

Research Article

Agricultural Engineering, 45(1) (2022) 21-35
DOI: 10.22055/AGEN.2022.39735.1627

ISSN (E): 2588-526X
ISSN (P): 2588-5944

Evaluation of *Streptomyces* inoculation and soil application of silicon on growth and nutrient concentration in soybean

R. Khodadadi¹ and R. Ghorbani Nasrabadi^{2*}

1. Ph.D Student soil biology and biotechnology, Department of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. Assistant professor of the soil biology and biotechnology, Department of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Received: 12 January 2022

Accepted: 23 May 2022

Abstract

Introduction: *Streptomyces* is the most important and dominant genus of actinomycetales with more than 664 species which some of its species may stimulate plant growth through nutritional and physiological mechanisms that include: dissolution of phosphates, production of siderophores and phytohormones, biological Nitrogen fixation and production of antifungal metabolites. Silicon has significant positive effects on improving the growth and physiological characteristics of the plant by improving the root system, biosynthesis of phytohormones, resistance to biological and non-biological stresses and nutrient uptake. Improvement of the silicon concentration in the plant depends on its availability in soil. Soil application of resources with appropriate amount of silicon is of great importance in increasing the availability and uptake of silicon. It is also documented that the co-application of plant growth promoting bacteria and silicon is a useful and efficient method to increase plant growth and yield under normal and stress conditions. Due to beneficial effects of plant growth promoting bacteria and silicon in improving crop growth and also the importance of soil application of different silicon sources, the aim of this study was to Investigate the effect of *Streptomyces* isolate, silicon application using calcium-magnesium silicate source and the combined application of *Streptomyces* + silicon on growth parameters, chlorophyll content and accumulation of some nutrients in soybean (*Glycine max* L.)

Materials and Methods: A pot experiment was designed *as factorial* in a complete randomized design with 3 replications under natural light and temperature conditions. Experimental treatments included soil application of calcium-magnesium silicate source (37.9% silicon dioxide) at four levels 0 (M₁), 200 (M₂), 400 (M₃) and 600 (M₄) kg Si ha⁻¹ and two levels of inoculation with *Streptomyces* isolates (no inoculation (B₀) and inoculation with *Streptomyces* (B₁)). Surface-sterilized seeds were inoculated with a suspension of (10⁷ CFU mL⁻¹) *Streptomyces* isolate. The effect of experimental treatments on plant development stage (late vegetative growth period) was investigated. The soybean plants were harvested after 10 weeks of growth period from soil surface. Plant growth parameters including shoot and root biomass, root volume and plant height were determined. Also, chlorophyll content (a, b, Total) and concentration of nitrogen, silicon, phosphorus and potassium in the shoot were measured.

Results and Discussion: The results of the present study showed a positive and significant effect of the co- application of silicon and *Streptomyces* inoculation on improvement of the growth



characteristics and chlorophyll content compared to their separate application. The highest amounts of shoot biomass (19.3 g per pot), root biomass (7.6 g per pot), root volume (38.07 cm³), plant height (98 cm) and chlorophyll a (18.07 mg / g), chlorophyll b (14.4 mg / g) and total chlorophyll (32.4 mg / g) were measured in the co-application of 600 kg ha⁻¹ Si (M₄) and *Streptomyces* inoculation (M₄B). Our results showed the improvement of soybean growth parameters could be due to the positive effect of *Streptomyces* isolate on plant growth promotion and utilization of calcium-magnesium silicate in soil. Combined application of silicon and *Streptomyces* inoculation increased the concentration of silicon, nitrogen, phosphorus and potassium in the M₄B treatment compared with the lonely application of highest level of silicon source (M₄) by 16.25, 7.45, 45.6, 51.7%, respectively.

Conclusion: Based on the results of the present study soil application of calcium-magnesium silicate increased plant growth and physiological factors. *Streptomyces* inoculation improved the effects of calcium-magnesium silicate levels to enhance growth parameters, chlorophyll content and nutrient concentration (silicon, nitrogen, phosphorus and potassium) in soybeans. This study was carried out in pot experiment at the vegetative growth stage of soybean. Therefore, supplementary studies are necessary in field and harvest stage.

Keywords: *Streptomyces, inoculation, silicon, soybean, plant growth*

ارزیابی مایه‌زنی استرپتومایسس و مصرف خاکی سیلسیم بر ویژگی‌های رشدی و غلظت عناصر غذایی سویا

رضا خدادادی^۱ و رضا قربانی نصرآبادی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

۲- استادیار بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

پذیرش نهایی: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲

کلمات کلیدی:

استرپتومایسس،

سیلسیم،

نیتروژن،

فسفر

چکیده

امروزه کاربرد تلفیقی باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPB) و سیلسیم (Si) به عنوان یک روش پایدار برای افزایش تولیدات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس پژوهشی گلدانی با هدف پایش اثر جدایی‌ی استرپتومایسس^۲ و مصرف خاکی سیلسیم از منبع سیلیکات کلسیم-منیزیم بر شاخص‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه سویا رقم (DPX) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با تیمارهای آزمایشی: مصرف خاکی سیلسیم (۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم سیلسیم در هکتار)، مایه‌زنی استرپتومایسس (مایه‌زنی، عدم مایه‌زنی) و کاربرد تلفیقی مایه‌زنی استرپتومایسس + مصرف خاکی سیلسیم در ۳ تکرار در مجموع ۲۴ واحد آزمایشی در محوطه پردیس دانشگاه علوم کشاورزی گرگان انجام شد. بر اساس نتایج، مایه‌زنی استرپتومایسس سبب بهبود تاثیر مصرف خاکی سیلسیم بر شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیک و جذب عناصر غذایی سویا گردید. بیشترین میزان زیست‌توده اندام هوایی (۱۹/۳ گرم در گلدان)، ریشه (۷/۶۷ گرم در گلدان)، کلروفیل کل (۳۲/۴۸ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) در تیمار کاربرد تلفیقی بالاترین سطح سیلسیم (۶۰۰ کیلوگرم سیلسیم در هکتار) + مایه‌زنی استرپتومایسس (M₃B) ثبت شد. روند هم‌افزایی مثبت مایه‌زنی استرپتومایسس در بهبود اثرات سطوح دیگر منبع سیلسیم بر محتوی کلروفیل با افزایش ۴۱/۷۶، ۴۹/۱ درصدی به ترتیب در تیمارهای تلفیقی (۴۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم سیلسیم در هکتار) + مایه‌زنی (M₁B, M₂B) مشهود بود. مایه‌زنی استرپتومایسس تأثیر به-

* عهده دار مکاتبات

Email: rgnasr@yahoo.com

1- Plant Growth Promoting Rhizobacteria

2- Strobotomyces

سزایی در افزایش غلظت سیلسیم (۵/۸ درصد)، نیتروژن (۱۶/۵۲)، فسفر (۲۳/۶ درصد)، پتاسیم (۱۲/۰۵ درصد) اندام هوایی در مقایسه با شاهد داشت. بر اساس نتایج، مایه‌زنی استرپتومایسس با ایجاد رابطه هم‌افزایی سبب بهبود اثرات سطوح سیلیکات کلسیم-منیزیم در تقویت شاخص‌های رشدی (زیست توده اندام‌هوایی و ریشه، حجم ریشه، ارتفاع گیاه)، محتوی کلروفیل و جذب عناصر غذایی (سیلسیم، نیتروژن، فسفر، پتاسیم) در سویا شده است.

مقدمه

خوابیدگی (ورس) و بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیک رشدی و عملکرد در گیاهان دارد (۳،۵،۲۳). با این وجود میزان تجمع سیلسیم در گیاهان بین ۰/۱ تا ۱۰ درصد با توجه به گونه گیاهی تعیین شده است (۲۴). در مطالعه‌ی دو ساله اثر مایه‌زنی آزوسپیریلیوم برازیلنس^۶ به سه روش (بدرمال، مایه‌زنی به خاک و برگ‌پاشی) و مصرف حاکی سیلیکات کلسیم و منیزیم در ویژگی‌های رشدی، فیزیولوژیک، جذب عناصر غذایی و عملکرد ذرت مشخص شد که روش بدرمال و مایه‌زنی به خاک به ترتیب با افزایش ۷/۳، ۱۰/۶ درصدی بیش‌ترین تأثیر را در افزایش عملکرد ذرت نشان دادند، هم‌چنین نتایج حاکی از افزایش زیتوده ریشه و جذب نیتروژن در نتیجه کاربرد تلفیقی سیلیکات کلسیم با مایه‌زنی باکتری (بدرمال) بود (۶). در بررسی بهینه‌سازی کاربرد تلفیقی مایه‌زنی جمعیت‌های باکتری محرک رشد سودوموناس و مقادیر مختلف سیلسیم^۷ (۱۵، ۱۰، ۵ گرم در کیلوگرم خاک) بر ویژگی‌های رشدی و عملکرد لویای فرانسوی^۸ مشخص شد که بیشترین مقدار ارتفاع بوته (۴۰/۱ سانتی‌متر)، طول غلاف (۱۸/۰۱ سانتی‌متر)، عملکرد غلاف (۶۷/۹۵ گرم) و فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز با کاربرد تلفیقی مایه‌زنی باکتری با جمعیت (۱۰^۷cfu/g) × (۵/۵۲) و سیلسیم (۱۰/۹ گرم در کیلوگرم خاک) ثبت

امروزه کاربرد تلفیقی باکتری‌های محرک رشد و سیلسیم به عنوان یک روش مفید و کارآمد در جهت افزایش رشد و عملکرد گیاهان در شرایط عادی و هم-چنین تعدیل اثرات منفی تنش‌های زیستی و غیر زیستی مورد توجه قرار گرفته است (۲، ۲۲). اکتینومایسیت‌ها^۱ از جمله رایزوباکتری‌های محرک رشد گیاه بوده که از طریق سازوکارهای تغذیه‌ای و فیزیولوژیک شامل: حل کردن فسفات‌ها، تولید سیدروفور و فیتوهورمون‌ها، تثبیت زیستی نیتروژن، تولید آنزیم ACC-دآمیناز^۲ و تولید متابولیت‌های ضد قارچی در ریزوسفر تحریک رشد گیاه را به دنبال دارند. از جمله مهم‌ترین جنس‌های اکتینومایسیت می‌توان به اکتینوپلاناس^۳، استرپتومایسس^۴ و میکرومونوسپرا^۵ اشاره داشت (۱۴). استرپتومایسس دارای بیشترین تعداد گونه در سلسله باکتریایی و جنس غالب در راسته اکتینومایسیت‌ها بوده که دارای بیش از ۶۶۴ گونه می‌باشد (۱۲). سیلسیم به عنوان دومین عنصر فراوان در پوسته زمین که میزان آن بین ۱-۴۵ درصد تخمین زده می‌شود اثرات مثبت به سزایی شامل: تقویت سیستم ریشه، بیوسنتز فیتوهورمون‌ها، مقاومت در برابر تنش‌های زیستی و غیر-زیستی، هم‌افزایی مثبت در جذب عناصر غذایی، کاهش

- 1- Actinomycetes⁸
- 2-ACC- Deaminase
- 3- Actinoplanes
- 4- Stroptomyces
- 5- Micromonospora

- 6- Azospirillum brasilense
- 7- French bean

مواد و روش

به منظور مطالعه اثر مصرف خاکی سیلیسیم و مایه‌زنی جدایه محرک رشد/استریتومایسس آزمایش گلدانی تحت شرایط نور و دمای محیط بر روی گیاه سویا (*Glycine max cv.*) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل: مصرف خاکی منبع سیلیکات کلسیم-منیزیم (۳۷/۹ درصد سیلیسیم‌دی‌اکسید، ۳۸/۷ درصد کلسیم‌اکسید) به میزان ۰، ۱، ۲ و ۳/۵ تن درهکتار که معادل ۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هکتار، جدایه استریتومایسس (مایه-زنی، عدم مایه‌زنی) و کاربرد تلفیقی آن‌ها بود (جدول ۱). مقادیر سطوح مختلف سیلیکات کلسیم-منیزیم توزین و قبل از کشت به خاک گلدان تیمارهای مورد هدف اضافه شد. جدایه/استریتومایسس منتخب از بانک میکروبی گروه علوم خاک دانشگاه علوم کشاورزی گرگان با شماره دسترسی KJ152149 بوده که خصوصیات محرک رشدی (حلالیت فسفر، تولید ایندول‌استیک‌اسید) آن در گذشته به اثبات رسیده است (۷). برای ایجاد شرایط محیطی نزدیک به مزرعه آزمایش در گلدان‌های حاوی هفت کیلوگرم خاک خشک الک شده در محل گلخانه با اسکلته فلزی رو باز انجام گرفت. خاک مورد استفاده از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری موجود در پردیس دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان جمع‌آوری و پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن اندازه‌گیری شد (جدول ۲). برای تأمین نیاز غذایی گیاه در طول فصل رشد بر اساس آزمون خاک مقدار ۰/۱۵ گرم معادل ۵۴ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع سوپر فسفات تریپل، ۰/۱ گرم معادل ۳۶ کیلوگرم در هکتار نیتروژن از منبع اوره به عنوان استارتر، ۰/۱۲ گرم معادل ۴۳ کیلوگرم در هکتار پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم به ازای هر گلدان استفاده گردید. همچنین برای تأمین نیتروژن گیاه در طول فصل رشد از مایه تلقیح

گردید (۱۵). با وجود فراوانی سیلیسیم در پوسته زمین بخش زیادی به شکل سیلیکات‌های تثبیت شده بوده که برای گیاهان غیرقابل دسترس می‌باشد. بهبود غلظت سیلیسیم در گیاه وابسته به فراهمی آن در خاک بوده که مصرف خاکی منابع با میزان سیلیسیم مطلوب در افزایش فراهمی و جذب سیلیسیم از اهمیت بالایی برخوردار است (۱۳). مزایای مصرف خاکی منابع سیلیسیم‌دار در خاک تنها به اثرات مستقیم فراهمی سیلیسیم از جمله بهبود رشد، مقاومت در برابر تنش‌های زیستی و غیر زیستی محدود نمی‌گردد بلکه به برخی اثرات غیر مستقیم آن مانند تنظیم pH ریزوسفر، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی، کاهش سمیت عناصر و همچنین بهبود فراهمی عناصر ضروری مانند: فسفر، پتاسیم کلسیم و منیزیم به ویژه در کودهای سیلیکاتی حاوی سنگ‌های معدنی به علت حضور سایر عناصر (کلسیم، منیزیم، آهن) در ترکیب این منابع بستگی دارد (۱۸). با وجود مزایای مصرف خاکی منابع مختلف سیلیسیم تعیین مقدار بهینه مصرف نقش تعیین‌کننده‌ای در متابولیسم رشد و تغذیه‌ی گیاه دارد. لی و ما (۱۹) در بررسی مصرف خاکی سیلیسیم در گیاه پنبه دریافتند که کاربرد میزان مناسبی از سیلیسیم سبب بهبود رشد و جذب فسفر، روی و بر در گیاهچه‌های پنبه گردید. در حالی که که جذب نیتروژن، پتاسیم، منگنز، کلسیم و منیزیم کاهش یافت. با توجه به نتایج مطلوب هم‌افزایی کاربرد باکتری-های محرک رشد و سیلیسیم در بهبود رشد گیاهان زراعی و همچنین اهمیت مصرف خاکی منابع مختلف سیلیسیم و اطلاع از میزان مصرف آن هدف از انجام این پژوهش پایش اثر جدایه‌ی/استریتومایسس، تغذیه خاکی سیلیسیم با استفاده از منبع سیلیکات کلسیم-منیزیم و کاربرد تلفیقی/استریتومایسس + تغذیه خاکی سیلیسیم بر شاخص‌های رشدی (زیست‌توده اندام‌هوایی و ریشه، ارتفاع گیاه)، محتوی کلروفیل و تجمع برخی عناصر غذایی (سیلیسیم، نیتروژن، فسفر، پتاسیم) در گیاه سویا رقم (DPX) می‌باشد.

گل‌دان)، حجم ریشه (۳۸/۰۷ سانتی‌متر مکعب) و ارتفاع بوته (۹۸ سانتی‌متر) در تیمار کاربرد تلفیقی بالاترین سطح سیلیم (۶۰۰ کیلوگرم در هکتار) + مایه‌زنی استرپتومایسس (M₃B) ثبت گردید. که به ترتیب با افزایش ۱۹/۵۱، ۶/۴۵، ۴۷/۲۱، ۱۷/۹۶ درصدی، اختلاف آماری معنی‌دار با تیمار جداگانه بالاترین سطح سیلیم (M₃) داشتند (شکل ۱، ۲، ۳، ۴). بهبود شاخص‌های رشدی گیاه می‌تواند به دلیل رابطه‌ی هم‌افزایی در نتیجه مایه‌زنی استرپتومایسس و تاثیر مثبت تغذیه‌ی خاکی سیلیم بر شاخص‌های رشدی سویا باشد. بر اساس نتایج پژوهش حاضر کاربرد سطوح مختلف سیلیم به ویژه سطوح بالای آن (M₂, M₃) سبب بهبود شاخص‌های رشدی گیاه به ویژه حجم ریشه در مقایسه با شاهد گردید. به طوریکه تیمار مصرف ۶۰۰ کیلوگرم سیلیم در هکتار (M₃) با تیمار کاربرد تلفیقی ۴۰۰ کیلوگرم سیلیم در هکتار + مایه‌زنی استرپتومایسس (M₂B) در شاخص حجم ریشه در یک گروه آماری قرار گرفت. همچنین تیمار مذکور اختلاف آماری محدود (۶/۴۵ درصدی) با تیمار بهینه (M₃B) در بهبود شاخص حجم ریشه داشت (شکل ۲) نتایج تحقیقات حاکی از اهمیت مصرف خاکی سیلیم و نقش غیر مستقیم این عنصر از طریق بهبود شاخص‌های مورفولوژیکی ریشه (قطر، سطح، حجم، وزن خشک ریشه و طول ریشه‌ی اصلی) و تأثیر آن بر خصوصیات عمومی رشد گیاه به ویژه زیست‌توده گیاهی می‌باشد (۴، ۱۶). در پژوهشی با هدف بررسی اثر مصرف خاکی ماده معدنی ولاستونیت^۳ با میزان سیلیم (سیلیم دی-اکسید=۵/۵۲) در سویا و یونجه مشخص شد که کاربرد ولاستونیت به میزان ۵ درصد وزنی سبب افزایش زیست توده اندام هوایی (۲ برابر)، زیست توده ریشه (۳۲/۵ برابر)، ارتفاع بوته (۸/۱ برابر) و عملکرد بوته (۵ برابر) در گیاه سویا گردید. علاوه بر این کاربرد ۱۰ درصد وزنی

تجاری بایوسوی^۱ حاوی باکتری برادی‌ریزوبیوم^۲ تولید شرکت فن‌آوری زیستی طبیعت گرا در تمامی گل‌دان‌ها استفاده گردید. ضد عفونی سطحی بذرها ابتدا به مدت ۳۰ ثانیه در الکل ۷۵ درصد و سپس به مدت ۳ دقیقه در محلول هیپوکلریت ۲/۵ درصد و در نهایت ۸ بار شستشو با آب مقطر استریل انجام شد. تعداد ۱۰ عدد بذر سویا رقم (DPX) در گل‌دان‌ها قرار داده و مقدار ۵۰۰ میکرولیتر از سوسپانسیون باکتری با جمعیت ۱۰^۹ برای ریزوبیوم و ۱۰^۷ استرپتومایسس (CFU.ml⁻¹) بر روی بذرها مایه‌زنی شد. پس از مدت کوتاهی از رشد تعداد استقرار گیاه به ۴ عدد کاهش یافت. بررسی تاثیر تیمارهای آزمایشی در مرحله توسعه گیاه (اواخر دوره رشد رویشی) انجام شد. پس از گذشت ۱۰ هفته از رشد گیاه، بوته‌ها با قطع کردن آنها از روی سطح خاک برداشت شدند. ویژگی‌ها اصلی رشد گیاه شامل: زیست توده اندام هوایی و ریشه، حجم ریشه، ارتفاع بوته اندازه‌گیری شد. همچنین محتوی کلروفیل (a,b, Total) و تجمع عناصر غذایی نیتروژن، سیلیم، فسفر و پتاسیم در اندام هوایی ثبت گردید. (۲۵).

نتایج و بحث

تاثیر تیمارهای آزمایشی بر شاخص‌های رشدی گیاه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل تیمارهای آزمایشی بر شاخص‌های رشدی گیاه (زیست توده اندام‌هوائی، زیست توده ریشه، ارتفاع گیاه، حجم ریشه) در سطح یک درصد آماری معنی‌دار بود (جدول ۳). نتایج پژوهش حاضر نشان دهنده اثر مثبت و معنی‌دار کاربرد تلفیقی مایه‌زنی استرپتومایسس و سیلیم در بهبود خصوصیات رشدی سویا در مقایسه با کاربرد جداگانه آن می‌باشد. بر این اساس بیشترین میزان زیست‌توده اندام هوایی (۱۹/۳ گرم در گل‌دان)، ریشه (۷/۶۷ گرم در

1- BioSoy

2- Bradyrhizobium

3- Wollastonite

بهبود ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه می‌گذارند (۲۷). بر این اساس احتمالاً بهبود شاخص‌های رشدی سویا در نتیجه‌ی کاربرد تلفیقی مایه‌زنی استرپتومایسس و مصرف خاکی سیلیسیم در پژوهش حاضر می‌تواند به علت نقش مثبت خصوصیات محرک رشدی جدایی‌ی استرپتومایسس مورد استفاده که شامل تولید ایندول استیک اسید، حلالیت فسفر معدنی نامحلول (۷) و هم-چنین تأثیر مثبت مصرف خاکی سیلیکات کلسیم-منیزیم بر خصوصیات رشدی گیاه بوده که مصرف ترکیبی آن‌ها سبب ایجاد رابطه‌ی هم‌افزایی مثبت و در نتیجه‌ی بهبود شاخص‌های رشدی گیاه شده است.

بیش‌ترین تأثیر مثبت بر شاخص‌های رشدی و عملکرد یونجه را از خود به ثبت رسانید. نتایج آن‌ها نشان داد که پاسخ‌های مثبت در خصوصیات رشدی گیاهان در نتیجه‌ی کاربرد ماده معدنی احتمالاً ناشی از آزادسازی عناصر غذایی به ویژه سیلیسیم در ناحیه ریزوسفر و فراهمی جذب آن توسط ریشه و در نتیجه بهبود شاخص‌های رشدی و عملکرد گیاه می‌باشد (۹). سیلیسیم با افزایش کشش دیواره سلولی و کشیدگی بافت‌های ریشه، تأثیر مثبت به سزایی در بهبود رشد ریشه دارد (۴، ۸). علاوه بر این باکتری‌های محرک رشد به واسطه‌ی تولید فیتوهورمون‌های گیاهی، آنزیم ACC-دآمیناز و سازوکارهای مختلف فراهمی عناصر غذایی، تأثیر مثبت از خود در

جدول (۱) تیمارهای آزمایشی مورد استفاده در این پژوهش

Table (1) Experimental treatments of this study

تیمارهای آزمایشی	کد	تیمارهای آزمایشی	کد
Experimental treatments	code	Experimental treatments	code
مایه‌زنی استرپتومایسس	B	شاهد	C
<i>Streptomyces</i> inoculation		Control	
کاربرد ۲۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هکتار + مایه‌زنی	M ₁ B	کاربرد ۲۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هکتار	M ₁
Application of 200 kg silicon per hectare + inoculation		Application of 200 kg silicon per hectare	
کاربرد ۴۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هکتار + مایه‌زنی	M ₂ B	کاربرد ۴۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هکتار	M ₂
Application of 400 kg silicon per hectare + inoculation		Application of 400 kg silicon per hectare	
کاربرد ۶۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هکتار + مایه‌زنی	M ₃ B	کاربرد ۶۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هکتار	M ₃
Application of 600 kg silicon hectare + inoculation		Application of 600 kg silicon per hectare	

خدادادی و قربانی نصرآبادی: ارزیابی مایه‌زنی استرپتومایسس مصرف...

جدول (۲) نتایج ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد پژوهش

فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	نیترژن کل	کربن آلی	pH	EC (dS/m)	بافت خاک	رس	سیلت	شن
Available phosphate (mg/kg)	Available Potassium (mg/kg)	Total Nitrogen (%)	Organic Carbon (%)			Soil texture	clay (%)	silt (%)	sand (%)
12.9	240	0.13	1.1	7.9	1.84	silty clay loam	29	59	12

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های رشدی و محتوی کلروفیل سویا

Table (2) ANOVA results of experimental treatments effects on growth and chlorophyll content of soybean

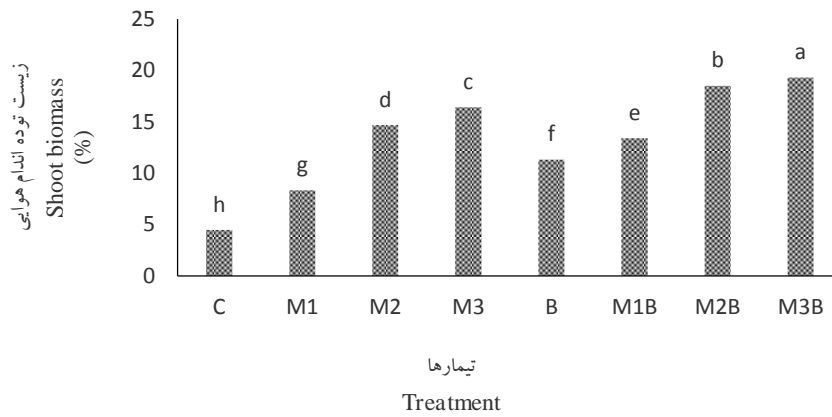
کلروفیل کل	کلروفیل b	کلروفیل a	حجم ریشه	ارتفاع گیاه	زیست توده ریشه	زیست توده اندام هوایی	درجه آزادی	منابع تغییرات
Total chlorophyll (mg/g ⁻¹ fw)	Chlorophyll b (mg/g ⁻¹ fw)	Chlorophyll a (mg/g ⁻¹ fw)	Root volume (%)	Plant height (%)	Root biomass (%)	Shoot biomass (%)	df	Sources of variation
493.3**	112.8**	134.9**	465.3**	880.4**	48.3**	134.5**	3	سیلیسیم silicium
268.3**	61.2**	73.1**	214.3**	737.04**	17.5**	132.02**	1	باکتری Bacteria
4.3**	8.5**	1.7**	9.4**	43.4**	3.9**	4.2**	3	سیلیسیم* باکتری Silicium* Bacteria
0.5	0.2	0.2	0.6	1.8	0.12	0.00044	-	خطا Error
4.04	7.6	4.1	2.8	1.7	10.7	0.15	-	ضریب تغییرات (%) CV

** معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

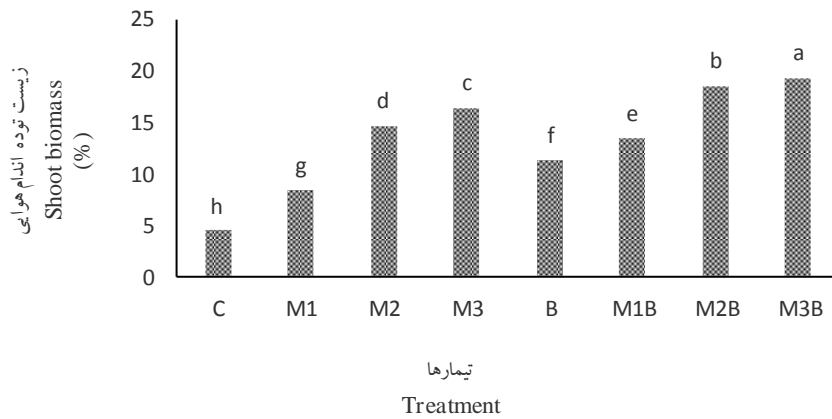
** significantly different at the 1% probability level .

در بررسی اثر تلفیقی باکتری‌های حل‌کننده فسفات و سطوح مختلف سیلیسیم در گندم گزارش شد که بیشترین میزان زیست توده اندام هوایی (۱۷/۲ گرم در گلدان)، زیست توده ریشه (۴/۸ گرم در گلدان) در تیمار کاربرد تلفیقی ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم سیلیسیم به همراه مایه‌زنی با سودوموناس مشاهده شد. نتایج آن‌ها بیان‌کننده اثر هم‌افزایی مثبت کاربرد تلفیقی باکتری‌های محرک رشد (با خصوصیات: تولید فیتوهورمون‌های گیاهی، تولید آنزیم ACC-دآمیناز و حل‌الیت فسفر معدنی نامحلول) و مصرف خاکی سیلیسیم در بهبود شاخص‌های رشدی گندم می‌باشد (۲۲).

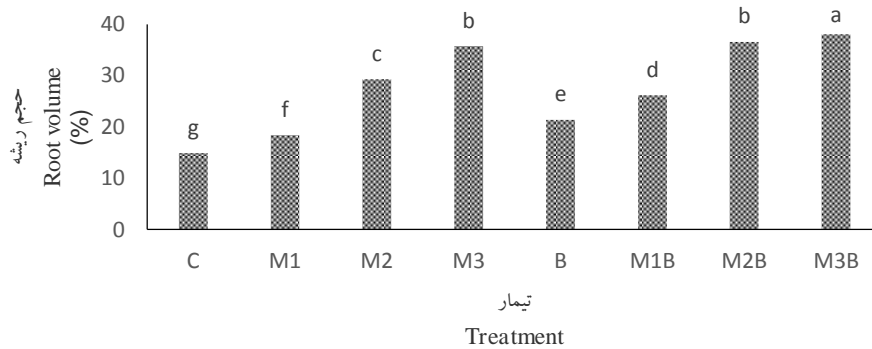
هورسمن و همکاران^۱ (۱۰) در بررسی اثرات استرپتومایسس (CLV45) بر خصوصیات رشدی سویا بیان داشتند که مایه‌زنی سبب افزایش ۳۶/۶۳ درصدی رشد بوته و ۱۷/۹۷ درصدی زیست توده اندام هوایی در مقایسه با شاهد شد. آن‌ها تولید هورمون اکسین و آنزیم ACC-دآمیناز توسط جدایه باکتریایی را علت اصلی بهبود خصوصیات رشدی سویا عنوان نمودند.



شکل (۱) مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای آزمایشی بر زیست توده اندام هوایی
Figure (1) Mean comparison effect of experimental treatments on shoot biomass

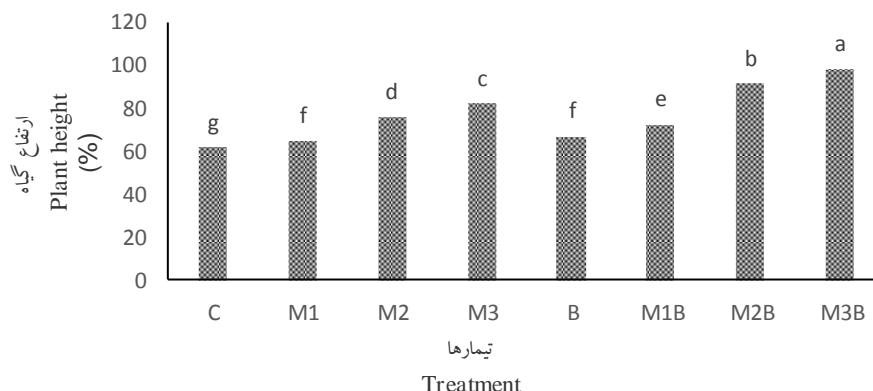


شکل (۲) مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای آزمایشی بر زیست توده ریشه
Figure (2) Mean comparison effect of experimental treatments on root biomass



شکل (۳) مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای آزمایشی بر حجم ریشه
Figure (3) Mean comparison effect of experimental treatments on root volume

خدادادی و قربانی نصرآبادی: ارزیابی مایه‌زنی استرپتومایسس مصرف...



شکل (۴) مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای آزمایشی بر ارتفاع گیاه

Figure (4) Mean comparison effect of experimental treatments on plant height

فیزیولوژیک و بهبود عملکرد گیاهان از طریق سازوکارهای مختلف شامل: فراهمی عناصر غذایی، تولید فیتوهورمون‌های تنظیم کننده رشد گیاه، سیدروفور و... ایفا می کنند (۲۸). همچنین عنوان شده است که مصرف حاکی منابع با میزان سیلیم مطلوب به واسطه فراهمی عناصر غذایی و بهبود تنظیم رشد و توسعه زیست توده گیاه، بهبود شاخص‌های فیزیولوژیک به ویژه فتوسنتز و محتوی کلروفیل را به دنبال دارد (۲۹). محمود و همکاران^۱ (۲۰) در بررسی تلفیقی باسیلوس و پتاسیم سیلیکات (۲ کیلوگرم در هکتار در آبیاری) بهبود محتوی کلروفیل به میزان ۲۵/۱۵ درصد در گیاه ماش متاثر از شوری را گزارش کردند.

تاثیر تیمارهای آزمایشی بر تجمع عناصر غذایی گیاه

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثرات اصلی و متقابل تیمارهای آزمایشی بر میزان غلظت سیلیم، نیتروژن، فسفر، پتاسیم در سطح آماری یک درصد معنی دار بود (جدول ۴). بیشترین میزان سیلیم (۰/۲۱ درصد)، نیتروژن (۳/۷۵ درصد)، فسفر (۰/۳۶ درصد) و پتاسیم (۲/۳۶ درصد) در تیمار کاربرد تلفیقی بالاترین سطح سیلیم (۶۰۰ کیلوگرم سیلیم در هکتار) + مایه زنی استرپتومایسس (M₃B) ثبت گردید. بر اساس نتایج ترکیب مایه زنی استرپتومایسس و سیلیم به ترتیب

تاثیر تیمارهای آزمایشی بر محتوی کلروفیل گیاه

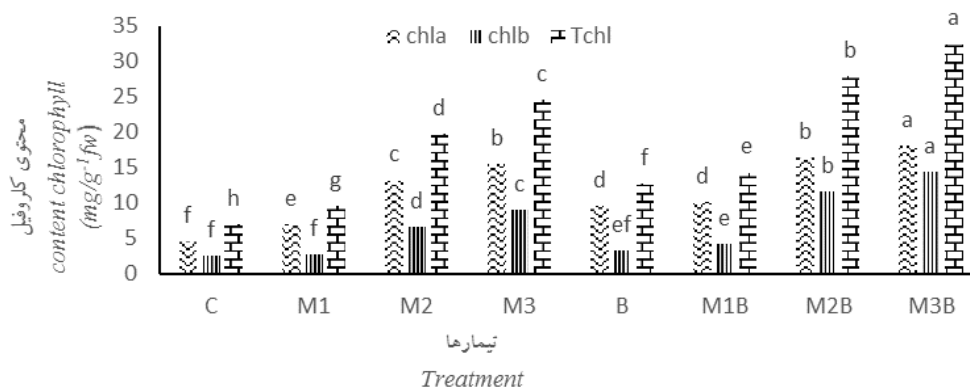
نتایج تجزیه واریانس نشان دهنده معنی دار بودن اثرات اصلی و متقابل تیمارهای آزمایشی بر محتوی کلروفیل برگ (کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل) در سطح آماری یک درصد می باشد (جدول ۳). بررسی نتایج کاربرد سطوح مختلف سیلیم بر سبزیگی گیاه حاکی از بهبود محتوی کلروفیل گیاه (a، b و کل) به ویژه در تیمارهای تلفیقی با مایه زنی استرپتومایسس می باشد. بیشترین میزان کلروفیل a (۱۸/۰۷)، کلروفیل b (۱۴/۴۱) و کلروفیل کل (۳۲/۴۸) در تیمار کاربرد تلفیقی بالاترین سطح سیلیم (۶۰۰ کیلوگرم سیلیم در هکتار) + مایه زنی استرپتومایسس (M₃B) ثبت گردید که به ترتیب با افزایش ۳۲/۵۱، ۶۰/۶۴، ۱۶/۲۸ درصدی اختلاف آماری معنی دار با تیمار مصرف جداگانه بالاترین سطح سیلیم (M₃) داشتند. روند تاثیر مثبت مایه زنی استرپتومایسس در بهبود اثرات سطوح دیگر سیلیم بر محتوی کلروفیل به خوبی مشاهده و ثبت گردید، به طوری که افزایش ۴۹/۱، ۴۱/۷۶ درصدی کلروفیل کل به ترتیب در تیمارهای تلفیقی (۴۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم سیلیم در هکتار) + مایه زنی استرپتومایسس (M₁B, M₂B) در مقایسه با کاربرد جداگانه (M₁, M₂) موید این موضوع است (شکل ۵). رانژوباکتری‌های محرک رشد گیاه نقش مهمی در توسعه فرایندهای رشدی،

هوایی و ریشه، ارتفاع بوته، طول ساقه در نتیجه‌ی اثرات مستقیم و غیر مستقیم سیلیسیم و باکتری‌های محرک رشد می‌باشد (۱). بر اساس نتایج تیمار کاربرد ۶۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هکتار (M_3) با تیمار کاربرد ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار (M_2) در تعیین غلظت پتاسیم و فسفر و همچنین تیمار مایه‌زنی باکتری با (M_2) در غلظت سیلیسیم در یک گروه آماری قرار گرفتند که این موضوع نشان‌دهنده اثر بخشی مناسب جدایه استرپتومایسس در مقایسه با کاربرد سطح سیلیسیم مذکور می‌باشد.

بررسی نتایج مقایسه میانگین غلظت عناصر غذایی در پژوهش حاضر نشان‌دهنده تأثیر مطلوب مایه‌زنی استرپتومایسس در افزایش غلظت سیلیسیم (۵/۸ درصد)، نیتروژن (۱۶/۵۲)، فسفر اندام هوایی (۲۳/۶ درصد)، پتاسیم اندام هوایی (۱۲/۰۵ درصد) در مقایسه با شاهد (عدم مایه‌زنی) می‌باشد (شکل ۶). با توجه به یکسان بودن شرایط آزمایشی و مایه‌زنی مشترک تیمارها با کود زیستی تجاری بایوسوی بر پایه جدایه برادی ریزوبیوم همزیست با سویا، به نظر می‌رسد افزایش معنی‌دار غلظت عناصر غذایی به ویژه غلظت فسفر در تیمار مایه‌زنی استرپتومایسس و سایر تیمارهای تلفیقی، احتمالاً ناشی از قابلیت مطلوب جدایه استرپتومایسس در فراهمی عناصر غذایی از طریق خصوصیات محرک رشدی مرتبط با تولید ایندول استیک اسید، اسیدهای آلی و سیدروفور می‌باشد. در مطالعه اثر متقابل کاربرد تلفیقی استرپتومایسس گریزوفلاووس^۲ و برادی ریزوبیوم (BLY3-8) در سویا بیان داشتند مایه‌زنی تلفیقی سبب افزایش میزان تثبیت نیتروژن مولکولی و همچنین بهبود جذب نیتروژن، فسفر و پتاسیم در مقایسه با شاهد شده است. آن‌ها خاطر نشان کردند که کاربرد ترکیبی جدایه‌ها می‌تواند به عنوان فرمولاسیون اقتصادی و موثر در افزایش رشد و جذب عناصر غذایی لگوم‌ها به ویژه سویا در نظر گرفته شود (۱۶).

سبب افزایش ۱۶/۲۵، ۷/۴۵، ۴۵/۶، ۵۱/۰۷ درصدی غلظت سیلیسیم، نیتروژن، فسفر و پتاسیم در تیمار بهینه (M_3B) در مقایسه با تیمار جداگانه بالاترین سطح سیلیسیم (M_3) گردید (شکل ۶). این موضوع می‌تواند به دلیل هم‌افزایی مثبت در نتیجه خصوصیات محرک رشدی استرپتومایسس (حلالیت فسفر، تولید ایندول استیک اسید) و هم‌چنین اثرات مثبت مصرف خاکی سیلیسیم بر تجمع عناصر غذایی (سیلیسیم، نیتروژن، فسفر و پتاسیم) گیاه باشد. سازوکار تاثیر سیلیسیم در گیاهان شامل: تنظیم بیوستر فیتوهورمون‌ها، املاح سازگار و نقش منحصر به فرد سیلیسیم در تنظیم بیان ژن‌های انتقال‌دهنده جذب فسفر نامحلول و افزایش ترشح مالات و سترات ریشه در ناحیه ریزوسفر (۱۷) و هم‌چنین سازوکار باکتری‌های محرک رشد در حلالیت فسفر (تولید اسیدهای آلی و غیر آلی و ترشح فسفاتاز) و پتاسیم (تولید اسیدهای آلی، غیر آلی و پروتون‌ها) از منابع آلی و کانی‌های حاوی پتاسیم، تولید سیدروفور، سنتز آگروپلی ساکاریدها و تولید ایندول استیک اسید که به صورت مستقیم و غیر مستقیم سبب افزایش فراهمی و تجمع عناصر غذایی در گیاهان می‌گردد، به خوبی اثبات شده است (۲۴، ۲۶). پاتی و همکاران^۱ (۲۱) در بررسی تاثیر کاربرد منبع آلی - معدنی سیلیسیمه (دیاتومیت) بر فیزیولوژی جذب عناصر غذایی برنج بیان داشتند که مصرف خاکی مقدار بالای آن (۶۰۰ کیلوگرم در هکتار) سبب افزایش جذب سیلیسیم (۵۶/۶ درصد)، نیتروژن (۱۷/۳ درصد)، فسفر (۴۸/۱ درصد)، پتاسیم (۱۱/۸ درصد) می‌گردد. آن‌ها بیان داشتند که افزایش فراهمی سیلیسیم به واسطه کاربرد منبع کودی مناسب، سبب بهبود ریشه‌زایی، سیلیسی شدن دیواره سلولی و در نهایت افزایش تجمع عناصر غذایی در گیاه (سیلیسیم، فسفر، پتاسیم و نیتروژن) می‌گردد. در بررسی اثر کاربرد باکتری‌های (سودوموناس، مزوریزوبیوم) و نانوسیلیکا در گیاه شاهی مشخص شد که به احتمال زیاد بهبود غلظت عناصر غذایی (برگ، ساقه و ریشه) انعکاسی از توسعه زیست‌توده اندام

خدادادی و قربانی نصرآبادی: ارزیابی مایه‌زنی استرپتومایسس مصرف...



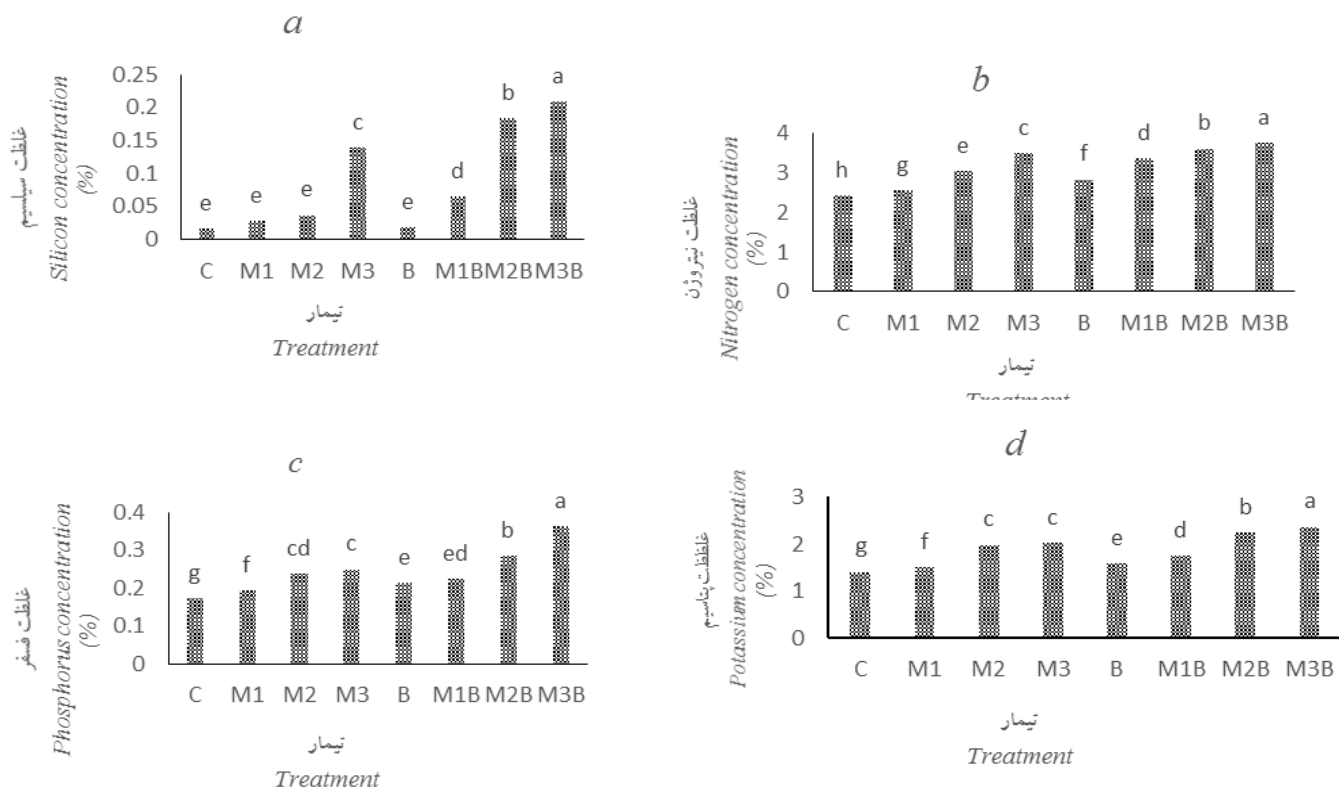
شکل (۵) مقایسه میانگین تاثیر تیمارهای آزمایشی بر محتوی کلروفیل

Figure (5) Mean comparison effect of experimental treatments on content chlorophyll

جدول (۴) نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر غلظت عناصر غذایی سویا

Table (3) ANOVA results of experimental treatments effects on nutrient concentration of soybean

غلظت پتاسیم	غلظت فسفر	غلظت نیتروژن	غلظت سیلیسیم	درجه آزادی	منابع تغییرات
potassium concentration (%)	phosphorus concentration (%)	Nitrogen concentration (%)	Silicon concentration (%)	df	Sources of variation
0.72**	0.016**	1.12**	0.0285**	3	سیلیسیم
0.38**	0.02**	1.54**	0.0281**	1	Silicon باکتری
0.0075*	0.0021**	0.079	0.0049**	3	bacteria باکتری* سیلیسیم
0.0012	0.000067	0.0047	0.00017	-	Bacteria* Silicon خطا
1.9	3.37	2.19	14.94	-	Error ضریب تغییرات
					CV (%)



شکل (۶) نتایج تاثیر تیمارهای آزمایشی بر غلظت عناصر غذایی اندام هوایی (a: غلظت سیلیسیم، b: غلظت نیتروژن، c: غلظت فسفر، d: غلظت پتاسیم)

Figure (6) Results of the experimental treatments effect on shoot nutrient concentrations (a: Silicon concentration, b: Nitrogen concentration, c: Phosphorus concentration, d: Potassium concentration)

سطوح سیلیکات کلسیم-منیزیم در تقویت ویژگی‌های رشدی، بهبود محتوی کلروفیل و جذب عناصر غذایی (سیلیسیم، نیتروژن، فسفر و پتاسیم) در گیاه سویا شده است. که انجام آزمون‌های زراعی با روش‌های کاربرد مختلف (خاکی، آب‌آبیاری، محلول‌پاشی) جهت بهینه‌سازی میزان مصرف سیلیکات کلسیم-منیزیم، ارزیابی اقتصادی و بررسی کارایی تاثیر کاربرد تلفیقی با باکتری-های محرک رشد گیاه به ویژه گونه‌های مختلف اکتینوباکتر توصیه می‌گردد. بر اساس نتایج، تیمار کاربرد ۲۰۰ کیلوگرم سیلیسیم در هکتار (M2) با مایه‌زنی استرپتومایسس در تعیین غلظت سیلیسیم اختلاف آماری معنی‌داری نداشته که حاکی از اثر بخشی مناسب جدایه

نتیجه‌گیری

استفاده از منابع مناسب سیلیسیم‌دار و همچنین کاربرد تلفیقی با باکتری‌های محرک رشد گیاه از جمله روش‌های کارآمد و مفید در بهبود رشد، عملکرد و کارایی تاثیر سیلیسیم برای گیاهان در نظر گرفته می‌شود. برآیند پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه نقش سیلیسیم و باکتری-های محرک رشد حاکی از نقش مثبت و هم‌افزایی آن‌ها در بهبود خصوصیات رشدی گیاهان می‌باشد. بر اساس نتایج پژوهش حاضر مصرف خاکی سیلیکات کلسیم-منیزیم سبب بهبود ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیک گیاه گردید. همچنین بر اساس نتایج به نظر می‌رسد مایه‌زنی استرپتومایسس با ایجاد رابطه هم‌افزایی، سبب بهبود اثرات

استرپتومایسس در مقایسه با کاربرد سطح سیلسیم مذکور می‌باشد. همچنین تیمارهای ۶۰۰ کیلوگرم سیلسیم در هکتار (M3) و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار (M2) در تعیین غلظت فسفر و پتاسیم اختلاف آماری معنی‌داری نداشته و در یک گروه آماری قرار گرفتند که این نتیجه می‌تواند در تعیین میزان استفاده از ماده معدنی مهم و قابل توصیه باشد.

References

- Boroumand, N., Behbahani, M. and Dini, G. 2020. Combined effects of phosphate solubilizing bacteria and nanosilica on the growth of land cress plant. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(1):232-243.
- Chandrakala, C., Voleti, S.R., Bandeppa, S., Kumar, N.S., and Latha, P.C. 2019. Silicate solubilization and plant growth promoting potential of *Rhizobium* sp. isolated from rice rhizosphere. *Silicon*, 11:2895-2906.
- Epstein, E. 1999. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 50:641-64.
- Etesami, H. and Jeong, B.R. 2018. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and environmental safety*, 147:881-896.
- Elmer, W.H. and Datnoff, L.E., 2014. Mineral nutrition and suppression of plant disease. Elsevier, 13:243.
- Galindo, F.S., Pagliari, P.H., Rodrigues, W.L., de Azambuja Pereira, M.R., Buzetti, S., and Teixeira Filho, M.C.M. 2020. Investigation of *Azospirillum brasilense* inoculation and silicon application on corn yield responses. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4):2406-2418.
- Ghorbani-Nasrabadi, R, P. Aghaz Nashtifani, P., and M. Zebarjadi, M. 2014. Evaluation of soil *Streptomyces* sp. plant growth promotion traits and potential application in enhancing early maize growth and P uptake. *Journal of soil management and sustainable production*. 4 (3): 195-213. (In Persian with English abstract).
- Hattori, T., Sonobe, K., Araki, H., Inanaga, S., An, P., and Morita, S. 2008. Silicon application by sorghum through the alleviation of stress-induced increase in hydraulic resistance. *Journal of Plant Nutrition*, 31(8):1482-1495.
- Haque, F., Santos, R.M., and Chiang, Y.W. 2020. Optimizing inorganic carbon sequestration and crop yield with wollastonite soil amendment in a microplot study. *Frontiers in Plant Science*, 11:1012.
- Horstmann, J.L., Dias, M.P., Ortolan, F., Medina-Silva, R., Astarita, L.V. and Santarém, E.R., 2020. *Streptomyces* sp. CLV45 from Fabaceae rhizosphere benefits growth of soybean plants. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51(4):1861-1871.
- Htwe, A.Z., Moh, S.M., Soe, K.M., Moe, K. and Yamakawa, T., 2019. Effects of biofertilizer produced from *Bradyrhizobium* and *Streptomyces griseoflavus* on plant growth, nodulation, nitrogen fixation, nutrient uptake, and seed yield of mung bean, cowpea, and soybean. *Agronomy*, 9(2):77.
- Iniyan, A.M., Wink, J., Landwehr, W., Ramprasad, E.V.V., Sasikala, C., Ramana, C.V., Schumann, P., Spröer, C., Bunk, B., Joseph, F.J.R.S. and Joshua, S.A. 2021. *Streptomyces marianii* sp. nov., a novel marine actinomycete from southern coast of India. *The Journal of Antibiotics*, 74:59-69.
- Jawahar, S. and Vaiyapuri, V. 2013. Effect of Sulphur and silicon fertilization on yield nutrient uptake and economics of rice by *S.jawahar* and *V. vaiyapuri*. *International Research Journal of Chemistry*, 1:34.
- Jog, R., Nareshkumar, G., and Rajkumar, S. 2012. Plant growth promoting potential and soil enzyme production of the most abundant *Streptomyces* spp. from wheat rhizosphere. *Journal of Applied Microbiology*, 113(5):1154-1164.

15. Kumar, V., Kumar, P., and Khan, A. 2020. Optimization of PGPR and silicon fertilization using response surface methodology for enhanced growth, yield and biochemical parameters of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under saline stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23:101463.
16. Kim, Y.H., Khan, A.L., Waqas, M., Shim, J.K., Kim, D.H., Lee, K.Y., and Lee, I.J. 2014. Silicon application to rice root zone influenced the phytohormonal and antioxidant responses under salinity stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33(2):137-149.
17. Kostic, L., Nikolic, N., Bosnic, D., Samardzic, J., and Nikolic, M. 2017. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. *Plant and Soil*, 419 (1):447-455.
18. Liang Y., Nikolic M., Bélanger R., Gong H., Song A. 2015. Effect of silicon on crop growth, yield and quality. *Silicon in Agriculture*, 209-223.
19. Li, Q. and Ma, C. 2003. Effect of available silicon in soil on nutritive metabolism of cotton seedling. *Scientia Agricultura Sinica*, 36:726-730.
20. Mahmood, S., Daur, I., Al-Solaimani, S.G., Ahmad, S., Madkour, M.H., Yasir, M., Hirt, H., Ali, S. and Ali, Z. 2016. Plant growth promoting rhizobacteria and silicon synergistically enhance salinity tolerance of mung bean. *Frontiers in Plant Science*, 7:876.
21. Pati, S., Pal, B., Badole, S., Hazra, G.C., and Mandal, B. 2016. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.*, 47:(3)284-290.
22. Rezakhani, L., Moteszarezaideh, B., Tehrani, M.M., Etesami, H., and Hosseini, H.M. 2019. Phosphate-solubilizing bacteria and silicon synergistically augment phosphorus (P) uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) plant fertilized with soluble or insoluble P source. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 173:504-513.
23. Rodrigues, F.A., Dallagnol, L.J., Duarte, H.S.S. and Datnoff, L.E. 2015. Silicon control of foliar diseases in monocots and dicots. *Silicon and plant diseases*, 67-108.
24. Sakihama, Y., and Yamasaki, H. 2002. Lipid peroxidation induced by phenolics in conjunction with aluminum ions. *Biologia Plantarum*, 45:(2)249-254.
25. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., and Loeppert, R.H. (Eds.). 2020. *Methods of soil analysis, part 3: Chemical methods (Vol. 14)*. John Wiley & Sons.
26. 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(1):1-14.
27. Shin, W., Siddikee, M.A., Joe, M.M., Benson, A., Kim, K., Selvakumar, G., Kang, Y., Jeon, S., Samaddar, S., Chatterjee, P. and Walitang, D. 2016. Halotolerant plant growth promoting bacteria mediated salinity stress amelioration in plants. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 49(4):355-367.
28. Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S. and Nasrulhaq Boyce, A. 2016. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—A review. *Molecules*, 21(5):573.
29. Walsh, O.S., McClintick-Chess, J. and Blanscet, S. 2017. Rate and Application Time of Plant Available Silicon on Winter Wheat Yield and Quality. *ASA, CSSA and SSSA International Annual*.