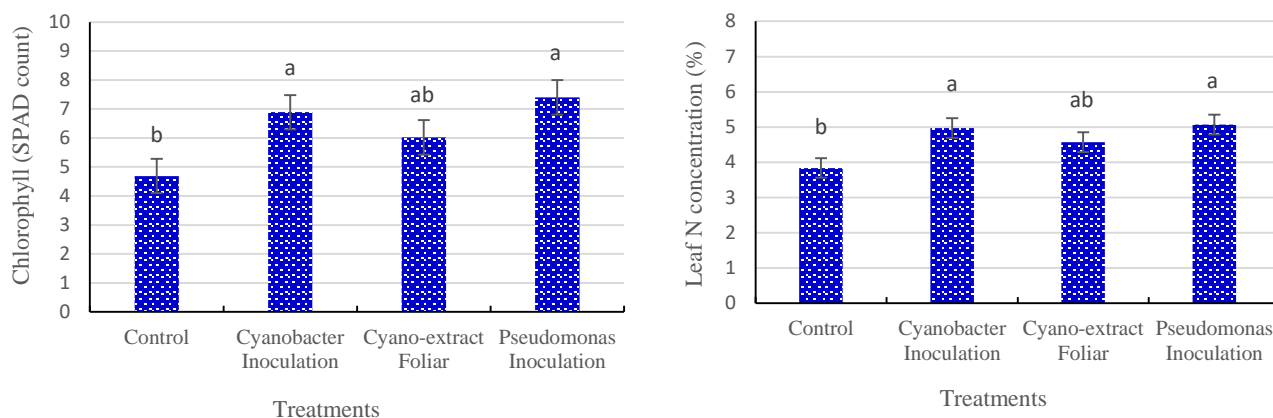
نتایج نشان داد که تعداد و وزن غده‌چه‌های متوسط (با قطر ۱۵-۲۵ میلی‌متر) در تیمار شاهد (به ترتیب ۶۱/۸۶ و ۲۶۳/۹ گرم) و تیمار محلول پاشی عصاره سیانوباکتری (به ترتیب ۶۱/۶۶ و ۲۶۰/۲ گرم) بیشتر بود که از لحاظ آماری با تیمار تلقیح سودوموناس تفاوت معنی‌دار نشان داد (شکل ۴). تعداد و وزن غده‌چه‌های کوچک (با قطر کمتر از ۱۵ میلی‌متر) در بین تیمارها تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد ولی با این حال، تیمار تلقیح ریشه با سیانوباکتری نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۲۵/۳۳ و ۴۰/۶۱ درصد افزایش نشان داد.



شکل ۴: اثر تیمارهای آزمایش بر تعداد غده‌چه‌های متوسط (چپ) و وزن غده‌چه‌های متوسط (راست) سیب‌زمینی در شرایط گلخانه‌ای

جوامع میکروبی خاک برای سلامت و بهره‌وری گیاه حیاتی هستند. کاربرد سیانوباکتری‌ها یا عصاره آنها برای محصولات مختلف و افزایش عملکرد آنها در پژوهش‌های مختلف بیان شده است (Hakkoum et al., 2025; Hidangmayum and Sharma, 2017; Chabili et al., 2025). سیانوباکتری‌ها و متابولیت‌های آنها می‌توانند به عنوان محرک‌های زیستی عمل کنند و جذب عناصر غذایی، ظرفیت آنتی‌اکسیدانی و مقاومت در برابر تنش را در شرایط غیربهبوده افزایش دهند، که می‌تواند فتوسنتز تاج‌پوشش گیاه را حفظ کرده و در نتیجه در حجیم شدن غده موثر باشند (Santini et al., 2021). تشکیل غده توسط عوامل مختلف خارجی و داخلی از جمله نور، غلظت اکسیژن، در دسترس بودن فتوسنتز، فیتوکروم‌ها، فاکتورهای رونویسی و در دسترس بودن متابولیت‌ها کنترل می‌شود (Singh et al., 2023).

نتایج نشان داد که میزان عدد SPAD قرائت شده در تیمار تلقیح سودوموناس و تلقیح سیانوباکتری بیشتر بود و نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۵۷/۶ و ۴۲/۵ درصد افزایش نشان داد. کودهای زیستی رشد گیاه و افزایش عملکرد محصول، ترشح ویتامین‌ها و جذب عناصر غذایی مانند نیتروژن، فسفر و پتاسیم را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، این عناصر غذایی رشد سلول، گسترش برگ‌ها و انتقال بین اندام‌های منبع و مخزن را بهبود می‌بخشد (Lee and Ryu, 2021). علاوه بر این، این عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم انتشار دی‌اکسید کربن (CO₂) را از طریق مزوفیل برگ تسهیل می‌کنند، که نقش مهمی در فتوسنتز و محتوای کلروفیل دارد (Torabian et al., 2021). برای غلظت نیتروژن برگ، نتایج نشان داد که در تیمار تلقیح سودوموناس و تلقیح سیانوباکتری بیشتر بود و نسبت به تیمار شاهد به ترتیب ۳۲/۰ و ۲۹/۴ درصد افزایش نشان داد که با تغییرات قرائت کلروفیل (SPAD) مطابقت داشت. طبق پژوهش ووس و وندریپوتن (Vos and vander-Putten, 1998)، با وجود تفاوت‌های زیاد در میزان دسترسی به نیتروژن، میزان اشباع نوری فتوسنتز در طول تیمارهای نیتروژن در آزمایش گلدان سیب‌زمینی نسبتاً پایدار ماند، که نشان می‌دهد سیب‌زمینی سطح برگ خود را به جای ظرفیت بیوشیمیایی خود برای مقابله با محدودیت نیتروژن تنظیم می‌کند. بنابراین، استراتژی‌های مدیریت نیتروژن در سیب‌زمینی باید گسترش برگ و توسعه سایه‌بان را در نظر بگیرند، نه فقط محتوای نیتروژن برگ را، تا رشد و عملکرد را بهینه کنند.



شکل ۵: اثر تیمارهای آزمایش بر قرائت کلروفیل با SPAD (چپ) و غلظت نیتروژن برگ (راست) سیب‌زمینی در شرایط گلخانه‌ای

غلظت پتاسیم در تیمار تلقیح سیانوباکتری بیشتر از بقیه تیمارها بود که نسبت به تیمار شاهد ۱۰/۹ درصد افزایش نشان داد که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری بین تیمارها در سطح احتمال ۵ درصد مشاهده نشد. پتاسیم در خاک بسیار فراوان است، اما به دلیل جذب قوی مواد معدنی، در دسترس بودن آن کم است. میکروارگانیسم‌ها نقش واسطه را برای تجمع و تنظیم این عنصر و اطمینان از انتقال آن به گیاه ایفا می‌کند (Berruti et al., 2015). بنابراین، پتاسیم باعث افزایش محتوای کلروفیل در برگ‌ها و سطح برگ می‌تواند شود (Torabian et al., 2021).

همبستگی خطی بین صفات

ضرایب همبستگی پیرسون نشان داد که (جدول ۳) طول ساقه با قطر ساقه، وزن تازه و خشک اندام هوایی همبستگی مثبت، قوی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) داشت و با غلظت نیتروژن برگ همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ($p \leq 0.05$) نشان داد. وزن تازه اندام هوایی با وزن خشک اندام هوایی همبستگی مثبت و با عدد کلروفیل (SPAD) و غلظت نیتروژن برگ همبستگی منفی، قوی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) داشت و با وزن غده‌چه‌های متوسط همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ($p \leq 0.05$) نشان داد. سطح برگ با تعداد غده‌چه متوسط همبستگی مثبت و با عدد کلروفیل (SPAD) همبستگی منفی و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ($p \leq 0.05$) نشان داد. تعداد کل غده‌چه‌ها با تعداد غده‌چه‌های متوسط و تعداد غده‌چه‌های کوچک همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) و با تعداد غده‌چه‌های بزرگ و وزن غده‌چه‌های متوسط همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ($p \leq 0.05$) نشان داد. عدد کلروفیل (SPAD) با غلظت نیتروژن برگ ($r=0.72^{**}$) همبستگی مثبت، قوی و معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد ($p \leq 0.01$) نشان داد و غلظت نیتروژن برگ با غلظت پتاسیم برگ ($r=0.66^*$) همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد ($p \leq 0.05$) نشان داد. در پژوهش جان‌محمدی و همکاران (Janmohammadi et al., 2016) نیز همبستگی بین عملکرد غده در سطح معنی‌داری یک درصد با ارتفاع بوته، تعداد ساقه، قطر ساقه

اصلی، عملکرد بیولوژیکی و تعداد غده در هر بوته به طور مثبت و معنی دار مشاهده گردید. همچنین، همبستگی مثبت بین صفات مرتبط با اندازه گیاه (ارتفاع بوته، تعداد ساقه، قطر ساقه اصلی و عملکرد بیولوژیکی) و محتوای نیتروژن مشاهده شد.

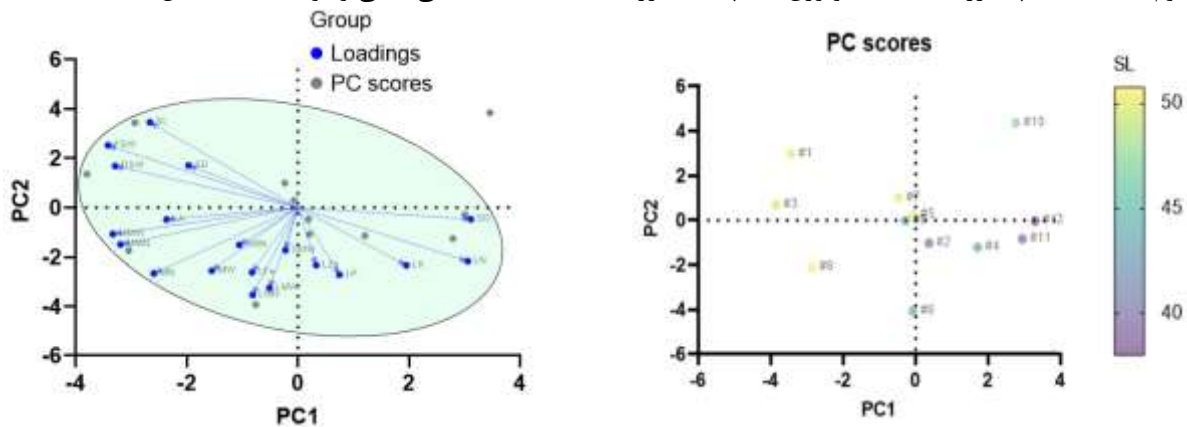
جدول ۳: ماتریس ضرایب همبستگی جفتی (r) بین صفات اندازه گیری شده در کشت غده‌چه‌های سیب‌زمینی

متغیرها	SL	SD	FSW	DSW	LA	MW	MN	LMN	MMN	MMW	SMN	SMW	SD	LN	LK	LFe
SL	۱															
SD	۰/۷۳**	۱														
FSW	۰/۸۱**	۰/۷۰**	۱													
DSW	۰/۷۴**	۰/۴۲	۰/۷۱**	۱												
LA	۰/۰۸	-۰/۱۴	۰/۳۴	۰/۴۲	۱											
MW	۰/۰۸	-۰/۰۵	۰/۲۷	۰/۴۰	۰/۴۰	۱										
MN	۰/۱۸	-۰/۲۲	۰/۴۸	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۸	۱									
LMN	-۰/۱۱	-۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۱۱	-۰/۰۵	۰/۶۱*	۰/۸۸**	۱								
MMN	۰/۲۰	-۰/۱۰	۰/۳۵	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۲۷	۰/۷۱**	۰/۲۷	۱							
MMW	۰/۳۲	-۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۹۲**	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۶۵*	۱						
SMN	۰/۱۷	۰/۳۱	۰/۰۶	۰/۲۳	۰/۰۶	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۱۴	۰/۱۶	۱					
SMW	-۰/۰۵	۰/۳۲	-۰/۱۳	۰/۰۳	-۰/۱۳	-۰/۰۰	۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۷۸**	۱				
SD	-۰/۲۵	-۰/۲۰	-۰/۱۶**	-۰/۳۷	-۰/۱۶**	-۰/۶۷**	-۰/۰۹	-۰/۰۹	-۰/۶۷**	-۰/۰۹	۰/۲۹	۰/۲۹	۱			
LN	-۰/۵۸*	-۰/۲۶	-۰/۷۴**	-۰/۷۰**	-۰/۴۴	-۰/۰۱	-۰/۱۶	-۰/۱۶	-۰/۳۷	-۰/۴۱	۰/۷۲**	۰/۲۲	۰/۲۲	۱		
LK	-۰/۴۳	-۰/۱۱	-۰/۳۱	-۰/۶۲*	-۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۳۸	۰/۰۵	۰/۳۷	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۳۷	۱	
LFe	-۰/۲۶	-۰/۰۱	-۰/۰۵	-۰/۱۸	-۰/۰۶	۰/۳۰	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۴۳	۰/۵۸*	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۳۵	۰/۳۷	۱

توضیحات: SL: طول ساقه، SD: قطر ساقه، FSW: وزن تازه اندام هوایی، DSW: وزن خشک اندام هوایی، LA: سطح برگ، MW: وزن کل غده‌چه، MN: تعداد کل غده‌چه، LN: تعداد غده‌چه، LMN: تعداد غده‌چه بزرگ، MMN: تعداد غده‌چه متوسط، MMW: وزن غده‌چه متوسط، SMN: تعداد غده‌چه کوچک، SMW: وزن غده‌چه کوچک، SD: کلروفیل (SPAD)، LN: نیتروژن برگ، LK: پتاسیم برگ، LFe: آهن برگ

تحلیل مؤلفه‌های اصلی یا تحلیل عاملی (PCA)

به منظور درک رابطه بین تیمارها و صفات اندازه‌گیری شده سیب‌زمینی، تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام شد. نتایج تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای متغیرها (صفات) نشان داد که مؤلفه‌های اصلی اول و دوم با مقادیر ویژه ۵/۹۶ و ۴/۸۷ به ترتیب ۲۹/۸ و ۲۴/۳ درصد از تغییرات ویژگی‌های محیطی را توجیه می‌کنند. این مقادیر ویژه هر چه بزرگتر باشند یعنی این مؤلفه‌ها اندازه و حجم بیشتری از داده‌ها را در اختیار داشته و اهمیت بیشتری دارند. در این پژوهش چهار مؤلفه اول، دوم، سوم و چهارم قادر به بیان ۷۶/۶ درصد از پراکندگی و واریانس داده‌ها هستند، بنابراین ۲۰ صفت اندازه‌گیری شده در این آزمایش به چهار مؤلفه اصلی تبدیل شدند. نتایج همبستگی متغیرها نیز نشان داد که مؤلفه اصلی اول با وزن تازه (۰/۸۷-) و خشک (۰/۸۲-) اندام هوایی و تعداد برگ (۰/۷۹) همبستگی قوی دارد. مؤلفه دوم با تعداد غده‌چه بزرگ (۰/۸۸-) و وزن غده‌چه‌های بزرگ (۰/۸۱-) همبستگی منفی و قوی داشت (شکل ۶).



شکل ۶: نمودارهای دوبعدی تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) از شاخص‌های رشد غده‌چه سیب‌زمینی تیمار شده با عصاره‌های زیستی سیانوباکتری‌ها و سودوموناس. داده‌ها قبل از تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی نرمال‌سازی شدند. متغیرهای بارگذاری شده شامل SL: طول ساقه، SD: قطر ساقه، FSW: وزن تازه اندام هوایی، DSW: وزن خشک اندام هوایی، LN: تعداد برگ، LA: سطح برگ، MW: وزن کل غده‌چه، MN: تعداد کل غده‌چه، LMN: تعداد غده‌چه بزرگ، MMN: تعداد غده‌چه متوسط، MMW: وزن غده‌چه متوسط، SMN: تعداد غده‌چه کوچک، SMW: وزن غده‌چه کوچک، SD: کلروفیل (SPAD)، LN: نیتروژن برگ، LK: پتاسیم برگ، LFe: آهن برگ با چهار تیمار شاهد (۱-۲-۳)، سیانوباکتری (۴-۵-۶)، عصاره سیانوباکتری (۷-۸-۹) و سودوموناس (۱۰-۱۱-۱۲) بودند.

در مولفه اول، در تیمارها (شکل ۶)، شاخص‌های قطر ساقه (SD)، تعداد برگ (LN)، پتاسیم برگ (LK)، فسفر برگ (LP)، روی برگ (LZn) و در مولفه دوم طول ساقه (SL)، وزن تازه (FSW) و خشک (DSW) اندام هوایی همبستگی مثبت داشتند، و این صفات ارتباط نزدیکی با یکدیگر داشتند. چابیلی و همکاران (Chabili et al., 2025) با بررسی اثرات محرک زیستی عصاره‌های زیستی سیانوباکتری‌ها و ریزجلبک‌های بر جوانه‌زنی بذر گندم، با تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) ارتباط بیشتر تیمارها را در غلظت کم (۰/۱ گرم در لیتر) با افزایش مثبت در جوانه‌زنی، قدرت رشد و پارامترهای بیومتریک نشان داد. این یافته‌ها در درجه اول بر فعالیت محرک زیستی ریزجلبک‌ها و سیانوباکتری‌های جدا شده از خاک به عنوان تیمار بذر و همچنین کاربرد عصاره‌های زیستی به عنوان ابزارهای پایدار برای افزایش جوانه‌زنی و قدرت بذر تأکید کردند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به طور کلی، سیانوباکتری می‌تواند به عنوان کودهای زیستی برای مدیریت سازگار با محیط زیست در کشت سیب‌زمینی و همچنین افزایش عملکرد قابل فروش توصیه شود. ارزیابی ویژگی‌های فیزیولوژیک نشان داد که هر دو سیانوباکتری رشته‌ای هتروسیست دار پتانسیل قابل توجهی برای افزایش حاصلخیزی خاک و افزایش رشد گیاه دارند. هر دو سویه توانایی‌های قابل توجهی در تثبیت نیتروژن اتمسفری، حل‌کنندگی تری‌کلسیم فسفات و تولید هورمون گیاهی ایندول-۳-استیک اسید (IAA) نشان دادند. مطالعه حاضر نشان داد که کاربرد سیانوباکتری و عصاره زیستی آن به عنوان محرک رشد گیاه، نسبت به کاربرد باکتری سودوموناس و تیمار شاهد بر رشد و عملکرد غده‌های سیب‌زمینی مؤثرتر است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که محلول‌پاشی عصاره سیانوباکتری‌ها طول و قطر ساقه، وزن خشک اندام هوایی، تعداد برگ، تعداد کل غده‌چه‌ها، غلظت فسفر آهن و روی برگ را نسبت به تیمارهای دیگر بیشتر افزایش داده است و بیشترین وزن کل غده‌چه‌ها در تیمار تلقیح ریشه با سیانوباکتری مشاهده شد. سیانوباکتری‌ها و عصاره‌های آنها اغلب به عنوان محرک زیستی استفاده می‌شوند و تنش‌های غیرزیستی را کاهش داده و رشد را در بسیاری از محصولات کشاورزی افزایش می‌دهند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که چنین فرمولاسیون‌هایی یک رویکرد مقرون به صرفه برای کشت گلخانه‌ای سیب زمینی ارائه می‌دهند و جایگزین پایداری برای مدیریت تلفیقی و بهینه کود هستند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه شهرکرد انجام شد. حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه شهرکرد، دانشکده کشاورزی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی اعظم خیراللهی نجف آبادی و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند. در کل مشارکت نویسندگان در مقاله به شکل زیر می‌باشد:

اعظم خیراللهی نجف‌آبادی: دانشجو؛ تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

صاحب سودائی مشائی: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

رحیم برزگر: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

صادق موسوی‌فرد: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

این مقاله به عنوان بخشی از یک پایاننامه کارشناسی ارشد با حمایت معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهرکرد، ایران، منتشر شده است. بنابراین، از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهرکرد به خاطر حمایت مالی و همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود. در ضمن، این پژوهش در گلخانه شخصی آقای نورمحمدی واقع در نجف آباد اصفهان و آزمایشگاه بیولوژی خاک دانشگاه شهرکرد انجام گردید. بنابراین، نگارندگان بر خود فرض می‌دانند از مدیریت محترم گلخانه، به خاطر کمک‌های بی‌دریغ‌شان در انجام کارهای تحقیقاتی و فراهم کردن بستر تحقیق، سپاسگزاری نمایند.

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

مجیدی، عزیز. (۱۳۹۳). استفاده از کلروفیل سنج مینولتا SPAD-502 برای برآورد غلظت نیتروژن برگ و پروتئین دانه در سه رقم گندم. پژوهش‌های خاک، ۲۸ (۲): ۲۴۵-۲۵۴. Doi: 10.22092/ijsr.2014.120333

امامی، عاکفه. (۱۳۷۵). روش‌های تجزیه گیاه. جلد اول. نشریه شماره ۹۸۲. موسسه تحقیقات خاک و آب، تهران، ایران.

حسنی، فرشید؛ درویشی، بابک و علی‌پور، داوود. (۱۳۸۶). دستورالعمل فنی کنترل و گواهی مزارع بذری سیب‌زمینی. موسسه ثبت و گواهی بذر و نهال، کرج، ۲۱ صفحه.

REFERENCES

- Alvarez, A.L.; Weyers, S.L.; & Gardner, R.D. (2024). Cyanobacteria-Based Soil Amendments in the Soil-Plant System: Effects of Inoculations on Soil Nutrient and Microbial Dynamics under Spring Wheat Growth. *Algal Research*, 77, 103326. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103326>.
- Bakker, A.W., & Schippers, B. (1987). Microbial cyanide production in the rhizosphere in relation to potato yield reduction and Pseudomonas SPP-mediated plant growth-stimulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19 (4): 451-457. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90037-X).
- Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R., & Bianciotto, V. (2015). Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. *Frontiers in Microbiology*, 6, 1559. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559>
- Bolandi, A. R. (2007). Study the effects of size and dormancy of microtuber on production of potato seed - minituber. Proceedings of the 5th National Horticultural Congress of Iran. Shiraz, Iran. P. 40.
- Chabili, A., Hakkoum, Z., Minaoui, F., Douma, M., Meddich, A., & Loudiki, M. (2025). Germination Screen of Eco-Extracts from Soil Cyanobacteria and Microalgae for Their Biostimulant Effects on Wheat Seeds Emergence and Vigor. *Algal Research*, 89, 104087.
- Chabili, A., Minaoui, F., Hakkoum, Z., Douma, M., Meddich, A., & Loudiki, M. (2024). A Comprehensive Review of Microalgae and Cyanobacteria-Based Biostimulants for Agriculture Uses. *Plants*, 13(2), 159. <https://doi.org/10.3390/plants13020159>
- Chamizo, S., Adessi, A., Mugnai, G., Simiani, A., & De Philippis, R. (2019). Soil Type and Cyanobacteria Species Influence the Macromolecular and Chemical Characteristics of the Polysaccharidic Matrix in Induced Biocrusts. *Microbial Ecology*, 78, 482-493.
- Chamizo, S., Mugnai, G., Rossi, F., Certini, G., & De Philippis, R. (2018). Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils: gaining insights for applicability in soil restoration. *Frontiers in Environmental Science*, 6, 49.
- Chittora, D., Meena, M., Barupal, T., Swapnil, P., & Sharma, K. (2020). *Cyanobacteria as a source of biofertilizers form sustainable agriculture*, BB Reports, 22, 100737.
- El-Ayouty, Y.M., Ghazal, F.M., Hassan, A.Z.A., & Abd El-Aal, A.A.M. (2004). Effect of Algal Inoculation and Different Water Holding Capacity Levels on Soil Aggregation and Soil Moisture Content of Sandy and Calcareous Soils under Tomato Cultivation Condition. *Journal of agricultural sciences in Mansoura University*, 29, 2801-2809.
- Emami, A. (1996). Plant Analysis Methods, Soil and Water Research Organization. Publication 982. Vol. 1: pp. 128. (In Persian).
- Glickmann, E., & Dessaux, Y. A (1995). Critical Examination of the Specificity of the Salkowski Reagent for Indolic Compounds Produced by Phytopathogenic Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology*, 61, 793-796.
- Goos, R. J. (1995). A laboratory exercise to demonstrate nitrogen mineralization and immobilization. *Journal of Natural*

Resources and Life Sciences Education, 24 (1): 68-70.

- Hakkoum, Z., Minaoui, F., Tazart, Z., Chabili, A., Douma, M., Mouhri, K., & Loudiki, M. (2025). Impact of a Soil Cyanobacteria Consortium-Based Bioinoculant on Tomato Growth, Yield, and Fruit Quality. *Plants*, 14(13), 2034. <https://doi.org/10.3390/plants14132034>
- Hassani, F., Darvishi, B. & Alipour, D. (2007). *Technical guidelines for the control and certification of potato seed farms*. Seed and Seedling Registration and Certification Institute, Karaj, 21 pages. (In Persian).
- Hidangmayum, A., & Sharma, R. (2017). Effect of different concentrations of commercial seaweed liquid extract of *Ascophyllum nodosum* as a plant bio stimulant on growth, yield and biochemical constituents of onion (*Allium cepa* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6 (4): 658-663.
- Janmohammadi, M., Pornour, N., Javanmard, A., & Sabaghnia, N. (2016). Effects of bio-organic, conventional and nanofertilizers on growth, yield and quality of potato in cold steppe. *Botanica Lithuanica*, 22(2), 133-144.
- Johansson, C., & Bergman, B. (1994). Reconstitution of the symbiosis of *Gunnera manicata* Linden: cyanobacterial specificity. *New Phytology*. 126:643–652.
- John, D. M., Whitton, B. A., & Brook, A.J. (2003). *The freshwater algal flora of the British Isles, an identification guide to freshwater and terrestrial algae*. Cambridge University Press. p. 702.
- Jose, S., Renuka, N., Ratha, S.K., Kumari, S., & Bux, F. (2024). Bioprospecting of Microalgae from Agricultural Fields and Developing Consortia for Sustainable Agriculture. *Algal Research*, 78, 103428. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103428>
- Just, B.S., Marks, E.A.N., Roquer-Beni, L., Llenas, L., Ponsà, S., & Vilaplana, R. (2024). Biofertilization Increases Soil Organic Carbon Concentrations: Results of a Meta-Analysis. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 22, 2361578.
- Kalra, Y. (1997). *Handbook of reference methods for plant analysis*. CRC press. p. 320. <https://doi.org/10.1201/9780367802233>.
- Kholssi, R., Marks, E.A.N., Miñón, J., Montero, O., Lorentz, J.F., Debdoubi, A., & Rad, C. (2022). Biofertilizing Effects of *Anabaena cylindrical* Biomass on the Growth and Nitrogen Uptake of Wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53, 1216–1225. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2043350>.
- Kolbe, H., & Stephan-Beckmann, S. (1997). Development, growth and chemical composition of the leaves and stem for potatoes. *Potato Research*, 40, 111-129. <https://doi.org/10.1007/BF02407567>
- Komárek, J. (2013). Cyanoprocaryota. 3. *Heterocytous Genera*; Büdel, B., Gärtner, G., Krienitz, L., Schagerl, M., Eds.; Springer Spektrum: Berlin/Heidelberg, Germany.
- Komarek, J., Kastovsky, J., Mares, J., & Johansen, L.R. (2014). Taxonomic classification of cyanoprocaryotes (cyanobacterial genera) 2014, using a polyphasic approach. *Preslia*, 86: 295–335.
- Lal, M., Kumar, A., Chaudhary, S., Singh, R.K., Sharma, S., & Kumar, M. (2022). Antagonistic and growth enhancement activities of native *Pseudomonas* spp. against soil and tuber-borne diseases of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 32, 22. <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00522-w>
- Lee, S. M., & Ryu, C. M. (2021). Algae as New Kids in the Beneficial Plant Microbiome. *Frontiers in Plant Science*, 12, 599742. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.599742>
- Majidi, A. (2014). Use of Minolta SPAD-502 Chlorophyll Meter for Estimating Leaf N Concentration and Grain Protein Content in Three Varieties of Wheat. *Iranian Journal of Soil Research*, 28(2), 245-254. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/ijrsr.2014.120333>.
- Massey, M.S., & Davis, J.G. (2023). Beyond Soil Inoculation: Cyanobacteria as a Fertilizer Replacement. *Nitrogen*, 4: 253–262.
- Mazhar, S., & Hasnain, S. (2011). Screening of Native Plant Growth Promoting Cyanobacteria and Their Impact on *Triticum aestivum* Var. Uqab 2000 Growth. *African Journal of Agricultural Research*, 6, 3988–3993.
- Mushtaq, Z., Asghar, H., Zahir, Z.A., & Maqsood, M. (2022). The interactive approach of rhizobacteria and l-tryptophan on growth, physiology, tuber characteristics, and iron concentration of potato (*Solanum tuberosum* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, 41:1359–1366. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10395-2>.
- Rippka, R. Deruelles, J. & Waterbury, J.B. (1979). Generic assignments, strain histories and properties of pure cultures of cyanobacteria, *Journal of General Microbiology*. 111 (1979) 1–61, <https://doi.org/10.1099/00221287-111-1-1>.
- Santini, G., Biondi, N., Rodolfi, L., & Tredici, M. R. (2021). Plant Biostimulants from Cyanobacteria: An Emerging Strategy to Improve Yields and Sustainability in Agriculture. *Plants*, 10(4), 643. <https://doi.org/10.3390/plants10040643>
- Sergeeva, E., Liaimer, A., & Bergman, B. (2002). Evidence for production of the phytohormone indole-3-acetic acid by cyanobacteria. *Planta*. 215: 229–238.
- Singh, P., Arif, Y., Siddiqui, H. Upadhyaya, C.P., Pichtel, J., & Hayat, S. (2023). Critical Factors Responsible for Potato Tuberization. *Botanical Review*, 89, 421–437 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12229-023-09289-7>
- Thomas, G. W. (1996). Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. (Ed), *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Madison. pp. 475-490.
- Torabian, S., Farhangi-Abriz, S., Qin, R., Noulas, C., Sathuvalli, V., Charlton, B., & Loka, D. A. (2021). Potassium: A Vital Macronutrient in Potato Production — A Review. *Agronomy*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy11030543>

- Toribio, A.J., Jurado, M.M., Suárez-Estrella, F., Lopez-Gonzalez, J.A., Martinez-Gallardo, M.R., & Lopez, M.J. (2021). Application of sonicated extracts of cyanobacteria and microalgae for the mitigation of bacterial canker in tomato seedlings. *Journal of Applied Phycology*, 33, 3817–3829 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10811-021-02599-6>
- Vaishampayan, A., Sinha, R.P., & Häder, D.P. (1998). Use of genetically improved nitrogen-fixing Cyanobacteria in rice paddy fields: Prospects as a source material for engineering herbicide sensitivity and resistance in plants. *Botanica Acta*, 111: 176–190.
- Vos, J. & van der Putten, P.E.L. (1998). Effect of nitrogen supply on leaf growth, leaf nitrogen economy and photosynthetic capacity in potato. *Field Crops Research*, 59, 63–72.
- Wasilewska-Nascimento, B., Boguszewska-Mańkowska, D., Zarzyńska, K. (2020). Challenges in the production of high-quality seed potatoes (*Solanum tuberosum* L.) in the tropics and subtropics. *Agronomy*, 10:260–272. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020260>
- Yandigeri, M.S. Yadav, A.K. Srinivasan, R. Kashyap, S. & Pabbi, S. (2011) Studies on mineral phosphate solubilization by cyanobacteria *Westiellopsis* and *Anabaena*. *Microbiology*, 80(4), 558-565