

The Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Reducing Drought Stress in Tomato Plants and Soil Biological Characteristics

S. Sasanifar¹, A. Beheshti Ale Agha^{1*}, R. Sharifi², S. Bahraminejad³

1- Department of Soil Science, Razi University, Kermanshah, Iran

(*- Corresponding Author Email: beheshtiali97@gmail.com)

2- Department of Plant Protection, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Department of Plant Production Engineering and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 01 April 2025

Revised: 08 June 2026

Accepted: 10 June 2026

Available Online: 10 June 2026

How to cite this article:

Sasanifar, S., Beheshti Ale Agha, A., Sharifi, R., & Bahraminejad, S. (2026). The role of plant growth-promoting rhizobacteria in reducing drought stress in tomato plants and soil biological characteristics. *Journal of Water and Soil*, 40(1), 57-71. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.92848.1477>

Introduction

Background and objectives: Drought stress is one of the most significant abiotic stressors, recognized as a major constraint on agricultural plant growth and productivity worldwide. It adversely affects soil physicochemical properties and plant physiological processes, altering soil microbial dynamics. Drought stress reduces crop yields and degrades soil health in arid and semi-arid regions, where water scarcity is a critical challenge. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) have emerged as a sustainable and eco-friendly strategy to enhance plant resilience against abiotic stresses, including drought. These beneficial microorganisms improve nutrient uptake, stimulate phytohormone production, and enhance stress tolerance mechanisms in plants, thereby mitigating the negative impacts of water deficit. Considering that most of the regions of Iran are located in arid and semi-arid climates and taking into account the advantages of plant growth-promoting rhizobacteria in reducing stress compared to other physical and chemical methods, this research investigated the effect of plant growth-promoting rhizobacteria on reducing drought stress in the tomato plant and biological characteristics of the soil.

Materials and Methods

A greenhouse experiment was conducted in a randomized complete block design (RCBD) with four replications. Experimental treatments included four levels of drought stress (40, 60, 80, and 100% of FC) and five bacterial strains: B19 (*Lysinibacillus sphaericus*), B60 (*Bacillus* sp.), B103 (*Lysinibacillus* sp.), B124 (*Achromobacter* sp.), and GB03 (*Bacillus subtilis*). A control treatment (without bacteria and drought stress) was also considered. To apply the treatments, 4 kg pots were prepared using soil passed through a 4 mm sieve. Nutrient Broth (NB) medium was used for cultivation to enhance the bacterial population. The bacteria were grown under controlled conditions at 30°C with continuous shaking at 120 rpm for 36 hours to ensure optimal growth. After incubation, a bacterial suspension with a concentration of 10⁹ CFU/mL was prepared in sterile distilled water. Tomato seedlings' roots were then immersed in this suspension for 20 minutes to ensure proper colonization before being transplanted into the potted soil. A control treatment (non-inoculated seedlings) was also included in the experiment for comparative analysis. To ensure the establishment of the plants, all the pots were irrigated for 3 to 4 weeks. The desired drought stress was applied during the cultivation period by measuring soil moisture using the gravimetric method. In this method, the weight of the pots was measured every day, and irrigation was performed immediately after the soil moisture decreased. This method of applying treatments continued daily for three months. The greenhouse temperature was 25°C and the lighting period was 12 hours. The characteristics of the number of flowers, fresh weight of the aerial part and roots, stomatal resistance, fresh weight of the fruit, and



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.92848.1477>

the amount of the free proline content of the leaves were measured. In addition, soil biological characteristics, including organic carbon mineralization, microbial biomass carbon, substrate-induced respiration (SIR), and metabolic quotient (qCO_2) after plant harvesting, were determined in the soil. Before performing the analysis of variance (ANOVA), the normality of the data was tested. In this study, Duncan's 5% probability level test was used for mean comparisons, Excel software was used for graphing, and SAS 9.4 was employed for data analysis.

Results

The results of this study showed that all five bacterial strains used caused significant increases in the fresh weight of the shoot, the number of flowers, and the fruit weight. The amount of free proline in the leaves increased significantly compared to the control treatment (no inoculation). The results showed that the value of stomatal resistance had a significant decrease compared to the control treatment (no inoculation). Also, the used strains improved the quality of soil biological characteristics, so that basal respiration, substrate-induced respiration (SIR), and microbial biomass carbon had a significant increase, but the metabolic quotient (qCO_2) showed a significant decrease compared to the control treatment (no inoculation). Among the five strains used, three strains, B19, B60, and B103 showed the greatest effect in reducing the effects of drought stress.

Conclusion

Various stressful conditions, including the moisture stress prevailing in Iran's agriculture, cause a decrease in the growth and yield of agricultural products; therefore, the use of inoculants containing microorganisms, including plant growth-promoting rhizobacteria, whose activity has been proven to improve stress conditions, is essential.

Keywords: Metabolic quotient, Microbial biomass carbon, Microbial respiration, Proline, Yield

نقش باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در کاهش تنش خشکی در گیاه گوجه‌فرنگی و ویژگی‌های زیستی خاک

سهیلا ساسانی فر^۱ - علی بهشتی آل آقا^{۱*} - روح الله شریفی^۲ - صحبت بهرامی نژاد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

چکیده

تنش خشکی از جمله تنش‌های فیزیکی است که به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده رشد و تولید گیاهان زراعی در اکثر نقاط جهان شناخته شده است. تنش خشکی نه تنها ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و رشد گیاه را دگرگون می‌کند، بلکه بر ویژگی‌های زیستی خاک نیز تأثیر می‌گذارد. با توجه به این که بیشتر مناطق ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و با در نظر گرفتن مزیت‌های باکتری‌های محرک رشد در کاهش تنش‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها، در این پژوهش تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در کاهش تنش خشکی در گیاه گوجه‌فرنگی و ویژگی‌های زیستی خاک بررسی شد. آزمایشی گلخانه‌ای به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح تنش خشکی شامل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و پنج سویه باکتری شامل B19 (*Lysinibacillus sphaericus*)، B60 (*Bacillus* sp.)، B103 (*Lysinibacillus* sp.)، B124 (*Achromobacter* sp.) و GB03 (*Bacillus subtilis*) بودند. همچنین یک تیمار شاهد (بدون باکتری و بدون تنش خشکی) نیز در نظر گرفته شد. به‌منظور اعمال تیمارها، گلدان‌های ۴ کیلوگرمی با استفاده از خاک زراعی عبور داده شده از الک ۴ میلی‌متر آماده شدند. ریشه‌های نشای گوجه‌فرنگی قبل از انتقال به گلدان‌های اصلی با توجه به تیمار مربوطه با باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد به مدت ۲۰ دقیقه آغشته و سپس نشاءها به گلدان اصلی انتقال داده شدند. به‌منظور اطمینان از استقرار گیاه، همه گلدان‌ها به مدت ۳ الی ۴ هفته آبیاری شدند. در ادامه دوره کشت، با اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش وزنی، تنش خشکی مورد نظر اعمال شد. ویژگی‌های تعداد گل، وزن تر بخش هوایی و ریشه، مقاومت روزه‌ای، وزن تر میوه و مقدار پرولین آزاد برگ اندازه‌گیری شدند. همچنین ویژگی‌های زیستی خاک شامل معدنی شدن کربن آلی، کربن زیست‌توده میکروبی، تنفس برانگیخته و کسر متابولیک پس از برداشت گیاهان در خاک تعیین شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که هر پنج سویه باکتری استفاده شده، باعث افزایش معنادار وزن تر اندام هوایی، تعداد گل و وزن میوه شدند. مقدار پرولین آزاد در برگ افزایش معناداری نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح) داشت. نتایج نشان داد، مقدار مقاومت روزه‌ای کاهشی معنادار، نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح) داشت. همچنین سویه‌های استفاده شده باعث بهبود کیفیت ویژگی‌های بیولوژیک خاک شدند، به‌طوری‌که تنفس پایه، تنفس برانگیخته و کربن زیست‌توده میکروبی افزایشی معنی‌داری داشتند، اما کسر متابولیک کاهشی معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد (عدم تلقیح) نشان داد. از بین پنج سویه به کار گرفته شده، سه سویه B19، B60 و B103 بیشترین تأثیر را در کاهش اثرات تنش خشکی نشان دادند. شرایط تنشی مختلف از جمله تنش رطوبتی حاکم بر کشاورزی ایران، موجب کاهش رشد و عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود، بنابراین استفاده از مایه تلقیح حاوی ریز جانداران از جمله باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد که فعالیت آن‌ها در بهبود شرایط تنش به اثبات رسیده، دارای اهمیت فراوان است.

واژه‌های کلیدی: تنفس میکروبی، پرولین، کربن زیست‌توده میکروبی، کسر متابولیک، عملکرد

۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*) نویسنده مسئول: beheshtiali97@gmail.com

۲- گروه گیاه‌پزشکی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳- گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

مقدمه

ایران یکی از کشورهایی است که با میانگین بارندگی سالیانه نزدیک ۲۴۰ میلی‌متر، یک‌سوم میانگین ریزش‌های سالیانه جهانی را برخوردار می‌باشد (Nouri & Homae, 2020). به همین دلیل بررسی پیامدهای تنش خشکی بر گیاه از اهمیت بالایی برخوردار است. تنش‌های غیر زیستی بیشترین آسیب را برای گیاهان دارند، از جمله مخرب‌ترین تنش‌هایی که گیاهان را از سطح فیزیولوژیکی تا مولکولی تحت تأثیر قرار می‌دهند، تنش خشکی است که رشد و عملکرد گیاهان زراعی را محدود می‌کند. تخمین زده می‌شود که تنش خشکی ممکن است باعث از دست دادن ۵۰ درصد عملکرد در گیاهان زراعی شود (Kasim et al., 2013).

تنش خشکی پتانسیل فشاری و اسمزی گیاه را مختل کرده و موجب کاهش عملکرد طبیعی گیاه می‌شود. خشک‌سالی همچنین باعث ایجاد تنش ثانویه می‌شود. استرس اکسیداتیو که می‌تواند باعث آسیب به پروتئین‌ها، لیپیدها و اسید نوکلئیک در گیاهان شود و می‌تواند پراکسیداسیون لیپیدی را آغاز کند (Nair et al., 2008). تنش خشکی باعث کاهش کیفیت مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی و در نتیجه کاهش رشد و عملکرد محصول می‌شود (Abdelaal et al., 2021). یکی از اولین واکنش‌های گیاهی که در معرض خشکی قرار می‌گیرد، بسته شدن روزنه‌ها و کاهش غلظت دی‌اکسید کربن و فتوسنتز است که به‌طور بالقوه منجر به مرگ گیاه تحت تنش شدید می‌شود (Siddiqui et al., 2015).

باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه (PGPR)^۱ نقش مهمی در افزایش رشد گیاه از طریق مکانیسم‌های مختلف ایفا می‌کند. روش عمل PGPR که باعث رشد گیاه می‌شود شامل افزایش تحمل به تنش غیر زیستی در گیاهان، قابل دسترس کردن مواد مغذی برای جذب آسان توسط گیاه، تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه، سیدروفورها، ترکیبات آلی فرار و آنزیم حفاظتی مانند کیتیناز و گلوکاناز برای پیشگیری از بیماری‌های گیاهی (García-Fraile et al., 2015) می‌باشد. با این حال، نحوه عمل PGPR های مختلف بسته به نوع گیاهان میزبان متفاوت است (Dey et al., 2004).

یکی دیگر از تأثیرات عمده PGPR بر گیاهان تحت شرایط تنش غیر زیستی، بهبود وضعیت آب برگ، به‌ویژه در شرایط تنش شوری و خشکی است (Naveed et al., 2014). سارما و سایکا (Sarma & Saikia, 2014) گزارش کردند که سویه *Pseudomonas aeruginosa* رشد گیاه ماش را در شرایط خشک‌سالی بهبود بخشید. توانایی گیاهان در استفاده از آب برای رشد به روزنه آن‌ها بستگی دارد.

روزنه روی برگ گیاه برای متعادل کردن محتوای آب در برگ و جذب آب توسط ریشه عمل می‌کند. نوید و همکاران (Naveed et al., 2014) گزارش کردند که رسانایی روزنه‌ای برگ در گیاهان تلقیح شده با PGPR نسبت به گیاهان تلقیح شده با PGPR در شرایط خشکی بیشتر بود و از مقاومت بیشتری در شرایط تنش خشکی بهره‌مند بودند. یافته‌های هر دو مطالعه ثابت می‌کند که گیاهان تلقیح شده با PGPR تمایل به بهبود کارایی مصرف آب در گیاهان دارند.

عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2020) بیان کردند که تلقیح باکتری‌های PGPR کارایی مصرف آب، زیست‌توده ریشه و اندام هوایی، محتوای نسبی آب برگ و شاخص پایداری غشا را بهبود بخشید و در نتیجه اثر نامطلوب تنش خشکی را در گیاهان گندم و گوجه‌فرنگی کاهش داد.

باکتری *P. fluorescens DR7* با بهبود رطوبت خاک در ناحیه ریشه، موجب افزایش رشد گیاه از رز دمروراهی تحت تنش خشکی شد (Niu et al., 2018). همچنین، تأثیر تنش خشکی بر رشد ذرت در حضور باکتری‌های محرک رشد گیاه شامل *P. putida*، *P. fluorescens P1*، *Azospirillum lipoferum* و *fluorescens P8* بررسی شد و نتایج نشان داد که تلقیح با این باکتری‌ها موجب افزایش رشد گیاه در شرایط خشکی نسبت به گیاهان شاهد گردید (Khan & Bano, 2019). تحقیقات میناکشی و همکاران (Meenakshi et al., 2019) نیز تأیید کرد که سویه‌های باکتریایی اندوفیت MKA2، MKA3 و MKA4 تنش خشکی را در گیاهان گندم کاهش می‌دهند. استفاده از سویه باکتری محرک رشد گیاه *B. subtilis SF48* رشد و محتوای نسبی آب برگ را در گیاهان گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی در مقایسه با گیاهان شاهد افزایش داد (Gowtham et al., 2020).

سینگ و جا (Singh & Jha, 2017)، باکتری *Stenotrophomonas maltophilia SBP-9* را با گیاه گندم تلقیح و مشاهده کردند که به‌طور قابل توجهی پارامترهای رشد گیاه، مانند طول ساقه، طول ریشه، وزن تر، وزن خشک و محتوای کلروفیل را افزایش یافت. هوانگ و همکاران (Huang et al., 2015) دریافتند که تلقیح *Bacillus pumilus* و *Bacillus atrophaeus*، *Bacillus subtilis* به‌طور قابل توجهی باعث رشد ذرت و گوجه‌فرنگی می‌شود.

باکتری‌های PGPR در خاک می‌تواند pH خاک را تحت تأثیر قرار دهد، به افزایش زیست‌توده گیاه کمک کند، فعالیت آنزیم‌ها را افزایش دهد و فرآیند معدنی شدن کربن و نیتروژن آلی را بهبود بخشد (Sarfraiz et al., 2019). نتایج کوساینوا و قیزیل‌کایا (Kussainova & Kizilkaya, 2021) نشان داد که در صورت وجود مقادیر کافی ماده

توسعه فناوری‌های زیستی سازگار با اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک باشد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد در کاهش اثرات تنش خشکی در گیاه گوجه‌فرنگی و تأثیر بر ویژگی‌های زیست خاک، در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی اجرا شد. خاک مورد مطالعه از اراضی دیم پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی به‌صورت یک نمونه مرکب تصادفی تهیه شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در پژوهش در **جدول ۱** نشان داده شده است. این آزمایش، به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار و در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. فاکتورهای بررسی شده شامل، چهار سطح تنش خشکی ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه (FC) و پنج سویه‌های باکتری شامل *Lysinibacillus sphaericus* B19، *Lysibacillus*، *Bacillus* sp. B60، *Achromobacter* sp. B124، *Bacillus subtilis* GB03 و *Bacillus subtilis* GB03 (بدون باکتری) نیز برای بررسی تیمارها در نظر گرفته شد. سویه *Bacillus subtilis* GB03 از پروفیسور Choong-Min Ryu، پژوهشگاه علوم زیستی و بیوتکنولوژی کره جنوبی تهیه شد که نقش آن در بهبود رشد گیاهان مختلف در شرایط تنش شوری اثبات شده است (Han et al., 2014; Zhang et al., 2008). سایر سویه‌ها از کلکسیون باکتری‌های گروه گیاه‌پزشکی دانشگاه رازی تهیه شدند و قادر به افزایش صفات رشدی گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط غیر تنش بودند (Amani-Mehr, 2016).

آلی در خاک با تلقیح میکروبی خاک، کربن آلی افزایش می‌یابد. در این مطالعه بیشترین تنفس برانگیخته خاک در تلقیح با سویه *Amycolatopsis* همراه با کاه و کلش گندم به‌دست آمد. این نشان می‌دهد که معدنی شدن مواد آلی و تولید دی اکسید کربن میکروبی در خاک بیشتر در تلقیح با سویه *Amycolatopsis* به‌دست می‌آید. به‌طور مشابه، مطالعات انجام شده توسط رویی و همکاران (Rui et al., 2016) و میزوا-هستک و همکاران (Mierzwa-Hersztek et al., 2018)، نشان دادند که تنفس میکروبی خاک با افزودن مواد آلی به خاک یا تلقیح میکروبی افزایش قابل‌توجهی دارد. با توجه به این نکته که کشور ایران در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار داشته و مسئله خشکی و کم‌آبی همواره یکی از مهم‌ترین مشکلاتی است که کشاورزان با آن مواجه هستند، پیدا کردن راهکارهایی برای کاهش تنش خشکی و مقاوم کردن گیاهان (از جمله گوجه‌فرنگی)، از مهم‌ترین دغدغه‌های محققان و کشاورزان است.

اگرچه اثر برخی باکتری‌های محرک رشد در کاهش تنش خشکی در مطالعات پیشین گزارش شده است، اما اطلاعات مستندی درباره کارایی سویه‌های مشخص مورد استفاده در این پژوهش (*Lysinibacillus sphaericus* B19، *Achromobacter* sp. B124، *Bacillus* sp. B60، *Lysinibacillus* sp. B103، *Bacillus subtilis* GB03) در گیاه گوجه‌فرنگی و به‌ویژه از منظر ویژگی‌های زیستی خاک وجود نداشت. نوآوری این پژوهش در ارزیابی هم‌زمان اثر این سویه‌ها بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی (مانند پرولین، مقاومت روزه‌ای و اجزای عملکرد) و ویژگی‌های زیستی خاک (شامل تنفس میکروبی، کربن زیست‌توده و کسر متابولیک) است. این رویکرد با هدف تبیین نقش هر سویه در بهبود عملکرد و پایداری سامانه گیاه-خاک تحت تنش خشکی انجام شد و نتایج حاصل می‌تواند زمینه‌ساز

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil

ویژگی	واحد	مقدار
Characteristics	Unit	Value
Sampling depth	عمق نمونه‌برداری	cm 0-30
Soil Texture	کلاس بافت خاک	Silty Clay Loam
OC	کربن آلی	% 2.20
pH	واکنش خاک	- 7
CEC	ظرفیت تبادل کاتیونی	cmol _c kg ⁻¹ 14
EC	هدایت الکتریکی	dS m ⁻¹ 0.4
CaCO ₃	آهک	% 26.70
Na	سدیم محلول خاک	meq L ⁻¹ 0.14
Ca	کلسیم محلول خاک	meq L ⁻¹ 1.60

همچنین به منظور شناسایی مؤثرترین ریزوباکتری‌ها در بهبود رشد گوجه‌فرنگی، ابتدا پیش‌آزمایشی به صورت غربال اولیه انجام شد. در این مرحله، ده جدایه باکتریایی شامل *Bacillus megaterium* (P2)، *Bacillus sp.* (B60)، *Lysinibacillus sphaericus* (B19)، *Bacillus subtilis* (GB03)، *Pseudomonas geniculata* (B11)، *Lysinibacillus*، *Bacillus pumilus* (INR7)، *Bacillus sp.* (D4)، *Stenotrophomonas maltophilia* (B71)، *sp.* (B103) و *Achromobacter sp.* (B124) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با پنج تکرار بررسی شدند. صفات رشدی نظیر وزن خشک ساقه و ریشه، ارتفاع ساقه و طول ریشه پس از یک ماه اندازه‌گیری و سویه‌های دارای بیشترین اثر در افزایش رشد گیاه به عنوان جدایه‌های برتر انتخاب گردیدند.

در ادامه، برای ارزیابی نقش جدایه‌های منتخب در القای مقاومت به خشکی، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با چهار تکرار و در شرایط گلخانه‌ای اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل چهار سطح تنش خشکی (۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه) و شش تیمار باکتریایی شامل پنج سویه منتخب (*Lysinibacillus*، *Lysinibacillus sp.* B103، *Bacillus sp.* B60، *sphaericus* B19 و *Bacillus subtilis* GB03 و *Achromobacter sp.* B124) به همراه تیمار شاهد (بدون تلقیح باکتری) بودند. این طراحی امکان بررسی دقیق اثر سویه‌های منتخب در بهبود تحمل خشکی و پایداری سیستم گیاه-ریزوسفر را فراهم ساخت. در این پژوهش از گیاه گوجه‌فرنگی رقم کارون که از شرکت روژین تاک تهیه شده بود استفاده شد. برای اعمال تیمارها، گلدان‌ها با ۴ کیلوگرم خاک که از الک ۴ میلی‌متری عبور داده شده بود، پر شدند.

برای افزایش جمعیت باکتری از محیط کشت مغذی NB^۱ استفاده شد. کشت باکتری‌ها در شیکر انکوباتور با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت ۱۲۰ دور در دقیقه و به مدت ۳۶ ساعت انجام گرفت. از سویه‌های باکتری، سوسپانسیون با فراوانی 10^9 CFU/ml در آب مقطر استریل آماده شد و ریشه‌های نشاء گوجه‌فرنگی برای ۲۰ دقیقه در سوسپانسیون قرار داده و در خاک گلدان کشت شدند (Amiri et al., 2018). تیمار شاهد نیز در آزمایش در نظر گرفته شد. برای اطمینان از استقرار کامل گیاه، تمامی گلدان‌ها به مدت چهار هفته به صورت منظم آبیاری شدند. پس از این دوره، تنش خشکی بر اساس درصدهای مختلف ظرفیت مزرعه شامل ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد اعمال گردید. ظرفیت مزرعه به روش وزنی تعیین شد؛ به طوری که گلدان‌های حاوی خاک پس از اشباع کامل و زهکشی ۲۴ ساعته وزن کشی شدند و اختلاف وزن خاک مرطوب و خشک به عنوان رطوبت در حد ظرفیت

مزرعه در نظر گرفته شد. با توجه به ظرفیت مزرعه ۲۹ درصد وزنی و استفاده از ۴ کیلوگرم خاک خشک در هر گلدان، مقدار آب لازم برای رسیدن به ظرفیت مزرعه کامل (۱۰۰ درصد) برابر با ۱۱۶۰ میلی‌لیتر محاسبه شد. بر این اساس، مقادیر آب اولیه در تیمارهای ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد ظرفیت مزرعه به ترتیب ۹۲۸، ۶۹۶ و ۴۶۴ میلی‌لیتر تعیین و اعمال گردید. در طول دوره آزمایش، وزن گلدان‌ها به صورت روزانه اندازه‌گیری می‌شد و بر اساس میزان کاهش وزن، آب مورد نیاز برای حفظ سطح رطوبت تنظیم شده به هر گلدان اضافه گردید (Dane & Topp, 2020). همچنین برای کنترل و اطمینان از ثبات رطوبت در طول دوره رشد گیاه، از دستگاه رطوبت‌سنج مدل PMS-714 استفاده گردید. این روش اعمال تیمارها به مدت سه ماه به صورت روزانه ادامه یافت. دمای گلخانه ۲۵ درجه سانتی‌گراد و طول دوره روشنایی ۱۲ ساعت بود. کاربرد تنش تا زمان، برداشت گیاهان انجام شد و ویژگی‌های تعداد گل، وزن تر بخش هوایی و ریشه، مقاومت روزنه‌ای برگ با استفاده از یک porometer قابل حمل و بر اساس روش مونتیث و همکاران (Monteith et al., 1965) اندازه‌گیری شد. این دستگاه با سنجش سرعت عبور بخار آب از سطح روزنه‌ها، مقاومت انتشار بخار در روزنه‌های برگ را محاسبه می‌کند. اندازه‌گیری‌ها در ساعات میانی روز و بر روی برگ‌های کاملاً توسعه یافته انجام شد تا شرایط نور و دما یکنواخت باشد. وزن تر میوه و مقدار پرولین آزاد برگ (Bates et al., 1973) اندازه‌گیری شدند. در خاک کشت شده پس از برداشت گیاهان، تنفس میکروبی خاک (Anderson, 1982) برای هفت هفته، کربن زیست‌توده میکروبی به روش گازدهی با کلروفورم و خوابانیدن (به مدت ۱۰ روز) (Horwath & Paul, 1994) و تنفس برانگیخته (SIR) (Alef & Nannipieri, 1995) اندازه‌گیری شدند. همچنین کسر متابولیکی (qCO_2) (Suman et al., 2006) با داده‌های به دست آمده محاسبه شد. قبل از تجزیه واریانس داده‌ها، آزمون نرمال بودن داده‌ها انجام شد. در این تحقیق برای مقایسه میانگین از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار اکسل استفاده شد و همچنین برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده گردید.

نتایج و بحث

ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی

تأثیر تیمارهای آزمایشی بر وزن تر بخش هوایی و ریشه گیاه گوجه‌فرنگی در جدول ۲ نشان داده شده است. اثرات متقابل باکتری و تنش خشکی در سطح احتمال ۱ درصد بر وزن تر بخش هوایی معنی‌دار بود ولی تأثیری بر وزن تر ریشه گیاه نداشت (جدول ۲). بیشترین وزن تر

از ریشه در معرض تنش قرار می‌گیرد. همچنین از آنجا که زیست‌توده ریشه‌ها کمتر از قسمت هوایی گیاهان است، کمبود آب بر ریشه‌ها، کمتر از قسمت‌های هوایی گیاهان تأثیر می‌گذارد (Eziz et al., 2017). پژوهشگران دیگر نیز گزارش کرده‌اند که تنش آبی باعث کاهش وزن اندام هوایی در گیاه می‌شود و این مورد در گیاهان ماش، نخود، سویا، کلزا، پنبه، لوبیا، یونجه و شبدر زیرزمینی گزارش شده است (Farooq et al., 2012). تحت شرایط کم‌آبی، نفوذ ریشه به اعماق خاک کاهش یافته و در نتیجه وزن تر و خشک گیاه نیز کم می‌شود (Kou et al., 2022).

تأثیر تیمارهای آزمایشی بر وزن تر میوه و تعداد گل گیاه گوجه‌فرنگی در جدول ۲ نشان داده شده است. اثرات متقابل باکتری و تنش خشکی در سطح احتمال ۱ درصد بر وزن تر میوه گوجه‌فرنگی و بر تعداد گل گیاه گوجه‌فرنگی در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). کاربرد هر پنج سویه باکتری، موجب افزایش وزن تر میوه گوجه‌فرنگی در برابر تیمار شاهد (عدم تلقیح) شد. به‌طوری‌که بیشترین وزن میوه (۶۲/۰۰ گرم در گلدان) مربوط به تیمار *Bacillus* sp. B60 در ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین وزن میوه (۱۴/۰۰ گرم در گلدان) مربوط به تیمار شاهد در تنش ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود (جدول ۳).

اندام هوایی (۳۴/۵۰ گرم در گلدان) مربوط به سویه‌های *L. sphaericus* B19 و *Lysibacillus* sp. B103 در رطوبت ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین وزن تر اندام هوایی (۱۲/۵۰ گرم) مربوط به تیمار شاهد آزمایش (عدم تلقیح باکتری) در رطوبت ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود. سویه *L. sphaericus* B19 در سطح خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه نیز توانست وزن تر را ۸۴ درصد افزایش دهد. نتایج نشان داد که تنش خشکی موجب کاهش معنی‌دار وزن تر اندام هوایی در گیاه گوجه‌فرنگی شده است. نتایج پژوهش‌های متعدد بیانگر حساسیت بیشتر بخش هوایی گیاه نسبت به تنش خشکی است. نتایج فعالیت پژوهشی محققین در این رابطه نشان داده است که در اثر تنش خشکی تعداد روزنه‌ها کاهش یافته و تبخیر و تعرق کم و در نتیجه فتوسنتز نیز کم شده و این موضوع باعث کاهش وزن اندام‌های هوایی گیاه می‌شود (Yadav et al., 2020). سهاران و نهرا (Nehra & Saharan, 2011) دلیل کاهش وزن خشک و تر اندام هوایی و در کل رشد گیاه گوجه‌فرنگی را در شرایط تنش خشکی، پلاسمولیز شدن سلول‌های گیاهی، بسته شدن روزنه‌ها (به‌منظور جلوگیری از تبخیر و تعرق) و در نتیجه کاهش فتوسنتز و افزایش تنفس نوری می‌دانند. در چنین شرایطی میزان اتیلن در گیاه نیز افزایش می‌یابد. با کاهش رطوبت، رشد قسمت‌های هوایی بیش از ریشه کاهش می‌یابد. تنش، ابتدا از قسمت‌های هوایی گیاه شروع می‌شود و اندام هوایی گیاه بیش

جدول ۲- تجزیه واریانس تیمارهای تنش خشکی و تلقیح باکتری بر ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی
Table 2- Variance analysis of drought stress and bacterial inoculation treatments on morphological and physiological characteristics of tomato

منابع تغییرات Sources of variation	df	میانگین مربعات Mean of squares					
		وزن تر اندام هوایی Shoot wet weight	وزن تر ریشه Root wet weight	وزن میوه Fruit weight	تعداد گل Flower No.	مقاومت روزنه‌ای Stomatal resistance	پرولین آزاد برگ Leaf-free proline
تکرار Rep	3	11.50 *	7.00 **	36.60 ns	3.50 **	52.70 **	0.32 ns
باکتری Bacteria	5	377.00 **	22.00 **	561.40 **	21.30 **	284 **	6.50 **
خشکی Drought	3	401.00 **	16.00 **	15.20 ns	60.30 **	2232 **	13.50 **
باکتری × خشکی Bacteria × Drought	15	15.00 **	0.61 ns	227.00 *	1.20 **	93.70 **	1.10 **
خطای آزمایشی Error	72	3.50	1.00	44.50	0.41	6.60	0.36
درصد ضریب تغییرات CV (%)	-	9.50	7.50	8.80	10.50	12.50	7.80

** و * به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گوجه‌فرنگی تحت تیمارهای تنش خشکی و تلقیح باکتری
Table 3- Comparison of average morphological and physiological characteristics of tomato under drought stress and bacterial inoculation treatments

صفات گیاهی Plant characteristics	تنش خشکی Drought stress	تیمار باکتری Bacterial strain					
		شاهد Control	<i>Lysinibacillus</i> <i>sphaericus</i> B19	<i>Bacillus</i> sp. B60	<i>Lysinibacillus</i> sp. B103	<i>Achromobacter</i> sp. B124	<i>Bacillus</i> <i>subtilis</i> GB03
وزن تر اندام هوایی Shoot Wet Weight (g/pot)	40% FC	12.50 j	23.00 de	19.30 fg	18.50 fg	14.20 ij	18.50 fgh
	60% FC	13.00 j	23.50 de	20.50 ef	23.60 de	16.40 hi	20.50 ef
	80% FC	16.00 hi	26.60 c	23.00 de	27.20 bc	17.20 ghi	23.40 de
	100% FC	16.20 hi	34.50 a	29.60 b	34.50 a	23.00 de	24.80 cd
وزن میوه Fruit Weight (g/pot)	40% FC	14.00 g	18.00 g	16.00 g	15.00 g	16.00 g	16.50 g
	60% FC	16.00 g	38.00 bcde	19.00 g	17.00 fg	18.00 g	23.00 efg
	80% FC	18.00 g	40.00 bcd	32.00 cdef	32.00 cdef	20.00 fg	29.00 defg
	100% FC	25.00 fg	49.00 abc	62.00 a	45.00 bcd	41.00 bcd	27.00 fg
تعداد گل No. of flower	40% FC	3.00 k	3.20 k	3.20 k	3.20 k	3.70 jk	5.00 hi
	60% FC	3.20 k	5.50 fghi	4.50 ij	3.50 k	4.70 i	6.50 def
	80% FC	3.50 k	6.20 efg	5.20 ghi	5.00 hi	6.50 def	8.50 ab
	100% FC	5.20 ghi	8.00 bc	7.00 de	7.50 cd	7.00 de	9.00 a
مقاومت روزنه‌ای Stomatal resistance sec) (mmol/m ²	40% FC	87.00 a	63.00 cde	64.00 cd	74.00 b	75.00 b	65.00 c
	60% FC	60.00 def	46.00 m	59.00 efgh	53.00 ijkl	59.00 efg	57.00 fghi
	80% FC	57.00 fghi	54.00 hijk	50.00 klm	57.00 fghi	56.00 fghi	55.00 ghij
	100% FC	53.00 ijkl	51.00 jklm	39.00 n	51.00 jklm	49.00 lm	49.00 lm
پروکلین آزاد برگ Leaf-free proline (μmol/g)	40% FC	2.20 ghi	4.80 ab	5.20 a	3.70 cd	3.80 cd	5.30 a
	60% FC	1.90 hi	3.60 cd	3.60 cde	3.60 cde	3.50 cde	4.00 bc
	80% FC	1.80 i	3.30 cdefg	3.30 cdefg	3.30 cdef	3.40 cdef	3.10 cdefg
	100% FC	1.70 i	3.20 cdefg	3.20 cdefg	3.10 cdefg	3.20 cdefg	3.00 cdefg

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, means with similar letters are not significantly different in probability level of 5%, from the Duncan's multiple range tests.

ارتفاع و عملکرد گیاه می‌شود (Branson et al., 1967). کاهش آب آبیاری به اندازه ۲۵ و ۵۰ درصد رطوبت مزرعه به ترتیب موجب کاهش عملکرد گیاه به اندازه ۲۹/۳۰ و ۴۰/۶۰ درصد شده است (Norjo et al., 2001). کاهش گسترش ریشه یکی از عوامل اصلی کاهش عملکرد گوجه‌فرنگی در شرایط خشکی است. در شرایط تنش، رشد ریشه‌ها کاهش پیدا می‌کند و رشد آن‌ها فقط به لایه‌های بالایی خاک محدود می‌شود (Egea et al., 2022).

استفاده از باکتری‌های محرک رشد گیاهی، به گونه قابل توجهی از کاهش محصول در شرایط تنش خشکی جلوگیری می‌کند و موجب افزایش عملکرد می‌شود. بر اساس مطالعات مختلف، تلقیح با باکتری‌های محرک رشد در شرایط تنش خشکی موجب افزایش عملکرد محصولات زراعی شده است؛ به گونه‌ای که در گوجه‌فرنگی تا حدود ۲/۸ درصد، در ذرت بین ۱۰ تا ۳۰ درصد، و در گندم و جو حدود ۴۰ درصد افزایش عملکرد نسبت به تیمار شاهد (بدون تلقیح) گزارش

پنج سویه باکتری تلقیح شده با ریشه، باعث افزایش معنی‌دار تعداد گل نسبت به شاهد شده‌اند. به طوری که بیشترین تعداد گل (۹/۰۰ گل در بوته) مربوط به تیمار باکتری *Bacillus subtilis* GB03 در تنش ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین تعداد گل (۳/۰۰ گل در بوته) مربوط به تیمار شاهد (عدم تلقیح باکتری) در تنش ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود (جدول ۳). تیمار باکتری *Bacillus subtilis* GB03 در تنش‌های مختلف رطوبتی، اختلاف معنی‌داری را با تیمار شاهد و سایر تیمارهای تلقیح نشان دادند. بوته‌های گوجه‌فرنگی تلقیح شده با باکتری *Bacillus subtilis* GB03 زودتر از چهار سویه دیگر به گل نشستند. گیاه گوجه‌فرنگی درست بعد از نشاکاری، در دوره گلدهی و شکل‌گیری میوه، به کمبود آب حساس می‌باشد، به طوری که کمبود آب در گام گلدهی سبب ریزش گل‌ها می‌شود. در تنش‌های رطوبتی در گیاه گوجه‌فرنگی، اندازه انرژی که صرف جذب آب از خاک توسط گیاه می‌شود افزایش می‌یابد که این کار موجب افزایش تنفس و کاهش

در آزمایش حاضر به کارگیری هر پنج سویه باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد باعث افزایش هدایت روزنه‌ای (کاهش مقاومت روزنه‌ای) شد. در تحقیق منافی و همکاران (Manafi et al., 2012) روی لوبیای قرمز تحت شرایط تنش خشکی، گزارش شد که کاربرد باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد از جنس *Rhizobium* موجب بهبود جذب آب توسط گیاه و افزایش محتوای رطوبت نسبی برگ گردید. این امر باعث شد روزنه‌ها برای مدت طولانی‌تری باز بمانند، فتوسنتز با کارایی بیشتری انجام گیرد و در نهایت عملکرد گیاه افزایش یابد. جباری و خالقی‌نژاد (Jabbari & Khaleghnezhad, 2014) در بررسی اثر دو سویه ریزوبیوم و باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد بر گیاه نخود گزارش کردند؛ که هدایت روزنه‌ای در وضعیت تنش خشکی نسبت به آبیاری، ۹۱ درصد کاهش داشت. رستم کیا و همکاران (Rostamikia et al., 2016) نشان دادند؛ که در شرایط تنش خشکی، در نتیجه، تلقیح دو گونه باکتری *Pseudomonas putida* و *Bacillus subtilis* با گیاه *Corylus avellana*، سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای و کارایی مصرف آب افزایش یافته است و همین امر باعث شده تا تیمارهای باکتری بتوانند بر عملکرد اندام‌های هوایی گیاه مذکور تأثیر مثبتی داشته باشند.

با توجه به نتایج جدول ۲، اثر متقابل تنش خشکی و تلقیح باکتری در سطح احتمال یک درصد بر میزان پرولین آزاد برگی معنی‌دار شد. تنش خشکی باعث افزایش میزان غلظت پرولین هم در گیاهان تلقیح شده با سویه‌های باکتری و هم در گیاهان شاهد شد با این تفاوت که میزان پرولین در گیاهان تلقیح شده با سویه‌های باکتری بیشتر بود (جدول ۳). بیشترین میزان غلظت پرولین آزاد در برگ (۵/۳۰ میکرومول بر گرم) مربوط به تیمار با سویه *B. subtilis* GB03 در تنش خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین میزان غلظت پرولین آزاد برگ (۱/۷۰ میکرومول بر گرم) مربوط به تیمار شاهد (بدون تلقیح باکتری) و ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه بود (جدول ۳).

توزیع پرولین در درون و بیرون سلول، نقش مهمی در مقاومت اسمزی بافت‌های مختلف نسبت به تنش‌ها ایفا می‌کند. در شرایط کمبود آب، سنتز پرولین اغلب از گلوتامیک اسید در سیتوزول و کلروپلاست سلول‌های گیاهی اتفاق می‌افتد، بنابراین پرولین در سیتوزول تجمع یافته تا توزیع آب به درون سلول انجام شود. در شرایط نرمال، پرولین به اندامک‌ها به‌ویژه واکوئل انتقال می‌یابد و در صورتی که گیاه تحت شرایط تنش خشکی قرار گیرد پرولین از واکوئل به سیتوزول انتقال می‌یابد (Trovato et al., 2019).

افزایش غلظت پرولین تحت شرایط تنش خشکی در برنج (Lum et al., 2014)، گوجه‌فرنگی (Khan et al., 2015) و فلفل تند (Anjum et al., 2012) نیز گزارش شده است؛ بنابراین گیاهانی که تحت تنش خشکی قرار می‌گیرند، مقدار زیادی از منابع کربن و نیتروژن

گردیده است (Najafvand et al., 2007; Zahir et al., 2004). در مورد تأثیر باکتری‌های محرک رشد روی گیاه سرخال گل (*Echinacea purpurea* L.) در شرایط تنش خشکی، می‌توان گفت که این باکتری‌ها موجب آزادسازی هورمون‌های گیاهی از جمله جیبرلیک اسید و اکسین می‌شوند (Vikram, 2007) که در نتیجه فرآیند رشد ریشه (Galleguillos et al., 2000) دسترسی و جذب عناصر غذایی از جمله فسفر و نیتروژن (Narula et al., 2000) را افزایش داده و در نتیجه موجب افزایش ارتفاع و تعداد گل‌ها در بوته می‌شود. در پژوهشی دیگر، کاربرد باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد در گیاه ذرت در شرایط تنش خشکی توانست تعداد دانه را از ۴۱۴/۰۸ به ۴۸۶/۱۶ عدد افزایش دهد که احتمالاً از طریق تأثیر در فاکتورهای مختلف رشد و جذب عناصر غذایی ضروری بوده است (Mohammadi et al., 2015).

تجزیه واریانس تیمارهای آزمایشی بر میزان مقاومت روزنه‌ای نشان دهنده تأثیر تیمار خشکی و باکتری در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۲). با افزایش تنش خشکی از سطح ۱۰۰ تا ۴۰ درصد رطوبت مزرعه، مقاومت روزنه‌ای روند افزایشی از خود نشان داد. استفاده از هر پنج سویه باکتری ریزوسفری محرک رشد باعث کاهش مقاومت روزنه-ای (افزایش هدایت روزنه‌ای) در گیاه گوجه‌فرنگی شد. (جدول ۳). بیشترین کاهش مقاومت روزنه‌ای (۳۹/۰۰ مول بر متر مربع بر ثانیه) مربوط به سویه *Bacillus* sp. B60 در تنش خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و بیشترین مقاومت روزنه‌ای (۸۷/۰۰ مول بر متر مربع بر ثانیه) مربوط به تیمار شاهد (عدم تلقیح) در تنش ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود. به عبارتی دیگر؛ بیشترین مقدار هدایت روزنه‌ای مربوط به سویه *Bacillus* sp. B60 بود.

در مطالعه حاضر میزان مقاومت روزنه‌ای با افزایش تنش خشکی افزایش پیدا کرد. در گونه‌های زراعی، عملکرد نسبتاً کم معمولاً با کاهش فتوسنتز در نتیجه بسته شدن روزنه‌ها ناشی از تنش خشکی شدید یا طولانی‌مدت مرتبط است (Mafakheri et al., 2010). علاوه بر این، بسته شدن روزنه در اثر خشک‌سالی می‌تواند آنابولیسم و تجمع مواد غذایی در میوه‌ها را محدود کند که می‌تواند شکل‌گیری طعم‌های مطلوب را مختل کند (Sánchez-Rodríguez et al., 2010). نتایج تحقیقات محمودیان و همکاران (Mohammadian et al., 2001) نشان داد که اثر رژیم رطوبتی بر مقاومت روزنه‌ای در سطح یک درصد معنی‌دار است و بیشترین مقدار مقاومت روزنه‌ای در حداکثر تنش خشکی و کمترین مقدار آن، در تیمار آبیاری کامل مشاهده شد. بانیک و همکاران (Banik et al., 2016) گزارش نمودند؛ که وقوع تنش خشکی در دو مرحله آغازش غده و غده بندی در سیب‌زمینی باعث کاهش معنی‌دار در پتانسیل آب برگ و افزایش معنی‌دار در مقاومت روزنه‌ای این گیاه می‌گردد.

خود را صرف سنتز تنظیم‌کننده‌های اسمزی از قبیل پرولین می‌کنند تا بتوانند فشار تورژانس سلول‌های خود را حفظ نمایند (Tourajzadeh et al., 2024).

ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تنش خشکی و تلقیح باکتری بر ویژگی‌های زیستی خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۴). با افزایش تنش خشکی، تنفس خاک کاهش پیدا کرد. تلقیح با هر یک از پنج سویه باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد موجب افزایش تنفس خاک شد. به‌طوری‌که بیشترین میزان تنفس خاک مربوط به سویه‌های *L. Achromobacter* sp. B124 و *sphaericus* B19 *Bacillus* sp. B60 در تنش خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین میزان تنفس خاک (۵/۲۰ میلی گرم دی اکسید کربن در کیلوگرم خاک) مربوط به تیمار شاهد (عدم تلقیح باکتری) در تنش خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه بود (جدول ۵).

اغلب، کاهش ویژگی‌های زیستی در خاک‌های تحت انواع تنش‌ها از جمله تنش شوری و تنش خشکی به افزایش پتانسیل اسمزی و سمیت یون‌های فراوان نسبت داده شده است (Vafadar et al., 2017). در توجیه کاهش تنفس خاک پس از تنش خشکی می‌توان گفت در شرایط افزایش شدت و دامنه تنش، ریز جانداران قادر به بردباری شرایط نبوده و دچار ناهنجاری فیزیولوژیک می‌شوند و در نتیجه تنفس خاک کاهش می‌یابد (Zeng et al., 2013). تنفس و زیست‌توده

میکروبی تحت تأثیر در دسترس بودن کربن آلی در خاک هستند و هر عاملی که موجب افزایش مقدار کربن آلی خاک شود، این دو فاکتور را نیز افزایش می‌دهد (Nahidan & Nourbakhsh, 2009).

بیشترین تنفس برانگیخته خاک (۴۰/۳ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) در تلقیح ریشه با سویه *Bacillus* sp. B60 در تنش خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه مشاهده شد و کمترین تنفس برانگیخته خاک (۵/۵ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) نیز در تیمار بدون تلقیح ریشه با باکتری در تنش خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه اندازه‌گیری شد که با سایر تنش‌های خشکی بدون تلقیح ریشه تفاوت معنی‌داری داشت (جدول ۵). جالب است که در بیشترین تنش خشکی (۴۰ درصد رطوبت مزرعه) سویه *L. sphaericus* B19 به‌عنوان بهترین سویه توانست، تنفس را از ۵/۵ (تیمار شاهد) به ۲۷/۸۳ میلی گرم بر کیلوگرم خاک افزایش دهد. این سویه توانایی بالایی در تولید سیدروفور، اکسین، تثبیت نیتروژن و حلالیت پتاسیم، فسفر و سیلیکات‌ها دارد (Martinez-Sergio & Jenny, 2018; Naureen et al., 2017).

کاهش تنفس برانگیخته در شرایط افزایش تنش، به این دلیل است که با افزایش خشکی جمعیت فعال میکروبی کاهش می‌یابد و کاهش رشد گیاه تأثیر شدیدی بر کاهش فعالیت میکروبی در این خاک‌ها دارد (Boyerahmadi et al., 2010). در پژوهش دیگری که بر روی تنش شوری که نتایج زیان‌بار آن شباهت زیادی به تنش خشکی دارد، قول‌لر و همکاران (Gollar et al., 2008) نشان دادند که شوری موجب کاهش معنی‌دار تنفس برانگیخته در خاک تحت کشت شیدر گردید.

جدول ۴- تجزیه واریانس تنش خشکی و تلقیح باکتری بر ویژگی‌های زیستی خاک

Table 4- Analysis of variance on the effect of drought stress and bacterial strains on soil biological characteristics

منابع تغییرات Sources of variation	df	میانگین مربعات Mean squares			
		تنفس پایه خاک Basal respiration	تنفس برانگیخته Substrate-induced respiration	کربن زیست‌توده میکروبی Microbial Biomass	کسر متابولیک Carbon Metabolic quotient
تکرار Rep	3	0.51 **	1398.00 ns	511.50 ns	0.0002 ns
باکتری Bacteria	5	1239.00 **	708317.00 **	559223.00 **	0.04 **
خشکی Drought	3	3084.00 **	122720.00 **	742915.00 **	0.01 *
باکتری × خشکی Bacteria × Drought	15	133.40 **	45732.00 **	42159.00 **	0.002 **
خطای آزمایشی Error	72	2.40	93.70	76.80	0.0006
درصد ضریب تغییرات CV (%)	-	15.80	14.50	22.40	2.30

** و * به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant, respectively

جانداران قرار دارد چرا که آن‌ها نه تنها قادر به ذخیره مواد غذایی هستند بلکه در چرخه عناصر غذایی و مواد آلی در خاک دخیل بوده و نقش مهمی در تجزیه ترکیبات پیچیده و آزاد کردن ترکیبات ساده مثل دی-اکسیدکربن دارند و افزایش آن‌ها در خاک مایه افزایش کربن زیست‌توده میکروبی می‌شود (Jafari et al., 2013). رضائی و رئیسی (Rezaie & Raiesi, 2016) نشان دادند با کاهش رطوبت از ۷۰ به ۳۰ درصد رطوبت مزرعه، تنفس خاک و کربن زیست‌توده میکروبی کاهش معنی-دار یافتند. آروناچالام و آروناچالام (Arunachalam & Arunachalam, 2000) نیز در بررسی‌های خود دریافتند؛ با افزایش رطوبت در خاک کربن زیست‌توده میکروبی افزایش می‌یابد. کسر متابولیک در تنش خشکی با ۴۰ درصد رطوبت مزرعه از ۰/۰۴۰۶ به ۰/۰۶۱۹ افزایش یافت (جدول ۵). با افزایش تنش خشکی، فراوانی ریز جانداران خاک کاهش می‌یابد در نتیجه qCO_2 افزایش می‌یابد. نتایج ارائه شده در جدول ۵ نشان داد که در همه سطوح خشکی، تلقیح باکتری با ریشه گیاه منجر به کاهش کسر متابولیکی در برابر تیمار شاهد شد.

سطوح مختلف تنش خشکی تأثیر متفاوت و معنی‌داری بر مقدار کربن زیست‌توده میکروبی خاک داشتند. با افزایش خشکی، کربن زیست‌توده میکروبی روند کاهشی نشان داد، به‌طوری‌که سطح خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه بیشترین (۲۲۸/۰۰) میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) و سطح خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه کمترین (۸۴/۴۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک) مقدار کربن زیست‌توده میکروبی را داشتند. با افزایش تنش خشکی فراوانی ریز جانداران خاک کاهش یافته و کارایی متابولیک آن‌ها کمتر می‌شود. افزودن باکتری به خاک منجر به افزایش اندازه کربن زیست‌توده میکروبی در خاک شد. به‌طوری‌که در تیمارهای حاوی باکتری تفاوت معنی‌داری با تیمار بدون باکتری داشت. تیمار با سویه *Bacillus* sp. B60 با میانگین ۹۰۹ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بیشترین اندازه را به خود اختصاص داد (جدول ۵). این سویه در همه سطوح تنش خشکی جزء سویه‌های برتر بود.

در این پژوهش مقدار کربن زیست‌توده میکروبی با افزایش تنش خشکی با کاهش همراه بود که می‌تواند به از بین رفتن توده عظیمی از ریز جانداران حساس به خشکی، به‌ویژه بعضی از باکتری‌ها نسبت داده شود. کربن زیست‌توده میکروبی به شدت تحت تأثیر فراوانی ریز

جدول ۵- آزمون میانگین پیامدهای متقابل خشکی و تیمارهای باکتری بر ویژگی‌های زیستی خاک

Table 5- Mean comparison on the effect of drought and bacterial strains interactions on soil biological factors

ویژگی زیستی خاک Soil biological characteristics	تنش خشکی Drought stress	تیمار باکتری Bacterial strain					
		شاهد Control	<i>Lysinibacillus sphaericus</i> B19	<i>Bacillus</i> sp. B60	<i>Lysinibacillus</i> sp. B103	<i>Achromobacter</i> sp. B124	<i>Bacillus subtilis</i> GB03
تنفس پایه خاک Basal respiration (mg C-CO ₂ /kg)	40% FC	5.20 j	12.48 d	14.36 bc	6.93 hi	11.90 d	5.90 ij
	60% FC	7.10 hi	13.24 cd	14.8 b	10.11 e	12.00 d	6.10 ij
	80% FC	7.70 gh	16.86 a	14.96 b	10.20 e	15.10 b	8.40 fg
	100% FC	9.20 ef	16.92 a	16.55 a	12.44 d	17.00 a	10.17 e
تنفس برانگیخته Substrate-induced respiration (mg C/kg)	40% FC	5.50 p	27.83 d	20.17 g	7.30 o	12.80 jk	10.80 lm
	60% FC	8.25 no	31.17 c	22.00 f	15.58 i	18.30 h	12.75 jk
	80% FC	19.17 mn	31.25 c	25.97 e	16.50 hi	20.39 fg	12.80 jk
	100% FC	11.00 kl	34.83 b	40.30 a	17.40 hi	25.67 e	13.75 j
کربن زیست‌توده میکروبی Microbial biomass carbon (mg/kg)	40% FC	84.40 k	296.00 hij	448.00 fg	398.00 gh	237.00 ij	348.00 ghi
	60% FC	114.00 k	593.00 de	646.00 de	613.00 de	348.00 ghi	367.00 ghi
	80% FC	224.00 j	599.00 de	844.00 ab	685.00 cd	412.00 fg	548.00 ef
	100% FC	228.00 j	775.00 bc	909.00 a	696.00 cd	846.00 ab	896.00 a
کسر متابولیک Metabolic quotient	40% FC	0.06 a	0.04 c	0.03 d	0.02 e	0.05 b	0.02 e
	60% FC	0.06 a	0.02 e	0.02 e	0.02 e	0.03 d	0.02 e
	80% FC	0.03 d	0.01 f	0.01 f	0.01 f	0.04 c	0.02 e
	100% FC	0.04 c	0.02 e	0.01 f	0.03 ij	0.02 e	0.01 f

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

In each column, means with similar letters are not significantly different in probability level of 5%, from the Duncan's multiple range tests.

تنش خشکی ۴۰ درصد رطوبت مزرعه و کمترین کسر متابولیک

بیشترین کسر متابولیک (۰/۰۶۱۹) در تیمار بدون تلقیح باکتری در

آزاد برگ و کاهش مقاومت روزنه‌ای نیز نشان‌دهنده ارتقای وضعیت فیزیولوژیکی و بهبود تحمل گیاه در برابر تنش خشکی می‌باشد. افزایش شاخص‌های زیستی خاک شامل تنفس پایه، تنفس القاشده با سوپسترا و کربن زیست‌توده میکروبی، همراه با کاهش ضریب متابولیکی (qCO_2)، نشان داد که تلقیح باکتریایی سبب افزایش کارایی متابولیکی جامعه میکروبی و پایداری بیشتر سامانه خاک-گیاه شده است. در میان سویه‌های مورد بررسی، B19 (*Lysinibacillus sphaericus*)، B60 (*Bacillus* sp.) و B103 (*Lysinibacillus* sp.) بیشترین کارایی را در بهبود هم‌زمان پاسخ‌های گیاه و ویژگی‌های زیستی خاک نشان دادند. مجموع این یافته‌ها نشان می‌دهد که نوآوری اصلی پژوهش در روشن‌سازی نقش فرآیندهای زیستی وابسته به خاک در افزایش تحمل گیاه به خشکی از طریق سویه‌های مشخص باکتریایی است. بدین ترتیب، استفاده هدفمند از این سویه‌ها می‌تواند رویکردی پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای مدیریت تنش خشکی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد. انجام مطالعات مزرع‌ای و بررسی پایداری اثرات این سویه‌ها، گام ضروری بعدی برای توسعه و تجاری‌سازی کودهای زیستی مقاوم به تنش است.

(۰/۰۱۱۵) در تنش خشکی ۱۰۰ درصد رطوبت مزرعه با تلقیح باکتری *Bacillus subtilis* مشاهده شد. این سویه در سطوح بالای تنش خشکی نیز توانست به‌خوبی qCO_2 را کاهش دهد. افزایش کسر متابولیکی (qCO_2) در این پژوهش می‌تواند وابسته به این حقیقت باشد که؛ هنگامی که جمعیت ریز جانداران خاک تحت تنش خشکی باشد، کربن بیشتری از راه تنفس خاک از دست رفته و کمتر وارد فرآیندهای بیوسنتزی و رشد ریز جانداران می‌شود و در پی آن، میزان کسر متابولیکی در خاک بیشتر می‌شود (Wong et al., 2008). افزایش فراوانی باکتری‌ها در خاک موجب افزایش کربن زیست‌توده میکروبی شده و در پی آن از بالا رفتن ضریب متابولیکی جلوگیری می‌کند (Anderson & Domsch, 1993).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تلقیح باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد، اثرات منفی تنش خشکی را در گوجه‌فرنگی به‌طور مؤثری کاهش می‌دهد. افزایش معنی‌دار وزن تر اندام هوایی، تعداد گل و وزن میوه در تمامی تیمارهای تلقیح‌شده بیانگر بهبود هم‌زمان رشد رویشی و زایشی گیاه تحت شرایط محدودیت رطوبتی است. افزایش پرولین

References

- Abbasi, S., Sadeghi, A., & Safaie, N. (2020). Streptomyces alleviate drought stress in tomato plants and modulate the expression of transcription factors ERF1 and WRKY70 genes. *Scientia Horticulturae*, 265, 109206. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109206>
- Abdelaal, K., Elafry, M., Abdel-Latif, I., Elshamy, R., Hassan, M., & Hafez, Y. (2021). Pivotal role of yeast and ascorbic acid in improvement the morpho-physiological and yield characters of two wheat cultivars under water deficit stress in calcareous soil. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 50(2), 12710. <https://doi.org/10.15835/nbha50212710>
- Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press.
- Amani-Mehr, M. (2016). *Biological control of tomato damping-off caused by Pythium aphanidermatum with rhizobacteria isolated from tomato rhizosphere* Razi University].
- Amiri, S., Nosrati, I., Mohammadi, G.R., Kahrizi, D., & Sharifi, R. (2018). Rye (*Secale cereale* L.) and plant probiotics interaction on control of branched broomrape (*Phelipanche ramosa*) on tomato (*Solanum lycopersicum*) Sivad and Super strain B cultivars. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 28(1), 139-149. http://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article_7348_12fd57bc1bcd0f0060361b4a84a36448.pdf
- Anderson, J.P. (1982). Soil respiration. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties* (pp. 831-871). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41>
- Anderson, T.H., & Domsch, K.H. (1993). The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 25(3), 393-395. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)
- Anjum, S.A., Farooq, M., Xie, X.-y., Liu, X.-j., & Ijaz, M.F. (2012). Antioxidant defense system and proline accumulation enables hot pepper to perform better under drought. *Scientia Horticulturae*, 140, 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.03.028>
- Arunachalam, A., & Arunachalam, K. (2000). Influence of gap size and soil properties on microbial biomass in a subtropical humid forest of north-east India. *Plant and Soil*, 223(1-2), 187-195. <https://doi.org/10.1023/A:1004828221756>
- Banik, P., Zeng, W., Tai, H., Bizimungu, B., & Tanino, K. (2016). Effects of drought acclimation on drought stress resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, 126, 76-89. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.01.008>

11. Bates, L.S., Waldren, R., & Teare, I. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39, 205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
12. Boyerahmadi, M., Raiesi, F., & Mohammadi, J. (2010). Influence of different salinity levels on some microbial indices in the presence and absence of plant's living roots [Research]. *Journal of Water and Soil Science*, 14(51), 103-115. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-1211-fa.html>
13. Branson, F., Miller, R.F., & McQueen, I. (1967). Geographic distribution and factors affecting the distribution of salt desert shrubs in the United States. *Journal of Range Management*, 287-296. <https://doi.org/10.2307/3895974>
14. Dane, J.H., & Topp, C.G. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis, Part 4: Physical methods*. John Wiley & Sons.
15. Dey, R., Pal, K., Bhatt, D., & Chauhan, S. (2004). Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 159(4), 371-394. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2004.08.004>
16. Egea, I., Estrada, Y., Flores, F.B., & Bolarín, M.C. (2022). Improving production and fruit quality of tomato under abiotic stress: Genes for the future of tomato breeding for a sustainable agriculture. *Environmental and Experimental Botany*, 204, 105086. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105086>
17. Eziz, A., Yan, Z., Tian, D., Han, W., Tang, Z., & Fang, J. (2017). Drought effect on plant biomass allocation: A meta- analysis. *Ecology and Evolution*, 7(24), 11002-11010. <https://doi.org/10.1002/ece3.3630>
18. Farooq, M., Hussain, M., Wahid, A., & Siddique, K. (2012). Drought stress in plants: an overview. In *Plant responses to drought stress: From morphological to molecular features* (pp. 1-33). https://doi.org/10.1007/978-3-642-32653-0_1
19. Galleguillos, C., Aguirre, C., Barea, J.M., & Azcon, R. (2000). Growth promoting effect of two *Sinorhizobium meliloti* strains (a wild type and its genetically modified derivative) on a non-legume plant species in specific interaction with two arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Science*, 159(1), 57-63. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(00\)00321-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00321-6)
20. García-Fraile, P., Menéndez, E., & Rivas, R. (2015). Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *Aims Bioengineering*, 2(3), 183-205. <https://doi.org/10.3934/bioeng.2015.3.183>
21. Gollar, A.M., Raiese, F., & Nadian, H. (2008). Salinity and phosphorus interactions on growth, yield and nutrient uptake by berseem clover (*Trifolium alexandrinum* L.). *Journal of Agronomic Research of Iran*, 22(2), 217-223.
22. Gowtham, H., Singh, B., Murali, M., Shilpa, N., Prasad, M., Aiyaz, M., Amruthesh, K., & Niranjana, S. (2020). Induction of drought tolerance in tomato upon the application of ACC deaminase producing plant growth promoting rhizobacterium *Bacillus subtilis* Rhizo SF 48. *Microbiological Research*, 234, 126422. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126422>
23. Han, Q.Q., Lu, X.P., Bai, J.P., Qiao, Y., Pare, P.W., Wang, S.M., Zhang, J.L., Wu, Y.N., Pang, X.P., Xu, W.B., & Wang, Z.L. (2014). Beneficial soil bacterium *Bacillus subtilis* (GB03) augments salt tolerance of white clover. *Front Plant Science*, 5, 525. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00525>
24. Horwath, W.R., & Paul, E.A. (1994). Microbial biomass. In D. R. Buxton (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties* (pp. 753-773). SSSA Book Series. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c36>
25. Huang, X.F., Zhou, D., Guo, J., Manter, D., Reardon, K., & Vivanco, J. (2015). *Bacillus* spp. from rainforest soil promote plant growth under limited nitrogen conditions. *Journal of Applied Microbiology*, 118(3), 672-684. <https://doi.org/10.1111/jam.12720>
26. Jabbari, F., & Khaleghnezhad, V. (2014). Consideration of some biofertilizers effect on water relations and gas exchange of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under irrigated and rainfed conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 45(1), 53-64. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2014.51026>
27. Jafari, S., Chorom, M., Enayatizamir, N., & Motamedi, H. (2013). Evaluating the effects of *Bacillus subtilis* and *Corynebacterium glutamicum* on soil microbial indexes in different levels of salinity. *Journal of Agricultural Engineering*, 35(2), 55-70. http://agrieng.scu.ac.ir/article_10008_479a5e5bdd9d9962623c76e0805f1152.pdf
28. Kasim, W.A., Osman, M.E., Omar, M.N., Abd El-Daim, I.A., Bejai, S., & Meijer, J. (2013). Control of drought stress in wheat using plant-growth-promoting bacteria. *Journal of Plant Growth Regulation*, 32, 122-130. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9283-7>
29. Khan, N., & Bano, A. (2019). Exopolysaccharide producing rhizobacteria and their impact on growth and drought tolerance of wheat grown under rainfed conditions. *PLoS One*, 14(9), e0222302. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222302>
30. Khan, S.H., Arsalan Khan, A.K., Uzma Litaf, U.L., Shah, A.S., Khan, M.A., Muhammad Bilal, M.B., & Ali, M.U. (2015). Effect of drought stress on tomato cv. Bombino. *Journal of Food Processing and Technology*, 6(7). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000465>
31. Kou, X., Han, W., & Kang, J. (2022). Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: A meta-analysis of trials under controlled conditions. *Front Plant Science*, 13, 1085409. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085409>

32. Kussainova, M., & Kızılkaya, R. (2021). The effect of inoculation with amycolatopsis strains on yield and nutrient content of wheat (*Triticum Aestivum* L.) and soil microbiological properties. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-814356/v1>
33. Lum, M., Hanafi, M., Rafii, Y., & Akmar, A. (2014). Effect of drought stress on growth, proline and antioxidant enzyme activities of upland rice. *The Journal of Animal and Plant Sciences*, 24(5), 1487-1493.
34. Mafakheri, A., Siosemardeh, A., Bahramnejad, B., Struik, P., & Sohrabi, Y. (2010). Effect of drought stress on yield, proline and chlorophyll contents in three chickpea cultivars. *Australian Journal of Crop Science*, 4(8), 580-585.
35. Manafi, H., Aliasgharzad, N., Neyshabouri, M., & Rejali, F. (2012). Tolerance to water deficit stress in tomato inoculated with Arbuscular Mycorrhizal fungi. *Water and Soil Science*, 22(2), 1-17.
36. Martinez-Sergio, A., & Jenny, D. (2018). *Lysinibacillus sphaericus* plant growth promoter bacteria and lead phytoremediation enhancer with *Canavalia ensiformis*. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 37(1), 276-282. <https://doi.org/10.1002/ep.12668>
37. Meenakshi, Annapurna, K., Govindasamy, V., Ajit, V., & Choudhary, D. (2019). Mitigation of drought stress in wheat crop by drought tolerant endophytic bacterial isolates. *Vegetos*, 32(4), 486-493. <https://doi.org/10.1007/s42535-019-00060-1>
38. Mierzwa-Hersztek, M., Klimkowicz-Pawlas, A., & Gondek, K. (2018). Influence of poultry litter and poultry litter biochar on soil microbial respiration and nitrifying bacteria activity. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 379-389. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0013-z>
39. Mohammadi, M., Malakouti, M., Khavazi, K., Rejali, F., & Davoodi, M. (2015). The effect of bio-fertilizer and chemical fertilizers (phosphate and zinc) on yield and yield components of two cultivars of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Water and Soil*, 29(1), 176-187. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.28483>
40. Mohammadian, R., Khoyi, F.R., Rahimian, H., Moghadam, M., Ghassemi-Golezani, K., & Sadeghian, S.Y. (2001). The effects of early season drought on stomatal conductance, leaf-air temperature difference and proline accumulation in sugar beet genotypes. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 3(3), 181-192.
41. Monteith, J., Szeicz, G., & Waggoner, P. (1965). The measurement and control of stomatal resistance in the field. *Journal of Applied Ecology*, 2(2), 345-355. <https://doi.org/10.2307/2401484>
42. Nahidan, S., & Nourbakhsh, F. (2009). The effect of organic carbon management on some biological factors of soil. 15th Soil Science Congress,
43. Nair, A.S., Abraham, T., & Jaya, D. (2008). Studies on the changes in lipid peroxidation and antioxidants in drought stress induced cowpea (*Vigna unguiculata* L.) varieties. *Journal of Environmental Biology*, 29(5), 689-691.
44. Najafvand, S., Najafvand, S., Khaleghi, S.S., & Alemzadeh, N. (2007). The effect of biological fertilizer Nitroxin on tomato seedling growth factors. 5th Horticulture Congress Shiraz, Iran.
45. Narula, N., Kumar, V., Behl, R.K., Deubel, A., Gransee, A., & Merbach, W. (2000). Effect of P- solubilizing *Azotobacter chroococcum* on N, P, K uptake in P- responsive wheat genotypes grown under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(4), 393-398. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200008\)163:4%3C393::AID-JPLN393%3E3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4%3C393::AID-JPLN393%3E3.0.CO;2-W)
46. Naureen, Z., Ur Rehman, N., Hussain, H., Hussain, J., Gilani, S., K. Al Housni, S., Mabood, F., Khan, A., Farooq, S., Abbas, G., & Al-Harrasi, A. (2017). Exploring the potentials of *Lysinibacillus sphaericus* ZA9 for plant growth promotion and biocontrol activities against phytopathogenic fungi. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01477>
47. Naveed, M., Hussain, M.B., Zahir, Z.A., Mitter, B., & Sessitsch, A. (2014). Drought stress amelioration in wheat through inoculation with *Burkholderia phytofirmans* strain PsJN. *Plant Growth Regulation*, 73, 121-131. <https://doi.org/10.1007/s10725-013-9874-8>
48. Niu, X., Song, L., Xiao, Y., & Ge, W. (2018). Drought-tolerant plant growth-promoting rhizobacteria associated with foxtail millet in a semi-arid agroecosystem and their potential in alleviating drought stress. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2580. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02580>
49. Norjo, A., Zomorodi, S., & Amami, A. (2001). The effect of different irrigation level on tomato. First National Conference on Mitigation of Water Crises, Zabol, Iran.
50. Nouri, M., & Homaei, M. (2020). Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran. *Meteorological Applications*, 27(2), e1899. <https://doi.org/10.1002/met.1899>
51. Rezaie, R., & Raiesi, F. (2016). Effect of superabsorbent polymers on soil microbial respiration and biomass under drought stress condition. *Journal of Soil Biology*, 3(2), 151-162. <https://doi.org/10.22092/sbj.2016.105966>
52. Rostamikia, Y., Tabari Kouchaksaraei, M., Asgharzadeh, A., & Rahmani, A. (2016). The effect of plant growth-promoting Rhizobacteria on growth and physiological characteristics of *Corylus avellana* seedlings. *Ecopersia*, 4(3), 1471-1479. <https://doi.org/10.18869/modares.ecopersia.4.3.1471>
53. Rui, Y., Murphy, D.V., Wang, X., & Hoyle, F.C. (2016). Microbial respiration, but not biomass, responded linearly to increasing light fraction organic matter input: Consequences for carbon sequestration. *Scientific Reports*, 6(1), 35496. <https://doi.org/10.1038/srep35496>

54. Saharan, B., & Nehra, V. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: a critical review. *Life Science and Medical Research*, 21(1), 1-30.
55. Sánchez-Rodríguez, E.N., Nava-Salazar, S., Morán, C., Romero-Arauz, J.F., & Cerbón-Cervantes, M.A. (2010). Estado actual de la preeclampsia en México: de lo epidemiológico a sus mecanismos moleculares. *Revista de Investigación Clínica*, 62(3), 252-260.
56. Sarfraz, R., Hussain, A., Sabir, A., Ben Fekih, I., Ditta, A., & Xing, S. (2019). Role of biochar and plant growth promoting rhizobacteria to enhance soil carbon sequestration-A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(251), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7400-9>
57. Sarma, R.K., & Saikia, R. (2014). Alleviation of drought stress in mung bean by strain *Pseudomonas aeruginosa* GGRJ21. *Plant and Soil*, 377, 111-126. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1981-9>
58. Siddiqui, M.H., Al-Khaishany, M.Y., Al-Qutami, M.A., Al-Whaibi, M.H., Grover, A., Ali, H.M., Al-Wahibi, M.S., & Bukhari, N.A. (2015). Response of different genotypes of faba bean plant to drought stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(5), 10214-10227. <https://doi.org/10.3390/ijms160510214>
59. Singh, R.P., & Jha, P.N. (2017). The PGPR *Stenotrophomonas maltophilia* SBP-9 augments resistance against biotic and abiotic stress in wheat plants. *Frontiers in Microbiology*, 8, 275381. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01945>
60. Suman, A., Lal, M., Singh, A., & Gaur, A. (2006). Microbial biomass turnover in Indian subtropical soils under different sugarcane intercropping systems. *Agronomy Journal*, 98(3), 698-704. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0173>
61. Tourajzadeh, O., Piri, H., Naserin, A., & Mahdi Cahri, M. (2024). Effect of nano biochar addition and deficit irrigation on growth, physiology and water productivity of quinoa plants under salinity conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 217, 105564. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105564>
62. Trovato, M., Forlani, G., Signorelli, S., & Funck, D. (2019). Proline metabolism and its functions in development and stress tolerance. *Osmoprotectant-mediated abiotic stress tolerance in plants: recent advances and future perspectives*, 41-72. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27423-8_2
63. Vafadar, R., Ghavidel, A., Goli, E., & Soltani, A.A. (2017). The effect of *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas putida* on some soil biological properties and plant growth indices of wheat under salt stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 27(4), 65-79.
64. Vikram, A. (2007). Interaction Between *Pseudomonas fluorescens* FPD-15 and *Bradyrhizobium* spp. in Peanut. *Biotechnology*, 6(2), 292-298. <https://doi.org/10.3923/biotech.2007.292.298>
65. Wong, V.N., Dalal, R.C., & Greene, R.S. (2008). Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 44(7), 943-953. <https://doi.org/10.1007/s00374-008-0279-1>
66. Yadav, S., Modi, P., Dave, A., Vijapura, A., Patel, D., & Patel, M. (2020). Effect of abiotic stress on crops. In *Sustainable Crop Production* (pp. 352). <https://doi.org/10.5772/intechopen.88434>
67. Zahir, Z.A., Arshad, M., & Frankenberger, W.T. (2004). Plant growth promoting rhizobacteria: applications and perspectives in agriculture. *Advances in Agronomy*, 81, 98-169. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(03\)81003-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(03)81003-9)
68. Zeng, W.-Z., Xu, C., Wu, J.-W., Huang, J.-S., & Ma, T. (2013). Effect of salinity on soil respiration and nitrogen dynamics. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 20(3), 519-530. <https://doi.org/10.2478/eces-2013-0039>
69. Zhang, H., Kim, M.S., Sun, Y., Dowd, S.E., Shi, H., & Pare, P.W. (2008). Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1. *Mol Plant Microbe Interact*, 21(6), 737-744. <https://doi.org/10.1094/mpmi-21-6-0737>