Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Plant Production Research

Print ISSN: 2322-2050
Online ISSN: 2322-2778

(OPEN ACCESS)

Evaluation of the Effect of Plant Growth-Promoting Bacteria and Potassium Nitrate on the Growth Characteristics and Gas Exchange of Lime (*Citrus aurantifolia*) Under Drought Stress

Soraya Moallaye Mazraei[1], Esmaeil Khaleghi[*2], Naeimeh Enayati Zamir[3]

1. Ph.D. Student in Physiology of Production and Postharvest of Horticultural Plants, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: sorayamoalla@gmail.com
2. Corresponding Author, Professor, Dept. of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: khaleghi@scu.ac.ir
3. Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: n.enayatzamir@scu.ac.ir

Article Info

Article type:
Full Length Research Paper

Article history:
Received: 07.28.2024
Revised: 08.13.2024
Accepted: 10.05.2024

Keywords:
Drought stress,
Plant growth-promoting bacteria,
Potassium nitrate

ABSTRACT

Background and Objectives: Drought is one of the environmental stresses that significantly affects plant growth, impacting morphological and physiological characteristics. This stress can lead to a reduction in photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance, ultimately resulting in decreased crop yield. Plant growth-promoting bacteria (*PGPB*) are recognized as a factor in enhancing plant resistance to drought stress. The objective of this study was to evaluate the simultaneous effect of inoculation with various strains of *PGPB* and foliar application of potassium nitrate on the growth characteristics and gas exchange of lime (*Citrus aurantifolia*) to enhance drought resistance.

Materials and Methods: In this study, the effect of *PGPB* at five levels (*Enterobacter cloacae E1, Bacillus subtilis CS1, Enterobacter cloacae R33*, a consortium of the three mentioned strains, and a control with no bacterial inoculation) along with foliar application of potassium nitrate at two levels (0 and 20 grams per liter) under three different irrigation regimes (40%, 70%, and 100% evapotranspiration potential) was evaluated on the growth characteristics and gas exchange of one-year-old lime seedlings (*Mexican lime*). The dry weight of the aerial parts and leaf area were measured once at the end of the experiment, while other parameters were collected at three time points: 60, 120, and 180 days after the start of the experiment. This study was conducted as a factorial experiment in a completely randomized block design with three replications, totaling 90 experimental units.

Results: The results showed that drought significantly reduced the gas exchange and growth characteristics of lime seedlings. Inoculation with *PGPB* along with the foliar application of 20 grams per liter of potassium nitrate improved the dry weight of the aerial parts under the highest drought stress, with a 36.5% increase compared to the control. The highest leaf area, measuring 1111 square meters, was observed in plants inoculated with the *R33* strain and treated with 20 grams per liter of potassium nitrate.

Inoculation of lime seedlings with the bacterial consortium along with the foliar application of 20 grams per liter of potassium nitrate resulted in a 61.2% increase in seedling height and a 16.6% increase in leaf number under the highest drought stress level. At the end of the experiment, the photosynthesis rate decreased by 29.9% compared to the start. Foliar application of 20 grams per liter of potassium nitrate and inoculation with *PGPB* improved photosynthesis. Specifically, photosynthesis in plants inoculated with *Bacillus subtilis CS1* and the three-strain consortium, along with foliar application of 10 grams per liter of potassium nitrate, increased by 56.1% and 43.8%, respectively, compared to plants without potassium nitrate application and no bacterial inoculation under the same irrigation regime. Under the highest stress level, the 40% evapotranspiration potential irrigation regime, inoculation with the three-strain consortium along with foliar application of 20 grams per liter of potassium nitrate improved stomatal conductance by 333.3% compared to untreated plants. Additionally, transpiration in plants inoculated with *Bacillus subtilis CS1* increased by 138.7% compared to the control. Sub-stomatal carbon dioxide concentration also increased by 69.4% in plants inoculated with *Enterobacter cloacae R33* and treated with potassium nitrate compared to the control.

Conclusion: The findings indicated that drought had significant negative effects on the growth characteristics and gas exchange of lime seedlings. In this experiment, foliar application of 20 grams per liter of potassium nitrate along with inoculation with *Bacillus subtilis CS1, Enterobacter cloacae R33*, and the three-strain consortium is suggested as the best treatment combination, leading to improved growth indices and gas exchange. This combination could be used as an effective strategy in managing drought stress to mitigate the adverse effects of drought on lime plants.

Cite this article: Moallaye Mazraei, Soraya, Khaleghi, Esmaeil, Enayati Zamir, Naeimeh. 2025. Evaluation of the Effect of Plant Growth-Promoting Bacteria and Potassium Nitrate on the Growth Characteristics and Gas Exchange of Lime (*Citrus aurantifolia*) Under Drought Stress. *Journal of Plant Production Research*, 32 (3), 135-161.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jopp.2024.22647.3167
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی

شاپا چاپی: ۲۰۵۰-۲۳۲۲
شاپا آنلاین: ۲۷۷۸-۲۳۲۲

بررسی اثر باکتری‌های محرک رشد و نیترات پتاسیم بر خصوصیات رشدی و تبادلات گازی لیموترش (*Citrus aurantifolia*) تحت تنش خشکی

ثریا معلای مزرعی[۱]، اسمعیل خالقی[۲*]، نعیمه عنایتی ضمیر[۳]

۱. دانشجوی دکتری فیزیولوژی تولید و پس از برداشت گیاهان باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: sorayamoalla@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: khaleghi@scu.ac.ir

۳. استاد گروه علوم و مهندسی‌خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: n.enayatzamir@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۷
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

واژه‌های کلیدی:
باکتری محرک رشد،
تنش خشکی،
نیترات پتاسیم

چکیده

سابقه و هدف: خشکی یکی از تنش‌های محیطی مؤثر بر رشد گیاهان است که خصوصیات رشدی، ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. این تنش می‌تواند منجر به کاهش فتوسنتز، تعرق و هدایت روزنه‌ای در گیاهان شود که نهایتاً به کاهش عملکرد محصول منجر می‌گردد. باکتری‌های محرک رشد به‌عنوان یکی از عوامل مؤثر در افزایش مقاومت گیاهان به تنش خشکی شناخته شده‌اند. هدف این پژوهش بررسی اثر هم‌زمان تلقیح سویه‌های مختلف باکتری‌های محرک رشد و محلول‌پاشی نیترات پتاسیم برخصوصیات رشدی و تبادلات گازی گیاه لیموترش جهت افزایش مقاومت به تنش خشکی بود.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، اثر باکتری محرک رشد در پنج سطح *Enterobacter coleacea E1*، *Bacillus subtilis CS1*، *Enterobacter coleacea* R33، کنسرسیوم سه سویه یادشده و شاهد (عدم تلقیح باکتری) همراه با محلول‌پاشی برگی نیترات پتاسیم در دو سطح (۰ و ۲۰ گرم در لیتر) تحت سه رژیم آبیاری مختلف (۴۰، ۷۰، ۱۰۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) بر خصوصیات رشدی و تبادلات گازی نهال‌های یک‌ساله لیموترش (*Mexican lime*) موردبررسی قرار گرفت. وزن خشک اندام هوایی و سطح برگ یک‌بار در پایان آزمایش و بقیه پارامترها در سه مقطع زمانی ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز پس از آغاز آزمایش جمع‌آوری شدند. این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار و درمجموع ۹۰ واحد آزمایشی انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که خشکی موجب کاهش قابل‌توجهی در تبادلات گازی و خصوصیات رشدی نهال‌های لیموترش گردید. تلقیح کنسرسیوم سه باکتری همراه با محلول‌پاشی ۲۰ گرم در

لیتر نیترات پتاسیم توانست وزن خشک اندام هوایی را ۳۶/۵ درصد نسبت به شاهد افزایش دهد. بیش‌ترین سطح برگ به میزان ۱۱۱۱ مترمربع نیز در گیاهان تلقیح‌شده با باکتری *R33* و محلول‌پاشی شده با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم به‌دست آمد. تلقیح نهال لیموترش با کنسرسیوم سه باکتری همراه با محلول‌پاشی ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم به ترتیب منجر به افزایش ۶۱/۲ و ۱۶/۶ درصدی ارتفاع نهال و تعداد برگ در گیاهان آبیاری شده با ۴۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق گردید. در پایان آزمایش، میزان فتوسنتز به میزان ۲۹/۹ درصد نسبت به آغاز آزمایش کاهش یافت. محلول‌پاشی نیترات پتاسیم به میزان ۲۰ گرم در لیتر و تلقیح با باکتری‌های محرک رشد موجب بهبود فتوسنتز گردید. به‌طور مشخص، فتوسنتز در گیاهان تلقیح شده با *Bacillus subtilis CS1* و کنسرسیوم سه سویه همراه با محلول‌پاشی ۱۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم به ترتیب ۵۶/۱ و ۴۳/۸ درصد نسبت به گیاهان بدون محلول‌پاشی نیترات پتاسیم و عدم تلقیح باکتری در همان رژیم آبیاری افزایش یافت. در رژیم آبیاری ۴۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق، تلقیح کنسرسیوم سه سویه همراه با محلول‌پاشی ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم توانست هدایت روزنه‌ای را نسبت به گیاهان بدون اعمال تیمار بهبود بخشد (۳۳۳/۳ درصد). هم‌چنین، میزان تعرق در گیاهان تلقیح‌شده با *Bacillus subtilis CS1* به میزان ۱۳۸/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. غلظت دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای نیز در گیاهان تلقیح‌شده با *Enterobacter coleacea R33* و تیمارشده با نیترات پتاسیم، به میزان ۶۹/۴ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان داد که خشکی تأثیرات منفی معناداری بر خصوصیات رشدی و تبادلات گازی نهال لیموترش داشت. در این آزمایش، محلول‌پاشی با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم به‌همراه تلقیح *Bacillus subtilis CS1*، *Enterobacter coleacea R33* و کنسرسیوم سه سویه به‌عنوان بهترین ترکیب تیماری که منجر به بهبود شاخص‌های رشدی و تبادلات گازی گردید پیشنهاد می‌شود. این ترکیب می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در مدیریت تنش خشکی در جهت کاهش اثرات سو تنش خشکی بر گیاه لیموترش مورداستفاده قرار گیرد.

استناد: معلای مزرعی، ثریا، خالقی، اسمعیل، عنایتی ضمیر، نعیمه (۱۴۰۴). بررسی اثر باکتری‌های محرک رشد و نیترات پتاسیم بر خصوصیات رشدی و تبادلات گازی لیموترش (*Citrus aurantifolia*) تحت تنش خشکی. *نشریه پژوهش‌های تولید گیاهی*، ۳۲ (۳)، ۱۶۱-۱۳۵.

DOI: 10.22069/jopp.2024.22647.3167

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

لیموترش بانام علمی *Citrus aurantifolia* متعلق به جنس *citrus* و تیره *Rutaceae*، یکی از گونه‌های مهم مرکبات، باارزش اقتصادی و تغذیه‌ای بالایی در جهان است (۱). این گیاه، از مناطق گرمسیری منشأ گرفته و گستره کشت آن شامل نواحی گرمسیری و نیمه‌گرمسیری بین عرض‌های جغرافیای ٤٠ درجه شمالی و جنوبی از خط استوا است (۲). لیموترش در ایران در مناطق جنوبی کشت می‌شود (۳) و در دسته گیاهان نیمه حساس به خشکی قرار دارد (٤). با توجه به این‌که بسیاری از باغ‌های مرکبات در فصل بهار و تابستان از خشک‌سالی شدید رنج می‌برند (۵) و آب آبیاری کافی همیشه در دسترس نیست، توسعه این گیاه در درازمدت با کمبود منابع آبی مواجه خواهد شد. ازاین‌رو مطالعه تنش خشکی و مدیریت آن در این ژرم‌پلاسم ارزشمند ضروری است.

تنش خشکی به‌عنوان یکی از عوامل محدودکننده اصلی در کاهش بهره‌وری محصولات کشاورزی در جهان شناخته‌شده است (٦) و بسیاری از واکنش‌های مهم و اساسی گیاه، از سوخت‌وساز سلولی تا تغییرات در نرخ رشد و عملکرد محصول را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. تنش خشکی با کاهش هدایت روزنه‌ای، جذب دی‌اکسیدکربن را کاهش داده و درنتیجه منجر به کاهش تبادلات گازی در گیاه می‌شود. همچنین، با کاهش نرخ فتوسنتز و تعرق، رشد و بهره‌وری محدود می‌گردد (۷، ۹). در شرایط تنش خشکی، تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)[1] و نیتروژن (RNS)[2] باعث ایجاد اختلالات فیزیولوژیکی در گیاهان می‌شود (۱۰). این گونه‌های فعال واکنش‌پذیری بالایی با بسیاری از سلول‌ها داشته و منجر به آسیب در ساختار غشا، تخریب ماکرومولکول‌های ضروری مانند پروتئین‌ها، کلروفیل، لیپیدهای غشایی، نوکلئیک اسیدها می‌گردند و هم‌چنین غلظت بیومارکرهایی مانند مالون‌دی‌آلدهید را افزایش می‌دهند (۱۱، ۱۲). بسته به مدت‌زمان، تنش خشکی می‌تواند از حالت متوسط تا طولانی‌مدت متغیر باشد و تأثیرات آن از اختلال در عملکردهای طبیعی سلول تا تغییرات در ویژگی‌های ریخت‌شناسی و فیزیولوژیکی در صورت طولانی شدن، متفاوت خواهد بود (۱۳).

گیاهان جهت مقابله با خشکی معمولاً از سازوکار فرار از خشکی (DE)[3] استفاده می‌کنند که به معنای رشد سریع و کوتاه کردن دوره زندگی به‌منظور تکمیل چرخه حیات در مدت کوتاه‌تری از شرایط مطلوب است (١٤). بخشی از استراتژی‌های بقا افزایش تولید مواد محلول سازگار مانند پرولین می‌باشد که باعث تنظیم عملکرد طبیعی سلولی، مقابله با رادیکال‌های آزاد، تنظیم فشار اسمزی و بهبود هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش می‌شود (۱۵). بااین‌وجود، این استراتژی‌ها ممکن است به‌تنهایی برای کاهش اثرات خشکی بر گیاهان کافی نباشند. ازاین‌رو، نیاز به بررسیروش‌ها و روش‌های جایگزینی است که بتوانند تحمل گیاهان در برابر تنش‌های خشکی را افزایش داده و توانایی آن‌ها در بازیابی از این شرایط را بهبود بخشند. مطالعات انجام‌شده درزمینه مدیریت تنش خشکی با شیوه‌های کشاورزی پایدار و سازگار با محیط‌زیست نشان داده است که کاربرد میکروارگانیسم‌های مفید، می‌تواند به کاهش مصرف آفت‌کش‌ها و کودهای مصنوعی، بهبود سلامت گیاه و کیفیت خاک کمک کند و درعین‌حال، مقاومت گیاه را در شرایط تنش افزایش دهد (١٦). ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاه[4]، علاوه برافزایش قابلیت جذب عناصر غذایی، تولید فیتوهورمون‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، تثبیت نیتروژن و کنترل

1- Reactive Oxygen Species
2- Reactive Nitrogen Species
3- Drought Escape
4- *Plant-growth promoting rhizobacteria* (*PGPR*)

عوامل بیماری‌زا می‌توانند با افزایش وزن توده ریشه‌ها، افزایش شاخه‌زایی، تولید ریشه‌های نازک‌تر و افزایش تارهای کشنده، سامانه ریشه‌ای گیاه را توسعه دهند (۱۷، ۱۸). تولید فیتوهورمون‌ها توسط باکتری‌های محرک رشد به افزایش هورمون‌های درون‌زا در گیاهان کمک می‌کند که در این میان، گروه اکسین‌ها نقش مؤثری در توسعه سامانه ریشه‌ای از طریق کاهش سطوح اتیلن در مقابله با تنش خشکی ایفا می‌کنند (۱۹). به‌طور مشابه، تلقیح باکتری باسیلوس در شرایط تنش خشکی توانسته سطوح بالایی از اکسین و جیبرلین تولید کند (۲۰). باکتری‌های محرک رشد با تولید پلی‌ساکاریدهای برون سلولی (EPS)[1] مانند سلولز و آلژینات، باعث تنظیم اتصال باکتری به ریشه‌ها و سهولت حرکت آب و مواد مغذی در شرایط تنش خشکی می‌شوند (۲۱) که مطالعات متعددی مبنی برجذب آب بیش‌تر در ریشه‌های تلقیح شده با باکتری محرک رشد این پدیده را تأیید می‌نماید (۲۲، ۲۳). کاربرد باکتری محرک رشد به‌صورت اسپری برگی بر روی درخت سرو نیز باعث افزایش محتوای نسبی آب برگ و بهبود هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش خشکی شده است (۲٤). تلقیح ذرت با *Azospirillum brasilense* و *Herbaspirillum seropedicae* منجر به بهبود کارایی مصرف آب، پایداری غشا، افزایش اسمولیت‌ها و بهبود فعالیت‌های ACC دآمیناز[2] و آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شده است (۲۵). هم‌چنین تلقیح سویا با *Pseudomonas* sp. منجر به افزایش محتوای کلروفیل، ارتفاع ساقه و وزن‌تر در شرایط خشکی شده است (۲٦).

علاوه بر نقش میکروارگانیسم‌ها، تغذیه مناسب گیاه با عناصر معدنی نیز در افزایش مقاومت به تنش خشکی اهمیت دارد. برخی از عناصر معدنی مانند نیتروژن و فسفر به‌راحتی قابل‌جایگزینی هستند، اما تنها ۳۵ درصد پتاسیم خروجی از خاک برمی‌گردد. با توجه به نقش مؤثر پتاسیم در رشد و عملکرد تنفسی گیاه و کاهش تنش‌های حاصل از کم‌آبی، مصرف کودهای پتاسیمی اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. پتاسیم در هدایت روزنه‌ای، حفظ پتانسیل اسمزی و جذب آب، عملکرد فتوسنتز، تولید پروتئین، افزایش طولی سلول، مهار یون‌های منفی، خاصیت قطبی غشاء و فعالیت آنزیمی دارد (۲۷، ۲۸). گیاهان تحت تنش خشکی پتاسیم بیش‌تری را جهت تنظیم اسمزی جذب می‌کنند و کاربرد پتاسیم خارجی می‌تواند سازکارهای فیزیولوژیکی و زیست‌شیمیایی را در این شرایط بهبود بخشد (۲۹). فعال کردن حدود ٦۰ آنزیم گیاهی، کمک به سوخت‌وساز گیاه، تقویت ریشه و ساقه، بهبود کیفیت محصول، مهار عوامل بیماری‌زا و آفات و افزایش تحمل گیاه در برابر تنش‌هایی ازجمله کم‌آبی و شوری از کارکردهای مثبت عنصر پتاسیم به شمار می‌رود (۳۰). هم‌چنین، پتاسیم در کنترل باز و بسته شدن روزنه‌ها جهت تبادل دی‌اکسیدکربن، بخارآب و اکسیژن با محیط و انتقال آب و مواد مغذی در سراسر آوندهای چوبی ضروری است (۳۱). مطالعات نشان داده‌اند کاربرد نیترات پتاسیم[3] (KNO_3) به‌صورت اسپری برگی، تنظیم اسمزی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گیاهان مرکبات را تحت تنش آبی بهبود می‌بخشد (۳۲).

با توجه به نگرانی‌های روزافزون در مورد تنش خشکی و تلاش برای سازگاری با این چالش، هدف این پژوهش به‌عنوان یک رویکرد نوین، بررسی تأثیر کاربرد تیمار زیستی باکتری محرک رشد و تیمار کودی نیترات پتاسیم بر بهبود مقاومت گیاه لیموترش از طریق تنظیم تبادلات گازی، افزایش رشد، کاهش دور آبیاری، کاهش هزینه‌ها است.

1- Exopolysaccharides
2- ACC deaminase
3- Potassium Nitrate

مواد و روش‌ها

محل کشت و آزمایش گیاه: نهال‌های یک‌ساله لیموترش از نهالستان تجاری مورد تأیید سازمان جهاد کشاورزی در شهرستان دزفول استان خوزستان تهیه و در گلدان‌های ۸ کیلوگرمی با بستر کشت مخلوط خاکی (یک‌سوم خاک زراعی، یک‌سوم ماسه و یک‌سوم کود حیوانی پوسیده) کشت شدند. گیاهان به‌مدت ۳ ماه جهت تثبیت و سازگاری با شرایط گلخانه نگهداری شدند و آبیاری نهال‌ها در مدت سازگاری با محیط به‌طور کامل صورت گرفت. این پژوهش به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و به روش اندازه‌گیری تکراری (هر تکرار یک گلدان) درسال ۱۴۰۱ تا ۱۴۰۲ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. میانگین دمای روز و شب به‌ترتیب ۲۵ و ۱۹ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۰ تا ۴۵ درصد و شدت نور ۴۵۰ وات بر مترمربع بود. pH آب آبیاری بین ۶/۲ تا ۶/۸ و هدایت الکتریکی در محدوده ۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر تنظیم شد. تجزیه فیزیکوشیمیایی خاک در جدول ۱ ارائه گردید.

جدول ۱- تجزیه فیزیکوشیمیایی خاک شامل غلظت عناصر معدنی، کربن آلی، pH و هدایت الکتریکی (EC).

Table 1. The physicochemical analysis of the soil includes the concentration of mineral elements, organic carbon content, pH, and electrical conductivity (EC).

پتاسیم (پی‌پی‌ام) Potassium (ppm)	فسفر (پی‌پی‌ام) Phosphorus (ppm)	منیزیم (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Magnesium (Meq/lit)	بیکربنات (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Bicarbonate (Meq/lit)	کلسیم (میلی‌اکی‌والان در لیتر) Calcium (Meq/lit)	کربن آلی (درصد) Organic Carbon (٪)	آهن (پی‌پی‌ام) Iron (ppm)	pH	هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر سانتی‌متر) EC (dS/m)
215.6	53.4	18.05	5.06	10.85	3.05	5	7.20	2.47

تیمارهای آزمایش: تیمارهای آزمایش شامل سویه‌های باکتری محرک رشد در ۵ سطح اینتروباکترکلوآسه سویه *E1*[1]، باسیلوس سوبتیلیس سویه *CS1*[2]، اینتروباکترکلوآسه سویه *R33*[3] و کنسرسیوم سه سویه یادشده و شاهد (عدم تلقیح باکتری)، محلول‌پاشی برگی نیترات پتاسیم در ۲ سطح (۰ و ۲۰ گرم در لیتر)، رژیم آبیاری در ۳ سطح (۴۰، ۷۰، ۱۰۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) می‌باشد که وزن خشک اندام هوایی و سطح برگ یک‌بار در پایان آزمایش و بقیه پارامترها در ۳ زمان ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز پس از شروع آزمایش موردبررسی قرار می‌گیرد.

اعمال تیمار تنش خشکی: پس از سازگاری نهال‌ها به‌منظور آبیاری و ایجاد شرایط تنش، شش گلدان به‌عنوان مرجع درنظر گرفته شد و ۲۴ ساعت پس از هر آبیاری این گلدان‌ها وزن شدند و پس از ۵ روز با خشک شدن سطح خاک مجدداً وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد. میانگین اختلاف وزن اول و دوم به‌عنوان میزان آب آبیاری ۱۰۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق در نظر گرفته‌شده و بر همین اساس میزان آب موردنیاز برای تیمارهای ۷۰ درصد و ۴۰ درصد درمجموع ۳ سطح محاسبه و اعمال گردید (رابطه ۱) (۳۳، ۳۴).

$$A - B = I \qquad (۱)$$

1- *Enterobacter coleacea E1*
2- *Bacillus subtilis CS1*
3- *Enterobacter coleacea R33*

که در آن، A میانگین وزن گلدان‌های مرجع بعد از ۲۴ ساعت از آبیاری در حالت FC، B میانگین وزن گلدان‌های مرجع بعد از خشک شدن سطح خاک، I ۱۰۰ درصد میزان آب آبیاری برحسب پتانسیل تبخیر و تعرق گیاه.

شایان ذکر است که هر پنج روز یک‌بار نسبت به آبیاری گلدان‌ها اقدام می‌شد و به‌طور میانگین مقدار حجم آب مصرفی ۴۰۰ میلی‌لیتر برای تیمار آبیاری ۱۰۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق بود.

آماده‌سازی و تلقیح باکتری و محلول‌پاشی نیترات پتاسیم: باکتری‌های اینتروباکترکلوآسه سویه *E1*، باسیلوس سوبتیلیس سویه *CS1*، اینتروباکترکلوآسه سویه *R33* و کنسرسیوم سه سویه یادشده از گروه بیولوژی خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز تهیه شد. برای تهیه کشت شبانه باکتری به میزان لازم از محیط کشت مایع مغذی در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل‌شده و در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۰ دقیقه اتوکلاو خواهد شد. پس از سرد شدن محیط کشت، چند کلونی از این باکتری‌ها در محیط کشت نوترینت براث[1] در دمای ۲۸ ۲۸ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۱۸ ساعت با قدرت ۱۳۰ دور در دقیقه کشت داده شدند، همچنین جهت اعمال تیمارهای باکتریایی، از سوسپانسیون حاصل از کشت شبانه هر یک از باکتری‌ها به میزانی که جمعیت باکتری برابر $1/5\times10^{6}$ کلونی در هر گرم خاک[2] باشد به ریشه گیاه تلقیح شد (۳۵، ۳۷). محلول‌پاشی برگی نیترات پتاسیم دو هفته بعد از اعمال تیمار خشکی بود (۳۸).

خصوصیات رشدی: در انتهای آزمایش، نهال‌ها از گلدان خارج شدند و بلافاصله پس از شستشوی ریشه‌ها، بخش هوایی به مدت ۷۲ ساعت در آون (مدل ممرت ساخت آلمان) با دمای ۷۵ درجه قرارداده شدند و سپس نمونه‌های خشک‌شده با ترازوی چهار رقم اعشار وزن شدند. سطح برگ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ[3] مدل *Delta-T Devices* LTD ساخت کشور انگلستان اندازه‌گیری شد.

ارتفاع نهال با استفاده از متر نواری از قسمت طوقه تا انتهای ساقه اندازه‌گیری شد و اندازه‌گیری تعداد برگ از طریق شمارش صورت گرفت.

تبادلات گازی: اندازه‌گیری تبادلات گازی برگ (هدایت روزنه‌ای، تعرق، فتوسنتز، دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای) نهال‌های لیموترش در بازه زمانی ۱۱-۹ صبح با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری فتوسنتز مدل LCI-SD انجام شد. قسمت میانی برگ انتخاب‌شده از گره‌های ۳ تا ۶ از بالای گیاه در حالت اتصال در محفظه شیشه‌ای دستگاه قرارداده شد و پس از ۲۰ ثانیه میزان تبادلات گازی ثبت گردید (۳۹).

کارایی مصرف آب: در این مطالعه، کارایی مصرف آب[4] (WUE) با استفاده از نسبت فتوسنتز به تعرق محاسبه شد. رابطه مورداستفاده به شرح زیر است (رابطه ۲) (۴۰):

$$\text{کارایی مصرف آب} = \frac{\text{نرخ فتوسنتز}}{\text{نرخ تعرق}} \qquad (۲)$$

جمع‌آوری داده‌ها: داده‌های مربوط به تبادلات گازی و کارایی مصرف آب در سه مرحله ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز پس از شروع جمع‌آوری شد.

تجزیه داده‌ها: جهت تجزیه پارامترهایی که در ۳ دوره به فاصله ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز پس از شروع آزمایش اندازه‌گیری شدند از طرح آزمایش اندازه‌گیری تکراری[5] استفاده شد. تجزیه‌وتحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار سس[6] نسخه ۹/۴ و مقایسه میانگین داده‌ها با

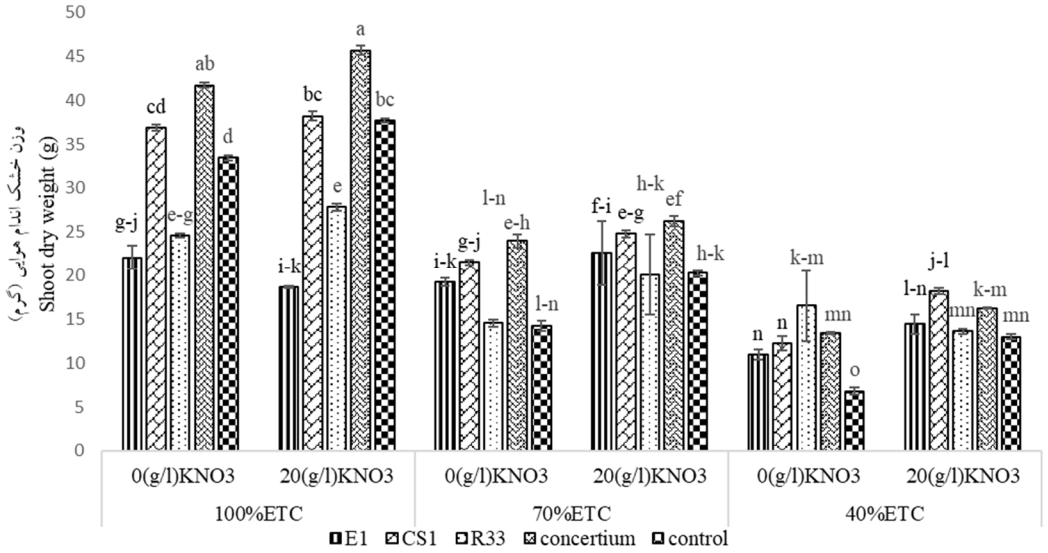
1- Nutrient Broth
2- CFU/g soil
3- Leaf area meter
4- Water Use Efficiency
5- Repeated Measure
6- SAS

روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

وزن خشک اندام هوایی: نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری در باکتری در نیترات پتاسیم (شکل ۱) نشان داد که تلقیح باکتری و استفاده از نیترات پتاسیم میزان وزن خشک اندام هوایی را تحت‌تأثیر قرارداد به‌طوری‌که بیش‌ترین میزان وزن خشک اندام هوایی در گیاهان تلقیح‌شده با کنسرسیوم سه باکتری و محلول‌پاشی شده با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم و با آبیاری ۱۰۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق به دست آمد که افزایش ۳٦/۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد در سطح آبیاری مشابه داشت. کم‌آبیاری موجب کاهش وزن خشک اندام هوایی گردید به‌طوری‌که کم‌ترین میزان وزن خشک اندام هوایی در آبیاری با ٤۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق و در گیاهان بدون اعمال باکتری و نیترات پتاسیم به‌دست آمد که این نتیجه با اثر مثبت تلقیح باکتری محرک رشد سودوموناس بر طول شاخساره و وزن‌خشک گیاه گندم تحت تنش خشکی مطابقت دارد (٤۱). دلیل احتمالی افزایش زیست‌توده آن‌ها در تیمارهای تلقیح‌شده، انتشار انواع تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است، این فیتوهورمون‌ها در منطقه ریزوسفر، منجر به اصلاح ساختار ریشه می‌شوند که ممکن است منجر به افزایش در سطح کل ریشه و درنتیجه بهبود جذب آب و مواد مغذی به‌ویژه نیتروژن و فسفر، و درنهایت باعث بهبود رشد کلی گیاه گردد (٤۲). در گزارش‌های متعددی کاربرد نیترات پتاسیم ریخت‌شناسی گیاه را تحت شرایط تنش با فراهم کردن منابع پتاسیم و نیتروژن که برای رشد و نمو ضروری هستند، بهبود بخشید (٤۳، ٤٤).

سطح برگ: براساس نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۲ کم‌آبیاری میزان سطح برگ را تحت‌تأثیر قرارداد و تلقیح باکتری‌های محرک رشد و استفاده از نیترات پتاسیم موجب افزایش میزان سطح برگ تحت تنش خشکی گردید. بیش‌ترین میزان سطح برگ در گیاهان تلقیح شده با باکتری *R33* و محلول‌پاشی شده با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم در ۱۰۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق به‌دست آمد که موجب افزایش ٤۹/۹ درصدی سطح برگ نسبت به شاهد در رژیم آبیاری مشابه گردید. کم‌آبیاری میزان سطح برگ را کاهش داد. کم‌ترین میزان سطح برگ در بالاترین سطح تنش خشکی (٤۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) و بدون اعمال تیمار باکتری و نیترات پتاسیم به‌دست آمد که به ترتیب موجب کاهش ٦٤/۸، ۷۰/۹، ٤۷/۸ و ٦٦/۳ درصدی سطح برگ نسبت به گیاهان محلول‌پاشی شده با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم همراه با تلقیح باکتری *E1*، *CS1*، *R33* و کنسرسیوم سه باکتری در رژیم آبیاری مشابه گردید. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیبات پلی‌ساکاریدی تولیدشده توسط باکتری‌های محرک رشد می‌توانند به بهبود ویژگی‌های خاک، افزایش مقاومت گیاه به تنش و همچنین به افزایش سطح برگ در شرایط تنش خشکی کمک کند (٤۵) و از طرف دیگر می‌توان به نقش پتاسیم در فعال کردن آنزیم‌های احیاکننده گازکربنیک و افزایش سوخت‌وساز و خصوصیات رشدی اشاره کرد.

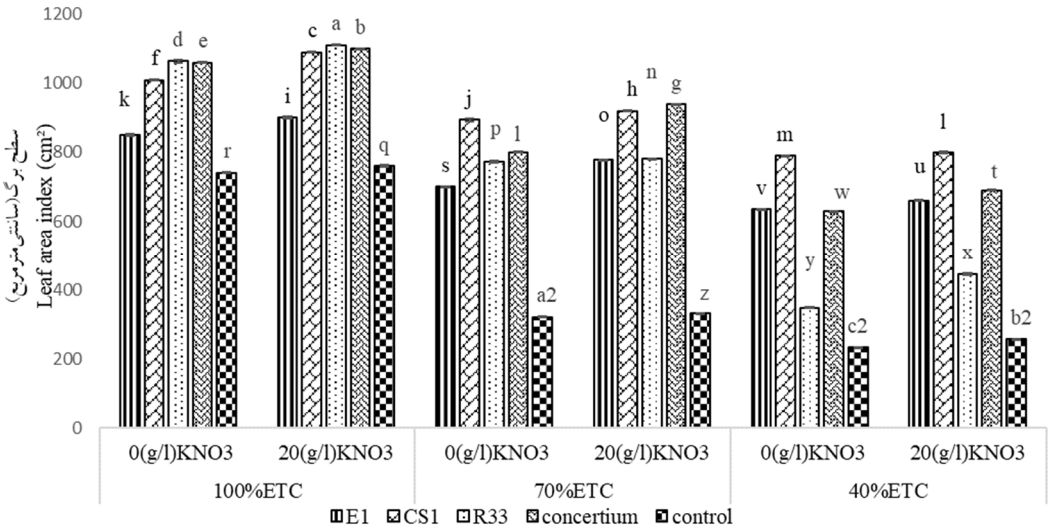


شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل باکتری × نیترات پتاسیم × آبیاری بر میزان وزن خشک اندام هوایی.

Fig. 1. Comparison of the mean interaction effect of bacteria × potassium nitrate × irrigation on shoot dry weight.

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، دارای تفاوت آماری نسبت به یکدیگر براساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد نیستند

Means within each column followed by the same letter(s) are not significantly different at P≤0.05 according to Duncan's test



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل باکتری × نیترات پتاسیم × آبیاری بر میزان شاخص سطح برگ.

Fig. 2. Comparison of the mean interaction effect of bacteria × potassium nitrate × irrigation on leaf area index.

در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، دارای تفاوت آماری نسبت به یکدیگر براساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد نیستند

Means within each column followed by the same letter(s) are not significantly different at P≤0.05 according to Duncan's test

ارتفاع نهال: براساس نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۲، باگذشت زمان، ارتفاع نهال افزایش یافت. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی نیترات پتاسیم و تلقیح باکتری‌های محرک رشد باعث افزایش ارتفاع نسبت به عدم محلول‌پاشی و عدم تلقیح باکتری شد و بیش‌ترین ارتفاع نهال ۱۸۰ روز پس از شروع آزمایش در گیاهان محلول‌پاشی شده با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم و تلقیح‌شده با کنسرسیوم سه باکتری در رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق مشاهده شد (۱۰۹/٦٦ سانتی‌متر) که تفاوت معناداری را با سایر تیمارها نشان داد. هم‌چنین، کم‌ترین میزان ارتفاع نهال (٤٧ سانتی‌متر) ٦٠ روز پس از شروع آزمایش، در گیاهان با رژیم آبیاری ٤٠ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق و عدم تلقیح باکتری و عدم محلول‌پاشی با نیترات پتاسیم مشاهده گردید. در شرایط آبیاری ۷۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق، گیاه رشد خود را در شرایط نرمال حفظ می‌کند، اما با کاهش رژیم آبیاری، کاهش رشد اندام هوایی مشاهده شد که استنباط می‌شود تلقیح باکتری و ACC دآمیناز تولیدشده توسط آن توانست با انجام سازوکارهای افزایش رشد طولی سلول و بافت گیاهی و خنثی کردن اثر اتیلن از سرعت رشد ساقه حمایت کند. هم‌چنین بررسی‌ها نشان دادند که در طول رشد رویشی، تنش خشکی می‌تواند حدود ٤١ درصد از رشد اندام هوایی را در غیاب باکتری‌های محرک رشد کاهش دهد درحالی‌که پس از تلقیح باکتری محرک رشد تنش خشکی رشد ساقه گیاه را تنها ۱۸ درصد کاهش داد (٤٦). از طرف دیگر افزایش ارتفاع ساقه گیاه لیموترش تحت تیمار نیترات پتاسیم با یافته‌های مطالعات دیگر مبنی برافزایش ارتفاع گیاه بادمجان تحت تیمار پتاسیم مطابقت دارد (٤٧).

تعداد برگ: با توجه به جدول ۲، مشخص شد که با کاهش مقدار آبیاری از ۱۰۰ به ۷۰ و ٤٠ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق، تعداد برگ‌های گیاه کاهش یافت. به‌گونه‌ای که کم‌ترین تعداد برگ (۱۰۱/۳۳) ٦٠ روز پس از شروع آزمایش مربوط به گیاهان آبیاری شده با ۷۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق گیاه و محلول‌پاشی نشده با نیترات پتاسیم و عدم حضور تیمار باکتری در ریشه گیاه و بیش‌ترین تعداد برگ ۱۸۰ روز پس از شروع آزمایش در گیاهان با رژیم آبیاری ۱۰۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق و محلول‌پاشی شده با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم و تلقیح‌شده توسط کنسرسیوم سه باکتری بود. هم‌چنین تعداد برگ در ٦٠ روز پس از شروع آزمایش گیاهان محلول‌پاشی شده با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم و تلقیح با باکتری‌های *E1*، *CS1*، *R33* و کنسرسیوم سه باکتری و آبیاری شده با ۷۰ درصد در مقایسه با گیاهان محلول‌پاشی نشده و عدم تلقیح باکتری در همین رژیم آبیاری به ترتیب ۲٦/۷، ۳٦/۳، ۳٤/۸، ٤۳/۷ درصد، در ۱۲۰ روز پس از آزمایش به ترتیب ۰/۷، ٤/۸، ٤/۲ و ٦ درصد و در ۱۸۰ روز پس از آزمایش به ترتیب ٥/٤٨، ۷/۹۰، ۱۳ و ۱۱/۹ درصد افزایش نشان داد و این افزایش نیز برای گیاهان آبیاری شده با ٤٠ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق گیاه و محلول‌پاشی با ۲ درصد نیترات پتاسیم و تلقیح با باکتری‌های *E1*، *CS1*، *R33* و کنسرسیوم سه باکتری در هر ۳ زمان بررسی‌شده مشاهده شد. به‌طور مشابه تلقیح با *Bacillus thuringiensis* توانست تعداد و سطح برگ را در شرایط تنش خشکی در گیاه نخود افزایش دهد (٤٨).

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل زمان × باکتری × نیترات پتاسیم × آبیاری بر میزان ارتفاع نهال و تعداد برگ.

Table 2. Comparison of the Mean Interaction Effects of Time × Bacteria × Potassium Nitrate × Irrigation on seedling height and leaf number.

تعداد برگ Number of leaves			ارتفاع نهال (سانتی‌متر) Seedling height (cm)					
زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			نیترات پتاسیم (گرم در لیتر) KNO_3 ($g.l^{-1}$)	باکتری Bacteria	آبیاری (درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) Irrigation(%ETC)
180	120	60	180	120	60			
223 ± 1.15 g_1	181 ± 0.57 $s_1t_1u_1$	147 ± 0.57 j_2	84.33 ± 0.88 l_1m_1	83 ± 0.57 $m_1n_1o_1$	71.33 ± 1.45 $a_2b_2y_1z_1$	20	E1	100% ETC
222 ± 0.57 g_1	177.66 ±0.88 v_1	139 ± 0.57 m_2	80.66 ± 1.20 p_1q_1	77 ± 0.57 $s_1t_1u_1$	69.66 ± 0.88 $a_2b_2c_2$	0		
243.33 ± 0.88 b_1	185 ± 0.57 r_1	160 ± 0.57 e_2	104.33 ± 1.20 b_1	86.66 ± 1.20 $i_1j_1k_1$	78 ± 0.57 $r_1s_1t_1$	20	CS1	
232 ± 0.57 d_1e_1	183 ± 0.57 r_1s_1	148 ± 0.57 j_2	90 ± 0.57 $f_1g_1h_1$	85 ± 1.15 $k_1l_1m_1$	77.66 ± 0.88 s_1t_1	0		
240.66 ± 0.88 c_1	190 ± 0.57 p_1q_1	154 ± 0.57 f_2	100 ± 0.57 c_1	90 ± 0.57 $f_1g_1h_1$	80 ± 0.57 $p_1q_1r_1$	20	R33	
243 ± 0.57 b_1	188 ± 0.57 q_1	134 ± 0.57 n_2o_2	105.66 ± 0.33 b_1	86 ± 0.57 $j_1k_1l_1$	75 ± 0.57 $u_1v_1w_1$	0		
249.66 ± 0.88 a_1	192 ± 0.57 p_1	162 ± 0.57 d_2e_2	109.66 ± 0.88 a_1	95 ± 0.57 d_1	89.33 ± 1.20 g_1h_1	20	CONSERTIUM	
244.66 ± 0.88 b_1	188 ± 0.57 q_1	151 ± 0.57 $g_2h_2i_2$	104 ± 0.57 b_1	88 ± 057 $h_1i_1j_1$	82 ± 0.57 $n_1o_1p_1$	0		
214 ± 0.57 i_1	171.66 ± 0.88 x_1	128 ± 0.57 q_2	74 ± 0.57 $v_1w_1x_1$	71 ± 1.15 $a_2b_2y_1z_1$	67.33 ± 0.88 $d_1e_1f_1$	20	CONTROL	
210.66 ± 0.88 j_1	169 ± 0.57 y_1z_1	115 ± 0.57 s_2	70 ± 0.57 $a_2b_2c_2z_1$	69.33 ± 0.88 $b_2c_2d_2$	66 ± 1.52 $f_2g_2h_2$	0		
218 ± 0.57 h_1	173 ± 0.57 w_1x_1	142 ± 0.57 k_2l_2	76 ± 0.57 $t_1u_1v_1$	71.66 ± 0.88 $a_2y_1z_1$	68 ± 0.57 $c_2d_2e_2f_2$	20	E1	70% ETC
212 ± 0.57 i_1j_1	169.33 ± 0.88 y_1	136 ± 0.57 n_2	72 ± 0.57 $x_1y_1z_1$	70 ± 0.57 $a_2b_2c_2z_1$	66.66 ± 0.88 $e_2f_2g_2$	0		
223 ± 1.52 g_1	180 ± 0.57 t_1u_1	152.66 ± 0.88 $f_2g_2h_2$	85 ± 0.57 $k_1l_1m_1$	80.33± 0.88 p_1q_1	75 ± 0.57 $u_1v_1w_1$	20	CS1	
222 ± 0.57 g_1	175 ± 0.57 w_1	143.33 ± 0.88 k_2	82 ± 0.57 $n_1o_1p_1$	77 ± 0.57 $s_1t_1u_1$	74.33 ± 0.66 v_1w_1	0		
233.66 ± 0.88 d_1	179 ± 0.57 u_1v_1	151 ± 1.73 $g_2h_2i_2$	93.66 ± 0.88 d_1e_1	81.66 ± 0.88 o_1p_1	78.66 ± 0.88 $q_1r_1s_1$	20	R33	
231 ± 0.57 e_1	173 ± 0.57 w_1x_1	141 ± 0.57 l_2m_2	90.66 ± 0.88 f_1g_1	75.33 ± 0.88 u_1v_1	73 ± 0.57 $w_1x_1y_1$	0		
231.33 ± 0.88 e_1	182 ± 0.57 s_1t_1	161 ± 0.57 e_2	94.33 ± 0.88 d_1	84 ± 0.57 $l_1m_1n_1$	80 ± 0.57 $p_1q_1r_1$	20	CONSERTIUM	
231.33 ± 1.20 e_1	180 ± 0.57 t_1u_1	149 ± 0.57 j_2	92 ± 0.57 e_1f_1	79 ± 0.57 $q_1r_1s_1$	78.66 ± 0.88 $q_1r_1s_1$	0		
206.66 ± 0.88 l_1m_1	161.66 ± 0.88 e_2	112 ± 0.57 t_2	66.66 ± 0.88 $e_2f_2g_2$	63 ± 0.57 i_2j_2	60 ± 0.57 k_2l_2	20	CONTROL	
205 ± 0.57 m_1	161 ± 0.57 e_2	101.33 ± 0.88 v_2	63.66 ± 0.88 i_2	61 ± 0.57 j_2k_2	58 ± 0.57 l_2	0		

ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

تعداد برگ Number of leaves			ارتفاع نهال (سانتی‌متر) Seedling height (cm)					
زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			نیترات پتاسیم (گرم در لیتر) KNO_3 ($g.l^{-1}$)	باکتری Bacteria	آبیاری (درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) Irrigation(%ETC)
180	120	60	180	120	60			
208 ± 0.57 k_1l_1	164 ± 0.57 c_2d_2	121 ± 0.57 r_2	68 ± 0.57 $c_2d_2e_2f_2$	64.33 ± 0.88 h_2i_2	55.66 ± 0.88 m_2	20	E1	ETC 40%
205.66 ± 1.20 m_1	160.66 ± 0.88 e_2	114 ± 0.57 s_2t_2	66 ± 0.57 $f_2g_2h_2$	63 ± 0.57 i_2j_2	54.66 ± 0.88 m_2n_2	0		
217 ± 0.57 h_1	167.66 ± 0.88 $a_2y_1z_1$	132 ± 0.57 o_2p_2	77.66 ± 0.88 s_1t_1	67.33 ± 0.88 $d_2e_2f_2$	63.33 ± 1.85 i_2	20	CS1	
210 ± 0.57 j_1k_1	165 ± 0.57 b_2c_2	131 ± 0.57 p_2	70 ± 0.57 $a_2b_2c_2z_1$	65 ± 0.57 $g_2h_2i_2$	60 ± 0.57 k_2l_2	0		
222.66 ± 0.88 g_1	166.66 ± 0.88 a_2b_2	128 ± 0.57 q_2	83.33 ± 0.88 $m_1n_1o_1$	68.33 ± 0.33 $c_2d_2e_2$	67 ± 1.52 $e_2f_2g_2$	20	R33	
219 ± 0.57 h_1	167 ± 0.57 $a_2b_2z_1$	126 ± 0.57 q_2	79 ± 0.57 $q_1r_1s_1$	66.66 ± 0.88 e_2f_2g	65 ± 0.57 $g_2h_2i_2$	0		
228.66 ± 0.88 f_1	174 ± 0.57 w_1	140 ± 0.57 l_2m_2	88.66 ± 0.88 $g_1h_1i_1$	76 ± 0.57 $t_1u_1v_1$	68.33 ± 0.88 $c_2d_2e_2$	20	CONSERTIUM	
222 ± 0.57 g_1	173.33 ± 0.88 w_1x_1	132 ± 0.57 o_2p_2	82 ± 0.57 $n_1o_1p_1$	74.33 ± 0.88 v_1w_1	66 ± 1.15 $f_2g_2h_2$	0		
201.33 ± 0.88 n_1	153 ± 1.52 g_2f_2	103.66 ± 0.88 u_2	60 ± 1.15 k_2l_2	55.33 ± 0.33 m_2	49 ± 0.57 o_2	20	CONTROL	
196 ± 1.15 o_1	150.66 ± 0.88 h_2i_2	103 ± 1.52 u_2v_2	55 ± 0.57 m_2n_2	53 ± 0.57 n_2	47 ± 0.57 o_2	0		

حروف از a_1 تا z_1 به ترتیب قرار گرفته‌اند، بعد از پایان حروف a_1 تا z_1، حروف از a_2 آغاز می‌شود و تا z_2 ادامه پیدا می‌کند

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، دارای تفاوت آماری نسبت به یکدیگر براساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد نیستند

The letters are arranged in order from a_1 to z_1. After the letters a_1 to z_1 have been completed, the letters start from a_2 and continue up to z_2

Means that share common letters do not have statistical differences from each other based on Duncan's test at the $P \leq 0.05$ level

تبادلات گازی

فتوسنتز: بررسی روند تغییرات فتوسنتز در جدول ۳ نشان داد که باگذشت زمان (۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز) پس از اعمال تیمار و کاهش آب آبیاری از ۱۰۰ به ۷۰ و ۴۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق گیاه، میزان فتوسنتز کاهش یافت. بیش‌ترین مقادیر فتوسنتز (۶/۳۱ و ۶/۶۶ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) در ۶۰ روز پس از اعمال تیمار در ۱۰۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق و سطح صفر و ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم در باکتری *CS1* مشاهده گردید که بین آن‌ها اختلاف معنی‌داری وجود نداشت اما نسبت به سایر تیمارها در همین زمان عدد بیش‌تری را نشان دادند. کم‌ترین میزان فتوسنتز (۱/۷ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) در ۱۸۰ روز پس از اعمال تیمار در گیاهان با رژیم آبیاری ۴۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق و بدون استفاده از نیترات پتاسیم و باکتری به‌دست آمد. این

نتایج نشان داد که محلول‌پاشی نیترات پتاسیم و تلقیح باکتری می‌تواند از کاهش شدید میزان فتوسنتز در رژیم‌های آبیاری ۷۰ و ٤۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق در پایان آزمایش جلوگیری کند.

تنش خشکی فرآیندهای سوخت‌وسازی طبیعی در گیاهان را مختل و منجر به کاهش رشد می‌شود (٤۹). کاهش رشد در اندام‌های هوایی به محدود کردن میزان تعرق و جلوگیری از اتلاف آب کمک می‌کند، اما درعین‌حال بهره‌وری و رشد کلی گیاه را کاهش می‌دهد (۵۰، ۵۱). بسته شدن روزنه‌ها یکی از اولین واکنش‌های گیاهان به کم‌آبی است که اگرچه به حفظ آب کمک می‌کند، اما جذب دی‌اکسیدکربن و به‌تبع آن فتوسنتز و تعرق را کاهش می‌دهد (۵۲). این یافته‌ها با پژوهش حاضر و نتایج دیگری که نشان می‌دهند تنش خشکی باعث کاهش هدایت روزنه‌ای، کاهش تعرق و درنهایت کاهش فعالیت فتوسنتزی می‌شود همخوانی داشت (۵۳، ۵٤). کاهش نرخ فتوسنتز در تنش خشکی به عوامل روزنه‌ای (عدم جذب دی‌اکسیدکربن) و غیرروزنه‌ای (اختلاف در فعالیت کلروپلاست و فتوسیستم‌ها) نسبت داده می‌شود (۵۵، ۵٦). این کاهش باعث عدم استفاده گیاه از انرژی نور جذب‌شده و تولید بیش‌ازحد گونه‌های اکسیژن فعال می‌شود که مانع تولید پروتئین‌های موجود در فتوسیستم‌های نوری و اختلال در زنجیره انتقال الکترون را موجب می‌شوند (۵۷).

در این پژوهش، تلقیح باکتری‌های محرک رشد هم‌زمان با محلول‌پاشی ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم توانست کارایی فتوسنتزی لیموترش را افزایش دهد. به‌نظر می‌رسد که این باکتری‌ها با تولید هورمون‌های گیاهی مانند سیتوکنین به بهبود نرخ فتوسنتز کمک کردند. گزارش‌شده است سیتوکنین تولیدشده توسط باکتری اسینتوباکتر در گیاه آقطی تحت شرایط تنش خشکی ۱۱/٦ درصد هدایت روزنه‌ای و ۱۳ درصد نرخ فتوسنتز را بهبود بخشیده و باعث معکوس شدن فرایند تخریب کلروفیل می‌شود (۵٦). این فیتوهورمون‌ها هدایت روزنه‌ای را تقویت کرده، باعث تقسیم و تمایز برگ و بهبود آوند چوبی و آبکش برگ می‌شوند (۵۸، ۵۹) و توانایی گیاه را در جذب و استفاده از دی‌اکسیدکربن برای فتوسنتز، حتی زمانی که آب محدود است را افزایش می‌دهند. علاوه بر نقش مؤثر باکتری‌های محرک رشد می‌توان به نقش کلیدی پتاسیم در فعال‌سازی آنزیم‌های فتوسنتزی (٤۵) و تعادل بین جذب دی‌اکسید کربن و حفظ آب جهت بالا بردن نرخ فتوسنتز در شرایط کم‌آبی اشاره کرد (٦۰).

تعرق: با عنایت به جدول ۳ در طی ٦۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز بعد از اعمال تیمار، کمترین میزان تعرق در ۱۸۰ روز پس از اعمال تیمار در گیاهان آبیاری شده با رژیم آبیاری ٤۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق، بدون محلول‌پاشی و بدون تلقیح باکتری (۰/۳۱ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) مشاهده شد. بیش‌ترین میزان تعرق در ۱۲۰ روز پس از اعمال تیمار در گیاهان کامل آبیاری شده و محلول‌پاشی با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم و حضور باکتری *R33* (۱/۹۲ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه) بود. هم‌چنین، در پایان آزمایش و در سطح ٤۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق مشخص گردید که میزان تعرق در گیاهان تلقیح‌شده با باکتری‌های *E1*، *CS1*، *R33* و کنسرسیوم سه باکتری و محلول‌پاشی شده با نیترات پتاسیم به ترتیب ٤۵/۵، ۱۲٤/۲، ٤۷/۲ و ۱۱۰ درصد نسبت به گیاهان بدون تلقیح باکتری و بدون اعمال محلول‌پاشی کودی، بیش‌تر بود. عملکردهای روزنه‌ای و کاهش آسیب‌های ساختاری دستگاه فتوسنتزی از طریق القای تجمع اسمولیت گیاهی ازجمله اسید آبسیزیک، اکسین و سایر هورمون‌ها دیگر فواید باکتری‌های محرک رشد در تبادلات گازی هستند (٦۱، ٦۲). گزارش‌های متعددی نشان داده‌اند که باکتری‌های محرک رشد می‌توانند نرخ بهینه تعرق، هدایت روزنه‌ای و جذب

دی‌اکسیدکربن را در گیاهان تحت تنش خشکی حفظ کنند (٦٣، ٦٤) هم‌چنین، اثرات مثبت این باکتری‌ها بر بهبود تبادلات گازی در درختان مرکبات که با باکتری محرک رشد تلقیح شده‌اند، در مطالعات متعددی تأیید شده است (٦٥، ٦٦). از سوی دیگر، پتاسیم به‌عنوان عنصری کلیدی در بهبود هدایت آوندی و عملکرد سامانه‌های انتقال آب و مواد مغذی در گیاهان شناخته شده است (٦٧). در این پژوهش، استفاده از نیترات پتاسیم موجب بهبود انتقال آب و مواد مغذی در آوندها شد و تعرق گیاه را در سطح مطلوبی حفظ نمود. این امر از خشک شدن بیش‌ازحد سلول‌ها جلوگیری کرده و به‌طورکلی بهبود وضعیت فیزیولوژیکی گیاهان تحت تنش خشکی کمک شایانی کرده است.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل زمان × باکتری × نیترات پتاسیم × آبیاری بر میزان فتوسنتز و تعرق.

Table 3. Comparison of the Mean Interaction Effects of Time × Bacteria × Potassium Nitrate × Irrigation on Photosynthesis and Transpiration Rates.

آبیاری (درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) Irrigation (%ETC)	باکتری Bacteria	نیترات پتاسیم ($g.l^{-1}$) KNO_3 ($g.l^{-1}$)	فتوسنتز ($\mu molCO_2.m^{-2}s^{-1}$) Photosynthesis ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$) زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			تعرق ($mmol.m^{-2}s^{-1}$) Transpiration ($mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)		
			60	120	180	60	120	180
100% ETC	E1	20	5.76 ± 0.255 b_1	4.56 ± 0.005 $f_1g_1h_1$	3.98 ± 0.005 ijk	1.15 ± 0.026 $g_1h_1i_1$	1.03 ± 0.012 $i_1j_1k_1l_1m_1$	0.94 ± 0.008 $l_1m_1n_1o_1p_1q_1r_1s_1$
		0	3.48 ± 0.057 $l_1m_1n1o_1p_1q_1r_1$	3.87 ± 0.005 $j_1k_1l_1m_1$	3.10 ± 0.005 $r_1s_1t_1u_1v_1w_1x_1$	0.55 ± 0.024 $h_2i_2j_2k_2l_2$	0.85 ± 0.025 $q_1r_1s_1t_1u_1v_1w_1x_1$	0.85 ± 0.005 $q_1r_1s_1t_1u_1v_1w_1x_1$
	CS1	20	6.66 ± 0.015 a_1	5.67 ± 0.008 b_1	3.58 ± 0.005 $k_1l_1m_1n_1o_1p_1q_1$	1.54 ± 0.066 b_1	0.8 ± 0.335 $a_2u_1v_1w_1x_1y_1z_1$	0.82 ± 0.005 $s_1t_1u_1v_1w_1x_1y_1$
		0	6.31 ± 0.54 a_1	5.58 ± 0.005 b_1c_1	3.44 ± 0.012 $m_1n_1o_1p_1q_1r_1s_1$	1.48 ± 0.071 b_1c_1	0.95 ± 0.005 $l_1m_1n_1o_1p_1q_1r_1$	0.76 ± 0.008 $a_2b_2v_1w_1x_1y_1z_1$
	R33	20	4.99 ± 0.443 d_1e_1	4.22 ± 0.005 $h_1i_1j_1$	3.98 ± 0.005 $i_1j_1k_1$	1.36 ± 0.001 $c_1d_1e_1$	1.92 ± 0.012 a_1	0.83 ± 0.008 $r_1s_1t_1u_1v_1w_1x_1$
		0	4.33 ± 0.246 $g_1h_1i_1$	3.97 ± 0.011 $i_1j_1k_1$	3.41 ± 0.008 $n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1$	0.91 ± 0.003 $m_1n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1$	0.84 ± 0.005 $r_1s_1t_1u_1v_1w_1x_1$	0.82 ± 0.005 $s_1t_1u_1v_1w_1x_1y_1$
	CONSERTIUM	20	5.14 ± 0.185 d_1	4.45 ± 0.003 $f_1g_1h_1$	3.27 ± 0.005 $p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	1.41 ± 0.000 c_1d_1	1.25 ± 0.005 $e_1f_1g_1h_1$	0.92 ± 0.005 $m_1n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1$
		0	4.85 ± 0.341 $d_1e_1f_1$	4.24 ± 0.005 $g_1h_1i_1j_1$	3.02 ± 0.005 $s_1t_1u_1v_1w_1x_1y_1$	1.01 ± 0.141 $j_1k_1l_1m_1n_1$	1.01 ± 0.008 $j_1k_1l_1m_1n_1$	0.89 ± 0.008 $n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1$
	CONTROL	20	5.20 ± 0.139 b_1c_1	4.48 ± 0.005 $f_1g_1h_1$	3.36 ± 0.005 $o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1$	1.55 ± 0.103 b_1	1.22 ± 0.008 $f_1g_1h_1$	0.81 ± 0.008 $t_1u_1v_1w_1x_1y_1z_1$
		0	5.12 ± 0.365 d_1	4.38 ± 0.005 $g_1h_1i_1$	3.21 ± 0.005 $q_1r_1s_1t_1u_1v_1w_1$	1.06 ± 0.005 $i_1j_1k_1l_1$	0.98 ± 0.005 $k_1l_1m_1n_1o_1p_1$	0.76 ± 0.012 $a_2b_2v_1w_1x_1y_1z_1$

ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

تعرق ($mmol.m^{-2}s^{-1}$) Transpiration ($mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$)			فتوسنتز ($\mu molCO_2.m^{-2}s^{-1}$) Photosynthesis ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$)					
زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)					
180	120	60	180	120	60	نیترات پتاسیم ($g.l^{-1}$) KNO_3 ($g.l^{-1}$)	باکتری Bacteria	آبیاری (درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) Irrigation (%ETC)
0.61 ± 0.008 $e_2f_2g_2h_2i_2$	0.74 ± 0.008 $a_2b_2c_2d_2w_1x_1y_1z_1$	0.98 ± 0.005 $k_1l_1m_1n_1o_1p_1$	2.85 ± 0.005 $a_2v_1w_1x_1y_1z_1$	3.34 ± 0.005 $o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1$	3.46 ± 0.136 $m_1n_1o_1p_1q_1r_1$	20	E1	70% ETC
0.64 ± 0.008 $c_2d_2e_2f_2g_2h_2i_2$	0.62 ± 0.005 $d_2e_2f_2g_2h_2i_2$	0.84 ± 0.000 $r_1s_1t_1u_1v_1w_1x_1$	2.46 ± 0.005 $a_2b_2c_2d_2e_2f_2$	2.56 ± 0.005 $a_2b_2c_2d_2z_1$	2.56 ± 0.493 $a_2b_2c_2z_1$	0		
0.88 ± 0.011 $o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	1.31 ± 0.005 $d_1e_1f_1$	1.35 ± 0.005 d_1e_1	3.39 ± 0.005 $o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1$	3.65 ± 0.008 $k_1l_1m_1n_1o_1p_1$	4.58 ± 0.355 $e_1f_1g_1h_1$	20	CS1	
0.68 ± 0.005 $a_2b_2c_2d_2e_2f_2g_2h_2$	1.15 ± 0.008 $g_1h_1i_1$	1.26 ± 0.004 $e_1f_1g_1$	3.45 ± 0.005 $m_1n1o_1p_1q_1r_1s_1$	3.66 ± 0.011 $k_1l_1m_1n_1o_1p_1$	3.84 ± 0.363 $j_1k_1l_1m_1n_1$	0		
0.55 ± 0.005 $h_2i_2j_2k_2l_2$	0.62 ± 0.005 $d_2e_2f_2g_2h_2i_2$	0.97 ± 0.015 $l_1m_1n_1o_1p_1q_1$	2.83 ± 0.008 $a_2w_1x_1y_1z_1$	3.42 ± 0.012 $n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1$	3.57 ± 0.067 $k_1l_1m_1n_1o_1p_1q_1$	20	R33	
0.46 ± 0.015 $k_2l_2m_2n_2$	0.53 ± 0.008 $i_2j_2k_2l_2m_2$	0.63 ± 0.000 $c_2d_2e_2f_2g_2h_2i_2$	2.83 ± 0.008 $a_2w_1x_1y_1z_1$	3.42 ± 0.005 $n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1$	2.38 ± 0.271 $b_2c_2d_2e_2f_2g_2$	0		
0.74 ± 0.016 $a_2b_2c_2d_2w_1x_1y_1z_1$	1.13 ± 0.005 $h_1i_1j_1$	1.25 ± 0.037 $e_1f_1g_1$	3.09 ± 0.005 $r_1s_1t_1u_1v_1w_1x_1$	4.62 ± 0.005 $e_1f_1g_1h_1$	4.66 ± 0.264 $e_1f_1g_1$	20	CONSERTIUM	
0.75 ± 0.011 $a_2b_2c_2w_1x_1y_1z_{11}$	1.02 ± 0.005 $j_1k_1l_1m_1n_1$	1.09 ± 0.056 $i_1j_1k_1$	3.01 ± 0.005 $t_1u_1v_1w_1x_1y_1$	4.23 ± 0.008 $g_1h_1i_1j_1$	4.82 ± 0.361 $d_1e_1f_1$	0		
0.64 ± 0.005 $c_2d_2e_2f_2g_2h_2i_2$	0.82 ± 0.008 $r_1s_1t_1u_1v_1w_1x_1y_1$	0.85 ± 0.003 $q_1r_1s_1t_1u_1v_1w_1x_1$	2.68 ± 0.005 $a_2b_2x_1y_1z_1$	3.28 ± 0.005 $p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	3.89 ± 0.043 $j_1k_1l_1$	20	CONTROL	
0.61 ± 0.008 $e_2f_2g_2h_2i_2$	0.73 ± 0.005 $a_2b_2c_2d_2e_2x_1y_1z_1$	0.63 ± 0.002 $c_2d_2e_2f_2g_2h_2i_2$	2.39 ± 0.005 $b_2c_2d_2e_2f_2g_2$	3.38 ± 0.005 $o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1$	3.77 ± 0.153 $k_1l_1m_1n_1o_1$	0		

ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

تعرق ($mmol.m^{-2}s^{-1}$) Transpiration ($mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			فتوسنتز ($\mu molCO_2.m^{-2}s^{-1}$) Photosynthesis ($\mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$) زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			نیترات پتاسیم ($g.l^{-1}$) KNO_3 ($g.l^{-1}$)	باکتری Bacteria	آبیاری (درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) Irrigation (%ETC)
180	120	60	180	120	60			
0.48 ± 0.005 $j_2k_2l_2m_2n_2$	0.86 ± 0.008 $p_1q_1r_1s_1t_1u_1$ v_1w_1	1 ± 0.103 $k_1l_1m_1n_1o_1$	2.13 ± 0.005 $e_2f_2g_2h_2$	2.68 ± 0.003 $a_2b_2x_1y_1z_1$	2.57 ± 0.179 $a_2b_2c_2z_1$	20	E1	40% ETC
0.53 ± 0.008 $i_2j_2k_2l_2m_2$	0.53 ± 0.008 $i_2j_2k_2l_2m_2$	0.69 ± 0.069 $a_2b_2c_2d_2e_2f_2$ g_2z_1	2.32 ± 0.094 $b_2c_2d_2e_2f_2g_2$	2.12 ± 0.008 $e_2f_2g_2h_2$	2.54 ± 0.160 $a_2b_2c_2d_2e_2z_1$	0		
0.74 ± 0.015 $a_2b_2c_2d_2w_1$ $z_1y_1x_1$	0.92 ± 0.005 $m_1n_1o_1p_1q_1$ $r_1s_1t_1$	1.00 ± 0.014 $k_1l_1m_1n_1o_1$	2.67 ± 0.005 $a_2b_2x_1y_1z_1$	3.18 ± 0.005 $q_1r_1s_1t_1u_1$ v_1w_1	4.26 ± 0.242 $g_1h_1i_1j_1$	20	CS1	
0.70 ± 0.008 $a_2b_2c_2d_2e_2f_2$ y_1z_1	0.82 ± 0.012 $s_1t_1u_1v_1w_1$ x_1y_1	0.98 ± 0.005 $k_1l_1m_1n_1$ o_1p_1	2.28 ± 0.061 $b_2c_2d_2e_2f_2g_2$	3.03 ± 0.005 $t_1u_1v_1w_1x_1$ y_1z_1	4.39 ± 0.055 $g_1h_1i_1$	0		
0.48 ± 0.008 $j_2k_2l_2m_2n_2$	0.61 ± 0.008 $e_2f_2g_2h_2i_2$	0.76 ± 0.009 $a_2b_2v_1w_1x_1$ y_1z_1	1.70 ± 0.005 h_2i_2	2.97 ± 0.005 $u_1v_1w_1x_1$ y_1z_1	3.56 ± 0.289 $k_1l_1m_1n_1o_1$ p_1q_1	20	R33	
0.31 ± 0.008 p_2	0.41 ± 0.008 $m_2n_2o_2p_2$	0.57 ± 0.005 $g_2h_2i_2j_2k_2$	1.56 ± 0.005 i_2	3.01 ± 0.005 $t_1u_1v_1w_1$ x_1y_1	3.67 ± 0.057 $k_1l_1m_1n_1$ o_1p_1	0		
0.69 ± 0.006 $a_2b_2c_2d_2e_2f_2$ g_2z_1	0.77 ± 0.008 $a_2u_1v_1w_1x_1$ y_1z_1	0.99 ± 0.004 $k_1l_1m_1n_1o_1$	2.46 ± 0.005 $a_2b_2c_2d_2e_2f_2$	2.60 ± 0.005 $a_2b_2y_1z_1$	2.60 ± 0.176 $a_2b_2v_1y_1z_1$	20	CONSERTIUM	
0.60 ± 0.005 $f_2g_2h_2i_2j_2$	0.73 ± 0.012 $a_2b_2c_2d_2e_2x_1$ y_1z_1	0.88 ± 0.007 $o_1p_1q_1r_1s_1t_1$ u_1v_1	2.14 ± 0.008 $c_2d_2e_2f_2g_2$	2.65 ± 0.008 $a_2b_2y_1z_1$	2.88 ± 0.165 $a_2v_1w_1x_1$ y_1z_1	0		
0.38 ± 0.005 $n_2o_2p_2$	0.47 ± 0.005 $k_2l_2m_2n_2$	0.53 ± 0.004 $i_2j_2k_2l_2m_2$	2.16 ± 0.008 $c_2d_2e_2f_2g_2$	2.15 ± 0.008 $c_2d_2e_2f_2g_2$	2.39 ± 0.326 $c_2d_2e_2f_2g_2$	20	CONTROL	
0.33 ± 0.005 o_2p_2	0.31 ± 0.012 o_2p_2	0.44 ± 0.014 $l_2m_2n_2o_2$	1.71 ± 0.005 h_2i_2	1.98 ± 0.005 $g_2h_2i_2$	2.06 ± 0.008 $f_2g_2h_2$	0		

حروف از a_1 تا z_1 به ترتیب قرار گرفته‌اند، بعد از پایان حروف a_1 تا z_1، حروف از a_2 آغاز می‌شود و تا z_2 ادامه پیدا می‌کند

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، دارای تفاوت آماری نسبت به یکدیگر براساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد نیستند

The letters are arranged in order from a_1 to z_1. After the letters a_1 to z_1 have been completed, the letters start from a_2 and continue up to z_2

Means that share common letters do not have statistical differences from each other based on Duncan's test at the $P \leq 0.05$ level

هدایت روزنه‌ای: با عنایت به جدول ٤ روند تغییرات هدایت روزنه‌ای حاصله از اثرات متقابل زمان × آبیاری × نیترات پتاسیم × باکتری نشان داد کم‌ترین میزان هدایت روزنه‌ای در طی ٦٠، ١٢٠ و ١٨٠ روز پس از اعمال تیمار، مربوط به گیاهان آبیاری شده با رژیم آبیاری ٤٠ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق و بدون اعمال تیمار باکتری و محلول‌پاشی نیترات پتاسیم معادل ٠/٠١٢ میلی‌مول بر مترمربع بر ثانیه بود. درحالی‌که هدایت روزنه‌ای در گیاهان محلول‌پاشی شده با ٢٠ گرم در لیتر نیترات پتاسیم و تلقیح

باکتری‌های *E1*، *CS1*، *R33*، کنسرسیوم سه باکتری و بدون تلقیح باکتری در همین رژیم آبیاری در طی ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز پس از اعمال تیمار بیشتر بود.

به نظر می‌رسد پتاسیم و هورمون‌های گیاهی تولیدشده توسط باکتری‌های محرک رشد می‌توانند به‌طور متقابل اثرات یکدیگر را تقویت کنند. پتاسیم با بهبود تعادل یونی و فشار اسمزی، شرایط مناسب‌تری برای عملکرد هورمون‌های گیاهی مانند سیتوکنین فراهم می‌کند. این همکاری باعث بهبود کارایی روزنه‌ها می‌شود (۶۸، ۶۹).

دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای: با توجه به جدول ٤ مشخص شد که بیش‌ترین میزان دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای مربوط به گیاهان کامل آبیاری شده و عدم محلول‌پاشی با نیترات پتاسیم و تلقیح با باکتری *CS1* در ٦٠ روز پس از اعمال تیمار به‌دست آمد (٤٠٨ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) درحالی‌که کم‌ترین میزان دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای در ۱۸۰ روز پس از اعمال تیمار، مربوط به گیاهان آبیاری شده با ٤٠ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق گیاه و عدم محلول‌پاشی با نیترات پتاسیم و بدون تلقیح باکتری (۱۸۸ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه) بود. هم‌چنین مشخص شد که درطی سه دوره ٦٠، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز پس از اعمال تیمار گیاهان تحت تنش آبیاری ٤٠ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق، تلقیح باکتری‌های *E1*، *CS1*، *R33* و کنسرسیوم سه باکتری به همراه محلول‌پاشی با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم سبب بهبود میزان دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای برگ نسبت به گیاهان فاقد محلول‌پاشی و عدم تلقیح باکتری در این رژیم آبیاری گردید درحالی‌که در گیاهان تحت تنش آبیاری ۷۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق در گیاهان تلقیح شده با باکتری‌های *CS1*، *R33* و کنسرسیوم سه باکتری و هم تلقیح‌نشده به همراه محلول‌پاشی با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم افزایش در میزان دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای را نسبت به گیاهان بدون اعمال تیمارهای نیترات پتاسیم و باکتری در این رژیم آبیاری نشان دادند. افزایش جذب دی‌اکسیدکربن را می‌توان به نقش باکتری‌های محرک رشد در بهبود جذب مواد مغذی نسبت داد. باکتری‌های محرک رشد با بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه از طریق جذب عناصر کلیدی مانند فسفر و نیتروژن عملکرد روزنه‌ای را تعدیل و جذب دی‌اکسید کربن را افزایش می‌دهند (٦٨). از سوی دیگر پتاسیم با بستن جزئی روزنه‌ها به‌منظور کاهش اتلاف آب، اثرات منفی تنش اسمزی را کاهش می‌دهد. این تنظیم روزنه‌ای توسط پتاسیم، با تعدیل جذب دی‌اکسیدکربن و کنترل اتلاف آب در سلول‌های نگهبان روزنه، به حفظ فشار تورژسانس و رشد متعادل برگ کمک می‌کند، که درنهایت منجر به بهبود فتوسنتز می‌شود (۷۰، ۷۲). به‌عبارت‌دیگر پتاسیم با تنظیم روزنه‌ای، به گیاه کمک می‌کند تا تعادل بهینه‌ای بین تبادلات گازی و حفظ آب برقرار کند (۷۳). نقش پتاسیم در تنظیم تعادل بین جذب دی‌اکسید کربن و حفظ آب، با یافته‌های مطالعه حاضر نیز همخوانی دارد.

کارایی مصرف آب: تجزیه‌وتحلیل تغییرات کارایی مصرف آب تحت تأثیر متقابل تلقیح باکتری و آبیاری در طول دوره‌های ٦٠، ۱۲۰ و ۱۸۰ روز پس از اعمال تیمار، نتایج نشان داد که در شرایط آبیاری با ۱۰۰، ۷۰ و ٤٠ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق، تفاوت‌های آماری معناداری در کارایی مصرف آب بین گیاهان تلقیح شده با باکتری و گیاهان تلقیح نشده وجود داشت. به‌ویژه، در شرایط تنش کم‌آبی با ۷۰ و ٤٠ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق، تلقیح باکتری در برخی موارد به بهبود کارایی مصرف آب شد (جدول ۵).

در پایان آزمایش، استفاده از باکتری *R33* و در شرایط آبیاری با ۷۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق، باعث افزایش کارایی مصرف آب به میزان ٤٠/٠٩

درصد نسبت به شاهد گردید. باکتری‌های محرک رشد با ترشح هورمون ایندول استیک اسید باعث افزایش طول و حجم ریشه می‌شوند (۷٤). در مطالعه‌ای روی گیاه فلفل افزایش سطح تماس ریشه با خاک هدایت هیدرولیکی را افزایش و جذب آب و مواد مغذی را بهبود بخشید (۷۵). تلقیح باکتری باسیلوس در ریشه گیاه خیار نیز توانست ریخت‌شناسی ریشه را تغییر و باعث افزایش مقاومت گیاه در شرایط تنش گردد که با نتایج مطالعه حاضر مبنی بر بهبود کارایی مصرف آب از طریق سامانه ریشه‌ای مطابقت دارد (۷٦).

جدول ٤- مقایسه میانگین اثر متقابل زمان × باکتری × نیترات پتاسیم × آبیاری بر میزان هدایت روزنه‌ای و دی‌اکسید زیر روزنه‌ای.

Table 4. Comparison of the Mean Interaction Effects of Time × Bacteria × Potassium Nitrate × Irrigation on Stomatal Conductance and Sub-Stomatal CO_2.

آبیاری (درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) Irrigation(%ETC)	باکتری Bacteria	نیترات پتاسیم ($g.l^{-1}$) KNO_3 ($g.l^{-1}$)	هدایت روزنه‌ای ($mmol.m^{-2}s^{-1}$) Stomatal Conductance ($mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای ($\mu mol.m^{-2}s^{-1}$) Sub-Stomatal CO_2 ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)		
			60	120	180	60	120	180
100% ETC	E1	20	0.080 ± 0.011 $c_1d_1e_1f_1g_1$	0.065 ± 0.000 $i_1j_1k_1l_1m_1n_1o_1$	0.062 ± 0.000 $j_1k_1l_1m_1n_1o_1p_1q_1$	386.6 ± 8.192 c_1	373.6 ± 0.881 d_1	367 ± 0.577 e_1f_1
		0	0.07 ± 0.005 $f_1g_1h_1i_1j_1k_1l_1m_1$	0.066 ± 0.000 $i_1j_1k_1l_1m_1n_1$	0.056 ± 0.001 $n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1$	394 ± 0.577 b_1	367 ± 0.577 e_1f_1	302 ± 0.577 x_1y_1
	CS1	20	0.103 ± 0.003 a_1b_1	0.082 ± 0.000 $c_1d_1e_1f_1$	0.076 ± 0.000 $e_1f_1g_1h_1i_1$	397 ± 0.577 b_1	388 ± 0.577 c_1	362 ± 0.577 g_1f_1
		0	0.09 ± 0.005 c_1d_1	0.074 ± 0.000 $e_1f_1g_1h_1i_1j_1$	0.062 ± 0.000 $j_1k_1l_1m_1n_1o_1p_1q_1$	408 ± 5.567 a_1	362 ± 0.577 g_1f_1	309 ± 0.577 v_1w_1
	R33	20	0.083 ± 0.003 $c_1d_1e_1$	0.081 ± 0.000 $c_1d_1e_1f_1$	0.084 ± 0.000 $c_1d_1e_1$	394.5 ± 2.020 b_1	377.3 ± 0.881 d_1	349.6 ± 0.881 j_1
		0	0.09 ± 0.005 c_1d_1	0.08 ± 0.000 $c_1d_1e_1f_1g_1$	0.079 ± 0.000 $d_1e_1f_1g_1h_1$	374.3 ± 0.881 d_1	352 ± 1.527 h_1i_1	333 ± 0.577 l_1m_1
	CONSERTIUM	20	0.08 ± 0.005 $c_1d_1e_1f_1g_1$	0.077 ± 0.000 $e_1f_1g_1h_1i_1$	0.063 ± 0.000 $j_1k_1l_1m_1n_1o_1p_1$	350.6 ± 0.881 i_1j_1	361 ± 0.577 g_1h_1	336 ± 0.577 k_1l_1
		0	0.09 ± 0.005 c_1d_1	0.07 ± 0.000 $f_1g_1h_1i_1j_1k_1l_1m_1$	0.061 ± 0.000 $k_1l_1m_1n_1o_1p_1q_1r_1$	359 ± 5.507 g_1h_1	336.6 ± 1.201 k_1l_1	328.3 ± 0.881 $m_1n_1o_1$
	CONTROL	20	0.013 ± 0.003 $f_2g_2h_2$	0.012 ± 0.000 h_2	0.082 ± 0.000 $c_1d_1e_1f_1$	318.3 ± 2.962 $q_1r_1s_1$	316.3 ± 0.881 $r_1s_1t_1u_1$	311.6 ± 0.881 u_1v_1
		0	0.110 ± 0.005 a_1	0.092 ± 0.000 b_1c_1	0.072 ± 0.000 $e_1f_1g_1h_1k_1l_1j_1$	315 ± 1.732 $s_1t_1u_1$	303 ± 0.577 x_1y_1	296 ± 0.577 a_2z_1

ادامه جدول ٤-

Continue Table 4.

دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای ($\mu mol.m^{-2}s^{-1}$) Sub-Stomatal CO_2 ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$) زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			هدایت روزنه‌ای ($mmol.m^{-2}s^{-1}$) Stomatal Conductance ($mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$) زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			نیترات پتاسیم ($g.l^{-1}$) KNO_3 ($g.l^{-1}$)	باکتری Bacteria	آبیاری (درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) Irrigation(%ETC)
180	120	60	180	120	60			
231 ± 0.577 m_2n_2	251 ± 0.577 h_2i_2	265 ± 1.73 f_2	0.056± 0.001 $n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1$	0.061 ± 0.000 $k_1l_1m_1n_1o_1p_1q_1r_1$	0.07 ± 0.005 $f_1g_1h_1i_1j_1k_1l_1m_1$	20	E1	70% ETC
214.3 ± 0.881 q_2	248 ± 0.577 $i_2j_2k_2$	256.3 ± 2.185 g_2h_2	0.048 ± 0.000 $s_1t_1u_1v_1w_1$	0.047 ± 0.000 $t_1u_1v_1w_1x_1$	0.05 ± 0.005 $q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0		
277 ± 1.527 $c_2d_2e_2$	317.3 ± 0.881 $q_1r_1s_1t_1u_1$	352 ± 1.732 h_1i_1	0.051 ± 0.001 $p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0.057 ± 0.000 $n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1$	0.08 ± 0.005 $c_1d_1e_1f_1g_1$	20	CS1	
237.6 ± 1.452 l_2	250 ± 0.577 i_2j_2	261.6 ± 0.881 f_2g_2	0.043 ± 0.000 $a_2u_1v_1w_1x_1y_1z_1$	0.066 ± 0.001 $h_1i_1j_1k_1l_1m_1n_1$	0.073 ± 0.008 $e_1f_1g_1h_1i_1j_1k_1$	0		
326.3 ± 0.333 $n_1o_1p_1$	339.6 ± 0.881 k_1	355.6 ± 1.201 h_1i_1	0.034 ± 0.001 $a_2b_2c_2d_2y_1z_1$	0.041 ± 0.000 $a_2b_2v_1w_1x_1y_1z_1$	0.05 ± 0.005 $q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	20	R33	
294 ± 1.000 a_2z_1	309 ± 0.577 v_1w_1	322 ± 0.577 $p_1q_1r_1$	0.028 ± 0.000 $c_2d_2e_2$	0.043 ± 0.002 $a_2u_1v_1w_1x_1y_1z_1$	0.046 ± 0.012 $t_1u_1v_1w_1x_1y_1$	0		
312 ± 0.577 $t_1u_1v_1$	341.3 ± 0.666 k_1	372.3 ± 1.452 d_1e_1	0.052 ± 0.000 $p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0.067 ± 0.001 $h_1i_1j_1k_1l_1m_1n_1$	0.073± 0.012 $e_1f_1g_1h_1i_1j_1k_1$	20	CONSERTIUM	
251.3 ± 0.881 h_2i_2	279.3 ± 1.452 $b_2c_2d_2$	304.3 ± 1.763 w_1x_1	0.044 ± 0.000 $u_1v_1w_1x_1y_1z_1$	0.053 ± 0.003 $o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0.06 ± 0.005 $l_1m_1n_1o_1p_1q_1r_1s_1$	0		
280 ± 0.577 $b_2c_2d_2$	311.6 ± 0.881 u_1v_1	328 ± 0.577 $m_1n_1o_1$	0.033 ± 0.000 $a_2b_2c_2d_2z_1$	0.053 ± 0.000 $o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0.05 ± 0.005 $q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	20	CONTROL	
273 ± 0.577 e_2	283.3 ± 0.881 b_2	294.6 ± 1.666 a_2z_1	0.025 ± 0.000 $c_2d_2e_2f_2g_2$	0.037 ± 0.000 $a_2b_2c_2w_1x_1y_1z_1$	0.046 ± 0.012 $t_1u_1v_1w_1x_1y_1$	0		

ادامه جدول ٤-

Continue Table 4.

دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای ($\mu mol.m^{-2}s^{-1}$) Sub-Stomatal CO_2 ($\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$)			هدایت روزنه‌ای ($mmol.m^{-2}s^{-1}$) Stomatal Conductance ($mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$)					
زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			زمان اندازه‌گیری (روز پس از شروع آزمایش) Measurement Time (Days After Start of Experiment)			نیترات پتاسیم ($g.l^{-1}$) KNO_3 ($g.l^{-1}$)	باکتری Bacteria	آبیاری (درصد پتانسیل تبخیر و تعرق) Irrigation(%ETC)
180	120	60	180	120	60			
225.3 ± 0.666 n_2o_2	232.3 ± 0.881 l_2m_2	263.3 ± 0.881 f_2	0.037 ± 0.000 $a_2b_2c_2w_1x_1y_1z_1$	0.052 ± 0.000 $p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0.05 ± 0.005 $q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	20	E1	40% ETC
202 ± 0.577 s_2	225.3 ± 0.333 n_2o_2	252.6 ± 0.881 h_2i_2	0.031 ± 0.000 $a_2b_2c_2d_2e_2$	0.037 ± 0.000 $a_2b_2c_2w_1x_1y_1z_1$	0.046 ± 0.012 $t_1u_1v_1w_1x_1y_1$	0		
249 ± 0.577 $i_2j_2k_2$	263 ± 0.577 f_2	291.3 ± 0.881 a_2	0.048 ± 0.000 $r_1s_1t_1u_1v_1w_1$	0.057 ± 0.000 $m_1n_1o_1p_1q_1r_1s_1t_1$	0.066 ± 0.012 $h_1i_1j_1k_1l_1m_1n_1$	20	CS1	
225.6 ± 0.881 n_2o_2	244 ± 0.577 k_2	283.6 ± 1.333 b_2	0.035 ± 0.000 $a_2b_2c_2d_2x_1y_1z_1$	0.045 ± 0.000 $t_1u_1v_1w_1x_1y_1$	0.05 ± 0.011 $q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0		
318.6 ± 0.881 $q_1r_1s_1$	323 ± 0.577 $o_1p_1q_1$	329 ± 0.577 m_1n_1	0.025 ± 0.000 $c_2d_2e_2f_2g_2$	0.024 ± 0.000 $d_2e_2f_2g_2h_2$	0.03 ± 0.005 $b_2c_2d_2e_2$	20	R33	
274.6 ± 1.527 d_2e_2	302 ± 0.577 x_1y_1	317.6 ± 0.881 $q_1r_1s_1t_1$	0.013 ± 0.000 $f_2g_2h_2$	0.018 ± 0.000 $e_2f_2g_2h_2$	0.026 ± 0.008 $c_2d_2e_2$	0		
267 ± 0.577 f_2	275 ± 0.577 d_2e_2	282 ± 13.527 b_2c_2	0.052 ± 0.000 $p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0.067 ± 0.000 $g_1h_1i_1j_1k_1l_1m_1n_1$	0.07 ± 0.005 $f_1g_1h_1i_1j_1k_1l_1m_1$	20	CONSERTIUM	
245 ± 1.52 j_2k_2	262 ± 0.577 f_2g_2	298.3 ± 0.881 y_1z_1	0.050 ± 0.000 $p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0.053 ± 0.000 $o_1p_1q_1r_1s_1t_1u_1v_1$	0.06 ± 0.005 $l_1m_1n_1o_1p_1q_1r_1s_1$	0		
193 ± 0.577 t_2u_2	198.3 ± 0.881 s_2t_2	222 ± 1.527 o_2p_2	0.018 ± 0.000 $e_2f_2g_2h_2$	0.025 ± 0.000 $c_2d_2e_2f_2$	0.03 ± 0.005 $b_2c_2d_2e_2$	20	CONTROL	
188 ± 0.577 u_2	208 ± 0.577 r_2	218 ± 0.577 p_2q_2	0.012 ± 0.000 g_2h_2	0.013 ± 0.000 $f_2g_2h_2$	0.02 ± 0.005 $e_2f_2g_2h_2$	0		

حروف از a_1 تا z_1 به ترتیب قرار گرفته‌اند، بعد از پایان حروف a_1 تا z_1، حروف از a_2 آغاز می‌شود و تا z_2 ادامه پیدا می‌کند

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، دارای تفاوت آماری نسبت به یکدیگر براساس آزمون دانکن در سطح پنج درصد نیستند

The letters are arranged in order from a_1 to z_1. After the letters a_1 to z_1 have been completed, the letters start from a_2 and continue up to z_2

Means that share common letters do not have statistical differences from each other based on Duncan's test at the $P \leq 0.05$ level

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش خشکی با کاهش میزان آب از ۱۰۰ به ۷۰ و ٤۰ درصد پتانسیل تبخیر و تعرق، خصوصیات رشدی و تبادلات گازی گیاه لیموترش را به‌طور قابل‌توجهی کاهش داد. بااین‌حال، استفاده از محلول‌پاشی نیترات پتاسیم ۲۰ گرم در لیتر و تلقیح باکتری‌های محرک رشد توانست تأثیرات منفی تنش خشکی را به میزان زیادی کاهش دهد. بیش‌ترین میزان وزن خشک اندام هوایی و سطح برگ به ترتیب در نهال‌های تلقیح‌شده با کنسرسیوم سه باکتری *R33* همراه با محلول‌پاشی شده با ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم مشاهده شد. تلقیح نهال لیموترش با کنسرسیوم سه باکتری همراه با محلول‌پاشی ۲۰ گرم در لیتر نیترات پتاسیم به ترتیب منجر به افزایش ٦۱/۲ و ۱٦/٦ درصدی ارتفاع نهال و تعداد برگ در بالاترین سطح تنش خشکی گردید. این تیمارها منجر به افزایش فتوسنتز، تعرق، هدایت روزنه‌ای و دی‌اکسیدکربن زیر روزنه‌ای و هم‌چنین بهبود کارایی مصرف آب در شرایط تنش خشکی شدند. نتایج نشان داد که نیترات پتاسیم با بهبود فعالیت‌های آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و شاخص‌های رشدی برگ و هم‌چنین افزایش تبادلات گازی، توانست آثار سوء تنش خشکی را کاهش دهد. علاوه‌بر این، تلقیح باکتری‌های محرک رشد با تولید فیتوهورمون‌ها و تنظیم تبادلات گازی، بهبود قابل‌توجهی در عملکرد گیاه در شرایط خشکی ایجاد کرد. ترکیب تیماری تلقیح *Bacillus subtilis CS1*، *Enterobacter coleacea R33* و کنسرسیوم سه سویه همراه با محلول‌پاشی نیترات پتاسیم ۲۰ گرم در لیتر نسبت به سایر تیمارها موجب بهبود شاخص‌های تبادلات گازی در نهال‌های لیموترش نشان داد، نتایج این آزمایش بیانگر آن است که استفاده از این روش‌های زیستی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در بهبود مدیریت آبیاری و استفاده از منابع آبی در شرایط کم‌آبی و هم‌چنین بهره‌وری گیاهان مرکبات مورداستفاده قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به‌خاطر حمایت‌هایشان جهت انجام رساله دکتری تشکر و قدردانی می‌نماید.

منابع

1. Tripoli, E., La Guardia, M., Giammanco, S., Di Majo, D., & Giammanco, M. (2007). Citrus flavonoids: Molecular structure, biological activity and nutritional properties: A review. *Food chemistry*, 104(2), 466-479.
2. Ghasemi, S., Hemati, K., Bashiri, S. Z., Ghasem, N. A., & Ghasemi, M. (2011). Quantitation of phenolic compounds in tissues of lime (*Citrus aurantifolia*) fruit during growth and maturation.
3. Moradi, S. (2016). Effects of water stress and inoculation with mycorrhizal fungi and symbiotic bacteria on vegetative indices of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(3), 129-231.
4. Amri, E., & Shahsavar, A. R. (2010). Response of lime seedlings (*Citrus aurantifolia* L.) to exogenous spermidine treatments under drought stress. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(9), 4483-4489.
5. García-Sánchez, F., Syvertsen, J. P., Gimeno, V., Botía, P., & Perez-Perez, J. G. (2007). Responses to flooding and drought stress by two citrus rootstock seedlings with different water-use efficiency. *Physiologia Plantarum*, 130(4), 532-542.

6. Thirumurugan, D., Cholarajan, A., Raja, S., & Vijayakumar, R. (2018). An introductory chapter: secondary metabolites. *Secondary metabolites-sources and applications*, 1, 13.
7. Campos, H., Trejo, C., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Conde-Martínez, F. V., & Cruz-Ortega, M. d. R. (2014). Photosynthetic acclimation to drought stress in Agave salmiana Otto ex Salm-Dyck seedlings is largely dependent on thermal dissipation and enhanced electron flux to photosystem I. *Photosynthesis Research*, 122, 23-39.
8. Simonneau, T., Lebon, E., Coupel-Ledru, A., Marguerit, E., Rossdeutsch, L., & Ollat, N. (2017). Adapting plant material to face water stress in vineyards: which physiological targets for an optimal control of plant water status? *OENO one*, 51(2), 167.
9. Zufferey, V., Spring, J. L., Verdenal, T., Dienes, A., Belcher, S., Lorenzini, F., Koestel, C., Rösti, J., Gindro, K., & Spangenberg, J. (2017). The influence of water stress on plant hydraulics, gas exchange, berry composition and quality of Pinot Noir wines in Switzerland. *Oeno One*, 51(1).
10. Khalvandi, M., Siosemardeh, A., Roohi, E., & Keramati, S. (2021). Salicylic acid alleviated the effect of drought stress on photosynthetic characteristics and leaf protein pattern in winter wheat. *Heliyon*, 7(1).
11. Matés, J. M., Pérez-Gómez, C., & De Castro, I. N. (1999). Antioxidant enzymes and human diseases. *Clinical biochemistry*, 32(8), 595-603.
12. Blokhina, O., Virolainen, E., & Fagerstedt, K. V. (2003). Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. *Annals of botany*, 91(2), 179-194.
13. Parvaneh, R., Shahrokh, T., & Meysam, H. S. (2012). Studying of salinity stress effect on germination, proline, sugar, protein, lipid and chlorophyll content in purslane (*Portulaca oleracea* L.) leaves. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 8(1), 182-193.
14. Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical reviews in plant sciences*, 33(4), 331-349.
15. Bhat, M. A., Mishra, A. K., Jan, S., Bhat, M. A., Kamal, M. A., Rahman, S., Shah, A. A., & Jan, A. T. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria in plant health: a perspective study of the underground interaction. *Plants*, 12(3), 629.
16. Bhat, M. A., Mir, R. A., Kumar, V., Shah, A. A., Zargar, S. M., Rahman, S., & Jan, A. T. (2021). Mechanistic insights of CRISPR/Cas-mediated genome editing towards enhancing abiotic stress tolerance in plants. *Physiologia plantarum*, 172(2), 1255-1268.
17. Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of plant growth promoting rhizobacteria (*PGPR*) as a plant growth enhancer for sustainable agriculture: A review. *Bacteria*, 3(2), 59-75.
18. Patten, C. L., & Glick, B. R. (2002). Role of Pseudomonas putida indoleacetic acid in development of the host plant root system. *Applied and environmental microbiology*, 68(8), 3795-3801.
19. Khan, N., Bano, A., Ali, S., & Babar, M. A. (2020). Crosstalk amongst phytohormones from planta and PGPR under biotic and abiotic stresses. *Plant Growth Regulation*, 90, 189-203.
20. Ashry, N. M., Alaidaroos, B. A., Mohamed, S. A., Badr, O. A., El-Saadony, M. T., & Esmael, A. (2022). Utilization of drought-tolerant bacterial strains isolated from harsh soils as a plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(3), 1760-1769.
21. Nadeem, S. M., Zahir, Z. A., Naveed, M., Asghar, H. N., & Arshad, M. (2010). Rhizobacteria capable of producing ACC-deaminase may mitigate salt stress in wheat. *Soil Science Society of America Journal*, 74(2), 533-542.

22. Lyngwi, N. A., & Joshi, S. (2014). Economically important Bacillus and related genera: a mini review. *Biology of useful plants and microbes*, 3, 33-43.
23. Kumar, M., Mishra, S., Dixit, V., Kumar, M., Agarwal, L., Chauhan, P. S., & Nautiyal, C. S. (2016). Synergistic effect of Pseudomonas putida and Bacillus amyloliquefaciens ameliorates drought stress in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Plant signaling & behavior*, 11(1), e1071004.
24. Liu, F., Xing, S., Ma, H., Du, Z., & Ma, B. (2013). Cytokinin-producing, plant growth-promoting rhizobacteria that confer resistance to drought stress in Platycladus orientalis container seedlings. *Applied microbiology and biotechnology*, 97, 9155-9164.
25. Xu, Z., Pan, G., Zhou, H., & Shen, B. (2018). Discovery and characterization of 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid synthase of bacterial origin. *Journal of the American Chemical Society*, 140(49), 16957-16961.
26. Radhakrishnan, R., Kang, S. M., Baek, I. Y., & Lee, I. J. (2014). Characterization of plant growth-promoting traits of Penicillium species against the effects of high soil salinity and root disease. *Journal of Plant Interactions*, 9(1), 754-762.
27. Wanga, S., Wanb, C., Wanga, Y., Chenc, H., Zhou, Z., Fu, H., & Sosebee, R. E. (2004). The characteristics of Na, K and free proline distribution in several drought-resistant plants of the Alxa Desert, China. *Journal of Arid Environments*, 56, 525-539.
28. Aslam, M., Rahman, W. U., Abbas, M., Jafar, H. M. A., Ali, R., Raza, S., Shah, S. A., & Ali, S. (2022). Mitigating the Drought Stress through Potassium Application in Corn. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 26(01), 671-689.
29. Moaaz Ali, M., Javed, T., Mauro, R. P., Shabbir, R., Afzal, I., & Yousef, A. F. (2020). Effect of seed priming with potassium nitrate on the performance of tomato. *Agriculture*, 10(11), 498.
30. Mahmoudi, M., Yousefian, M., Alavi, S. V., & Shahabian, M. (2021). Investigation of Changes in Vegetative Growth, Yield and Qualitative Properties of Thomson Navel Orange Fruit with Emphasis on Optimal Consumption of Manure and Chemical Fertilizers. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 11(1), 27-45.
31. Cochrane, T. T., & Cochrane, T. A. (2009). The vital role of potassium in the osmotic mechanism of stomata aperture modulation and its link with potassium deficiency. *Plant signaling & behavior*, 4(3), 240-243.
32. Bolat, I., Korkmaz, K., Dogan, M., Turan, M., Kaya, C., Seyed Hajizadeh, H., & Kaya, O. (2024). Enhancing drought, heat shock, and combined stress tolerance in Myrobalan 29C rootstocks with foliar application of potassium nitrate. *BMC Plant Biology*, 24(1), 140.
33. Arji, I., Arzani, K., & Ebrahidzadeh, H. (2004). Quantitative study of proline and soluble sugars of five olive (*Olea europaea* L.) cultivars under drought stress conditions.
34. Khaleghi, E. (2012). Response of young olive plants *cv.Dezful'to Kaolin* and water stress and mature olive trees cv.Zard'to Kaolin under specific environmental conditions of Fasa city Ph. D. Thesis.
35. Bakhtiyarifar, M., Enayatizamir, N., & Mehdi Khanlou, K. (2021). Biochemical and molecular investigation of non-rhizobial endophytic bacteria as potential biofertilisers. *Archives of Microbiology*, 203(2), 513-521.
36. Lamizadeh, E., Enayatizamir, N., & Motamedi, H. (2016). Isolation and identification of plant growth-promoting rhizobacteria (*PGPR*) from the rhizosphere of sugarcane in saline and non-saline soil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 5(10), 1072-1083.
37. Pirhadi, M., Enayatizamir, N., Motamedi, H., & Sorkheh, K. (2016).

Screening of salt tolerant sugarcane endophytic bacteria with potassium and zinc for their solubilizing and antifungal activity. *Biosci. Biotechnol. Res. Commun*, 9, 530-538.

38. Gimeno, V., Díaz-López, L., Simón-Grao, S., Martínez, V., Martínez-Nicolás, J., & García-Sánchez, F. (2014). Foliar potassium nitrate application improves the tolerance of Citrus macrophylla L. seedlings to drought conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 83, 308-315.
39. Danaeifar, A., Khaleghi, E., Zivdar, S., & Mehdikhanlou, K. (2023). Physiological, biochemical, and gene expression of Sour Orange (*Citrus aurantium* L.) to Iron (II)-Arginine Chelate under salinity, alkalinity, and salt–alkali combined stresses. *Scientia Horticulturae*, 319, 112146.
40. Ahmed, S., Nawata, E., Hosokawa, M., Domae, Y., & Sakuratani, T. (2002). Alterations in photosynthesis and some antioxidant enzymatic activities of mungbean subjected to waterlogging. *Plant Science*, 163(1), 117-123.
41. Tariq, A., Ahmed, A., & Abdullah, H. (2020). PGPR Biostimulants as Effective Drought Mitigating Agents.
42. Pérez-Montaño, F., Alías-Villegas, C., Bellogín, R., Del Cerro, P., Espuny, M., Jiménez-Guerrero, I., López-Baena, F. J., Ollero, F., & Cubo, T. (2014). Plant growth promotion in cereal and leguminous agricultural important plants: from microorganism capacities to crop production. *Microbiological research*, 169(5-6), 325-336.
43. Ahmad, S., Wang, G. Y., Muhammad, I., Zeeshan, M., & Zhou, X. B. (2022). Melatonin and KNO3 application improves growth, physiological and biochemical characteristics of maize seedlings under waterlogging stress conditions. *Biology*, 11(1), 99.
44. Hassanpouraghdam, M. B., Vojodi Mehrabani, L., Kheiri, M., Chrysargyris, A., & Tzortzakis, N. (2022). Physiological and biochemical responses of *Tanacetum balsamita* L. to the foliar application of Dobogen biostimulant, glucose and KNO_3 under salinity stress. *Scientific reports*, 12(1), 9320.
45. Vurukonda, S. S. K. P., Vardharajula, S., Shrivastava, M., & SkZ, A. (2016). Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological research*, 184, 13-24.
46. Farooqi, Z. U. R., Ayub, M. A., ur Rehman, M. Z., Sohail, M. I., Usman, M., Khalid, H., & Naz, K. (2020). Regulation of drought stress in plants. In *Plant life under changing environment* (pp. 77-104). Elsevier.
47. Fawzy, Z., El-Nemr, M., & Saleh, S. (2007). Influence of levels and methods of potassium fertilizer application on growth and yield of eggplant.
48. Arafa, S. A., Attia, K. A., Niedbała, G., Piekutowska, M., Alamery, S., Abdelaal, K., Alateeq, T. K., AM Ali, M., Elkelish, A., & Attallah, S. Y. (2021). Seed priming boost adaptation in pea plants under drought stress. *Plants*, 10(10), 2201.
49. Akhtar, N., Ilyas, N., Hayat, R., Yasmin, H., Noureldeen, A., & Ahmad, P. (2021). Synergistic effects of plant growth promoting rhizobacteria and silicon dioxide nano-particles for amelioration of drought stress in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 166, 160-176.
50. Skirycz, A., & Inzé, D. (2010). More from less: plant growth under limited water. *Current opinion in biotechnology*, 21(2), 197-203.
51. Ngumbi, E., & Kloepper, J. (2016). Bacterial-mediated drought tolerance: current and future prospects. *Applied Soil Ecology*, 105, 109-125.
52. Faizan, M., Hayat, S., & Pichtel, J. (2020). Effects of zinc oxide nanoparticles on crop plants: A perspective analysis. *Sustainable Agriculture Reviews 41: Nanotechnology for Plant Growth and Development*, 83-99.

53. Chaves, M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of botany*, 103(4), 551-560.
54. Lawlor, D. W., & Tezara, W. (2009). Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. *Annals of botany*, 103(4), 561-579.
55. Drake, J. E., Power, S. A., Duursma, R. A., Medlyn, B. E., Aspinwall, M. J., Choat, B., Creek, D., Eamus, D., Maier, C., & Pfautsch, S. (2017). Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis for four tree species under drought: A comparison of model formulations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 454-466.
56. Liu, F., Ma, H., Peng, L., Du, Z., Ma, B., & Liu, X. (2019). Effect of the inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria on the photosynthetic characteristics of Sambucus williamsii Hance container seedlings under drought stress. *AMB Express*, 9, 1-9.
57. Bellasio, C., Quirk, J., & Beerling, D. J. (2018). Stomatal and non-stomatal limitations in savanna trees and C4 grasses grown at low, ambient and high atmospheric CO_2. *Plant Science*, 274, 181-192.
58. Hönig, M., Plíhalová, L., Husičková, A., Nisler, J., & Doležal, K. (2018). Role of cytokinins in senescence, antioxidant defence and photosynthesis. *International journal of molecular sciences*, 19(12), 4045.
59. Chernyad'Ev, I. (2000). Ontogenetic changes in the photosynthetic apparatus and effects of cytokinins. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 36, 527-528.
60. Kang, S., Zhang, L., Liang, Y., Hu, X., Cai, H., & Gu, B. (2002). Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural water management*, 55(3), 203-216.
61. Ouledali, S., Ennajeh, M., Ferrandino, A., Khemira, H., Schubert, A., & Secchi, F. (2019). Influence of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the control of stomata functioning by abscisic acid (ABA) in drought-stressed olive plants. *South African Journal of Botany*, 121, 152-158.
62. Brilli, F., Pollastri, S., Raio, A., Baraldi, R., Neri, L., Bartolini, P., Podda, A., Loreto, F., Maserti, B. E., & Balestrini, R. (2019). Root colonization by Pseudomonas chlororaphis primes tomato (*Lycopersicum esculentum*) plants for enhanced tolerance to water stress. *Journal of plant physiology*, 232, 82-93.
63. Muhammad Zafar-ul-Hye, M. Z. U. H., Farooq, H. M., Zahir, Z. A., Mubshar Hussain, M. H., & Amjad Hussain, A. H. (2014). Application of ACC-deaminase containing rhizobacteria with fertilizer improves maize production under drought and salinity stress.
64. Barnawal, D., Bharti, N., Pandey, S. S., Pandey, A., Chanotiya, C. S., & Kalra, A. (2017). Plant growth-promoting rhizobacteria enhance wheat salt and drought stress tolerance by altering endogenous phytohormone levels and TaCTR1/TaDREB2 expression. *Physiologia plantarum*, 161(4), 502-514.
65. Salem, A., Khandaker, M. M., Mahmud, K., Alsufyani, S. J., Majrashi, A. A., Rashid, Z. M., Alenazi, M. M., Osman, N., & Badaluddin, N. A. (2024). Enhancing photosynthesis and root development for better fruit quality, aroma, and lessening of radioactive materials in key lime (*Citrus aurantifolia*) using *Trichoderma harzianum* and *Bacillus thuringiensis*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 206, 108295.
66. Tahira Abbas, T. A., Saeed Ahmad, S. A., Muhammad Ashraf, M. A., Shahid, M., Muhammad Yasin, M. Y., Balal, R., Pervez, M., & Sumaira Abbas, S. A. (2013). Effect of humic and application at different growth stages of

kinnow mandarin (*Citrus reticulata Blanco*) on the basis of physio-biochemical and reproductive responses.

67. Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International journal of molecular sciences*, 14(4), 7370-7390.
68. Egamberdieva, D., Wirth, S. J., Alqarawi, A. A., Abd_Allah, E. F., & Hashem, A. (2017). Phytohormones and beneficial microbes: essential components for plants to balance stress and fitness. *Frontiers in microbiology*, 8, 2104.
69. Cakmak, I. (2005). The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(4), 521-530.
70. Battie-Laclau, P., Delgado-Rojas, J. S., Christina, M., Nouvellon, Y., Bouillet, J. P., de Cassia Piccolo, M., Moreira, M. Z., de Moraes Goncalves, J. L., Roupsard, O., & Laclau, J. P. (2016). Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in Eucalyptus grandis plantations. *Forest Ecology and Management*, 364, 77-89.
71. Battie-Laclau, P., Laclau, J. P., Piccolo, M. d. C., Arenque, B. C., Beri, C., Mietton, L., Muniz, M. R. A., Jordan-Meille, L., Buckeridge, M. S., & Nouvellon, Y. (2013). Influence of potassium and sodium nutrition on leaf area components in Eucalyptus grandis trees. *Plant and soil*, 371, 19-35.
72. Schulze, E. D., Turner, N. C., Nicolle, D., & Schumacher, J. (2006). Leaf and wood carbon isotope ratios, specific leaf areas and wood growth of Eucalyptus species across a rainfall gradient in Australia. *Tree Physiology*, 26(4), 479-492.
73. Müller, H. M., Schäfer, N., Bauer, H., Geiger, D., Lautner, S., Fromm, J., Riederer, M., Bueno, A., Nussbaumer, T., & Mayer, K. (2017). The desert plant Phoenix dactylifera closes stomata via nitrate-regulated SLAC 1 anion channel. *New Phytologist*, 216(1), 150-162.
74. Shao, H. B., Chu, L. Y., Jaleel, C. A., Manivannan, P., Panneerselvam, R., & Shao, M. A. (2009). Understanding water deficit stress-induced changes in the basic metabolism of higher plants–biotechnologically and sustainably improving agriculture and the ecoenvironment in arid regions of the globe. *Critical reviews in biotechnology*, 29(2), 131-151.
75. Chieb, M., &Gachomo, E. W. (2023). The role of plant growth promoting rhizobacteria in plant drought stress responses. *BMC plant biology*, 23(1), 407.
76. Wang, C. J., Yang, W., Wang, C., Gu, C., Niu, D. D., Liu, H. X., Wang, Y. P., & Guo, J. H. (2012). Induction of drought tolerance in cucumber plants by a consortium of three plant growth-promoting rhizobacterium strains. *Plos one*, 7(12), e52565.