



Publisher: Soil Science Society of Iran

Soil Biology Journal

<https://sbj.areeo.ac.ir/>


Research article

Evaluation and comparative analysis of plant growth-promoting traits in diverse groups of rhizosphere bacteria

Akram Otadi¹ , Hassan Etesami², Houshang Khosravi³ * and Hosseinali Alikhani⁴1-Soil and Water Research Institute Karaj, Iran, email: mahnaz.otadi@gmail.com-2-Associate Professor, University of Tehran; E-mail: hassanetesami@ut.ac.ir3-Associate Professor, Soil Biology Department, Soil and Water Research Institute, P.O.BOX: 31785-11. Karaj, Iran, email: hkhosravi@areeo.ac.ir4-Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, University of Tehran; E-mail: halikhan@ut.ac.ir

Article Info

Received:

October 21, 2024

Accepted:

February 18, 2025

Keywords:

Auxin, Azotobacter, Exopolysaccharides, Pseudomonas, Rhizosphere, Siderophore

Corresponding author's email:
hkhosravi@areeo.ac.ir
DOI:

10.22092/SBJ.2025.367286.271

Extended Abstract

Background and Objectives: Using chemical fertilizers is the primary method of plant nutrition in agriculture, however, it has a high potential for contamination of water, soil, plants, animals and humans; therefore, it is crucial to provide solutions based on sustainable development for crop production. One of the solutions is to use the potential of beneficial soil microorganisms including plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). The PGPR are a large group of beneficial soil bacteria that affect plant growth through various mechanisms including, production growth-promoting substances such as auxin, solubilization of insoluble organic and inorganic phosphates, production of siderophores, and potassium releasing from soil clay minerals such as biotite and muscovite. Having positive impact of PGPR on plant growth has led to their use as biofertilizers or inoculants in agriculture. One of the most essential components of a biofertilizer is microorganisms. The most important and well-known PGPRs include *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, and *Azospirillum*. The aim of this research was to compare these four groups, native to Iranian soils regarding plant growth-promoting characteristics and to identify superior strains that can be investigated in future research as biofertilizers. Such a comparison has not been done in the country on different groups of PGPR.

Materials and Methods: In this research, 63 strains of PGPR including 13 *Azotobacter*, 10 *Azospirillum*, 21 *Bacillus*, and 19 *Pseudomonas* strains were used obtained from the microbial culture collection of Soil and Water Research Institute which were previously isolated across from different agricultural soils of Iran. The strains were screened and compared regarding plant growth-promoting characteristics. The ability of strains to produce auxin evaluated using Salkowski reagent method at the levels 0 and 50 mg/L L-tryptophan. The siderophore assayed using the CAS-agar method, calculating the ration of halo-to-colony diameter. The extracellular polysaccharides (EPS) were measured weighting the dried precipitated substances. The ability to solubilize inorganic and organic phosphates was investigated by calculating the ratio of halo to colony diameter in Pikovskaya's agar medium. Alexandrov's method was used to investigate the ability of released potassium from muscovite and biotite soil clay minerals. The NBRIP culture medium, was used to evaluate the ability to dissolve insoluble iron phosphate. All experiments were performed in triplicate and the statistical analysis of data done using SAS software. Means were compared and grouped by the least significant difference (LSD) method at the 5% probability level.

Results:The results showed that *Pseudomonas* strain P214 produced 51.68 µg/mL of auxin at 50 mg/L of L-tryptophan and 48.72 µg/mL in the absence of L-tryptophan (0 mg/L). For mineral and organic phosphate solubilization, *Pseudomonas* P187 and P186 demonstrated the highest indices, with halo-to-colony diameter ratios of 2.59 and 4.13, respectively. Siderophore production by the *Pseudomonas* group was significantly higher than that of the other three groups, with strain P188 exhibiting the greatest capacity, achieving a halo-to-colony diameter ratio of 3.38. Additionally, *Pseudomonas* exhibited the strongest ability to solubilize insoluble iron phosphate, with strain P192 recording the highest halo-to-colony diameter ratio of 4.45. Among potassium-releasing strains, *Bacillus* B517 showed the highest release from biotite, with a value of 33.33 g/L, while B326 exhibited the highest release from muscovite, with a value of 24.67 g/L. Finally, strain P526 produced the highest quantity of extracellular polysaccharides, with a value of 84.6 g/L.

Conclusion:In this research, 63 strains belonging to four groups of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) native to Iranian soils obtained from culture collection of Soil and Water Research institute including *Pseudomonas* (19 strains), *Azotobacter* (13 strains), *Bacillus* (21 strains) and *Azospirillum* (10 strains) were investigated and compared in terms of plant growth-promoting characteristics. The results showed that the *Pseudomonas* group showed a significant difference from the other groups regarding siderophore production, solubilization of insoluble iron phosphate, extracellular polysaccharides, and solubility of mineral and organic phosphates. *Pseudomonas* and *Azotobacter* groups produced the highest indole acetic acid at 0 and 50 mg/L L-tryptophan levels. The *Bacillus* group had the highest ability to release potassium from biotite and *Pseudomonas* from muscovite. The *Pseudomonas* had superior strains in most of the plant growth-promoting characteristics, however, considering that other groups showed superiority in some other characteristics, it is suggested to use a Consortium of superstrains of each group should be used as inoculants or biofertilizers in the future research.

Cite this article: Outadi, A., Etesami, H., Khosravi, H., and Alikhani, H., 2025. Evaluation and Comparative Analysis of Plant Growth-Promoting Traits in Diverse Groups of Rhizosphere Bacteria. *Soil Biology Journal*, 12 (2),235-260



DOI: 10.22092/SBJ.2025.367286.271

Publisher: Soil Science Society of Iran



دو فصلنامه

نشریه زیست‌شناسی خاک

<https://sbj.areeo.ac.ir/>



مقاله پژوهشی

ارزیابی و مقایسه صفات محرک رشدی گیاه در گروه‌های مختلف باکتری‌های ریزوسفری

اکرم اوتادی^۱، حسن اعتصامی^۲، هوشنگ خسروی^۳ و حسینعلی علیخانی^۴

۱- پژوهشگر مؤسسه تحقیقات خاک و آب آدرس: کرج، ایمیل: mahnaz.otadi@gmail.com

۲- عضو هیأت علمی پردیس کشاورزی کرج، دانشگاه تهران؛ ایمیل: hassanetesami@ut.ac.ir

۳- عضو هیأت علمی مؤسسه تحقیقات خاک و آب؛ آدرس: کرج، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، ایمیل: hkhosravi@areeo.ac.ir

۴- عضو هیأت علمی پردیس کشاورزی کرج، دانشگاه تهران؛ ایمیل: halikhan@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۷/۳۰ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

چکیده

باکتری‌های محرک رشد گیاه، گروه وسیعی از ریزجانداران مفید خاک هستند که از طریق سازوکارهای مختلف می‌توانند بر رشد گیاهان تأثیر بگذارند. در این پژوهش، ۶۳ سویه باکتری متعلق به چهار گروه از باکتری‌های سودوموناس، ازتوباکتر، باسیلوس و آروسپیریوم جداسازی شده از خاک‌های ایران از نظر ویژگی‌های منسوب به محرک رشد گیاه مطالعه و مقایسه شدند. توانایی سویه‌ها در تولید اکسین، سیدروفور، پلی-ساکاریدهای خارج سلولی، انحلال فسفات‌های معدنی و آلی، توانایی آزادسازی پتاسیم و توانایی انحلال فسفات آهن نامحلول بررسی شدند. نتایج نشان داد که سودوموناس P214 در سطح ال-تریپتوفان ۵۰ میلی‌گرم در لیتر مقدار ۵۱/۶۸ و در ال-تریپتوفان صفر، مقدار ۴۸/۷۲ میکروگرم بر میلی‌لیتر اکسین تولید کرد. از نظر توانایی حل‌کنندگی فسفات‌های نامحلول معدنی و آلی به ترتیب سودوموناس P187 و P186 با نسبت قطر هاله به کلونی ۲/۵۹ و ۴/۱۳ دارای بیش‌ترین شاخص بودند. تولید سیدروفور در گروه سودوموناس با سه گروه دیگر اختلاف معنی‌داری نشان داد و سویه P188 با نسبت قطر هاله به کلنی ۳/۳۸ بیش‌ترین توانایی را نشان داد. سودوموناس‌ها بیش‌ترین توانایی انحلال فسفات آهن نامحلول را نشان دادند و بهترین سویه P192 با نسبت قطر هاله به کلونی ۴/۴۵ بود. بیش‌ترین توانایی آزادسازی پتاسیم از بیوتیت با مقدار ۳۳/۳۳ گرم در لیتر مربوط به باسیلوس B517 و از موسکویت با مقدار ۲۴/۶۷ مربوط به B326 بود. بالاترین مقدار تولید پلی-ساکاریدهای خارج سلولی متعلق به سویه‌های P526 با مقدار ۶/۸۴ گرم بر لیتر بود. در مجموع، گروه سودوموناس در بیشتر صفات از سه گروه دیگر برتری نسبی نشان داد. در این پژوهش سویه‌های منتخب از هر گروه از نظر ویژگی‌های مختلف محرک رشدی برای ادامه پژوهش‌ها انتخاب و معرفی شدند.

واژه‌های کلیدی: ازتوباکتر، اکسین، آگزوپلی‌ساکارید، سیدروفور، سودوموناس، ریزوسفر

مقدمه

تأمین نیاز غذایی جمعیت رو به افزایش، یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهان است و تولید محصولات کشاورزی گزینه اصلی برای حل این مشکل است. مصرف کودهای شیمیایی از راه‌های اصلی تغذیه گیاهان در کشاورزی است زیرا به آسانی و به سرعت عناصر مورد نیاز گیاه را تأمین می‌کنند. اگرچه کودهای شیمیایی پرمصرف-ترین نهاده‌های کشاورزی هستند، با این حال، از پتانسیل آلوده‌سازی بالایی برخوردار بوده و مصرف بی‌رویه و نامتعادل آن‌ها موجب آلودگی آب، خاک، گیاه، دام و انسان می‌شوند؛ بنابراین ارائه راهکارهای مبتنی بر توسعه پایدار و توجه به حفظ سلامت محیط‌زیست برای افزایش تولید محصولات کشاورزی ضروری و مهم است. یکی از راهکارها استفاده از پتانسیل ریزجانداران مفید خاک‌زی است. کودهای زیستی فرآورده‌هایی هستند که حاوی تعداد مناسبی از یک یا چند ریزجاندار مفید و یا متابولیت‌های حاصل از فعالیت آن‌ها می‌باشند که قادرند نیاز گیاه به یک و یا چند عنصر را تأمین و یا از طریق سازوکارهای مختلف رشد گیاه را تحریک و افزایش دهند (خسروی و همکاران، ۲۰۲۴).

غربالگری اصولی ریزجانداران مفید، قدم اول در دستیابی به کودهای زیستی مؤثر و با کارایی بالا است. در بین ریزجانداران مفید خاک‌زی، گروه باکتری‌های محرک رشد گیاه یا اصطلاحاً^۱ PGPR دارای جایگاه ویژه‌ای هستند و طبق تعریف به طیف وسیعی از باکتری‌های مفید خاک‌زی اطلاق می‌شوند که وقتی در کنار گیاه میزبان فعالیت می‌کنند رشد گیاه را تحریک کنند. سازوکارهایی که این باکتری‌ها از طریق آن‌ها بر رشد گیاهان تأثیر می‌گذارند شامل تولید هورمون‌های محرک رشد، توانایی حل‌کنندگی فسفات‌های نامحلول، آزادسازی پتاسیم از کانی‌های خاک، تولید سیدروفور و پلی‌ساکاریدهای خارج سلولی (EPS)^۲ است (کلوئپر و همکاران، ۱۹۸۹؛ خسروی و همکاران، ۲۰۲۴).

تولید هورمون‌های گیاهی نقش مهمی در رشد و توسعه گیاه دارند (سرور و فراکنبرگر، ۱۹۹۴) و در این میان، اکسین‌ها و از جمله ایندول استیک اسید (IAA)^۳ از جمله شناخته‌شده‌ترین هورمون‌های رشد گیاه هستند که باعث طولی شدن و تکثیر سلول‌های ریشه می‌شوند (پاتن و گلینک، ۲۰۰۲). در ناحیه ریزوسفر به دلیل وجود جمعیت بالای میکروبی و فراوانی سوبستراها تولید اکسین بیشتر است (سرور و همکاران، ۱۹۹۲). در گزارشی آمده است که ۸۰ درصد از باکتری‌های جداسازی شده از ریزوسفر گیاهان مختلف دارای توانایی تولید IAA بوده‌اند (دوبلاثر، ۲۰۰۳).

حل‌کنندگی فسفات‌های نامحلول یکی دیگر از خصوصیات PGPR و از ویژگی‌های اصلی توسعه کودهای زیستی کارآمد است (رافی و همکاران، ۲۰۱۹). گروه PGPR از طریق سازوکارهایی مانند ترشح اسیدهای آلی و فسفاتازها قادرند ترکیبات فسفاتی نامحلول را به شکل قابل‌استفاده برای گیاه درآورند (گوسوامی و همکاران، ۲۰۱۹؛ سوندارا و همکاران، ۲۰۰۲). اهمیت این ویژگی در این است که قسمت اعظم فسفر در خاک به شکل فسفات-های نامحلول است که برای گیاه قابل جذب نیست و همچنین قسمت زیادی از کودهای شیمیایی فسفری که به خاک اضافه می‌شوند به سرعت به شکل نامحلول درآمده و برای گیاهان غیرقابل دسترس می‌شوند. این مسئله برای عنصر آهن هم به ویژه در شرایط خاک‌های آهکی و با PH بالا همانند خاک‌های ایران وجود دارد (منگل و همکاران، ۲۰۰۱). برخی از سویه‌های PGPR مواد کلات‌کننده‌ای به نام سیدروفور^۴ ترشح می‌کنند که به جذب آهن تمایل دارند (گلینک، ۲۰۱۵) و با آهن فریک موجود در خاک کمپلکس-های پایداری تشکیل می‌دهند که برای گیاهان نیز قابل جذب هستند (اوسیلیوان و اوگارا، ۱۹۹۲). در مورد عنصر مهم پتاسیم هم حدود ۹۰ تا ۹۸ درصد پتاسیم کل خاک‌ها به شکل غیرقابل دسترس است و در ایران حدود ۳۰

³ - Indole acetic acid

⁴- Siderophore

¹ - Plant growth-promoting rhizobacteria

² - Exopolysaccharide

اگرچه تاکنون پژوهش‌های زیادی در مورد این گروه از باکتری‌ها انجام شده است اما چنین مقایسه‌ای به‌ویژه در کشور به‌صورت یکجا بر روی گروه PGPR انجام نشده است. نتایج این مطالعه می‌تواند در پژوهش‌های آتی به‌عنوان مایه تلقیح بر روی محصولات مختلف موردبررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش تعداد ۶۳ سویه از PGPR موجود در کلکسیون میکروبی مؤسسه تحقیقات خاک و آب استفاده شد. این سویه‌ها شامل ۱۳ سویه از *ازتوباکتر*، ۱۰ سویه *آزوسپیریوم*، ۲۱ سویه *باسیلوس* و ۱۹ سویه *سودوموناس* بودند. در این مقاله سویه‌های *سودوموناس* با P، *باسیلوس* با B، *آزوسپیریوم* با A و *ازتوباکتر* با Azto نشان داده شده است.

اندازه‌گیری توانایی تولید اکسین

به‌منظور بررسی توانایی تولید اکسین (IAA)، ۵۰ میکرولیتر از سوسپانسیون باکتری به ۲۵ میلی‌لیتر محیط TSB حاوی ۰ و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر ال-تریپتوفان منتقل و در دمای ۳۰ درجه سلسیوس گرم‌خانه‌گذاری^۵ شد. بعد از ۴۸ ساعت سوسپانسیون باکتری به مدت ۱۵ دقیقه در ۱۰۰۰۰ سانتریفیوژ و یک میلی‌لیتر از محلول بالایی با ۲ میلی‌لیتر معرف سالکوفسکی مخلوط شد. این مخلوط به مدت ۲۵ دقیقه در دمای اتاق تاریک نگهداری و سپس میزان جذب نور آن در ۵۳۵ نانومتر با استفاده از اسپکتروفوتومتر (مدل Pharmacia Biotech) قرائت شد (اهمان، ۱۹۷۷). مقدار تولید اکسین هر سویه با مقایسه مقدار جذب نور آن با منحنی استاندارد با غلظت‌های ۰، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم در لیتر تهیه‌شده از ایندول استیک اسید محاسبه شد.

درصد خاک‌ها دارای پتاسیم کمتر از ۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم هستند (کومار و همکاران، ۲۰۲۰؛ جلالی، ۲۰۰۶)؛ همچنین عمده کودهای پتاسیمی، وارداتی بوده و قیمت آن‌ها زیاد است بنابراین بررسی امکان استفاده از پتانسیل زیستی ریزجانداران خاک برای تأمین بخشی از پتاسیم موردنیاز گیاه دارای اهمیت است و به همین منظور غربالگری و دستیابی به سویه‌های برتر از باکتری‌های بومی از نظر توانایی آزادسازی پتاسیم از خاک به‌ویژه کانی‌های میکا که غنی از پتاسیم هستند ضروری است.

گروه PGPR در پاسخ به شرایط تنش‌های محیطی تولید مواد EPS که از پلیمرهای طبیعی متشکل از واحدهای قندی هستند می‌کنند (مور و همکاران، ۲۰۱۴). این مواد باکتری را در برابر شرایط تنشی مانند خشکی و یون‌های فلزات سمی، شکار توسط پروتوزوئرها و آلوده شدن به‌وسیله باکتریوفاژها مقاوم‌تر می‌کند. مواد EPS همچنین نیتروژناز که آنزیم تثبیت نیتروژن است را در برابر آسیب غلظت بالای اکسیژن محافظت می‌کنند. این مواد همچنین خاصیت چسبندگی داشته که باعث چسبیدن ذرات خاک به‌هم، اتصال باکتری به ذرات و کمک به کلونیزاسیون بهتر ریشه گیاه می‌شوند (نسیم و همکاران، ۲۰۱۸؛ همپا سا و ایگناتو، ۱۹۹۸).

با توجه به موارد گفته‌شده، دستیابی به سویه‌های برتر PGPR بومی و سازگار با شرایط اقلیمی و خاک برای استفاده از آن‌ها به‌عنوان کودهای زیستی برای افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی دارای اهمیت است. مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین گروه‌های مختلف PGPR شامل چهار گروه *سودوموناس*، *ازتوباکتر*، *باسیلوس* و *آزوسپیریوم* هستند (اگامبردیا و همکاران، ۲۰۰۲؛ خسروی و همکاران، ۲۰۲۴). هدف از انجام این پژوهش مقایسه چهار گروه مذکور جداسازی شده از مناطق مختلف زیر کشت محصولات کشاورزی ایران از نظر خصوصیات محرک رشدی و شناسایی سویه‌های برتر از هر گروه بود.

توانایی حل‌کنندگی فسفات‌های معدنی و آلی نامحلول

در این آزمون ابتدا باکتری‌ها به مدت ۴۸ ساعت در محیط TSB کشت داده شدند. برای اندازه‌گیری نیمه کمی توانایی انحلال فسفات‌های معدنی، ۱۵ میکرولیتر از سوسپانسیون تازه باکتری با روش قطره‌گذاری روی پلیت‌های حاوی محیط جامد پیکوفسکایا یا به اختصار PKV (پیکوفسکایا، ۱۹۴۸) که حاوی ۵ گرم تری‌کلسیم-فسفات $(Ca_3(PO_4)_2)$ به‌عنوان تنها منبع فسفر بود کشت داده شد. پلیت‌های تلقیح شده در دمای ۲۸ درجه سلسیوس نگهداری شدند. ظهور هاله شفاف در پیرامون کلنی باکتری به‌عنوان نشانه حل‌کنندگی فسفات در نظر گرفته شد. برای ارزیابی میزان نسبی انحلال فسفات، بعد از یک هفته نسبت قطر هاله به قطر کلنی تعیین شد (رشید، ۲۰۰۴). برای اندازه‌گیری توانایی حل‌کنندگی فسفات‌های آلی به‌جای تری‌کلسیم‌فسفات از اینوزیتول هگزا فسفات استفاده و در ادامه، مشابه اندازه‌گیری فسفات معدنی عمل شد.

توانایی تولید سیدروفور

بررسی توانایی تولید سیدروفور توسط سویه‌ها بر اساس روش اصلاح‌شده الکساندر و زوبر (۱۹۹۱) انجام شد. در این روش نیاز به چهار محلول مجزا شامل محلول معرف Fe-CAS، محلول بافر، محلول غذایی و محلول کازوآمینواسید می‌باشد. سه محلول اول توسط اتوکلاو و محلول چهارم توسط دستگاه میلی پور (فیلتر ۰/۲ میکرون) استریل شدند. ابتدا محلول غذایی به محلول بافر و محلول کازوآمینواسید اضافه و سپس ضمن به‌هم زدن آرام و بدون ایجاد حباب، محلول معرف Fe-CAS به آن‌ها اضافه و در پلیت‌ها توزیع گردید. مقدار ۵ میکرولیتر از سوسپانسیون تازه هر یک از سویه‌های مورد مطالعه با جمعیت تنظیم‌شده در وسط هر ظرف پتری با روش قطره‌گذاری به مقدار ۵

میکرولیتر، تلقیح و در دمای ۲۸ درجه سلسیوس به مدت چهار روز نگهداری شدند. توانایی تولید سیدروفور از طریق محاسبه نسبت قطر هاله نارنجی‌رنگ تشکیل‌شده در اطراف کلنی به قطر کلونی تعیین شد.

توانایی حل‌کنندگی فسفات آهن

برای بررسی توانایی سویه‌ها در حل کردن فسفات آهن از محیط کشت NBRIP^۶ استفاده شد (نوتیال، ۱۹۹۹). ابتدا چند قطره معرف Bromo cresol نیم درصد به محیط کشت اضافه و پس از تنظیم pH روی ۷ و اتوکلاو کردن، در پلیت‌های ۸ سانتی‌متری پخش شد. از سوسپانسیون تازه هر یک از سویه‌های مورد مطالعه با جمعیت تنظیم‌شده (5×10^8 CFU/mL) به‌اندازه ۵ میکرولیتر در هر پلیت در سه نقطه با روش قطره‌گذاری تلقیح شد. پلیت‌های تلقیح شده در دمای ۲۸ درجه سلسیوس و به مدت ۴۸ ساعت گرم‌خانه‌گذاری و در نهایت، نسبت قطر هاله شفاف اطراف کلونی به قطر کلونی محاسبه شد.

توانایی آزادسازی پتاسیم

برای اندازه‌گیری توانایی آزادسازی پتاسیم از کانی‌های موسکویت (میکای سفید) و بیوتیت (میکای سیاه) از روش الکساندروف (الکساندروف، ۱۹۶۷) استفاده شد. ابتدا به‌منظور حذف پتاسیم محلول و تبادلی از سطح کانی‌ها، قبل از استفاده در محیط کشت، کانی‌ها با استفاده از اسید کلریدریک ۰/۱ مولار به مدت ۳۰ دقیقه اسید شویی و سپس در ۳۰ میلی‌لیتر آب مقطر شیکر شده و پس از سانتریفیوژ، محلول رویی حذف و آنگاه یک شب در دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. از طرف دیگر، سویه‌های باکتری مورد آزمایش در محیط کشت اختصاصی، رشد داده شدند. دو میلی‌لیتر از سوسپانسیون باکتری در سانتریفیوژ (۱۰۰۰۰ دور در دقیقه) رسوب داده شد. رسوب حاصله^۷

شد و مقدار بر اساس میلی‌گرم در میلی‌لیتر گزارش شد (ساندهیا و همکاران، ۲۰۰۹).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

همه آزمایش‌های ذکر شده در این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی^۸ (CRD) در سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار 9.4 M6 (SAS (TS1M6) انجام شد. میانگین‌ها به روش کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه و گروه‌بندی شدند.

نتایج

تولید اکسین

از نظر توانایی تولید اکسین، سویه‌ها به سه دسته کم ($10-30 \mu\text{g/mL}$)، متوسط ($20-100 \mu\text{g/mL}$) و زیاد ($100-200 \mu\text{g/mL}$) تقسیم شدند. به‌طور کلی در هر دو سطح ال-تریپتوفان، ۵، ۳۵/۵ و ۵۷/۵ درصد از سویه‌های باکتری به ترتیب در دسته کم، متوسط و زیاد قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها (جدول ۱) نشان داد سویه‌های P241، P187 و P214 بیش‌ترین مقادیر اکسین در سطوح صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب ۴۳/۹۰ و ۴۴/۹۳ و ۵۱/۶۸ میکروگرم بر میلی‌لیتر محیط کشت بودند. اکثر سویه‌ها در سطح ۵۰ ال-تریپتوفان میلی‌گرم در لیتر، بالاترین مقدار اکسین را تولید کردند. برخی سویه‌ها مانند Azto474، A232 و A231 در سطح صفر ال-تریپتوفان نسبت به سطح ۵۰ ال-تریپتوفان مقدار اکسین بیشتری تولید کردند.

در یک میلی‌لیتر آب مقطر استریل معلق شده و به ۵۰ میلی‌لیتر محیط کشت مایع الکساندروف دارای میکا افزوده شد و به مدت یک هفته در دمای ۲۸ درجه سلسیوس بر روی شیکر قرار گرفت. مقدار پتاسیم آزاد شده (پتاسیم محلول) با استفاده از روش فلیم‌فتمتری اندازه‌گیری شد. در صورتی که مقدار پتاسیم محلول تیمار دارای باکتری تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد داشت، باکتری مذکور به‌عنوان حل‌کننده پتاسیم در نظر گرفته شد. برای تهیه استانداردهای پتاسیم از کلرید پتاسیم (KCl) با غلظت‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ میلی‌گرم در لیتر استفاده شد. (گوش و همکاران، ۲۰۲۳).

تولید EPS

برای بررسی توانایی تولید EPS، از کشت ۴۸ ساعته هر سویه در محیط TSB به میزان ۱۰ میکرولیتر به ارلن‌های ۱۰۰ میلی‌لیتر حاوی ۲۵ میلی‌لیتر محیط کشت اختصاصی هر باکتری تلقیح و به مدت یک هفته در دمای ۲۸ درجه سلسیوس گرم‌خانه‌گذاری شدند. محتویات ارلن به لوله‌های سانتریفیوژ منتقل و سپس در دمای چهار درجه سلسیوس و به مدت ۳۰ دقیقه و ۱۰۰۰ در دور بر دقیقه سانتریفیوژ شدند. به‌منظور رسوب دادن EPS تولید شده به مایع شفاف رویی حاصل از سانتریفیوژ سه میلی‌لیتر به لوله‌ها منتقل و با نه میلی‌لیتر اتانول سرد مخلوط و با ورتکس به مدت پنج دقیقه به هم زده شد. در این مرحله مایع شفاف رویی دور ریخته شد و ته‌نشست حاوی EPS در محیط آزمایشگاه خشک شد. رسوب تشکیل شده توزین

^۸ - Completely Randomized Design

جدول ۱- توانایی سویه‌های مختلف باکتری در تولید اکسین (مقایسه میانگین‌ها)

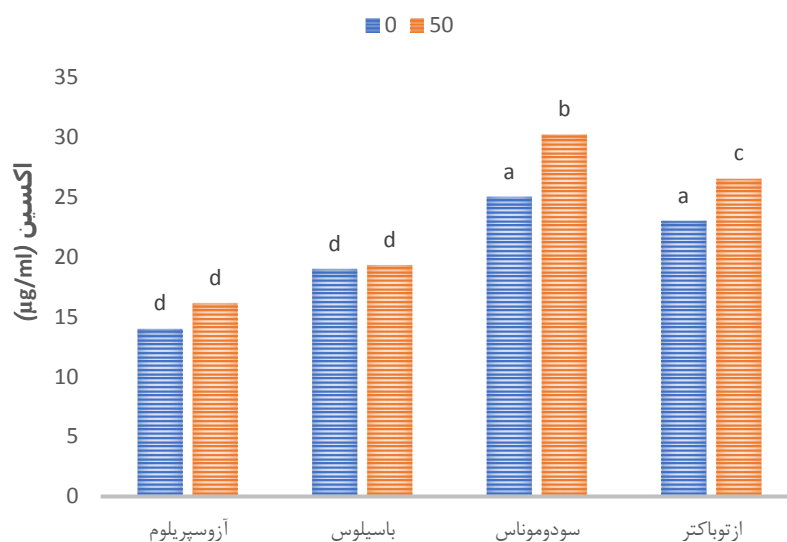
مقدار اکسین تولیدشده توسط سویه‌های مختلف برحسب میکروگرم بر میلی‌لیتر محیط کشت							
در سطح ال- تریپتوفان mg/L	سویه باکتری	در سطح ال- تریپتوفان mg/L	سویه باکتری	در سطح ال- تریپتوفان mg/L	سویه باکتری	در سطح ال- تریپتوفان mg/L	سویه باکتری
۲۱/۴۴±۱/۲۱	A231	۳۷/۰۴±۳/۰۳	Azto470	۸/۶۶±۰/۳۵	A231	۳۸/۳۰±۲/۲۰	Azto470
۲۳/۷۲±۲/۵۰	A232	۳۶/۸۳±۳/۰۱	Azto471	۲۰/۵۰±۰/۱۳	A232	۲۴/۳۶±۲/۴۱	Azto471
۲۳/۵۹±۰/۲۲	A443	۳۶/۶۰±۲/۳۲	Azto472	۲۴/۹۰±۰/۰۴	A443	۲۴/۸۸±۳/۱۷	Azto472
۱۶/۱۰±۱/۹۱	A448	۳۷/۹۱±۱/۰۴	Azto473	۱۸/۲۸±۰/۰۹	A448	۲۷/۸۹±۳/۲۰	Azto473
۱۵/۹۲±۱/۴۱	A500	۴۰/۶۷±۰/۱۷	Azto474	۸/۶۴±۳/۰۵	A500	۱۷/۸۷±۴/۰۳	Azto474
۲۰/۸۳±۳/۰۲	A501	۲۹/۳۳±۳/۰۹	Azto475	۷/۲۳±۱/۹۹	A501	۲۳/۶۴±۳/۱۸	Azto475
۱۹/۱۲±۰/۵۴	A502	۲۷/۷۸±۱/۴۲	Azto476	۲۴/۳۳±۰/۱۳	A502	۳۴/۸۶±۱/۱۵	Azto476
۱۱/۷۱±۱/۲۰	A503	۳۲/۷۴±۲/۰۳	Azto477	۱۴/۰۴±۱/۲۶	A503	۲۰/۸۸±۳/۰۲	Azto477
۱۷/۶۹±۱/۰۲	Azosbra	۳۷/۵۰±۱/۰۶	Azto478	۳۰/۶۷±۷/۸۳	Azosbra	۳۸/۷۷±۱/۹۰	Azto478
۱۶/۷۲±۴/۶۱	Azoslipo	۳۱/۵۷±۱/۱۱	Azto479	۲۱/۹۰±۵/۵۲	Azoslipo	۱۸/۵۶±۲/۹۳	Azto479
۲۲/۴۷±۷/۴۲	B221	۲۹/۷۳±۳/۴۱	Azto480	۱۹/۵۳±۱/۴۵	B221	۲۷/۵۸±۲/۲۹	Azto480
۲۴/۷۷±۳/۱۵	B235	۳۵/۷۳±۱/۳۴	Azto482	۷/۱۸±۱/۹۸	B235	۱۴/۱۹±۲/۹۰	Azto482
۳۴/۵۴±۲/۱۷	B256	۲۳/۱۸±۱/۷۱	P180	۳۲/۹۰±۱/۴۷	B256	۲۴/۷۴±۰/۲۰	P180
۱۷/۲۰±۱/۸۰	B267	۲۷/۸۹±۳/۸۰	P184	۲۸/۵۸±۴/۷۴	B267	۱۴/۰۶±۲/۹۵	P184
۱۹/۰۴±۰/۵۳	B270	۴۰/۱۵±۰/۳۵	P186	۲۳/۱۶±۲/۷۱	B270	۸/۰۰±۲/۰۵	P186
۲۳/۹۵±۱/۵۰	B271	۴۰/۱۱±۱/۳۲	P187	۲۴/۹۷±۰/۴۱	B271	۴۳/۹۰±۱/۷۵	P187
۹/۶۴±۱/۱۵	B311	۳۸/۷۷±۲/۲۰	P188	۱۴/۰۳±۱/۲۱	B311	۳۸/۴۲±۲/۷۲	P188
۱۴/۰۸±۰/۷۱	B312	۳۹/۹۸±۰/۴۱	P189	۸/۷۴±۲/۳۰	B312	۴۰/۰۸±۰/۳۰	P189
۲۱/۸۰±۰/۷۲	B317	۳۹/۹۸±۰/۶۱	P190	۲۲/۰۳±۰/۷۴	B317	۳۶/۶۵±۱/۰۸	P190
۱۵/۰۵±۱/۲	B320	۳۶/۹۹±۳/۲۲	P191	۱۵/۶۴±۱/۰۴	B320	۳۹/۵۴±۱/۰۰	P191
۱۶/۵۶±۷/۳	B326	۴۰/۲۳±۰/۳۷	P192	۱۵/۳۴±۲/۹	B326	۳۷/۵۲±۲/۰۸	P192
۱۴/۰۱±۰/۶	B327	۳۶/۹۹±۱/۱۴	P193	۱۴/۶۷±۰/۲۷	B327	۳۵/۷۱±۱/۷	P193
۱۵/۲۶±۱/۱۱	B331	۳۲/۶۹±۲/۸۱	P194	۱۶/۶۶±۱/۳۸	B331	۱۷/۸۹±۳/۶	P194
۱۷/۸۴±۰/۳۵	B416	۳۴/۰۵±۴/۹۰	P196	۲۰/۶۸±۱/۸۹	B416	۱۹/۷۱±۲/۵۸	P196
۲۲/۸۲±۲/۰۹	B417	۴۸/۷۲±۱/۴۵	P214	۱۹/۳۲±۱/۳۶	B417	۵۱/۶۸±۳/۰۱	P214
۲۵/۸۹±۲/۰۷	B444	۳۹/۰۸±۴/۰۱	P241	۱۹/۷۸±۳/۵۳	B444	۴۴/۹۳±۲/۳۵	P241
۱۸/۹۹±۰/۳۴	B445	۳۷/۹۸±۱/۷۲	P283	۱۹/۰۴±۰/۱۵	B445	۳۰/۶۷±۴/۹۰	P283
۲۰/۷۵±۱/۶	B509	۲۵/۱۸±۷/۵	P526	۱۷/۴۲±۰/۱۲	B509	۱۹/۵۸±۴/۰۵	P526
۱۴/۷۵±۰/۴۰	B517	۲۹/۴۴±۲/۵۲	P1	۲۱/۲۹±۲/۴۳	B517	۳۳/۵۶±۰/۹۴	P1
۱۹/۸۳±۱/۷۱	B520	۳۴/۴۳±۶/۰۱	P4	۲۱/۱۶±۲/۳۰	B520	۳۵/۴۳±۲/۶۰	P4
۲۶/۹۹±۱/۰۴	Bmeg	۳۷/۶۵±۱/۶۳	P6	۱۹/۱۴±۲/۹۰	Bmeg	۲۶/۱±۲/۰۹	P6
۳۱/۹۵±۲/۹۲	Azto469			۱۹/۸۳±۱/۱۱	Azto469		

۵/۷۱۴۹ =LSD (5%)

± مقدار خطای استاندارد

داری بین این دو گروه باسیلوس و آزوسپیریلیوم دیده نشد (شکل ۱).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که بیش‌ترین میزان تولید اکسین مربوط به گروه سودوموناس و ازتوباکتر بود. اختلاف معنی



شکل ۱- مقایسه مقدار تولید اکسین توسط آزوسپریلوم، باسیلوس، سودوموناس و ازتوباکتر (۵۰ و ۰ یعنی در سطوح ال-تریپتوفان صفر و ۵۰ میلی‌گرم در لیتر؛ (%۵) =LSD=۵/۷۱۴۹؛ حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است)

حل‌کنندگی فسفات‌های معدنی نامحلول

تجزیه واریانس داده‌های حل‌کنندگی فسفات‌های معدنی نامحلول نشان داد که سویه‌های P187 و P196 به ترتیب با نسبت قطر هاله به کلونی ۲/۴۷ و ۲/۵۸ بیش‌ترین میزان انحلال را داشتند (جدول ۲).

جدول ۲- مقایسه میانگین سویه‌های مختلف باکتری در انحلال فسفات‌های معدنی

شاخص حلالیت فسفات بر اساس نسبت قطر هاله به قطر کلونی			
سویه باکتری	انحلال فسفات	سویه باکتری	انحلال فسفات
Azto470	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto470	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto471	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto471	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto472	۱/۶۳۸±۰/۱۷	Azto472	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto473	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto473	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto474	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto474	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto475	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto475	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto476	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto476	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto477	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto477	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto478	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto478	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto479	۱/۵۵۶±۰/۰۶	Azto479	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto480	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto480	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
Azto482	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto482	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
P180	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P180	۲/۰۸۲±۰/۱۹
P184	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P184	۱/۹۷۷±۰/۱۳
P186	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P186	۲/۲۹۲±۰/۱۹
P187	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P187	۲/۵۸۷±۰/۱۹
P188	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P188	۲/۱۱۴±۰/۲۴
P189	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P189	۱/۸۹۸±۰/۳۶
P190	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P190	۱/۸۵۶±۰/۳۱
P191	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P191	۱/۹۳۰±۰/۲۰
P192	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P192	۲/۰۰۸±۰/۴۱
P193	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P193	۱/۸۹۸±۰/۳۳
P194	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P194	۲/۰۹۴±۰/۴۹
P196	۱/۴۳۷±۰/۱۵	P196	۲/۴۷۸±۰/۳۴
P214	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P214	۱/۹۵۰±۰/۱۸
P241	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P241	۲/۴۱۶±۰/۱۴
P283	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P283	۱/۶۴۱±۰/۱۶
P526	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P526	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰
P1	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P1	۲/۳۷۳±۰/۲۷
P4	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P4	۱/۶۵۳±۰/۱۸
P6	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P6	۲/۱۳۵±۰/۲۲
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰			

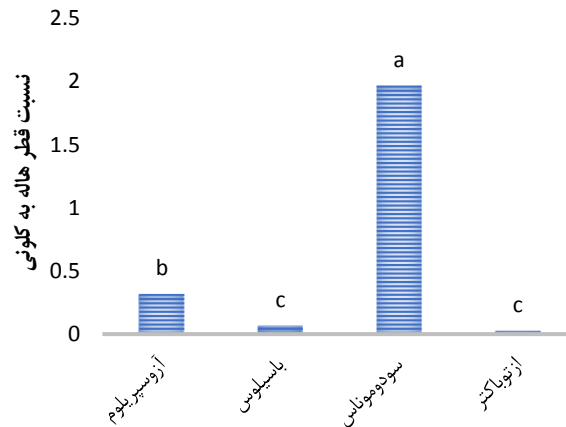
±/۳۵۶۹ = LSD (5%)

± مقدار خطای استاندارد

حل‌کنندگی فسفات‌های آلی نامحلول

نتایج سنجش توانایی انحلال فسفات آلی نشان داد که اختلاف معنی‌داری در سطح یک درصد بین سویه‌ها وجود داشت (جدول ۳). سویه‌های P241 و P186 به ترتیب با دارا بودن نسبت قطر هاله به کلونی ۴/۹۵ و ۴/۱۳ بیش‌ترین انحلال را نشان دادند.

مقایسه میانگین‌های شاخص انحلال فسفات‌های معدنی نامحلول نشان داد که باکتری‌های جنس سودوموناس از بیش‌ترین میزان انحلال فسفات معدنی برخوردار بودند. بین باکتری‌های جنس باسیلوس و ازتوباکتر از نظر انحلال فسفات اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد (شکل ۲).



شکل ۲- مقایسه توانایی انحلال فسفات معدنی گروه‌های آزوسپیریوم، باسیلوس، سودوموناس و ازتوباکتر (%). LSD=0.36؛ حروف مشترک نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است.

جدول ۳- مقایسه میانگین سویه‌های مختلف باکتری در انحلال فسفات‌های آلی

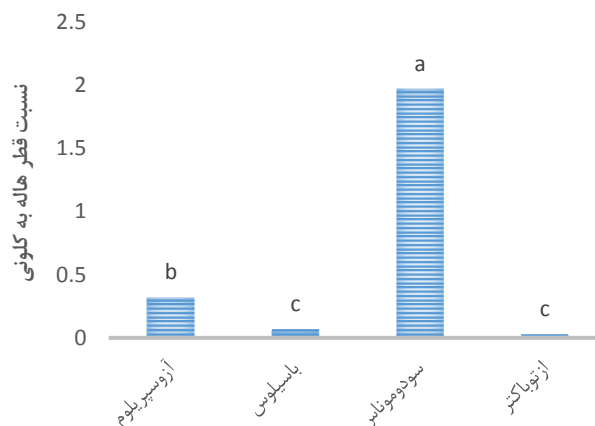
شاخص حلالیت فسفات بر اساس نسبت قطر هاله به قطر کلونی			
انحلال فسفات	سویه باکتری	انحلال فسفات	سویه باکتری
0.00±0.00	A231	0.30±0.00	Azto470
1.83±0.16	A232	0.00±0.00	Azto471
2.05±0.25	A443	0.00±0.00	Azto472
0.00±0.00	A448	0.00±0.00	Azto473
0.00±0.00	A500	0.40±0.00	Azto474
0.00±0.00	A501	0.00±0.00	Azto475
0.00±0.00	A502	0.00±0.00	Azto476
0.00±0.00	A503	0.00±0.00	Azto477
0.00±0.00	Azosbra	0.00±0.00	Azto478
0.00±0.00	Azoslipo	0.00±0.00	Azto479
0.00±0.00	B221	0.00±0.00	Azto480
1.81±0.13	B235	0.00±0.00	Azto482
0.00±0.00	B256	3.31±0.03	P180
0.00±0.00	B267	0.00±0.00	P184
0.00±0.00	B270	4.13±0.12	P186
0.00±0.00	B271	3.56±0.59	P187
0.00±0.00	B311	3.45±0.44	P188
0.00±0.00	B312	0.00±0.00	P189
0.00±0.00	B317	2.15±0.45	P190
0.00±0.00	B320	0.00±0.00	P191
0.00±0.00	B326	1.75±0.22	P192
0.00±0.00	B327	2.16±0.28	P193
1.66±0.18	B331	0.00±0.00	P194
0.00±0.00	B416	2.27±0.30	P196
0.00±0.00	B417	2.08±0.33	P214
1.34±0.18	B444	4.95±0.39	P241
0.00±0.00	B445	2.34±0.48	P283
0.00±0.00	B509	0.00±0.00	P526
0.00±0.00	B517	1.90±0.12	P1
0.00±0.00	B520	3.58±0.87	P4
0.00±0.00	Bmeg	3.28±0.09	P6
0.00±0.00	Azto469		

0.3183=LSD (5%)

مقدار خطای استاندارد

باسیلوس و آزوسپیریلوم اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. (شکل ۳)

مقایسه میانگینها نشان داد که گروه سودوموناس، بیش‌ترین میزان انحلال فسفات آلی در مقایسه با آزوسپیریلوم، باسیلوس و ازتوباکتر داشت. بین باکتری‌های گروه



شکل ۳- مقایسه توانایی انحلال فسفات آلی گروه‌های آزوسپیریلوم، باسیلوس، سودوموناس و ازتوباکتر (۵٪) $LSD=0.136$; حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد است).

تولید سیدروفور

نتایج نشان داد که اثرات سویه‌ها در تولید سیدروفور در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. حدود ۲۶٪ از باکتری‌ها توانایی بالا، ۳۹٪ توانایی متوسط و ۴۵٪ قابلیت سنتز سیدروفور را نداشتند. سویه‌های P283, P188 و B271 به ترتیب با داشتن نسبت قطر هاله به کلونی ۳/۳۷، ۲/۸۴، ۲/۶۶ بیش‌ترین توانایی در تولید میزان سیدروفور را نشان دادند (جدول ۴).

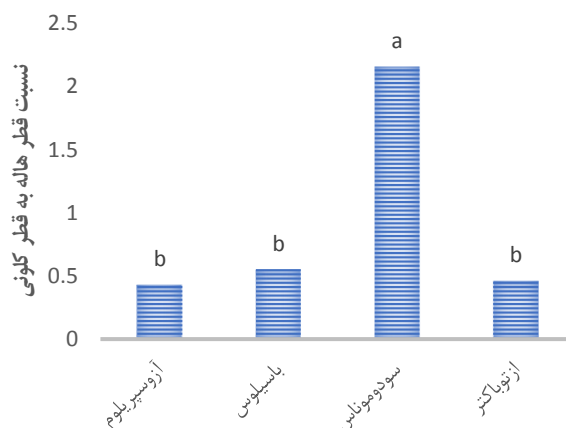
مقایسه گروه‌های چهارگانه باکتری‌ها از نظر مقدار سیدروفور تولیدشده نشان داد که گروه سودوموناس بیش‌ترین میانگین معنی‌دار را داشت. میانگین سیدروفور تولیدی سه گروه آزوسپیریلوم، باسیلوس و ازتوباکتر اختلاف معنی‌داری با هم نشان ندادند (شکل ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین سویه‌های مختلف در تولید سیدروفور (نسبت قطر هاله به کلونی)

سیدروفور	باکتری	سیدروفور	باکتری
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A231	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto470
۱/۶۶۶±۰/۰۱۰	A232	۲/۰۰۰±۰/۰۱۰	Azto471
۱/۴۲۱±۰/۰۴۰	A443	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto472
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A448	۱/۹۲۳±۰/۰۶۰	Azto473
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A500	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto474
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A501	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto475
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A502	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto476
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A503	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto477
۱/۲۲۵±۰/۰۳۰	Azosbra	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto478
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azoslipo	۲/۰۹۵±۰/۰۷۰	Azto479
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B221	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto480
۱/۸۰۰±۰/۰۵۰	B235	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto482
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B256	۱/۴۳۳±۰/۱۶۴	P180
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B267	۲/۵۸۳±۰/۰۵۷	P184
۱/۱۴۲±۰/۰۸۰	B270	۲/۳۲۷±۰/۰۹۸	P186
۲/۶۶۶±۰/۰۰۰	B271	۱/۹۲۳±۰/۰۱۰	P187
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B311	۳/۳۷۷±۰/۳۶۵	P188
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B312	۲/۳۷۱±۰/۱۱۱	P189
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B317	۱/۸۰۰±۰/۰۳۰	P190
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B320	۱/۹۲۳±۰/۰۰۰	P191
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B326	۲/۴۳۵±۰/۱۱۱	P192
۲/۳۳۳±۰/۲۸۰	B327	۲/۱۶۶±۰/۰۵۰	P193
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B331	۲/۴۱۶±۰/۰۰۰	P194
۱/۸۵۷±۰/۰۱۰	B416	۲/۲۲۲±۰/۰۰۱	P196
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B417	۲/۱۲۵±۰/۰۴۰	P214
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B444	۱/۶۶۶±۰/۰۰۰	P241
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B445	۲/۸۴۸±۰/۰۵۲	P283
۱/۸۵۱±۰/۱۲۸	B509	۲/۱۱۱±۰/۰۴۱	P526
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B517	۱/۵۷۱±۰/۰۳۰	P1
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B520	۱/۶۵۳±۰/۰۹۶	P4
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Bmeg	۲/۱۳۵±۰/۰۷۰	P6
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto469		

۰/۱۱۳۹ = LSD/۵

± مقدار خطای استاندارد



شکل ۴- مقایسه مقدار تولید سیدروفور گروه‌های آزوسپیریلام، باسیلوس، سودوموناس و ازتوباکتر (۵٪)؛ LSD=۰/۱۴؛ حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است.

انحلال فسفات آهن

نتایج حاصل از ارزیابی فسفات آهن حل شده توسط سویه‌ها نشان داد که ۲۵٪ از سویه‌های مورد مطالعه توانایی حل‌کنندگی فسفات آهن را داشتند. بیش‌ترین نسبت قطر هاله به کلونی مربوط به سویه‌های P192, P283, P241 به ترتیب ۳/۸۸ و ۳/۹۶ و ۴/۴۵ بود (جدول ۵).

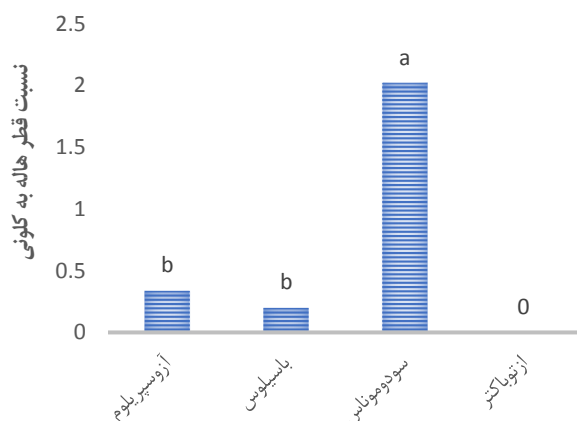
بیش‌ترین میانگین انحلال فسفات آهن به گروه سودوموناس تعلق گرفت. میانگین انحلال توسط گروه‌های آزوسپیریلام و باسیلوس اختلاف معنی‌داری باهم نشان ندادند. (شکل ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین سویه‌های مختلف باکتری در توان حل‌کنندگی فسفات آهن
(نسبت قطر هاله به کلونی)

حل‌کنندگی آهن	باکتری	حل‌کنندگی آهن	باکتری
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A231	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto470
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A232	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto471
۱/۹۰±۰/۰۱۰	A443	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto472
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A448	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto473
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A500	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto474
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A501	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto475
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A502	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto476
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	A503	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto477
۱/۴۵±۰/۰۷۲	Azosbra	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto478
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azoslipo	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto479
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B221	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto480
۲/۱۲±۰/۰۹۰	B235	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto482
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B256	۱/۴۴±۰/۰۸۰	P180
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B267	۱/۵۵±۰/۰۴۰	P184
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B270	۳/۵۵±۰/۱۱۱	P186
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B271	۳/۷۷±۰/۱۱۱	P187
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B311	۳/۶۶±۰/۰۵۷	P188
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B312	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P189
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B317	۳/۵۰±۰/۰۹۰	P190
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B320	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P191
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B326	۴/۴۵±۰/۰۷۲	P192
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B327	۳/۵۵±۰/۰۷۰	P193
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B331	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P194
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B416	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P196
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B417	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P214
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B444	۳/۸۸±۰/۱۱۱	P241
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B445	۳/۹۶±۰/۰۶۴	P283
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B509	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P526
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	B517	۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	P1
۲/۰۳±۰/۰۵۷	B520	۲/۷۰±۰/۰۶۴	P4
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Bmeg	۲/۳۰±۰/۰۰۰	P6
۰/۰۰۰±۰/۰۰۰	Azto469		

۰/۰۵۳=LSD (%۵)

± مقدار خطای استاندارد



شکل ۵- مقایسه توانایی انحلال فسفات آهن گروه‌های آزوسپیریلام، باسیلوس، سودوموناس و ازتوباکتر (۵٪) $LSD=0/053$ ؛ حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است.

آزادسازی پتاسیم

مقایسه میانگین مقدار آزادسازی پتاسیم توسط باکتری‌ها نشان داد که باکتری گروه باسیلوس و سودوموناس از بیش‌ترین میانگین به ترتیب در محیط کشت حاوی بیوتیت و مسکوویت برخوردار بودند. گروه ازتوباکتر کمترین آزادسازی پتاسیم در محیط حاوی بیوتیت و مسکوویت را داشتند (شکل‌های ۶ و ۷).

نتایج نشان داد که میزان پتاسیم آزادشده توسط سویه‌های مختلف برای کانی بیوتیت در محدوده ۴۳/۳۳-۲/۳۳ و برای کانی مسکوویت در دامنه ۳۰/۶۶-۳/۰۰ میلی-گرم بر لیتر بود (جدول ۶). سویه‌های B271، B326 و P214 به ترتیب ۲۷/۰۰ و ۲۷/۳۳ و ۴۳/۳۳ از کانی بیوتیت و سویه‌های B445، B326 و P214 به ترتیب ۲۳/۶۶ و ۲۴/۶۶ و ۳۰/۶۶ از کانی مسکوویت بیش‌ترین پتاسیم را آزاد کردند.

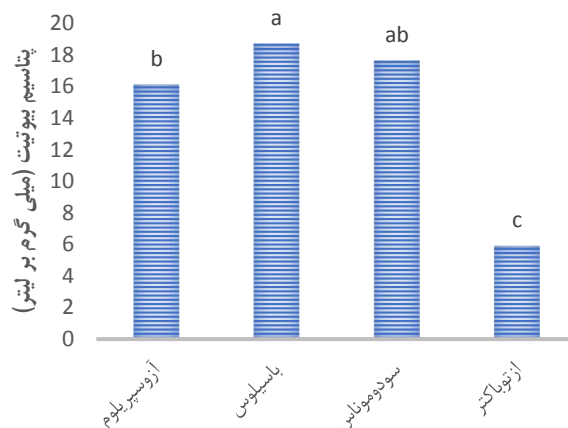
جدول ۶- مقایسه میانگین سوبه‌های مختلف در آزادسازی پتاسیم از کانیهای مسکوویت و بیوتیت

پتاسیم آزادشده (میلی گرم بر لیتر)		سوبه باکتری	پتاسیم آزادشده (میلی گرم بر لیتر)		سوبه باکتری
مسکوویت	بیوتیت		مسکوویت	بیوتیت	
۴/۶۶±۰/۶۲	۴/۳۳±۰/۰۷	Azto470	۱۲/۰۰±۰/۹	۱۷/۳۳±۰/۵۷	A231
۵/۰۰±۰/۳۲	۶/۶۰±۰/۶۶	Azto471	۱۱/۰۰±۰/۹۷	۷/۶۶±۰/۵۷	A232
۴/۹۶±۰/۶۱	۷/۴۶±۰/۳۳	Azto472	۱۶/۶۷±۱/۱۵	۱۹/۵۷±۰/۵۷	A443
۸/۵۳±۰/۲۳	۸/۶۲±۰/۶۶	Azto473	۲۲/۰۰±۲/۰۰	۱۷/۶۶±۱/۱۵	A448
۵/۳۷±۰/۶۳	۵/۹۲±۰/۹۶	Azto474	۱۰/۶۷±۰/۵۷	۱۶/۳۳±۰/۵۷	A500
۱۲/۴۶±۰/۳۳	۷/۶۶±۰/۶۹	Azto475	۱۶/۶۶±۰/۶۶	۱۰/۶۶±۰/۵۷	A501
۴/۷۵±۰/۰۵	۱۶/۶۶±۰/۵۲	Azto476	۱۸/۳۳±۰/۶۴	۱۶/۶۶±۱/۱۵	A502
۳/۰۰±۰/۰۰۵	۵/۳۵±۰/۲۹	Azto477	۱۳/۶۶±۰/۳۴	۲۲/۶۶±۰/۵۷	A503
۵/۳۳±۰/۲۱	۷/۳۳±۱/۳۰	Azto478	۱۲/۰۳±۰/۸۷	۱۸/۶۶±۰/۵۶	Azosbra
۳/۸۲±۰/۰۸	۵/۳۷±۰/۳۴	Azto479	۱۳/۶۷±۰/۳۴	۱۴/۰۰±۰/۰۹	Azoslipo
۵/۴۳±۰/۵۲	۶/۰۰±۰/۸۰	Azto480	۴/۳۳±۰/۳۷	۲۶/۶۶±۰/۵۷	B221
۴/۸۵±۰/۶۷	۵/۶۶±۰/۱۲	Azto482	۱۵/۳۳±۰/۶۷	۱۶/۳۳±۰/۵۷	B235
۱۲/۰۰±۰/۵۰	۱۱/۲۸±۰/۸۶	P180	۱۴/۰۰±۰/۰۸	۲۳/۶۶±۰/۶۴	B256
۱۰/۳۷±۰/۹۸	۱۸/۰۰±۰/۰۸	P184	۱۳/۵۷±۰/۵۴	۱۴/۶۶±۰/۵۴	B267
۱۵/۸۶±۰/۳۷	۲۲/۳۳±۲/۲۴	P186	۱۳/۳۳±۰/۳۳	۱۶/۶۶±۰/۶۶	B270
۱۳/۷۹±۰/۳۵	۱۴/۳۱±۱/۶۲	P187	۲۲/۵۶±۰/۶۱	۲۷/۳۳±۰/۹	B271
۱۴/۹۲±۰/۸۲	۱۵/۰۵±۱/۲۳	P188	۲۲/۰۰±۰/۰۷	۲۴/۳۳±۰/۳۳	B311
۱۸/۶۶±۰/۶۶	۱۸/۳۱±۰/۱۹	P189	۱۷/۵۴±۰/۳۹	۱۸/۶۱±۰/۶۹	B312
۱۴/۶۶±۰/۸۶	۹/۶۶±۰/۰۹	P190	۱۱/۲۸±۱/۳۳	۲۲/۶۶±۰/۳۷	B317
۱۴/۹۶±۰/۹۵	۱۰/۶۴±۰/۱۳	P191	۴/۳۷±۰/۵۹	۹/۳۷±۰/۹۱	B320
۱۶/۷۶±۱/۳۳	۱۶/۶۴±۰/۳۱	P192	۲۴/۶۷±۰/۳۸	۱۷/۳۳±۰/۷۹	B326
۱۲/۶۶±۰/۴۶	۱۴/۹۱±۱/۳۴	P193	۲۳/۰۰±۰/۰۷	۱۸/۰۰±۰/۰۴	B327
۱۶/۸۵±۱/۶۲	۲۲/۳۸±۱/۳۲	P194	۱۷/±۰/۶۸	۱۷/۰۰±۱/۰۵	B331
۲۲/۷۴±۱/۸۲	۲۵/۶۲±۰/۷۵	P196	۱۷/۳۳±۰/۶۴	۲۳/۶۸±۰/۶۱	B416
۳۰/۸۲±۱/۳۶	۴۳/۳۸±۲/۲۸	P214	۱۴/۳۳±۰/۹۷	۱۴/۳۳±۰/۳۷	B417
۱۶/۴۵±۰/۶۴	۱۴/۳۸±۱/۳۵	P241	۶/۹۳±۰/۳۷	۱۰/۶۶±۰/۹۵	B444
۱۲/۶۸±۰/۳۹	۱۵/۲۶±۰/۶۶	P283	۲۳/۹۱±۰/۶۶	۱۹/۶۶±۰/۳۷	B445
۱۹/۰۰±۰/۹۰	۱۸/۲۸±۱/۰۹	P526	۳/۰۰±۰/۰۱	۱۵/۳۳±۰/۸۳	B509
۱۹/۴۹±۰/۸۵	۱۶/۶۹±۰/۶۵	P1	۷/۶۸±۰/۹۳	۳۳/۳۳±۰/۳۳	B517
۱۰/۲۱±۱/۶۲	۱۴/۲۳±۰/۳	P4	۱۰/۳۷±۰/۷۱	۱۸/۳۷±۰/۹۱	B520
۱۶/۶۶±۰/۸۶۳	۱۵/۶۹±۰/۴۶	P6	۹/۰۸±۰/۵۰	۱۶/۰۰±۰/۶۸	Bmeg
			۳/۹۲±۰/۶۵	۲/۳۳±۰/۹۶	Azto469

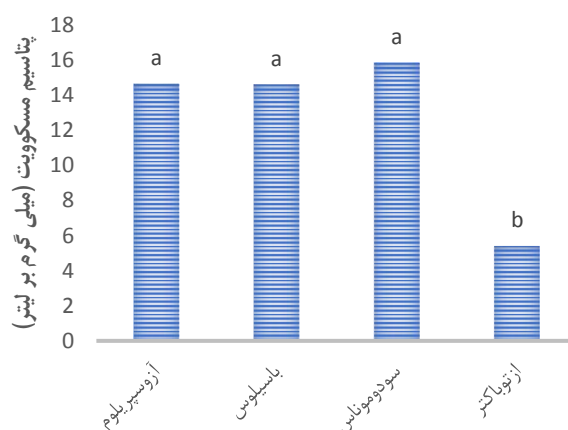
۱/۸۱۷۰ =LSD (5%)

۱/۱۲۲۳ =LSD (%)

± مقدار خطای استاندارد



شکل ۶ - مقایسه توانایی آزادسازی پتاسیم توسط گروه‌های آزوسپیریلام، باسیلوس، سردوموناس و ازتوباکتر از بیوتیت (۵٪).
 $LSD=1/82$; حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است.



شکل ۷ - مقایسه توانایی آزادسازی پتاسیم موسکویت گروه‌های آزوسپیریلام، باسیلوس، سردوموناس و ازتوباکتر (۵٪).
 $LSD=0/14$; حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است.

تولید EPS

مقایسه میانگین گروه‌ها نشان داد که گروه سردوموناس بیش‌ترین میزان و گروه باسیلوس کمترین مقدار EPS را تولید کرد. آزوسپیریلام و ازتوباکتر اختلاف معنی‌داری باهم نشان ندادند (شکل ۸).

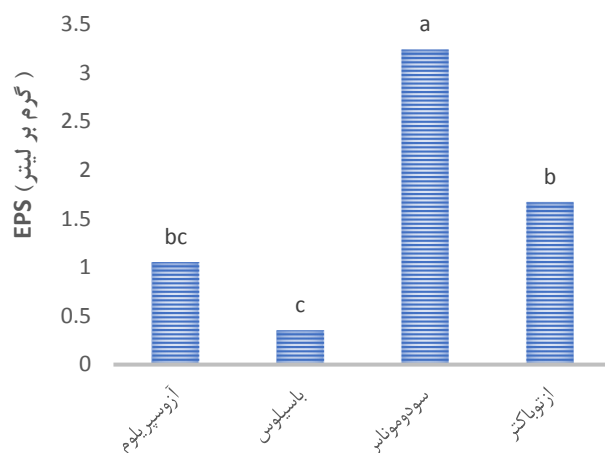
نتایج نشان داد که ۵۰٪ از سویه‌ها توانایی تولید EPS را داشتند. میزان تولید EPS سویه‌های مختلف بین ۰/۲ تا ۶/۸۴ بود، بیش‌ترین مقدار متعلق به سویه‌های سردوموناس P190، P283 و P526 به ترتیب به میزان ۶/۰۴ و ۶/۶۰ و ۶/۸۴ گرم در لیتر بود (جدول ۷).

جدول ۷- مقایسه میانگین سویه‌های مختلف در تولید EPS (میلی گرم در میلی لیتر)

سویه باکتری	EPS	سویه باکتری	EPS
A231	./...±./...	Azto470	۱/۹۶±./۰۶
A232	./...±./...	Azto471	./۲۹±./۰۱
A443	./...±./...	Azto472	۲/۴۳±./۱۴
A448	./...±./...	Azto473	./۸۱±./۰۲
A500	./...±./...	Azto474	./۷۰±./۰۰۷
A501	./...±./...	Azto475	./۸۲±./۰۰۱
A502	±۳/۶۸±۱/۱۲	Azto476	۱/۵۶±./۰۰۵
A503	۲/۲۲±./۶۴	Azto477	۱/۹۲±./۴۱
Azosbra	./...±./...	Azto478	۴/۷۹±./۲۴
Azoslipo	۴/۶۲±./۳۸	Azto479	۱/۷۹±./۴۴
B221	./...±./...	Azto480	۱/۷۶±./۰۶
B235	./...±./...	Azto482	۱/۸۷±./۱۷
B256	./...±./...	P180	./...±./...
B267	./...±./...	P184	./...±./...
B270	./...±./...	P186	۵/۲۱±./۰۳۸
B271	۲/۰۵±./۱۷	P187	۵/۳۸±./۴۱
B311	./...±./...	P188	۳/۴۴±./۱۰۰
B312	./...±./...	P189	./...±./...
B317	./...±./...	P190	۶/۳۴±./۴۱
B320	./...±./...	P191	./...±./...
B326	./...±./...	P192	۴/۱۵±./۰۰۶
B327	./۵۹۲±./۰۰۶	P193	۵/۰۱±./۲۴
B331	./۵۸۸±./۰۴	P194	۴/۹۸±./۵۸
B416	۱/۶۷±./۰۴	P196	./...±./...
B417	./۲۱۱±./۰۵	P214	۱/۹۸±./۲۰
B444	./۴۲۱±./۰۴	P241	۵/۹۲±./۱۱
B445	./...±./...	P283	۶/۶۰±./۵۷
B509	./...±./...	P526	۶/۸۴±./۱۴
B517	./...±./...	P1	۵/۹۸±./۳۷
B520	۱/۸۸±./۰۵	P4	./...±./...
Bmeg	./...±./...	P6	./...±./...
Azto469	./۹۷۰±./۰۲		

۱/۲۱۳۹ =LSD (5%)

± مقدار خطای استاندارد



شکل ۸- مقایسه توانایی تولید EPS توسط گروه‌های آزوسپیریلوم، باسیلوس، سودوموناس و ازتوباکتر (۵٪)؛ LSD=۱/۲۱؛ حروف مشترک نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح ۵ درصد است)

بحث

استفاده شد. در گزارش‌های دیگری هم آمده که افزودن تریپتوفان تولید اکسین را افزایش می‌دهد (سرور و همکاران، ۱۹۹۲؛ ژائو، ۲۰۱۲). تولید اکسین توسط سودوموناس پوتیدا سویه ۲-GR۱۲ با افزایش تریپتوفان به محیط کشت باکتری افزایش یافت به طوری که در غلظت‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر تریپتوفان به ترتیب ۱۴/۵، ۲۲/۵، ۲۶/۲ و ۳۲/۷ میلی‌گرم در لیتر اکسین تولید شد (پاتن و گلیک، ۲۰۰۲). افزودن تریپتوفان به TSB توانایی تولید اکسین را توسط باکتری سودوموناس فلورسنس سویه M۲۰ افزایش داد بطوریکه در غلظت‌های ۰/۱، ۲۵ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر التریپتوفان به ترتیب ۷/۱، ۱۲ و ۹۶ میلی‌گرم در لیتر اکسین تولید شد (استاسویک، ۲۰۰۹). در محیط کشت حاوی پودر سویا به عنوان منبع تریپتوفان سه سویه سودوموناس پوتیدا و یک سویه سودوموناس ائروژینوزا توانستند به ترتیب مقادیر ۱۴/۸، ۲۱/۲، ۲۸/۷ و ۲۱/۲ میلی‌گرم در لیتر IAA تولید کنند (تورس-روبیو و همکاران، ۲۰۰۰). سویه‌های سودوموناس فلورسنت کشت شده در محیط غذایی مایع نوترینت حاوی ۵ گرم در لیتر ال - تریپتوفان توانایی تولید ۴۱ تا ۵۳/۲ میلی‌گرم در لیتر اکسین را نشان دادند (شارما، ۲۰۱۳). سه سویه سودوموناس فلورسنس B۱۶، 45M و MCO۷ کشت شده در محیط حداقل حاوی ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر ال تریپتوفان توانستند به ترتیب مقادیر ۰/۷، ۱۴/۹ و ۱۹/۵

گروه PGPR تولیدکننده هورمون‌های گیاهی مانند اکسین‌ها می‌توانند ابزار مهمی در توسعه کودهای زیستی باشند زیرا این هورمون‌ها نقش مهمی در توسعه و تقسیم سلولی، جوانه‌زنی و رشد ریشه دارند (نسیم و همکاران ۲۰۱۸). در مطالعه‌ای مشخص شد که سویه‌های تولیدکننده مقدار زیاد اکسین در مقایسه با گروه‌های دارای توانایی تولید متوسط و ضعیف تأثیر بیشتری بر جوانه‌زنی گیاه داشته‌اند (خالد و همکاران، ۲۰۰۴). بررسی تولید اکسین توسط ۵۳ سویه PGPR نشان داد که بین ۱/۳ تا ۷ میلی‌گرم در لیتر اکسین تولید کردند و کارآمدترین آن‌ها سویه‌ای از سودوموناس بود (احمد و همکاران، ۲۰۰۵). ال-تریپتوفان به عنوان یک پیش ماده برای بیوسنتز IAA در باکتری‌ها شناخته شده (سرور، ۱۹۹۳) و ایده مسیر وابسته به تریپتوفان در بیوسنتز آن ارائه شده است (رادوانسکی و لست، ۱۹۹۵). مقایسه میانگین‌های اثر غلظت‌های مختلف ال-تریپتوفان در تولید اکسین در محیط TSB نشان داد که با افزایش تریپتوفان توانایی تولید اکسین توسط سویه‌ها افزایش یافت. باکتری‌های P214، P241، P283 و P187 در سطح ال-تریپتوفان ۵۰ بالاترین مقدار اکسین را تولید کردند. گزارش شده است که تولید ایندول -۳- استیک اسید به وسیله ریزجانداران خاک در حضور پیش ماده تریپتوفان صورت می‌گیرد (بلیمو و همکاران، ۲۰۱۵). در این پژوهش از دو روش با و بدون ال-تریپتوفان

۴۴۷/۶ و ۴۲۷/۷ میلی‌گرم در لیتر فسفر محلول تولید کنند (ژئون و همکاران، ۲۰۰۳).

قسمت اعظم آهن در خاک به صورت آهن فریک (Fe^{3+}) می‌باشد (منگل و همکاران، ۲۰۰۱) که دارای حلالیت ناچیزی بوده و عملاً برای گیاهان و ریزجانداران قابل جذب نیست (یوسف و همکاران، ۲۰۲۲). تعدادی از باکتری‌ها قادرند فسفات آهن موجود در خاک را جذب و آن را در اختیار گیاه قرار دهند (کلپر و همکاران، ۱۹۸۹). در این پژوهش، P283 و P192 بیش‌ترین میزان حل‌کنندگی فسفات آهن را داشتند. از طرف دیگر، فیتوسیدروفورها لیگاندهای شیمیایی هستند که کمپلکس پایداری با آهن تشکیل داده و باعث جذب آن توسط گیاه می‌شوند. گروه PGPR توانایی تولید سیدروفورهای میکروبی را دارند که قادرند آهن موردنیاز گیاه را فراهم نماید (اسکاونیو و پدرازا، ۲۰۱۳). در این پژوهش نتایج حاصل از ارزیابی توانایی تولید سیدروفور نشان داد که اکثر سویه‌ها توانستند بر روی محیط CAS هاله‌های نارنجی رنگ که دلیلی بر تولید سیدروفور است، تولید کنند. میانگین نسبت قطر هاله به قطر کلونی سویه‌ها باهم اختلاف داشت و بیش‌ترین نسبت قطر هاله به کلونی مربوط به سویه‌های B271، P283 و P188 بود.

پتاسیم، نقش محوری در فرآیندهای فیزیولوژیکی حیاتی مانند فعال‌سازی آنزیم‌ها، سنتز پروتئین‌ها، فتوسنتز و تنظیم اسمزی ایفا می‌کند (کینابو و سلمان، ۲۰۱۵؛ جانسون و همکاران، ۲۰۱۶). استفاده از سویه‌های دارای توانایی زیاد در آزادکنندگی پتاسیم در کودهای زیستی در تأمین این عنصر دارای اهمیت است. در این پژوهش سویه‌های باکتری و نوع کانی حاوی پتاسیم تأثیر متفاوتی بر حل‌کنندگی پتاسیم داشتند (جدول ۶). میزان پتاسیم حل‌شده توسط سویه‌های مختلف برای کانی موسکویت در دامنه ۳۰/۶۶-۳/۰ میلی‌گرم بر لیتر و برای کانی بیوتیت ۴/۳۳-۲/۳۳ میلی‌گرم بر لیتر بود. سویه‌های B271، P214 و B326 سبب بیش‌ترین میزان حل‌کنندگی پتاسیم در دو کانی شدند. آزادسازی پتاسیم از کانی فلدسپار توسط

میلی‌گرم در لیتر اکسین تولید کنند (جئون و همکاران، ۲۰۰۳). در پژوهش حاضر، بعضی از سویه‌ها همانند Azto474، A232 و A231 توانستند غلظت‌های بالایی از اکسین را در سطح صفر ال-تریپتوفان تولید کنند. تولید میزان زیاد اکسین توسط این سویه‌ها در غلظت صفر تریپتوفان را می‌توان به وجود مقادیر زیاد پیتون در محیط TSB ربط داد. گزارش‌شده که ۱۱ سویه سودوموناس فلورسنت و ۸ سویه ازتوباکتر در محیط کشت مایع بدون اضافه کردن تریپتوفان به میزان ۵/۳۴ تا ۲۲/۴ میلی‌گرم در لیتر اکسین تولید کردند (احمد و همکاران، ۲۰۰۵). در پژوهش دیگری نیز گزارش شده که سویه‌های ازتوباکتر و آزوسپیریوم از مسیرهای مختلفی توانستند برای تولید اکسین استفاده کنند؛ بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری نمود که این نوع از سویه‌ها از مسیر دیگری برای بیوسنتز IAA استفاده کرده باشد.

گروه PGPR با استفاده از تولید آنزیم فسفاتاز و تولید اسیدهای آلی و معدنی و از طریق کاهش pH محیط، اشکال کم محلول و نامحلول فسفر را به شکل محلول و قابل جذب گیاه درمی‌آورند (سیلوا و همکاران، ۲۰۲۳؛ کوندو و گاور، ۱۹۸۰؛ کپرت و همکاران، ۱۷۹۷). گزارش شده که اسیدهای آلی می‌توانند کمپلکس‌های محلول با یون‌های فلزی پیوند شده با فسفر مانند کلسیم، آلومینیوم و آهن تشکیل دهند و بدین طریق باعث آزادسازی فسفر می‌شوند (شارما و همکاران، ۲۰۱۳). نتایج ما نشان داد که بیشتر سویه‌ها توانایی انحلال $Ca_3(PO_4)_2$ را داشتند و بیش‌ترین مقدار مربوط به P187 بود. در پژوهشی ده باکتری و سه قارچ جداشده از ریزوسفر برنج توانایی بالایی در حل فسفات‌های معدنی داشتند و شاخص حلالیت (نسبت قطر هاله + کلونی به قطر کلونی) در این سیزده ایزوله بین ۲/۱۶ و ۶/۲۳ میلی‌گرم در لیتر متغیر بود (راشید و همکاران، ۲۰۰۴). بررسی‌ها نشان دادند که سه سویه سودوموناس فلورسنتس MCOV، 45M و B16 کشت شده در محیط PKV توانستند در مدت ۵ روز به ترتیب ۴۵۸/۳،

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تعداد ۶۳ سویه متعلق به چهار گروه مهم باکتری‌های محرک رشد (PGPR) گیاه بومی خاک‌های ایران شامل سودوموناس، ازتوباکتر، باسیلوس و آزوسپیریوم از نظر ویژگی‌های محرک رشدی بررسی و مقایسه شدند. نتایج نشان داد که گروه سودوموناس از نظر تولید سیدروفور، انحلال فسفات آهن نامحلول، پلی ساکاریدهای خارج سلولی (EPS)، حل‌کنندگی فسفات‌های معدنی و آلی با سه گروه دیگر اختلاف معنی داری نشان دادند. دو گروه سودوموناس و ازتوباکتر بالاترین میزان IAA را در سطوح ال-تریپتوفان صفر و ۵۰ گرم در لیتر تولید کردند. گروه باسیلوس بیش‌ترین توانایی آزادسازی پتاسیم از بیوتیت و سودوموناس از موسکویت را داشتند. با اینکه سودوموناس‌ها در بیشتر خصوصیات محرک رشدی از سویه‌های برتری برخوردار بودند با این‌حال با توجه به اینکه سایر گروه‌ها هم در برخی ویژگی‌های دیگر برتری نشان دادند بنابراین پیشنهاد می‌شود برای استفاده از این سویه‌ها به عنوان مایه تلقیح یا کود زیستی، در پژوهش‌های آتی از ترکیبی از سویه‌های برتر هر گروه هم استفاده شود.

باکتری‌های محرک رشد به سبب ترشح اسیدهای آلی گزارش شده است (سیندهو و همکاران، ۲۰۱۶). همچنین گزارش شده که ازتوباکتر موجب آزادسازی پتاسیم از کانی ارتوکلاز شده است (خلیل و همکاران، ۲۰۱۰).

در این پژوهش، گروه سودوموناس بیش‌ترین مقدار EPS را تولید کرد. گزارش شده که همبستگی مثبتی بین میزان تحمل به تنش خشکی و تولید EPS توسط جدایه سودوموناس پوتیدا / GAP-P45 وجود دارد، بطوریکه با افزایش تنش خشکی و تولید EPS توسط باکتری افزایش می‌یابد؛ همچنین تشکیل بیوفیلم در نتیجه تولید پلی‌ساکارید در اطراف جدایه باکتری سبب توسعه خاک‌دانه‌سازی، افزایش میزان و پایداری خاک چسبیده به ریشه و همچنین تنظیم پتانسیل ماتریک در محیط ریزوسفر شده است (ساندهیا و همکاران، ۲۰۰۹).

Reference

1. Ahmad, F., Ahmad, I., and Sahirkhan, M. 2005. Indoleacetic acid production by indigenous isolates of *Azotobacter* and *fluorescent pseudomonas* in the presence and absence of tryptophan. *Turk. J. Biol.* 29: 29-34.
2. Alexander, D. B., & Zuberer, D. A. 1991. Use of chrome azurol S reagents to evaluate siderophores production by rhizosphere bacteria. *Biology and Fertility of soils*, 12, 39-45. <https://doi.org/10.1007/BF00369386>.
3. Aleksandrow, V.G. Blagodyr, R.N. and Iiiev, I.P., 1967. Liberation of phosphoric acid from apatite by silicate bacteria. *Mikrobiolohichnyi zhurnal*, 29, 111-114.
4. Belimov, A.A., Dodd, I.C., Safronova, V.I., Shaposhnikov, A.I., Azarova, T.S., Makarova, N.M., Davies, W.J. and Tikhonovich, I.A., 2015. Rhizobacteria that produce auxins and contain 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid deaminase decrease amino acid concentrations in the rhizosphere and improve growth and yield of well-watered and water-limited potato (*Solanum tuberosum*). *Annals of Applied Biology*, 167(1), pp.11-25. <https://doi.org/10.1111/aab.12203>
5. Dobbelaere, S., Vanderleyden, J. and Okon, Y., 2003. Plant growth-promoting effects of diazotrophs in the rhizosphere. *Critical reviews in plant sciences*, 22(2), pp.1071. <https://doi.org/10.1080/713610853>
6. Egamberdiyeva, D. and Höflich, G., 2002. Root colonization and growth promotion of winter wheat and pea by *Cellulomonas* spp. At different temperatures. *Plant Growth Regulation*, 38, pp.219-224. <https://doi.org/10.1023/A:1021538226573>
7. Ehmann, A. 1977. The Van Urk-Salkowski reagent-a sensitive and specific chromogenic reagent for silica gel thin-layer chromatographic detection and identification of indole derivatives. *Journal of Chromatography*. 132, 267-276. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(00\)89300-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(00)89300-0)
8. Ghosh, S., Mondal, S., Banerjee, S., Mukherjee, A. and Bhattacharyya, P., 2023. Temporal dynamics of potassium release from waste mica as influenced by potassium mobilizing bacteria. *J Pure Appl Microbiol*, 17(1). <https://doi.org/10.22207/JPAM.17.1.17>
9. Glick, B.R., 2015. *Beneficial plant-bacterial interactions* (Vol. 243). Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13921-0>
10. Goswami, S.P., Maurya, B.R., Dubey, A.N. and Singh, N.K., 2019. Role of phosphorus solubilizing microorganisms and dissolution of insoluble phosphorus in soil. *International Journal of Chemical Studies*, 7(3), pp.3905-3913.
11. Jalali, M., 2006. Kinetics of non-exchangeable potassium release and availability in some calcareous soils of western Iran. *Geoderma*, 135, pp.63-71. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.11.006>
12. Jeon, J.S., Lee, S.S., Kim, H.Y., Ahn, T.S. and Song, H.G., 2003. Plant growth promotion in soil by some inoculated microorganisms. *The Journal of Microbiology*, 41(4), pp.271-276.
13. Johnston, A. E., Poulton, P. R., Goulding, K. W., Macdonald, A. J., & Glendinning, M. J. 2016. Potassium management in soils and crops: A review. In *Proceedings of the International Fertiliser Society*, 792:52
14. Kepert, D.G., Robson, A.D. and Posner, A.M., 1979. The effect of organic root products on the availability of phosphorus to plants. In *The soil-root interface* (pp. 115-124). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-325550-1.50015-X>
15. Khalid, A., Arshad, M. and Zahir, Z.A., 2004. Screening plant growth-promoting rhizobacteria for improving growth and yield of wheat. *Journal of*

- applied microbiology, 96(3), pp.473-480. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2672.2003.02161.x>
16. Khalil, A.A., Fetyan, N.A. and Hemeid, N.M., 2010. Effect of *Bacillus circulans* and *Azotobacter chroococcum* inoculation on potato roduction in presence of different mineral potassium sources. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, 1(9), pp.471-483. <https://doi.org/10.21608/jacb.2010.90059>
17. Khosravi, H., Khoshru, B., Nosratabad, A.F. and Mitra, D., 2024. Exploring the landscape of biofertilizers containing plant growth-promoting rhizobacteria in Iran: progress and research prospects. *Current Research in Microbial Sciences*, p.100268. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100268>
18. Kinabo, J.O.Y.C.E. and SALAAM, D., 2015. Role of potassium in human and animal nutrition. In *First National Potash Symposium Dares Salaam*.
19. Kloepper, J.W., Lifshitz, R. and Zablotowicz, R.M., 1989. Free-living bacterial inocula for enhancing crop productivity. *Trends in biotechnology*, 7(2), pp.39-44. [https://doi.org/10.1016/0167-7799\(89\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0167-7799(89)90057-7)
20. Kumar, P., Kumar, T., Singh, S., Tuteja, N., Prasad, R. and Singh, J., 2020. Potassium: A key modulator for cell homeostasis. *Journal of Biotechnology*, 324, pp.198-210. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.10.018>
21. Kundu, B.S. and Gaur, A.C., 1980. Establishment of nitrogen-fixing and phosphate-solubilising bacteria in rhizosphere and their effect on yield and nutrient uptake of wheat crop. *Plant and soil*, 57, pp.223-230. <https://doi.org/10.1007/BF02211682>
22. Mengel, K., Kirkby, E.A., Kosegarten, H. and Appel, T., 2001. The soil as a plant nutrient medium. *Principles of plant nutrition*, pp.15-110. https://doi.org/10.1007/978-94-010-1009-2_2
23. More, T.T., Yadav, J.S.S., Yan, S., Tyagi, R.D. and Surampalli, R.Y., 2014. Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications. *Journal of environmental management*, 144, pp.1-25. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.010>
24. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200008\)163:4<393::AID-JPLN393>3.3.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4<393::AID-JPLN393>3.3.CO;2-N)
25. Naseem, H., Ahsan, M., Shahid, M.A. and Khan, N. 2018. Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance. *Journal of basic microbiology*.58 (12): 1009-1022. <https://doi.org/10.1002/jobm.201800309>
26. Nautiyal, C.S., 1999. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS microbiology Letters*, 170(1), pp.265-270. [https://doi.org/10.1016/S0378-1097\(98\)00555-2](https://doi.org/10.1016/S0378-1097(98)00555-2)
27. O'sullivan, D.J. and O'Gara, F., 1992. Traits of *fluorescent Pseudomonas* spp. involved in suppression of plant root pathogens. *Microbiological reviews*, 56(4), pp.662-676. <https://doi.org/10.1128/MMBR.56.4.662-676.1992>
28. Patten, C.L. and Glick, B.R., 2002. Role of *Pseudomonas putida* indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and environmental microbiology*, 68(8), pp.3795-3801. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.8.3795-3801.2002>
29. Pikovskaya, R., 1948. Mobilization of phosphorus in soil in connection with vital activity of some microbial species. *Mikrobiologiya* 17: 362-370. *Plant Soil*, 287, pp.77-84.
30. Radwanski, E.R. and Last, R.L. 1995. Tryptophan biosynthesis and metabolism: biochemical and molecular genetics. *The Plant Cell*, 7(7), p.921. <https://doi.org/10.2307/3870047>
31. Rafi, M.M., Krishnaveni, M.S., and Charyulu, P. 2019. Phosphate-solubilizing microorganisms and their

- emerging role in sustainable agriculture. In V. Buddolla Ed., Recent Developments in Applied Microbiology and Biochemistry pp. 223-233.
[<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816328-3.00017-9>]
32. Rashid, M., Khalil, S., Ayub, N., Alam, S. and Latif, F., 2004. Organic acids production and phosphate solubilization by phosphate solubilizing microorganisms (PSM) under in vitro conditions. *Pak J Biol Sci*, 7(2), pp.187-196. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2004.187.196>
 33. Sandhya, V.Z.A.S., Grover, M., Reddy, G. and Venkateswarlu, B. 2009. Alleviation of drought stress effects in sunflower seedlings by the exopolysaccharides producing *Pseudomonas putida* strain GAP-P45. *Biology and fertility of soils*. 46(1):17-26. <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0401-z>
 34. Sarwar, M. and Frankenberger, W.T., 1994. Influence of L-tryptophan and auxins applied to the rhizosphere on the vegetative growth of *Zea mays* L. *Plant and Soil*, 160, pp.97-104. <https://doi.org/10.1007/BF00150350>
 35. Sarwar, M., 1993. Microbial production of auxins in soil and their influence on plant growth. University of California, Riverside.
 36. Sarwar, M., Arshad, M., Martens, D.A. and Frankenberger, W.T., 1992. Tryptophan-dependent biosynthesis of auxins in soil. *Plant and Soil*, 147, pp.207-215. <https://doi.org/10.1007/BF00029072>
 37. Scavino, A.F. and Pedraza, R.O., 2013. The role of siderophores in plant growth-promoting bacteria. In *Bacteria in agrobiolgy: crop productivity* (pp. 265-285). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-37241-4_11
 38. Sharma, S.B., Sayyed, R.Z., Trivedi, M.H. and Gobi, T.A., 2013. Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2, pp.1-14. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
 39. Silva, L.I.D., Pereira, M.C., Carvalho, A.M.X.D., Buttrós, V.H., Pasqual, M. and Dória, J., 2023. Phosphorus-solubilizing microorganisms: a key to sustainable agriculture. *Agriculture*, 13(2), p.462. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020462>
 40. Sindhu, S.S., Parmar, P., Phour, M. and Sehrawat, A., 2016. Potassium-solubilizing microorganisms (KSMs) and its effect on plant growth improvement. *Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture*, pp.171-185. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2776-2_13
 41. Skvortsov, I.M. and Ignatov, V.V. 1998. Extracellular polysaccharides and polysaccharide-containing biopolymers from *Azospirillum* species: properties and the possible role in interaction with plant roots. *FEMS microbiology letters*, 165(2): 223-229. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1998.tb13150.x>
 42. Staswick, P.E., 2009. The tryptophan conjugates of jasmonic and indole-3-acetic acids are endogenous auxin inhibitors. *Plant physiology*, 150(3), pp.1310-1321. <https://doi.org/10.1104/pp.109.138529>
 43. Sundara, B., Natarajan, V. and Hari, K., 2002. Influence of phosphorus solubilizing bacteria on the changes in soil available phosphorus and sugarcane and sugar yields. *Field crops research*, 77(1), pp.43-49. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00048-5)
 44. Torres-Rubio, M.G., Valencia-Plata, S.A., Bernal-Castillo, J. and Martínez-Nieto, P., 2000. Isolation of Enterobacteria, *Azotobacter* sp. and *Pseudomonas* sp., producers of indole-3-acetic acid and siderophores, from Colombian rice rhizosphere. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42(4), pp.171-176.
 45. Yousuf, S., Naqash, N. and Singh, R., 2022. Nutrient Cycling: An Approach for Environmental Sustainability. *Environmental Microbiology*:

Advanced Research and
Multidisciplinary Applications;
Bentham Science Publisher: Sharjah,
United Arab Emirates, p.77.
<https://doi.org/10.2174/9781681089584122010007>

46. Zhao, Y., 2012. Auxin biosynthesis: a simple two-step pathway converts tryptophan to indole-3-acetic acid in plants. *Molecular plant*, 5(2), pp.334-338. <https://doi.org/10.1093/mp/ssr104>