DOI: 10.29252/ARIDBIOM.2026.4057

بررسی تلقیح بذر با باکتری‌های محرک رشد گیاه بر خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه گلرنگ تحت تنش همزمان خشکی و گردوغبار (مقالهٔ پژوهشی)

۱- حمیدگل‌آرایی، دانشجوی دکتری، گروه مدیریت بیابان، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
۲- اصغر مصلح‌آرانی*، استاد گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.
amosleh@yazd.ac.ir
۳- حسن اعتصامی، استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی کرج، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
۴- رضا دهقانی‌بیدگلی، دانشیارگروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی ، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

چکیده

این مطالعه به‌بررسی تأثیر دو باکتری محرک رشد گیاه *Bacillus amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* بر صفات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکردی گیاه گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) تحت تنش خشکی و گردوغبار می‌پردازد. آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با تیمارهای مختلف شامل تلقیح انفرادی و ترکیبی دو باکتری، آبیاری در سه سطح دوره آبیاری (۴، ۶ و ۸ روز یکبار) و گردوغبار در دو سطح (بدون گردوغبار و ۵/۹۵ گرم‌برمترمربع در هفته) اجرا شد. نتایج نشان‌داد که تاثیر همزمان خشکی و گردوغبار بر روی گلرنگ مخربتر از تاثیر هرکدام به‌تنهایی بود. در این میان گردوغبار تاثیر منفی کمتری نسبت‌به خشکی بر گیاه گلرنگ داشت. خشکی موجب کاهش جذب نیتروژن (۴۴ درصد)، قندهای محلول (۳۲)، وزن بذر در هر پایه (۸۰ درصد) و وزن خشک گلرنگ (۵۵ درصد) و افزایش فنل (۳۴ درصد)، پرولین (۴۱ درصد) و کاروتنوئید (۳۲ درصد) شد. در مقابل گردوغبار فقط مقدار فسفر و قندهای محلول گلرنگ را کاهش و اسید آسکوربیک و فنل را افزایش داد. تلقیح باکتریایی در اغلب موارد موجب بهبود شرایط فیزیولوژیکی و عملکردی گلرنگ شد، در این میان ترکیب دو باکتری عملکرد بهتری نسبت‌به تلقیح انفرادی باکتری‌ها در اغلب صفات اندازه‌گیری‌شده داشت. درحالیکه *B. halotolerans* و ترکیب دو باکتری، عملکرد بهتری در افزایش وزن بذر گلرنگ داشتند، وزن خشک گیاه با تلقیح *B. amyloliquefaciens* افزایش بیشتری یافت. یافته‌های این تحقیق بر اهمیت استفاده از ترکیب همزمان باکتری‌های محرک رشد گیاه به عنوان راهکاری زیستی پایدار برای بهبود رشد گیاهانی که اغلب با چندین تنش روبرو هستند تأکید دارد.

واژگان کلیدی: باکتری‌های محرک رشد گیاه، خشکی، گردوغبار، اسید آسکوربیک.

مقدمه

دانه‌های روغنی به‌عنوان یکی از منابع مهم در تغذیه انسانی و صنایع مختلف کشاورزی و صنعتی در جهان نقش بسزایی دارند. با توجه به محدودیت منابع آبی و افزایش تقاضا برای محصولات غذایی، توسعه کشت دانه‌های روغنی مقاوم به تنش‌های محیطی از اولویت‌های استراتژیک کشورها محسوب می‌شود [۱۰]. گلرنگ یک گیاه یک‌ساله علفی از تیره‌ی کاسنی است که به‌عنوان یک محصول روغنی، دارویی، رنگ‌زا و صنعتی در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان کشت می‌شود. در سال‌های اخیر، به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر مقاومت نسبی به تنش‌های محیطی، گلرنگ به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای کشاورزی پایدار در مناطق خشک و نیمه خشک معرفی شده است [۳۸]. روغن گلرنگ

عمدتاً حاوی اسیدهای چرب غیراشباع اسید لینولئیک و اسید اولئیک و اسیدهای چرب اشباع اسید استئاریک و اسید پالمیتیک است [۳۰].

تنش خشکی به‌عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده گیاهان، باعث کاهش جذب مواد غذایی، بسته شدن روزنه‌ها، کاهش فعالیت فتوسنتزی و در نهایت کاهش رشد و عملکرد محصول می‌شود [۴۰]. همچنین، خشکی با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن باعث آسیب اکسیداتیو و تخریب‌سلولی می‌شود[۴۸]. گردوغبار به‌عنوان یک تنش‌محیطی مکمل در مناطق خشک و بیابانی به‌علت وزش باد و فعالیت‌های انسانی افزایش‌یافته است. گردوغبار می‌تواند سطح برگ‌ها را بپوشاند، روزنه‌ها را مسدود کند، انتقال نور را کاهش دهد و تبادلات گازی را محدود سازد که این امر باعث تشدید تنش خشکی می‌شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اثر همزمان چند تنش بر صفات فیزیولوژیکی گیاهان بیشتر از تاثیر هرکدام به‌تنهایی است [۴۱].

اگرچه هیچ پژوهشی اثر گردوغبار را بر گیاه گلرنگ مورد بررسی قرار نداده است، (و این تحقیق برای سایر گیاهان زراعی هم انگشت شمار است)، اما اثرات منفی تاثیر خشکی بر روی گیاه گلرنگ گزارش شده است. در بررسی پاسخ فیزیولوژیکی ژنوتیپ‌های گندم تحت شرایط گردوغبار نشان داده شد که تنش گردوخاک بر تمامی صفات اندازه‌گیری شده، تأثیر معنی‌داری داشت. در اثر اعمال این تنش فاکتورهای محتوای نسبی آب برگ، نشت یونی، پایداری غشاء، پروتئین، کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید کاهش و فقط پرولین افزایش یافت [۲]. در پژوهشی تاثیر خشکی بر صفات بیوشیمیایی و فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی گلرنگ با استفاده از ۱۰۰ ژنوتیپ در شرایط مزرعه بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان‌داد که تنش خشکی باعث افزایش برگشت‌پذیر فنول‌های کل، فلاونوئیدهای کل، فلاونول‌های کل، آنتوسیانین کل، پرولین، مالون‌دی‌آلدئید و فعالیت آنتی‌اکسیدانی شد، اما محتوای کلروفیل کل و کاروتنوئید کل را در گلرنگ کاهش یافت [۱۹]. نتایج همچنین نشان‌داد که واریانس ژنتیکی بالا منجر به وراثت‌پذیری بالای صفات بیوشیمیایی تحت تنش خشکی می‌شود و در نتیجه تحمل به خشکی را در گلرنگ کشت شده در مناطق مستعد خشکسالی بهبود می‌بخشد. تنوع ژنتیکی قابل توجه در تمام صفات بیوشیمیایی نشان‌داد که این صفات، به‌ویژه فنل‌های کل و فلاونوئیدهای کل می‌توانند به‌عنوان معیارهای غربالگری برای انتخاب ژنوتیپی در آب و هوای خشک مورد استفاده قرار گیرند [۱۹]. در پژوهشی دیگر شاخص سطح برگ، محتوای کلروفیل و شاخص‌های پایداری غشاء در گیاه گلرنگ به‌شدت تحت تأثیر شرایط کمبود آب قرار گرفت و افزایش قابل توجهی در ترکیبات آنتی‌اکسیدانی، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز ایجاد شد [۲۷].

تلاش‌های زیادی در زمینه‌ی توسعه راهکارهای پایدار برای افزایش مقاومت گیاهان نسبت‌به تنش‌های محیطی در حال اجراست. استفاده از روش‌های نوین اصلاح نباتات، اصلاح خاک و فناوری‌های زیستی به یکی از اولویت‌های مهم پژوهشی در سطح جهانی تبدیل شده است. به‌دلیل اهمیت گلرنگ راهکارهای متعددی برای افزایش محصول و تحمل گیاه به تنش خشکی انجام شده است. در سال‌های اخیر استفاده از تکنیک‌های زیست‌فناوری و تلقیح با میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه برای افزایش تحمل به تنش‌ها به‌طور گسترده ای بکار رفته است [۴۲]. ریزوسفر گیاه که محل تجمع میکروارگانیسم‌های مفید است، نقش مهمی در حفظ سلامت و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌ها دارد. باکتری‌های محرک رشد گیاه از گروه‌های مهم میکروارگانیسم‌ها هستند که با تأثیر بر رشد و مقاومت گیاهان، نقش مؤثری در افزایش عملکرد دارند [۱۵]. این باکتری‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند تولید هورمون‌های رشد (اکسین، سیتوکینین، جیبرلین)، تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات، تولید آنزیم ACC دی‌آمیناز جهت کاهش استرس اتیلن، تولید سیدروفورها و افزایش جذب عناصر غذایی،

موجب بهبود رشد ریشه و اندام هوایی می‌شوند [۳۱،۳]. در پژوهشی نشان داده شد که بیشترین وزن تر ساقه، وزن تر و خشک ریشه و افزایش جوانه‌زنی بذرها به‌ترتیب با باکتری *Pseudomonas fluorescens* و *Bacillus muralis* بدست آمد [۵۷].

سویه‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* به‌دلیل سازگاری با شرایط بیابانی و توانایی تولید اسپور، مقاومت بالا در برابر شرایط نامساعد محیطی و تولید متابولیت‌های ضدباکتری و ضدقارچ، به‌عنوان باکتری‌های محرک رشد مؤثر شناخته شده‌اند. تاثیر باکتری *B. amyloliquefaciens* بر روی رشد گیاه یونجه تحت شرایط تنش خشکی بررسی شد. کاربرد این باکتری به‌طور قابل توجهی طول کل ریشه، قطر متوسط ریشه و محتوای پتاسیم و آهن را در برگ‌ها، ریشه‌ها و خاک یونجه تحت شرایط تنش خشکی افزایش داد. کاهش قابل توجهی همچنین در محتوای سدیم در برگ‌ها و خاک یونجه تحت تیمار *B. amyloliquefaciens* مشاهده شد. به‌طور کلی، نتیجه‌گیری شد که *B. amyloliquefaciens* می‌تواند به‌عنوان یک کود زیستی بالقوه در کشاورزی پایدار برای بهبود مواد مغذی خاک و افزایش تولید گیاه در شرایط خشکسالی عمل کند [۲۰]. نتایج مثبت مشابه در مطالعات دیگر نیز نشان‌داده شده است [۴، ۶۸، ۹ ، ۶۳].

با توجه به خشکسالی در سال‌های اخیر، شکل‌گیری کانون‌های گردوغبار به‌شدت افزایش‌یافته است، به‌طوریکه این دو رخداد با همبستگی بالا، به‌طور همزمان در مناطق خشک و نیمه خشک بروز کرده و کشاورزی را تحت تاثیر قرار داده است [۱۸].

هیچ تحقیقی که تاثیر توام خشکی و ریزگرد را بر روی گلرنگ بررسی گرده باشد وجود ندارد. از آنجا که بذر این گیاهان محصول نهایی و هدف اصلی کشت است، حفظ و بهبود عملکرد بذر تحت تنش‌های خشکی و گردوغبار از اهمیت حیاتی برخوردار است. در این راستا، با توجه به اهمیت دانه های روغنی، این پژوهش با هدف بررسی کارآیی و نقش باکتری‌های محرک رشد مقاوم به خشکی *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* بر روی برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک گونه گلرنگ تحت تنش خشکی و گردوغبار در شرایط مزرعه انجام شد.

مواد و روش‌ها

کشت و اعمال تیمار

در این پژوهش تاثیر سویه‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* بر خصوصیات فیزیولوژیک و مورفولوژیک گونه گلرنگ تحت تنش خشکی و گردوغبار به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی بررسی شد. به این منظور ۲۴ کرت ۱ مترمربعی در مزرعه منصور در شهرستان آران و بیدگل آماده شد. جدول ۱ آمار اقلیمی منطقه محل کشت را نشان می‌دهد. تیمارهای این تحقیق شامل فاکتور اول: باکتری محرک رشد گیاه (در چهار سطح شامل شاهد، تلقیح با باکتری *B. amyloliquefaciens* ، تلقیح با باکتری *B. halotolerans* و تلقیح همزمان با دو باکتری)، فاکتور دوم: سطوح مختلف آبیاری (در سه سطح با دوره آبیاری ۴، ۶ و ۸ روزه)، و فاکتور سوم: گردوغبار (در دو سطح بدون گردوغبار و اعمال گردوغبار) صورت گرفت.

جدول ۱- آمار اقلیمی منطقه کشت

	بارش ماهانه (میلی‌متر)	درجه حرارت میانگین (سانتی‌گراد)	رطوبت میانگین (٪)	تبخیر ماهانه (میلی‌متر)	میانگین سرعت باد بیشینه (متربرثانیه)	تعدا روزهای بارانی
فروردین	۴/۶	۱۹/۳	۳۳	۲۵۹	۹	۳

اردیبهشت	۲	۲۴/۵	۲۳	۳۴۴	۱۱۱	۲
خرداد	۱/۴	۳۰/۸	۲۲	۴۴۲	۱۰	۴
تیر	۰/۱	۳۳/۹	۱۷	۴۶۱	۹	۲

تیمار باکتری

دو نوع باکتری محرک رشد گیاه *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* و همچنین ترکیب این دو سویه به‌نسبت ۱:۱ برای این آزمایش در نظر گرفته شد. سویه‌های این دو باکتری از مرکز کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب چهار سطح سوسپانسیون باکتریایی با غلظت نهایی 3×10^{8} CFU/mL شامل (شاهد، سوسپانسیون بدون باکتری، سوسپانسیون با سویه *B. amyloliquefaciens*، سوسپانسیون با سویه *B. halotolerans* و سوسپانسیون حاوی هر دو سویه) تهیه شد. بذور سالم گلرنگ که از اداره جهاد کشاورزی تهیه شده بود قبل از کشت به‌مدت دو ساعت در مایه تلقیح قرار گرفت. ۱۶ عدد بذر تلقیح شده در هر کرت با فواصل یکسان کشت و طبق طرح آبیاری گردید.

اعمال سطوح آبیاری

آزمایش در بهار سال ۱۴۰۳ با تسطیح زمین کشاورزی رها شده شروع شد. جهت بررسی دقیق‌تر اثر باکتری‌های محرک رشد گیاه در حین آزمایش یا قبل از آزمایش از هیچ کودی استفاده نشد. در هر کرت یک مترمربعی تعداد ۱۶ بذر (هر کدام به‌عنوان یک تکرار) کاشته شد. این تعداد براساس تحقیق سایر محققان است که نشان دادند با این تراکم بیشترین محصول گلرنگ بدست می‌آید [۴۸]. بذرها در فواصل ۲۵ سانتی‌متری در چهار ردیف کشت شدند. آبیاری نهال‌ها براساس شرایط اقلیمی منطقه هر ۴ روز یکبار، به‌عنوان شاهد (مطابق با عرف زارعین محلی)، آبیاری ۶ روزه به‌عنوان کم آبیاری متوسط، آبیاری ۸ روزه به‌عنوان اعمال کم آبیاری شدید اعمال گردید. آبیاری تا زمان استقرار نهال‌ها (یک‌ماه بعد از کاشت) هر ۴ روزه یکبار انجام شد.

اعمال تیمار گردوغبار

با توجه به منشاءیابی انجام شده و تعیین کانون‌های بحرانی گردوغبار استان اصفهان –شهرستان آران و بیدگل، برای تهیه گردوغبار از نمونه خاک کانون گردوغبار استفاده شد [۴۹]. از آنجایی‌که اندازه ذرات گردوغبار اندازه‌گیری شده در استان اصفهان بین ۱ میکرومتر تا ۱۰۰ میکرومتر می‌باشد، مقداری از نمونه خاک‌های منطقه برداشته و داخل دستگاه الک ریخته شده و از ذرات زیر ۱۰۰ میکرومتر برای اعمال ریزگرد استفاده شد. براساس مطالعه‌ی میدانی انجام‌شده در منطقه‌ی بیابانی کاشان (دشت مرنجاب)، میزان رسوب گردوغبار ریزشی بر سطح برگ‌های گیاه *Smirnovia iranica* در بازه‌ی زمانی (آوریل تا ژوئن) مطابق با اواسط فروردین تا اوایل تیر، بین۰/۵۷ تا ۰/۱۱۳ میلی‌گرم بر سانتی‌مترمربع در روز گزارش شده است؛ که معادل ۰/۵۷ تا ۱/۱۳ گرم بر مترمربع در روز می‌باشد [۴۹]. با توجه به این‌که دوره‌ی اجرای آزمایش حاضر نیز در همین بازه‌ی زمانی انجام شده، مقدار گرد و غبار اعمال‌شده بر پایه‌ی همین مقادیر منطقه‌ای تعیین گردید. بدین منظور مقدار مشخص از گردوغبار به‌صورت هفتگی وزن و توسط بلوور دمنده به داخل پلاستیک مکعب شکل (برابر با ابعاد هر کرت) که بدین منظور ساخته شده بود دمیده شد. لازم بذکر است که مقدار گرد و غبار براساس سطح کرت مورد استفاده محاسبه و در داخل پلاستیک مکعب شکل دمیده شد.

نمونه‌برداری از برگ گیاه گلرنگ جهت آنالیز فاکتورهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی قبل از تشکیل گل و وزن دانه و اندازه‌گیری صفات رویشی و زایشی گیاه گلرنگ بعد از برداشت گیاه انجام شد.

اندازه‌گیری فاکتورهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی

برای اندازه‌گیری کلروفیل از روش لیختنتالر [۳۴]، اندازه‌گیری اسید آسکوربیک از روش اسمیرنوف [۶۱]، اندازه‌گیری فنل کل از روش سوان و هیل [۶۲]، اندازه‌گیری پرولین روش بیتز [۸]، اندازه‌گیری قندهای محلول روش کوچرت [۲۹]، برای اندازه‌گیری محتوای یونی از روش والینگ [۶۶،۱۱] استفاده شد.

محاسبات آماری

به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده از نرم‌افزار SPSS استفاده شد و نمودارها نیز در نرم‌افزار Excel رسم گردید. پس از اطمینان از نرمال‌بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف - اسمیرنوف، اختلاف بین سطوح مختلف تیمارها به صورت آنالیز داده‌ها با آزمون تجزیه واریانس و در نهایت مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن (α=۰/۰۵) بررسی گردید.

نتایج

بررسی خصوصیات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی

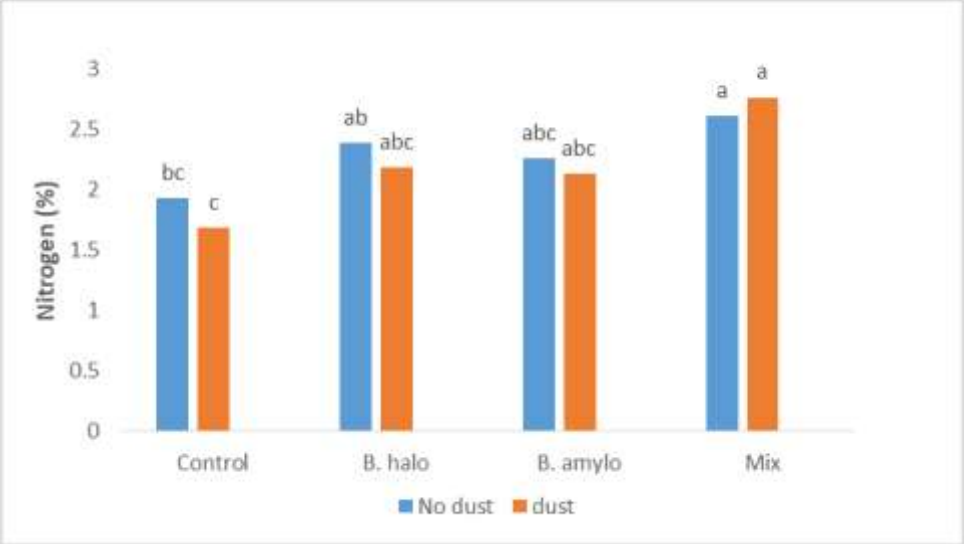
نتایج تجزیه واریانس نشان‌داد که برهمکنش باکتری × گردوغبار × خشکی بر مقدار کلسیم، فنل، فسفر، قندهای محلول، پرولین و کلروفیل b، برهمکنش باکتری × گردوغبار بر مقدار اسید آسکوربیک، کاروتنوئید و نیتروژن ، برهمکنش باکتری × خشکی بر غلظت کاروتنوئید و نیتروژن و برهمکنش گرد و غبار × خشکی بر غلظت کاروتنوئید در برگ گلرنگ معنی‌دار بود. سایر صفات اندازه‌گیری شده معنی‌دار نبودند.

جدول۲- آنالیز واریانس صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاه گلرنگ

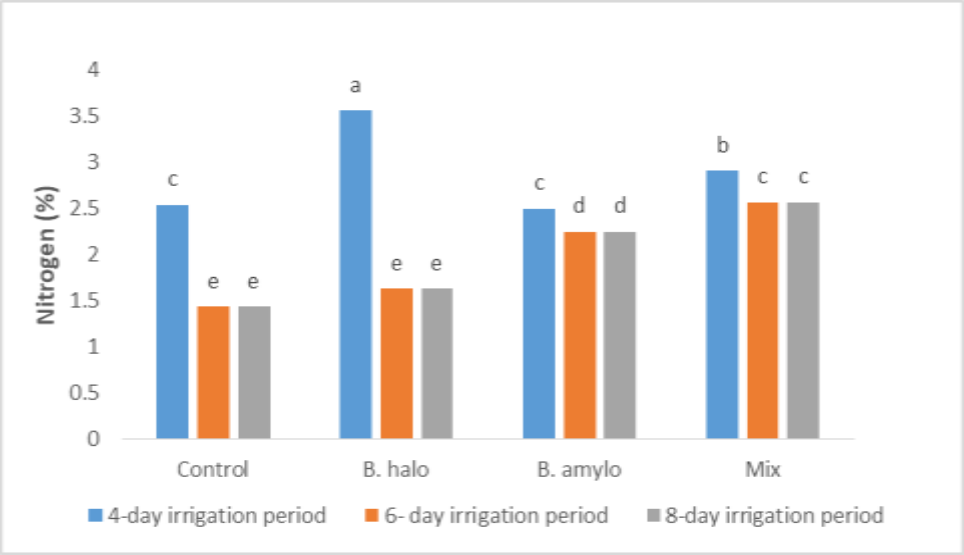
	نیتروژن	وزن دانه	اسید آسکوربیک	فنل کل	پتاسیم	کلسیم	فسفر	قندهای محلول	پرولین	کارتنوئید	کلروفیل کل	کلروفیل b	کلروفیل a	وزن خشک گیاه
باکتری	۲/۳**	۳۰**	۴**	۴**	۰/۲**	۰/۰۴**	۱**	۳۰۲۴**	۰/۰۴**	۰/۱**	۲**	۰/۲**	۱**	۹۶**
گردوغبار	۰/۲**	۲/۸**	۴**	۸**	۰/۰۴ns	۰/۰۰۲ns	۱/۶**	۱۷۶۰**	۰/۰۱**	۰/۱**	۰/۹۶**	۰/۰۵**	۰/۶**	۵۶**
آبیاری	۵**	۲۲۶**	۲/۷**	۷**	۰/۰۴**	۰/۰۷**	۰/۲۹**	۴۷۹۸**	۰/۰۴**	۰/۱۷**	۳/۶**	۰/۰۲**	۳/۶**	۳۴۳**
بلوک	۰/۰۳ns	۰/۱ns	۴/۵**	۰/۰۲ns	۰/۰۲ns	۰/۰۲**	۰/۰۱ns	۳۰ns	۰/۰۰۲**	۰/۰۰۳ns	۰/۵**	۰/۰۲**	۰/۳**	۲/۷ns
B*D	۰/۱۴**	۰/۸**	۱/۷**	۱**	۰/۰۰۸ns	۰/۰۳**	۰/۲**	۴۹۹**	۰/۰۱**	۰/۰۹**	۰/۰۳ns	۰/۰۰۱ns	۰/۰۲ns	۳۷**
B*I	۱/۷**	۵**	۰/۸*	۰/۳۶**	۰/۰۲ns	۰/۰۰۹*	۰/۰۳*	۱۱۴*	۰/۰۰۹**	۰/۰۱*	۰/۰۷ns	۰/۰۱**	۰/۰۶ns	۱۲**
D*I	۰/۰۰۳ns	۰/۲ns	۰/۲ns	۰/۸**	۰/۰۵ns	۰/۲**	۰/۰۳*	۱۸۵**	۰/۰۰۲ns	۰/۰۴**	۰/۰۷ns	۰/۰۰۷**	۰/۰۵ns	۰/۰۳ ns
B*D*I	۰/۰۱ns	۰/۸*	۰/۰۶ns	۰/۳**	۰/۰۴ns	۰/۰۰۹*	۰/۰۷**	۱۸۵**	۰/۰۰۲*	۰/۰۰۳ns	۰/۰۳ns	۰/۰۰۶**	۰/۰۵ns	۱/۴ns
خطا	۰/۰۳۵	۰/۳۵	۰/۲۶	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۹	۳۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۳۵	۱

نیتروژن

نتایج نشان‌داد اعمال گردوغبار اختلاف معنی‌داری در میزان نیتروژن در هیچکدام از تیمارها ایجاد نکرد. کاربرد همزمان دو باکتری مقدار نیتروژن را در شرایط ریزگرد یا بدون ریزگرد به‌ترتیب ۶۴ و ۳۵ درصد نسبت‌به شرایط بدون باکتری افزایش داد. نتایج همچنین نشان‌داد که با کاهش آبیاری به ۶ و ۸ روز یک بار، مقدار نیتروژن در شرایط بدون باکتری کاهش معنی‌داری به میزان ۴۴ درصد داشت. در دوره آبیاری ۶ و ۸ روزه *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری مقدار نیتروژن را به‌طور معنی‌داری نسبت‌به شاهد بدون باکتری افزایش دادند (شکل ۱و۲).



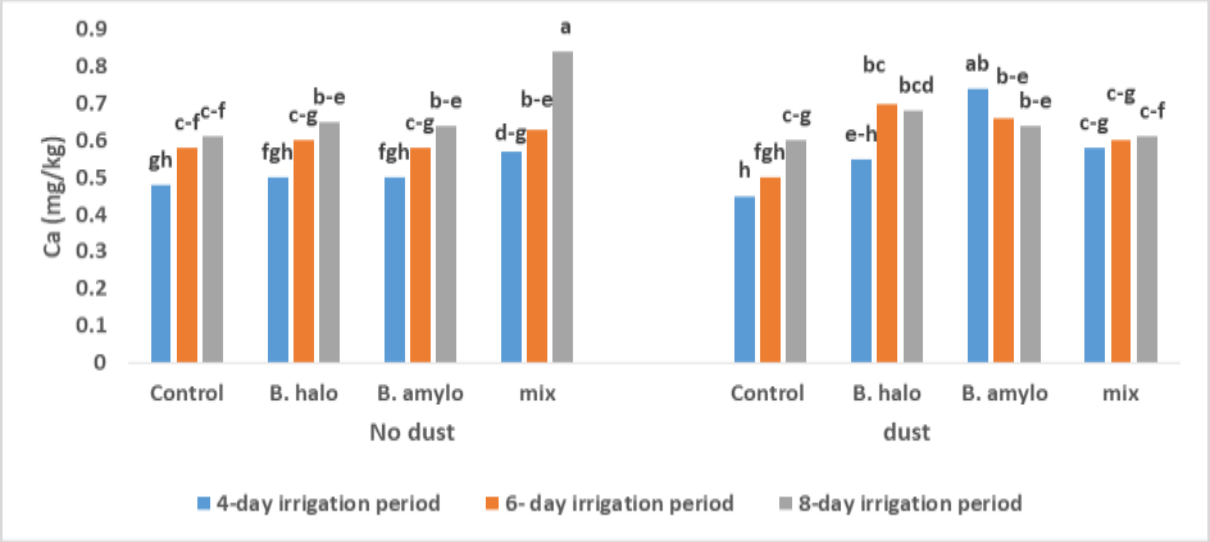
شکل۱- تاثیر متقابل باکتری و گردوغبار بر نیتروژن برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).



شکل۲- تاثیر متقابل باکتری و خشکی بر نیتروژن برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

کلسیم

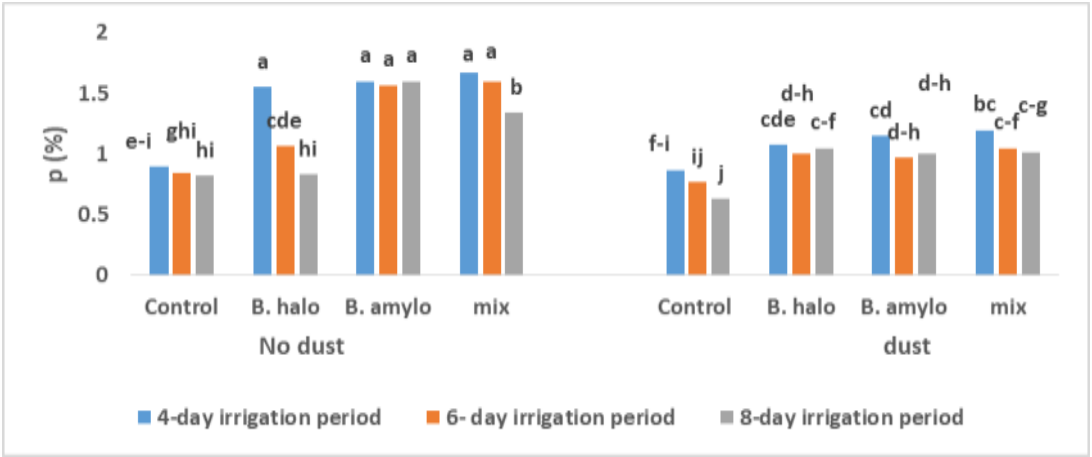
نتایج نشان‌داد که افزایش دوره آبیاری از ۴ به ۸ روز، به‌طور معنی‌داری مقدار غلظت کلسیم برگ را در تیمار بدون حضور ریزگرد افزایش داد. کاربرد همزمان دو باکتری در آبیاری ۸ روزه موجب افزایش ۳۸ درصدی غلظت کلسیم در تیمار بدون ریزگرد نسبت به شاهد بدون باکتری شد. در شرایط حضور ریزگرد، استفاده از *B. halotolerans* در آبیاری ۶ روزه (افزایش ۴۰ درصدی کلسیم)، *B. amyloliquefaciens* دوره‌های آبیاری ۴ و ۶ روزه (افزایش ۶۴ و ۳۲ درصدی کلسیم) و ترکیب دو باکتری نیز در آبیاری ۴ روزه، افزایش ۲۹ درصدی کلسیم را نسبت‌به شرایط بدون باکتری ایجاد کرد (شکل ۳).



شکل۳- تاثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر مقدارکلسیم برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

فسفر

نتایج نشان‌داد که در شرایط بدون باکتری مقدار فسفر تحت تاثیر ریزگرد در آبیاری ۸ روزه، کاهش معنی‌داری یافت. در شرایط بدون ریزگرد *B. halotolerans* باعث افزایش معنی‌دار ۷۲ و ۲۶ درصدی فسفر در دوره آبیاری 4 و 6 روزه نسبت‌به شرایط بدون باکتری شد. *B. amyloliquefaciens* و کاربرد همزمان دو باکتری در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش معنی‌دار فسفر در هر سه دوره آبیاری گردید. در شرایط اعمال ریزگرد تلقیح باکتریایی سبب افزایش معنی‌دار فسفر در هر سه دوره آبیاری گردید (شکل ۴).

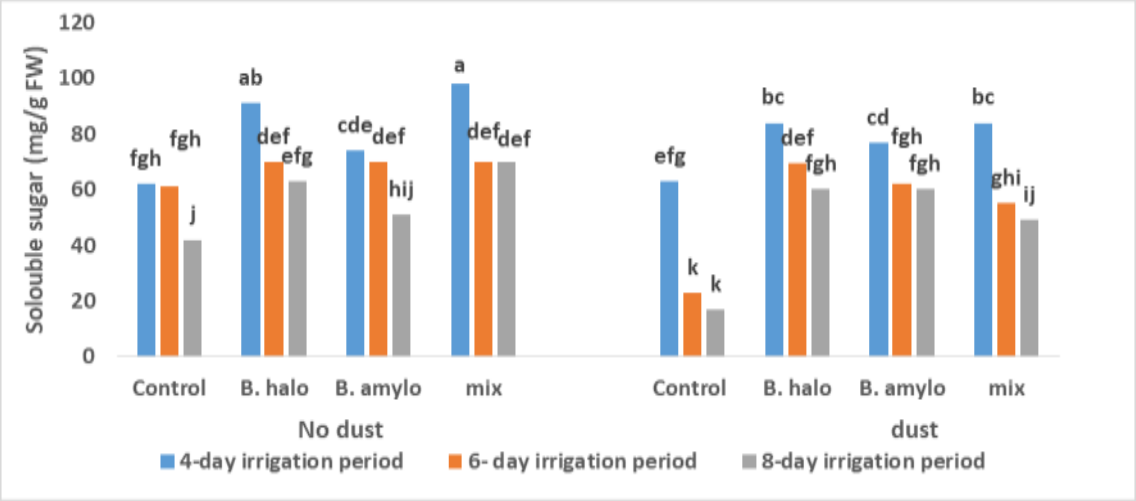


شکل ۴- تاثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر فسفر برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

قندهای محلول

نتایج نشان‌داد اعمال ریزگرد و افزایش دوره آبیاری از ۴ به ۸ روز باعث کاهش معنی‌دار قندهای محلول در شرایط بدون باکتری گردید. دو باکتری و ترکیب دو باکتری در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش قندهای محلول در دوره آبیاری ۴ روزه شد. تلقیح باکتریایی در شرایط اعمال ریزگرد باعث افزایش قندهای محلول در هر ۳ دوره آبیاری شد. اعمال ریزگرد در شرایط کاربرد ترکیب دو باکتری در هر سه دوره آبیاری،

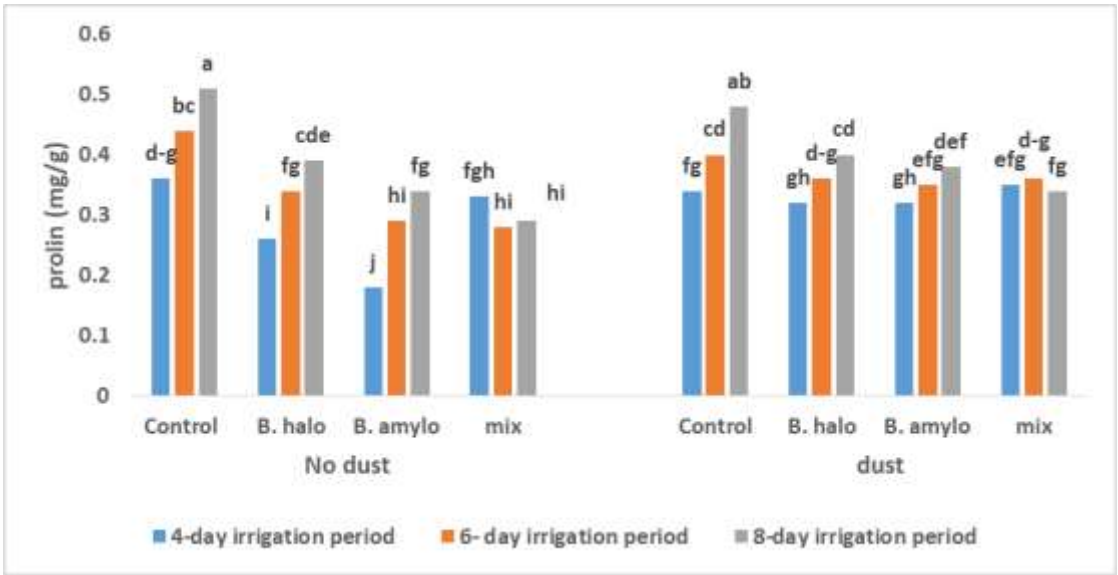
باعث کاهش معنی‌دار قندهای محلول نسبت‌به شرایط بدون ریزگرد شد (شکل ۵).



شکل۵- تاثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر قندهای محلول برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

پرولین

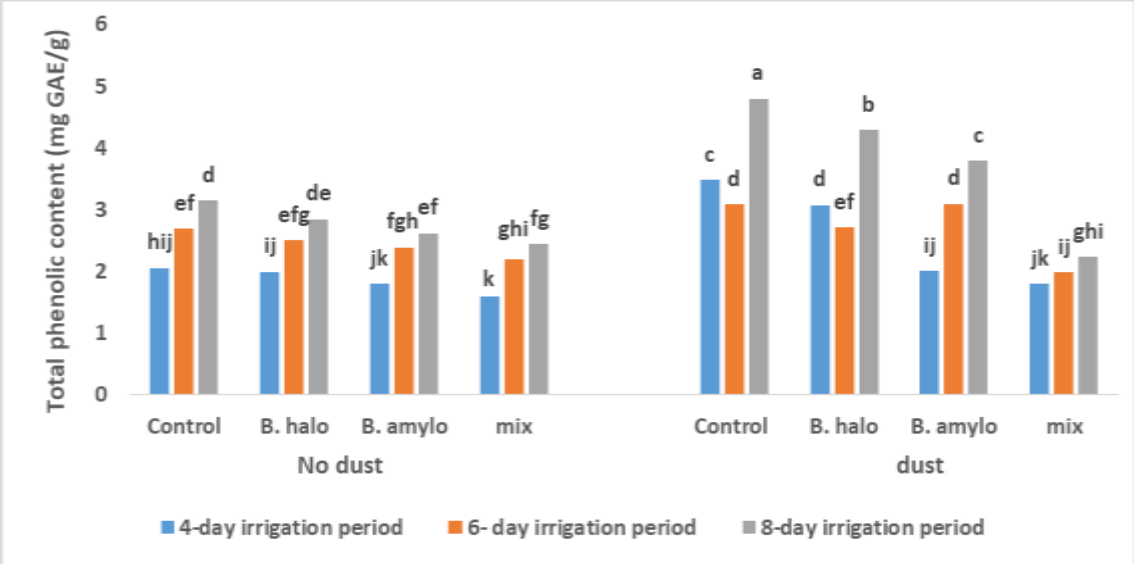
نتایج نشان‌داد که مقدار پرولین تحت تاثیر کم آبیاری افزایش در مقابل ریزگرد به‌تنهایی مقدار پرولین را در شرایط بدون باکتری تغییر نداد. تلقیح باکتریایی در شرایط اعمال ریزگرد باعث کاهش پرولین در دوره آبیاری ۸ روزه گردید. تلقیح باکتریایی در شرایط بدون ریزگرد نیز موجب کاهش پرولین در هر سه دوره آبیاری (بجز آبیاری ۴ روزه در اعمال دو باکتری) شد. اعمال ریزگرد به‌تنهایی در شرایط کاربرد *B. halotolerans* در دوره آبیاری ۴ روزه باعث افزایش معنی‌دار ۱۹ درصدی پرولین نسبت‌به شرایط بدون باکتری شد، این افزایش در *B. amyloliquefaciens* در دوره آبیاری ۴ و ۶ روزه و در ترکیب دو باکتری در دوره آبیاری ۶ و ۸ روزه بدست آمد (شکل ۶).



شکل۶- تاثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر پرولین برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

فنل

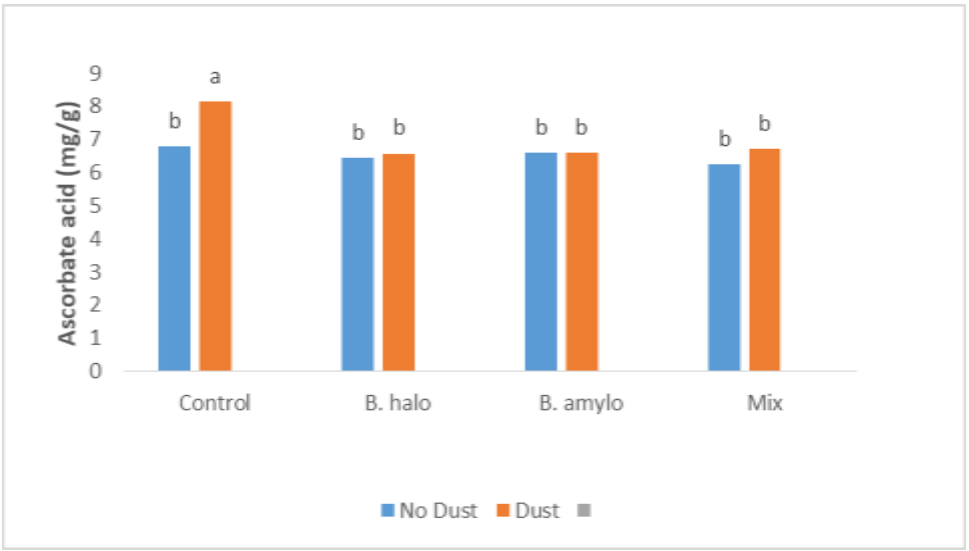
نتایج نشان‌داد که در شرایط بدون باکتری مقدار فنل در اثر ریزگرد و کم آبیاری به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. *B. amyloliquefaciens* در شرایط بدون ریزگرد باعث کاهش فنل به‌میزان ۱۷ درصد در دوره آبیاری ۸ روزه نسبت‌به شرایط بدون باکتری گردید. ترکیب دو باکتری در شرایط بدون ریزگرد مقدار فنل را در هرسه دوره آبیاری کاهش داد. در شرایط اعمال ریزگرد *B. halotolerans* و ترکیب دو باکتری باعث کاهش معنی‌دار فنل در هر سه دوره آبیاری گردید و در *B. amyloliquefaciens* هم در آبیاری ۴ و ۸ روزه باعث کاهش معنی‌دار فنل نسبت‌به شرایط بدون باکتری شد (شکل ۷).



شکل۷- تاثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر فنل برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

اسید آسکوربیک

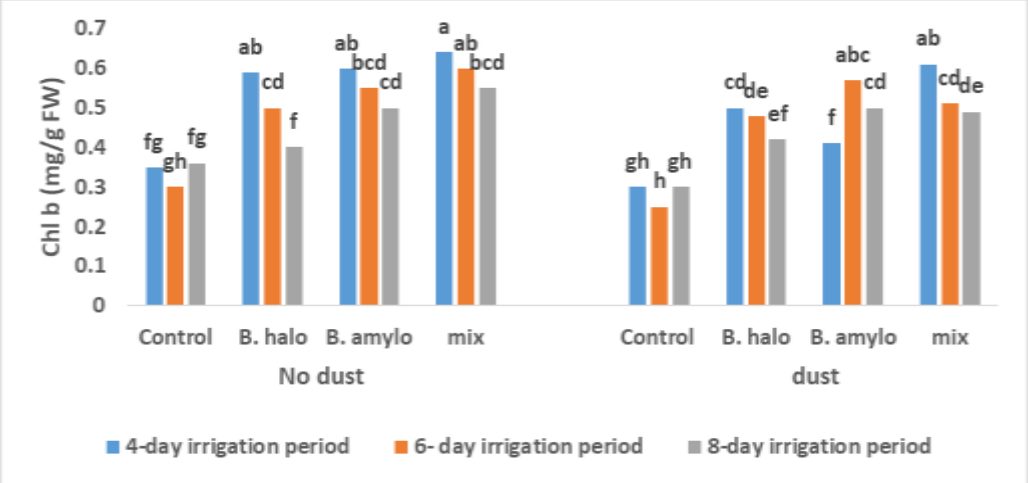
نتایج نشان‌داد که با اعمال گردوغبار در شرایط بدون باکتری مقدار اسید آسکوربیک به‌طور معنی‌داری به‌میزان ۲۰ درصد افزایش یافت. تلقیح باکتریایی در همه سویه‌ها موجب کاهش اسید آسکوربیک در شرایط اعمال ریزگرد نسبت‌به بدون حضور باکتری شد (شکل ۸).



شکل ۸- تاثیر متقابل باکتری و گردوغبار بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

کلروفیل b

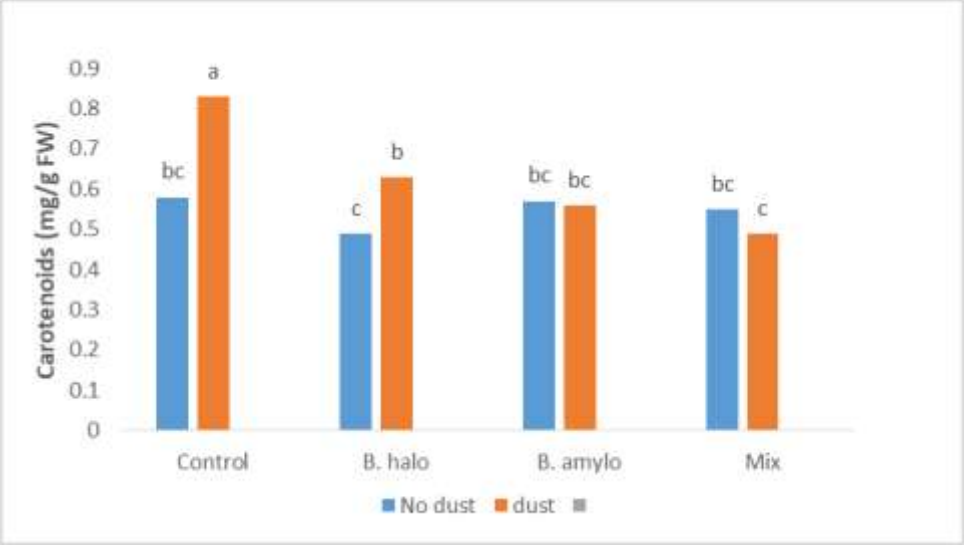
نتایج نشان‌داد که در شرایط بدون باکتری مقدار کلروفیل b تحت تاثیر کم آبیاری و اثر ریزگرد قرار نگرفت. باکتری *B. halotolerans* در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش ۶۹ و ۶۷ درصدی کلروفیل b در دوره آبیاری ۴ و ۶ روزه نسبت‌به شرایط بدون باکتری شد. در شرایط اعمال ریزگرد نیز *B. halotolerans* موجب افزایش کلروفیل b در هر سه دوره آبیاری گردید. *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری نیز در شرایط اعمال ریزگرد و بدون ریزگرد سبب افزایش کلروفیل b در هر سه دوره آبیاری نسبت‌به شرایط بدون این باکتری گردید. اعمال ریزگرد در شرایط کاربرد *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* در دوره آبیاری ۴ روزه باعث کاهش معنی‌دار مقدار کلروفیل b نسبت‌به شرایط اعمال ریزگرد شد این کاهش در ترکیب دو باکتری در دوره آبیاری ۶ روزه بدست آمد (شکل۹).



شکل ۹- تاثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر کلروفیل b برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

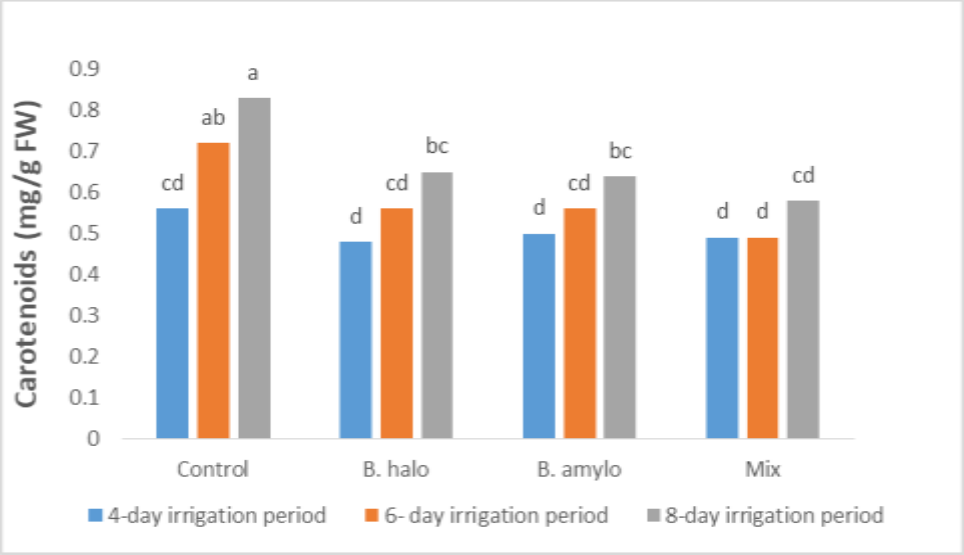
کاروتنوئید

نتایج نشان‌داد کاربرد ریزگرد باعث افزایش معنی‌دار کاروتنوئید به‌میزان ۴۳ در شرایط عدم تلقیح باکتری شد. از بین باکتری‌ها، *B. amyloliquefaciens* و تلقیح همزمان دو باکتری باعث کاهش مقدار کاروتنوئید در شرایط اعمال ریزگرد شد. *B. halotolerans* نیز مقدار کاروتنوئید را کاهش‌داد، با این وجود نسبت‌به شرایط بدون گردوغبار به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (شکل ۱۰).



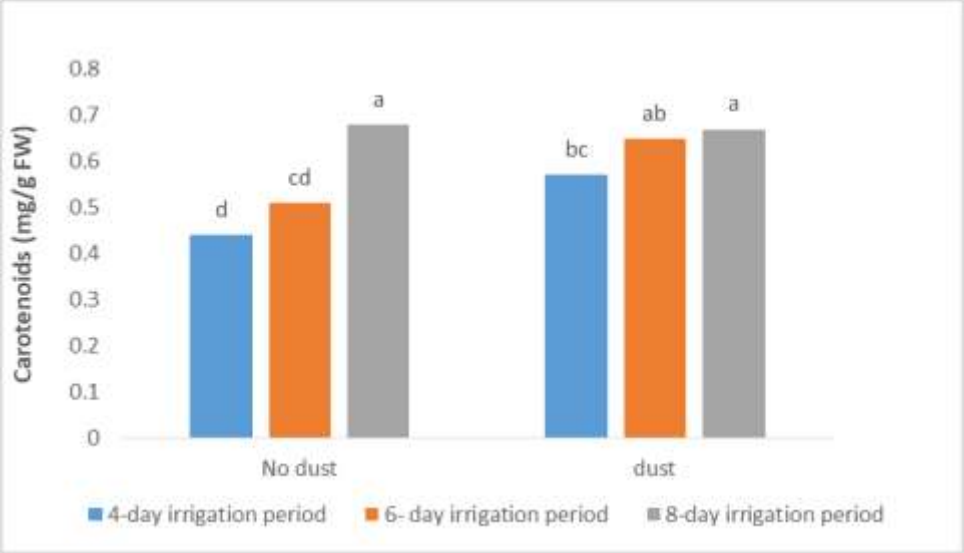
شکل ۱۰- تاثیر متقابل باکتری و گردوغبار بر کاروتنوئید برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

نتایج همچنین نشان‌داد با افزایش دور آبیاری از ۴ به ۶ و ۸ روز مقدار کاروتنوئید در شرایط بدون باکتری افزایش یافت. تلقیح باکتریایی در تمام حالات مقدار کاروتنوئید را نسبت‌به عدم استفاده از باکتری در آبیاری ۶ و ۸ روزه کاهش داد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- تاثیر متقابل باکتری و خشکی بر کاروتنوئید برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

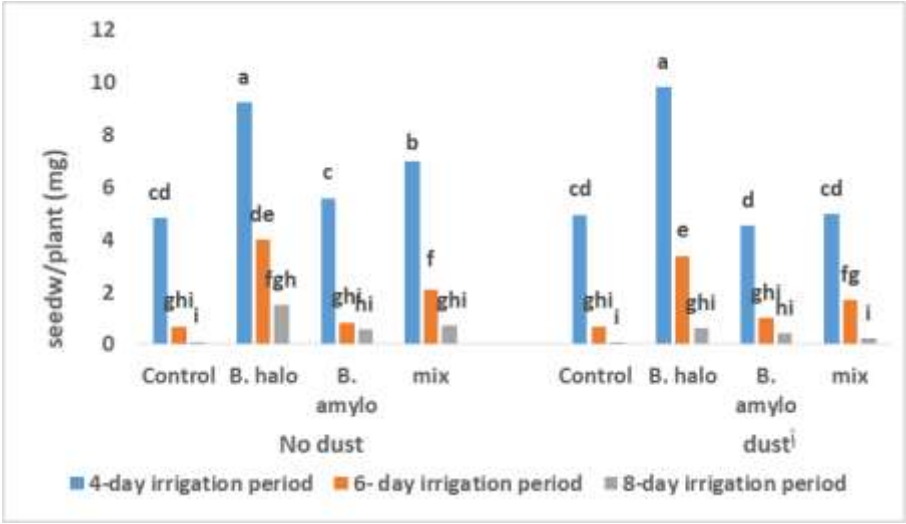
نتایج نشان‌داد با افزایش دور آبیاری به ۸ روز مقدار کاروتنوئید به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. تنش گردوغبار در آبیاری ۴ و ۶ روزه مقدار کاروتنوئید را به‌ترتیب به‌میزان ۳۰ و ۲۷ درصد نسبت‌به شرایط بدون گردوغبار افزایش داد (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- تاثیر متقابل خشکی و گردوغبار بر کاروتنوئید برگ گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

وزن بذر

نتایج نشان‌داد که در شرایط عدم تلقیح باکتری مقدار وزن بذر، با افزایش دور آبیاری کاهش معنی‌دار یافت. *B. halotolerans* در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش وزن بذر در هر سه دوره آبیاری نسبت‌به شرایط بدون باکتری شد. *B. halotolerans* در شرایط اعمال ریزگرد نیز موجب افزایش معنی‌دار ۹۸ و ۳۸۴ درصدی وزن بذر در دوره آبیاری ۴ و ۶ روزه نسبت‌به شرایط بدون ریزگرد شد (شکل ۱۳). ترکیب دو باکتری نیز در شرایط بدون ریزگرد در دوره آبیاری ۴ و ۶ روزه وزن بذر را افزایش دادند.

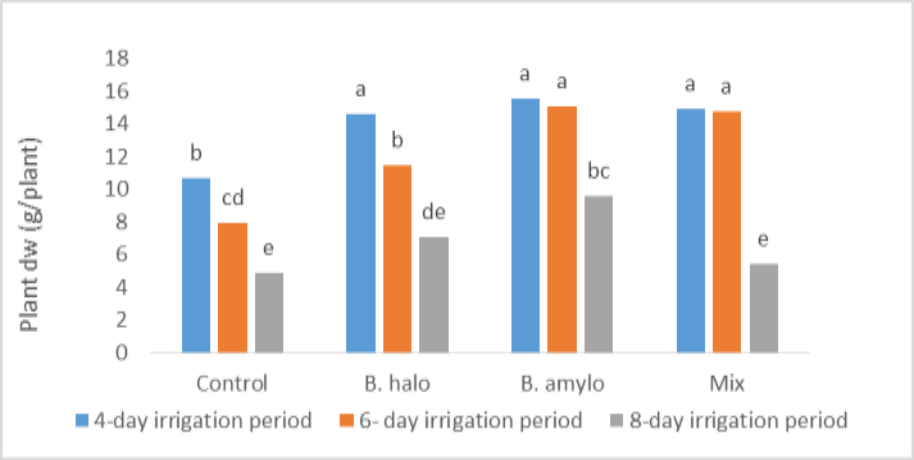


شکل ۱۳- تاثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر وزن بذر گونه گلرنگ (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

وزن گیاه

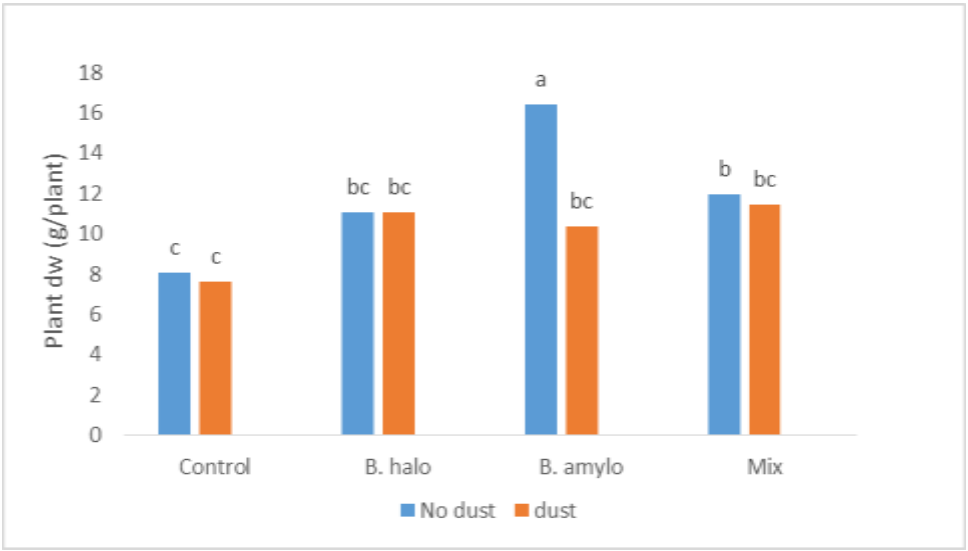
نتایج نشان‌داد که با افزایش دوره آبیاری وزن گیاه در شرایط بدون باکتری کاهش یافت. تلقیح با *B. halotolerans* و ترکیب دو باکتری وزن گیاه را در دو دوره آبیاری ۴ و ۶ روزه و تلقیح با *B. amyloliquefaciens* وزن گیاه را در هر سه دوره

آبیاری به‌طور معنی‌داری نسبت‌به شرایط بدون باکتری افزایش داد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- تاثیر باکتری‌های محرک رشد بر وزن گیاه در شرایط مختلف آبیاری(ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

نتایج همچنین نشان داد که گرد و غبار تغییری در وزن گیاه در شرایط عدم تلقیح باکتری ایجاد نکرد. تلقیح با *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری وزن گیاه گلرنگ را در شرایط بدون ریزگرد افزایش داد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- تاثیر باکتری‌های محرک رشد بر وزن گیاه در تحت شرایط اعمال گردوغبار (ستون هایی که دارای حروف مشترک هستند براساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌دار ندارند).

بحث

نتایج نشان‌داد که با افزایش دوره آبیاری مقدار نیتروژن کاهش یافت در حالی‌که گردوغبار به‌تنهایی تاثیر معنی‌داری بر آن نداشت. نیتروژن عنصری حیاتی برای گیاه تلقی می‌گردد که علاوه‌بر شرکت در ساختمان پروتئین‌های سلول‌های گیاهی، آنزیم‌ها، اسیدهای نوکلئوئیک، بخشی از کلروفیل گیاه را نیز تشکیل می‌دهد [۶۰]. تنش خشکی به‌دلیل سرعت پایین تعرق، کاهش انتقال فعال و اختلال در نفوذپذیری غشاء، جذب مواد مغذی توسط ریشه‌ها و انتقال آنها در گیاه را کاهش می‌دهد [۲۷]. نتایج مشابه بر روی گلرنگ نشان‌داد که شاخص‌های جذب،

تجمع، تقسیم و انتقال نیتروژن در گیاهان گلرنگ تحت تأثیر شرایط خشک‌تر حاکم در سال دوم آزمایش قرار گرفت و در نتیجه جذب نیتروژن در گلرنگ بطور قابل توجهی کاهش یافت [۲۷]. کاربرد همزمان دو باکتری مقدار نیتروژن را در شرایط ریزگرد افزایش‌داد. در دوره آبیاری ۶ و ۸ روزه ترکیب دو باکتری مقدار نیتروژن را بطور معنی‌داری افزایش دادند. افزایش مقدار نیتروژن در شرایط تنش را می‌توان به خصوصیات محرک رشدی PGPR به‌خصوص تثبیت نیتروژن مولکولی نسبت‌داد. به‌نظر می‌رسد این باکتری با تثبیت N_2 و افزایش تولید پروتئین در شرایط تنشی تا حدودی آثار مضر تنش را کاهش می‌دهند [۴۶].

نتایج نشان‌داد که با افزایش دوره آبیاری مقدار کلسیم افزایش یافت، ولی مقدار آن تحت تاثیر گردوغبار قرار نگرفت. کلسیم به‌عنوان یک عنصر کلیدی در پایداری دیواره سلولی و سیگنال‌دهی به گیاه برای مقابله با تنش‌های محیطی شناخته شده است [۲۶]. جذب کلسیم می‌تواند باعث افزایش تحمل گلرنگ به کم آبیاری گردد و به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های تحمل به خشکی در گیاه معرفی گردد. تلقیح باکتری‌هایی باعث افزایش کلسیم به‌ویژه در شرایط اعمال ریزگرد نسبت‌به شاهد شد. بررسی اثر کم‌آبیاری بر مقدار کلسیم در گیاه کاملینا نیز نشان‌داد که این تنش مقدار کلسیم را افزایش‌داد [۱۸]. باکتری‌های محرک رشد گیاه قادرند از طریق انحلال تری کلسیم فسفات [۵] و همچنین توسعه سریع سیستم ریشه‌ای و افزایش قابلیت جذب مواد غذایی مانند کلسیم و منیزیم باعث افزایش تحمل گیاه نسبت به تنش شوند [۱].

نتایج نشان‌داد که با افزایش دوره آبیاری تغییری در مقدار فسفر ایجاد نشد، اما تحت تاثیر همزمان کم آبیاری ۸ روزه و ریزگرد کاهش معنی‌داری نشان‌داد. فسفر از مهم‌ترین عناصر مورد نیاز جهت رشد و ترمیم گیاه به‌شمار رفته که اغلب به‌عنوان ماده انرژی‌زا تعریف می‌شود زیرا این عنصر به ذخیره و انتقال انرژی در فرآیند فتوسنتز کمک نموده و برای تقسیم سلولی و تشکیل RNA و DNA بسیار لازم است. تغییر در میزان این عنصر به‌طور مستقیم بر میزان فرآیند فتوسنتز [۱۶] و به‌طور غیرمستقیم بر میزان سنتز پروتئین تأثیرگذار می‌باشد. از آنجایی‌که فسفر نقش مهمی در اغلب فعالیت‌های متابولیسمی گیاهان دارد؛ کاهش آن در برگ گیاه به‌دلیل افزایش گردوغبار باعث کاهش سنتز اسمولیت‌ها و پروتئین‌های محلول می‌شود [۸]. کاهش میزان فسفر ناشی از تنش گردوغبار در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است [۴۳ و ۴۴]. در شرایط اعمال ریزگرد *B. halotolerans* ، *B. amyloliquefaciens* و کاربرد همزمان دو باکتری سبب افزایش معنی‌دار فسفر در هر سه دوره آبیاری گردید. از جمله صفات بسیار مهم باکتری‌های محرک رشد گیاه معدنی کردن فسفر آلی و انحلال فسفر معدنی از طریق ساخت آنزیم‌های فسفاتاز و فیتاز و اسیدهای آلی مانند اسید گلونیک و اسید سیتریک می‌باشد. *B. amyloliquefaciens* [۶۹] و *B. halotolerans* [۵۹] با کاهش pH ریزوسفر از طریق ساخت و رهاسازی اسیدهای آلی باعث حل کردن کانی‌های فسفره نامحلول و تبدیل آنها به شکل قابل جذب برای گیاه می‌شوند. علاوه‌بر این، تولید سیانیدهیدروژن توسط این باکتری‌ها، می‌تواند باعث افزایش غیرمستقیم فراهمی عنصر فسفر از طریق کلات با عناصر فلزی ترکیب‌شده با فسفر و رهاسازی آن در ریزوسفر گردد.

نتایج نشان‌داد که اعمال گردوغبار باعث تشدید اثر کم آبیاری بر کاهش قندهای محلول شد. فرونشست و تجمع ذرات ریزگرد بر روی سطوح اندام‌های هوایی گیاه اثرات سوء و نامطلوبی بر کربوهیدرات و قندهای محلول گیاهان دارد که در نهایت سبب کاهش تولید اولیه آن می‌شود [۳۶]. گردوغبار باعث بسته شدن دهانه روزنه‌های برگ (که حدود ۵ تا ۷ میکرومتر می‌باشند) گردیده [۴۵] و در عین حال باعث افزایش دمای برگ، عدم تهویه مناسب، عدم تعرق و عدم ورود CO_2 به برگ می‌شود [۴۵]، از طرفی تجمع گردوغبار سبب ایجاد حالت سایه بر گیاه می‌شود [۵۲] و فتوسنتز در برگ را

تنزل می‌دهند [۵۶] در نهایت مقدار سنتز قند کاهش می‌یابد. تلقیح باکتریایی در شرایط اعمال ریزگرد باعث افزایش قندهای محلول در هر ۳ دوره آبیاری شد. نتایج مشابه افزایش مقدار قندهای محلول در تلقیح *B. amyloliquefaciens* در گیاه سویا تحت تنش خشکی [۵۱] بدست آمد. این باکتری با تعدیل سنتز فیتوهورمون‌ها و تنظیم تعادل اسمزی، هموستاز یونی و بیان ژن، از رشد گیاه محافظت می‌کند. *B. halotolerans* نیز مشابه سویه قبلی، در گیاه گندم [۶۷] مقدار قندهای محلول را افزایش‌داد.

نتایج نشان‌داد که مقدار فنل در اثر ریزگرد و کم آبیاری بطور معنی‌داری افزایش‌یافت. آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی نیز بطور عمده شامل آسکوربیک اسید، ترکیبات فنلی، فلاونوئید، آنتوسیانین و پرولین می‌باشند [۱۴]. ترکیبات آنتی‌اکسیدان موجب کاهش سطح گونه‌های فعال اکسیژن در سلول‌های گیاهی می‌شوند، و سریع‌ترین واحدهای مقابله کننده در برابر حمله ROS محسوب می‌شوند [۱۳]. آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) به‌عنوان نخستین خط دفاعی گیاهان در مقابل ROS، تبدیل O_2^- به H_2O_2 را کاتالیز کرده و باعث کاهش خسارت به DNA و پروتئین‌ها می‌شود. گردوغبار می‌تواند سطح برگ‌ها را بپوشاند، روزنه‌ها را مسدود کند، انتقال نور را کاهش‌دهد و تبادلات گازی را محدود سازد که این امر باعث تشدید تنش در گیاه می‌شود [۴۱]. مشابه این تحقیق، افزایش فنل در گیاه گلرنگ تحت تنش خشکی در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است [۱۹]. در شرایط اعمال ریزگرد تلقیح باکتریایی باعث کاهش معنی‌دار فنل در هر سه دوره آبیاری شد که می‌تواند ناشی از کاهش شدت تنش و بهبود وضعیت فیزیولوژیکی گیاه باشد. باکتری‌های *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* با افزایش جذب عناصر غذایی، ترشح فیتوهورمون‌ها و القای مقاومت سیستمیک، موجب کاهش نیاز گیاه به سنتز ترکیبات دفاعی پرهزینه‌ای مانند فنل‌ها شده‌اند [۴ و ۳۱].

نتایج نشان‌داد که مقدار پرولین تحت تاثیر کم آبیاری افزایش یافت در مقابل ریزگرد به‌تنهایی مقدار پرولین را تغییر نداد. از مهمترین نقش‌های فیزیولوژیکی تجمع پرولین در واکنش به کمبود آب، نقش آن به‌عنوان یک ماده تنظیم کننده فشار اسمزی و عامل حفاظت‌کننده آنزیم‌های سیتوپلاسمی و ساختمانی غشا است [۱۷]. در شرایط تنش خشکی، پرولین در حفظ پتانسیل اسمزی، حذف رادیکال‌های آزاد ROS، حفاظت ماکرومولکول‌ها و تنظیم pH سلولی نقش اساسی دارد همچنین برای گیاهان تحت تنش شدید، پرولین به‌عنوان منبع ازت و کربن نیز عمل کرده و تحمل گیاه در برابر تنش را افزایش می‌دهد [۲۴]. مشابه مطالعه حاضر نشان‌داده شد که غلظت کل اسید آمینه آزاد در ژنوتیپ‌های گلرنگ بطور قابل توجهی تحت تأثیر تنش خشکی قرار گرفت [۲۷]. گیاهان گلرنگی که در شرایط عادی رشد می‌کردند، غلظت کل اسید آمینه آزاد کمتری نسبت‌به گیاهانی داشتند که در شرایط تنش خشکی رشد می‌کردند. مشابه این تحقیق، افزایش پرولین در گیاه گلرنگ تحت تنش خشکی در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است [۱۹]. تلقیح باکتریایی در شرایط اعمال ریزگرد (دوره آبیاری ۸ روزه) و بدون اعمال ریزگرد باعث کاهش پرولین شد. باکتری‌های محرک رشد گیاه با افزایش جذب پتاسیم از طریق اسیدی کردن محیط ریزوسفر، افزایش جذب آب از طریق تولید اکسین و افزایش حجم ریشه، در کاهش تنش مشارکت می‌کنند، که این خود کاهش تولید پرولین را توجیه می‌کند [۴۳].

نتایج نشان‌داد که با اعمال گردوغبار در شرایط بدون باکتری مقدار اسید آسکوربیک بطور معنی‌داری به‌میزان ۲۰ درصد افزایش یافت . آنتی‌اکسیدان طبیعی اسید آسکوربیک نقش مهمی در مقاومت گیاهان به آلودگی‌های محیطی به‌ویژه ریزگردها دارد. این ماده با پراکسید هیدروژن (H_2O_2) واکنش داده و در خنثی‌سازی آن و دیگر ترکیبات از جنس اکسیژن فعال نقش بسزایی داشته و منجر به حفاظت کلروفیل و کاروتنوئیدها می‌شود [۴۱]. همچنین این ماده یک

عامل احیاءکننده و کاهنده‌ای قوی می‌باشد و فعالیت احیاءکنندگی آن به میزان اسیدیته سلول وابسته بوده [۵۱ و ۶۳] و در pHهای بالاتر فعال‌تر می‌باشد [۳۵] ، حضور ذرات گردوغبار بر روی سطح برگ منجر به افزایش غلظت آنیون‌ها و کاتیون‌های درون سلول‌های گیاهی و انحلال آنها در شیره سلولی، تغییر میزان اسیدیته و در نهایت ایجاد شرایط قلیایی در سلول می‌گردد [۳۲] و از طرفی بالا رفتن میزان مواد قلیایی اسیدیته برگ را نیز به شدت افزایش داده بطوریکه می‌تواند سبب ایجاد آسیب‌های جدی به ساختار و محتوای برگ شود [۱۲]. مشابه این تحقیق نشان‌داده شد که مقدار اسید آسکوربیک در گیاه گلرنگ تحت تنش خشکی افزایش میابد. تلقیح باکتریایی در این تحقیق برای همه سویه ها موجب کاهش اسید آسکوربیک شد [۲۳]. *B. amyloliquefaciens* موجب افزایش توان دفاعی گیاه در برابر تنش‌های غیرزیستی می‌شود. این اثرات از طریق افزایش تولید اسمولیت‌هایی مانند پرولین و قندهای محلول، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی بهبود عملکرد فتوسنتزی و حفظ تعادل آبی سلول انجام می‌گیرد [۴].

کاروتنوئیدها از جمله ترکیبات فتوسنتزی مهم و آنتی‌اکسیدان‌های غیرآنزیمی در گیاهان هستند که نقش حیاتی در حفظ ساختار فتوسیستم‌ها، جذب نور و مقابله با تنش‌های اکسیداتیو ناشی از شرایط محیطی ایفا می‌کنند [۲۳]. یافته‌های این مطالعه نشان‌داد که کاربرد ریزگرد و کم آبیاری باعث افزایش معنی‌دار کاروتنوئید شد. که می‌تواند بیانگر پاسخ تطابقی گیاه برای کاهش آسیب ناشی از استرس اکسیداتیو ناشی از ذرات گردوغبار باشد. این افزایش احتمالاً در راستای نقش محافظتی کاروتنوئیدها در خاموش‌سازی گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) می‌باشد [۵۳]. تلقیح باکتریایی باعث کاهش مقدار کاروتنوئید شد. این کاهش می‌تواند ناشی از بهبود وضعیت فیزیولوژیک گیاه و کاهش نیاز به سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی ثانویه باشد، چرا که باکتری‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* از طریق القای مقاومت سیستمیک، کاهش تنش اکسیداتیو و بهبود جذب آب و عناصر غذایی، میزان آسیب‌پذیری گیاه را کاهش می‌دهند [۴۷]. نتایج به‌دست‌آمده با گزارش‌های مشابه مطابقت دارد؛ برای مثال، در مطالعات نشان‌داد که کاربرد باکتری‌های محرک رشد موجب کاهش سطح کاروتنوئید تحت تنش خشکی شد که به تعدیل تنش در گیاهان نسبت داده شد [۶۵]. همچنین سایر مطالعات نشان می‌دهد که تلقیح باکتری‌های مقاوم به خشکی موجب کاهش تجمع کاروتنوئیدها در گندم تحت تنش گردوغبار گردید که بیانگر عملکرد محافظتی این باکتری‌ها بود [۵۵].

کلروفیل b به‌عنوان یکی از رنگیزه‌های فتوسنتزی نقش مکملی در جذب نور و انتقال انرژی دارد و حساسیت بالایی به تنش‌های محیطی از جمله خشکی، شوری و آلودگی هوا دارد. در مطالعه حاضر، اگرچه کلروفیل b در شرایط بدون تلقیح باکتری تحت تأثیر تنش کم‌آبی و گردوغبار قرار نگرفت، اما تلقیح با باکتری‌های محرک رشد سبب بهبود معنی‌دار کلروفیل b شدند. این بهبود احتمالاً ناشی از تحریک تولید مواد تنظیم‌کننده رشد گیاهی نظیر سیتوکنین‌ها و کاهش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS)توسط این باکتری‌ها است که به پایداری غشاء کلروپلاست و رنگیزه‌های آن کمک می‌کند [۵۵ و ۳۸ و ۶۵].

وزن خشک گیاه و وزن بذر یکی از شاخص‌های مهم کیفیت و عملکرد گیاه است که تحت تأثیر شرایط محیطی و مدیریتی تغییر می‌کند. نتایج نشان‌داد که افزایش دوره آبیاری به‌طور معنی‌داری باعث کاهش این دو شاخص شد. خشکی موجب اختلال در فتوسنتز، فرآیندهای آنزیمی و بیوشیمیایی و بهم خوردن توازن متابولیسمی گیاهان شده و بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی آنها تاثیر می‌گذارد [۲۱، ۵۸ و ۵۴]. تغییر در صفات مورفولوژیکی شامل کاهش رشد [۶]، کاهش بیومس و نهایتا کاهش در تولید محصول [۱۵] ایجاد می‌شود.

نتایج مشابه در بررسی ژنوتیپ‌های مختلف گلرنگ بدست آمد که نشان‌داد وزن هزار دانه گلرنگ بطور معنی‌داری تحت تنش خشکی کاهش یافت [۳۷]. تاثیر *B. halotolerans* و ترکیب دو باکتری بر وزن دانه و *B. amyloliquefaciens* بر وزن خشک گیاه گلرنگ در تنش خشکی موثرتر بودند. قبلا تاثیر این باکتری‌ها بر افزایش تجمع عناصر نیتروژن، فسفر و کلسیم، افزایش قندهای محلول نشان‌داده شد. همه این‌ها میتوانند بر افزایش وزن بذر گلرنگ و وزن خشک گیاه در تلقیح باکتری‌های مذکور موثر باشند. باکتری‌های مذکور از طریق تولید ایندول-۳-استیک اسید(IAA) ، سایتوکنین‌ها و جیبرلین‌ها موجب افزایش توسعه ریشه، طویل شدن سلول‌ها، افزایش سطح برگ و رشد کل‌گیاه می‌شود. این هورمون‌ها در مراحل مختلف نمو گیاه به‌ویژه در دوره‌های تنش‌زا مانند خشکی یا کم‌غذایی نقش کلیدی ایفا می‌کنند [۵۱].

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان‌داد که تنش‌های همزمان خشکی و گردوغبار باعث اختلالات قابل توجهی در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه گلرنگ شد؛ به‌طوری‌که کاهش معنی‌دار در قندهای محلول، محتوای نیتروژن، فسفر، کلسیم، کلروفیل b و کاروتنوئیدها و افزایش اسمولیت‌هایی مانند پرولین و فنل، آسید آسکوربیک نمایانگر استرس اکسیداتیو در گیاه بود. این تغییرات موجب کاهش عملکرد کیفی و کمی گیاه به‌ویژه وزن بذر گردید. نتایج این تحقیق به وضوح نشان‌داد که اثر تنش خشکی بر گلرنگ از اثر گردوغبار بیشتر است. به‌عبارت دیگر گردوغبار اثر تنش خشکی را تشدید می‌کنند.

تلقیح باکتری‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans*، به‌ویژه در کاربرد ترکیبی، نقش مؤثری در تعدیل اثرات منفی این تنش‌ها ایفا کرد. این باکتری‌ها با بهبود جذب عناصر معدنی، القای پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی، تنظیم متابولیت‌های سازگار توانستند استرس اکسیداتیو را کاهش داده و عملکرد فیزیولوژیکی و تولیدی گیاه را بهبود بخشند. افزون‌بر این، افزایش معنی‌دار وزن بذر در تیمارهای باکتریایی، نشان‌دهنده افزایش پایداری عملکرد و کیفیت محصول در شرایط محیطی نامساعد است . یافته‌های این تحقیق بر اهمیت استفاده از باکتری‌های محرک رشد مقاوم به خشکی و گردوغبار به‌عنوان راهکاری زیستی پایدار برای بهبود بهره‌وری زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید دارد. همچنین، تفاوت در اثر بخشی سویه‌های باکتریایی مورد استفاده نشان‌دهنده ضرورت انتخاب دقیق سویه‌ها متناسب با شرایط اقلیمی و نوع تنش است که می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های آینده در این حوزه باشد.

References

[1]. ALKahtani, M.D.F., Attia, K.A., Hafez, Y.M., Khan, N., Eid, A.M., Ali, M.A. M. & Abdelaal, K.A.A. (2020). Fluorescence Parameters and Antioxidant Defense System Can Display Salt Tolerance of Salt Acclimated Sweet Pepper Plants Treated with Chitosan and Plant Growth Promoting. *Rhizobacteria. Agronomy*, 10(8), 1180. https://doi.org/10.3390/agronomy10081180.

[2]. Amid, S., Fazeli, A., Haghi, R., & Bazgir, M. (2023). Physiological response of some wheat genotypes under dust conditions. *Journal of Plant Biological Sciences*, *15*(2), 67-84. https://doi.org/10.22108/ijpb.2024.139885.1345.

[3]. Amini Hajiabadi, A., Mosleh Arani, A., Ghasemi, S., Rad, M.H., Etesami, H., Shabazi Manshadi, S. & Dolati, A. (2021). Mining the rhizosphere of halophytic rangeland plants for halotolerant bacteria to improve growth and yield of salinity-stressed wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 163: 139-153. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.059

[4]. Anzuma, A., Hossain, M.M., Mohammed, M.U.D., Nazran, A., Khan, H.I., Islam, N. & Ghosh, T.K. (2024). Enhancing drought tolerance in common bean by plant growth promoting rhizobacterium *B. amyloliquefaciens*. *Acta agriculturae Slovenica*, 120(3), 1-10. https://doi.org/10.14720/aas.2024.120.3.18249

[5]. Azarmi, F., Mozafari, V., Abbaszadeh Dahaji, P. & Hamidpour, M. (2016). Biochemical, physiological and antioxidant enzymatic activity responses of pistachio seedlings treated with plant growth promoting rhizobacteria and Zn to salinity stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(1), 21. https://doi.org/10.1007/s11738-015-2032-3

[6]. Azarmi-Atajan., F. & Sayyari-Zohan, M.H. (2020). Alleviation of salt stress in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by plant growth-promoting rhizobacteria. *Journal of horticulture and postharvest research*, 3, 67-78. https://doi.org/10.22077/jhpr.2020.3013.1114

[7]. Bates, L.S., Waldren, R.P. & Teare, I.D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 39(2), 205–207. https://doi.org/10.1007/BF00018060.

[8]. Bimal, C.S. & Karmoker, J.L. (2011). Effects of phosphorus deficiency on accumulation of biochemical compounds in lentil. *Bangladesh Journal of Botany*, 40(1), 23-27.

[9]. Bisht, N., Singh, T., Ansari, M.M., Joshi, H., Mishra, S.K. & Chauhan, P. S. (2025). Plant growth-promoting *B. amyloliquefaciens* orchestrate homeostasis under nutrient deficiency exacerbated drought and salinity stress in Oryza sativa L. seedlings. *Planta*, 261(1), 8. https://doi.org/10.1007/s00425-024-04585-x

[10]. Bistgani, Z.E., Siadat, S.A., Bakhshandeh, A, Pirbalouti, A.G. & Hashemi, M. (2017). Interactive effects of drought stress and chitosan application on physiological characteristics and essential oil yield of *Thymus daenensis* Celak. *Crop Journal*, 5:407–415. https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.04.003.

[11]. Bremner, J.M. & Mulvaney, C.S. (1982). Total nitrogen, In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeny, (Eds), Methods of soil Analysis, American Society of Agronomy and soil Science Society of America, Madison, pp. 1119-1123.

[12]. Chaturvedi, R.K., Shikha, P., Savita, R., Obaidollah, S.M., Vijay, P. & Hema, S. (2013). Effect of drought load on the leaf attributes of the tree species growing along the roadside. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 384-391.

[13]. Dirk, I. & Montago, M.V. (2002). Oxidative Stress in Plants. Taylor & Fransis.

[14]. Dvorak, P., Krasylenko, Y., Zeiner, A., Samaj, J. & Takac, T. (2021). Signaling towards reactive oxygen species-scavenging enzymes in lants. *Frontier Plant Science*, 11:618835. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.618835

[15]. Etesami, H., & Glick, B.R. (2020). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Their Environmental Applications: A Review. *Applied Soil Ecology*, 156, 103701. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103701.

[16]. Frydenvang, J., Van Maarschalkerweerd, M., Carstensen, A., Mundus, S., Birkelund Schmidt, S., Pedas, P.R., Holst Laursen, K., Schjoerring, J. K. & Husted, S. (2015). Sensitive detection of phosphorus deficiency in plants using chlorophyll a fluorescence. *Plant Physiology*,169(1), 353–361. https://doi.org/10.1104/pp.15.00823

[17]. Ghaffari, H., Tadayon, M.R., Nadeem, M., Cheema, M. & Razmjoo, J. (2019). Proline-mediated changes in antioxidant enzymatic activities and the physiology of sugar beet under drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, *41, 23.* https://doi.org/10.1007/s11738-019-2815-z

[18]. Golaraei, H., Arani, A. M., Etesami, H., Bidgoli, R. D., Sefid, M. K. M., Zilaie, M. N., & Dolati, A. (2026). Bacillus spp. mitigate drought and dust stress in Camelina sativa by enhancing physiological resilience and nutrient acquisition. *Journal of Arid Environments*, *232*, 105516. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105516.

[19]. Golkar, P., Hamzeh, E., Mirmohammadi Maibody, S.A. & Taghizadeh, M. (2021). Safflower's (*Carthamus tinctorius* L.) physio-biochemical mechanisms to improve its drought tolerance. *Acta Physiologiae Plantarum*, *43*(5), 82. https://doi.org/10.1007/s11738-021-03254-w

[20]. Han, L., Hu, L., Lv, Y., Li, Y., Ma, Z., Li, B. & Zhao, X. (2024). Effects of *B. amyloliquefaciens* QST713 on mineral nutrient utilization of Alfalfa (Medicago sativa L.) under drought stress. *Agronomy*, *14*(8), 1793. https://doi.org/10.3390/agronomy14081793

[21]. Hashemi, S. (2023). Effects of drought stress on physiological and biochemical traits of oilseed crops in Iran. *Plant Stress Biology*, 15(2), 112-125.

[22]. Havaux, M. (2014). Carotenoid oxidation products as stress signals in plants. *The Plant Journal*, 79(4), 597–606. https://doi.org/10.1111/tpj.12386.

[23]. Hojati, M., Modarres-Sanavy, S., Karimi, M. & Ghanati, F. (2011) Responses of growth and antioxidant systems in Carthamus tinctorius L. under water deficit stress. *Acta Physiologiae Plantarum* 33(1):105–112. doi:10.1007 s11738-010-0521-y.

[24]. Hosseinifard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyla, Ł. & Garnczarska, M. 2022. Contribution of Exogenous Proline to Abiotic Stresses Tolerance in Plants: A Review. *International journal of Molecular Science*. 6;23(9):5186. doi: 10.3390/ijms23095186. PMID: 35563577; PMCID: PMC9101538.

[25]. Hussain, M.I., Lyra, D.A., Farooq, M., Nikoloudakis, N. & Khalid, N. (2016). Salt and drought stresses in safflower: a review. *Agronomy for sustainable development*, 36(1), 4. https://doi.org/10.1007/s13593-015-0344-8.

[26]. Ilyas, M., Nisar, M., Khan, N., Hazrat, A., Khan, A. H., Hayat, K., ... & Ullah, A. (2021). Drought tolerance strategies in plants: a mechanistic approach. *Journal of Plant Growth Regulation*, *40*(3), 926-944. https://doi.org/10.1007/s00344-020 10174-5

[27]. Javed, S., Ashraf, M.Y., Mahmood, S., Bukhari, S.A. & Meraj, M. (2013). Comparative Evaluation of Biochemical Changes in Different Safflower Varieties (Carthamus tinctorius L.) under Water Deficit. *Journal of Food Process Technology*, 4: 270. doi:10.4172/2157-7110.1000270

[28]. Khosrowshahi, Z.T., Ghassemi-Golezani, K., Salehi-Lisar, S.Y. & Motafakkerazad, R. (2020). Changes in antioxidants and leaf pigments of safflower (Carthamus tinctorius L.) affected by exogenous spermine under water deficit. *Biologia futura*, *71*(3), 313-321. https://doi.org/10.1007/s42977-020-00039-z.

[29]. Kochert, G. (1978). Carbohydrate determination by the phenol-sulfuric acid method. *Handbook of phycological methods, Physiological and biochemical methods.*, 95.

[30]. Kostik, V., Memeti, S. & Bauer, B. (2013) Fatty acid composition of edible oils and fats. J*ournal of Hygienic Engineering and Design*, 4:112–116. https://eprints.ugd.edu.mk/id/eprint/11460

[31]. Kumar, A., Singh, S., Gaurav, A.K., Srivastava, S. & Verma, J. P. (2020). Plant Growth-Promoting Bacteria: Biological Tools for the Mitigation of Salinity Stress in Plants. *Frontiers in Microbiology*, 11:1216. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01216

[32]. Kumar Rai, P. & Panda, L.L.S. (2014). Leaf dust deposition and its impact on Biochemical aspect of some Roadside Plants of Aizawl, Mizoram, North East India. International Research Journal of environment Sciences. *International Research Journal of Environmental Sciences*, 3(11),14-19.

[33]. Kumar, A., Verma, J.P. & Shahi, S.K. (2020). Role of plant growth-promoting rhizobacteria in drought tolerance: mechanisms and prospects. In Plant-Microbe Interactions in Agro-Ecological Perspectives (pp. 497–515). Springer.

[34]. Lichtenthalar, H.K. (1987). Chlorophyll and carotenoids: pigments of photosynthetic bio-membranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382.

[35]. Lohe, R.N., Tyagi, B., Singh, V., Tyagi, P.K., Khanna, D.R. & Bhutiani, R. (2015). A comparative study for air pollution tolerance index of some terrestrial plant species. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 1: 315-324. https://sid.ir/paper/343388/en

[36]. Meravi, N., Singh, P.K. & Prajapati, S.K. (2021). Seasonal variation of dust deposition on plant leaves and its impact on various photochemical yields of plants. *Environmental Challenges*, 4, 1-6. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100166.

[37]. ParsaMotlagh, B., Seyedeh Mahbubeh, B. Seyedeh Mahbubeh, M. Fateminick, F. & Mahmoudi, M. (2021). Evaluation of drought stress on unsaturated fatty acids and some physiological traits of four safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars in Jiroft, *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 14, 3, 619-627, doi =10.22077/escs.2020.3179.1812. [in Farsi]

[38]. Mosupiemang, M., Emongor, V.E., & Malambane, G. (2022). A review of drought tolerance in safflower. *International Journal of Plant & Soil Science*, 34(10), 140-149. https://www.sdiarticle5.com/review-history/84696

[39]. Mubshar Hussain, M. H., Shahid Farooq, S. F., Waseem Hasan, W. H., Sami Ul-Allah, S. U. A., Mohsin Tanveer, M. T., Muhammad Farooq, M. F., & Ahmad Nawaz, A. N. (2018). Drought stress in sunflower: physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. 1 https://doi.org/0.5555/20183271739

[40]. Naderi, K., Etesami, H., Alikhani, H.A. & Mosleh Arani, A. (2022). Potential use of endophytic and rhizosheath bacteria from the desert plant *Stipagrostis pennata* as biostimulant against drought in wheat cultivars, *Rhizosphere*, 24, 100617, ISSN 2452-2198. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100617

[41]. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., & Etesami, H. (2023). Evaluation of air pollution (dust) tolerance index of three desert species Seidlitzia rosmarinus, Haloxylon aphyllum, and Nitraria schoberi under salinity stress. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(7), 838. https://doi.org/10.1007/s10661-023-11436-x

[42]. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., & Etesami, H. (2023). The importance of plant growth-promoting rhizobacteria to increase air pollution tolerance index (APTI) in the plants of green belt to control dust hazards. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1098368. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1098368

[43]. Zilaie, M. N., Arani, A. M., Etesami, H., & Dinarvand, M. (2022). Halotolerant rhizobacteria enhance the tolerance of the desert halophyte Nitraria schoberi to salinity and dust pollution by improving its physiological and nutritional status. *Applied Soil Ecology*, *179*, 104578. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104578

[44]. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., Etesami, H., & Dinarvand, M. (2022). Improved salinity and dust stress tolerance in the desert halophyte Haloxylon aphyllum by halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria. *Frontiers in plant science*, *13*, 948260. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.948260

[45]. Najib, R., Houri, T., Khairallah, Y. & Khalil, M. (2022). Effect of dust accumulation on *Quercus cerris* L. leaves in the Ezer forest, Lebanon. *iForest* 15: 322-330. doi: 10.3832/ifor3959-015.

[46]. Ngalimat, M.S., Yahaya, R.S., Ahmad, S. A., & Sabri, S. (2021). A review on the biotechnological applications of the operational group *B. amyloliquefaciens*. *Microorganisms*, *9*(3), 614. https://doi.org/10.3390/microorganisms9030614

[47]. Nguyen, H.T., Ryu, C.M. & Oh, Y. (2021). The role of Bacillus spp. in drought stress tolerance in plants. *Plant and Soil*, 468, 1–16.

[48]. Rahimi, M., Farhadi, H. & Nazari, S. (2023). Drought tolerance mechanisms and yield stability of Carthamus tinctorius L. under water stress conditions. *Crop Science*, 63(1), 47–58.

[49]. Ranjbar Fordoeil, A. & Heydarnezhad, S. (1397). Impact of Aeolian dust accumulation on some biochemical parameters of cow-tail shrubs (*Smirnovia iranica*) leaves in the desert regions of Kashan, Iran, Second International Dust International Conference, Ilam. https://civilica.com/doc/936104.

[50]. Sampaio, M.C., Santos, R.F., Bassegio, D., Vasconselos, E.S., Silveira, L., Lenz, N.B. Lewandoski, C.F. & Tokuro, L.K. (2017). Effect of plant density on oil yield of safflower, *African journal of agricultural research*, 12, 2147-2152. https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11370

[51]. Sheteiwy, M. (2021). "Inoculation with *B. amyloliquefaciens* and mycorrhiza confers tolerance to drought stress and improve seed yield and quality of soybean plant." *Physiologia Plantarum* 172 (4): 2153-2169. https://doi.org/10.1111/ppl.13454

[52]. Sharma, B., Sharma, S., Bhardwaj, S.K., Kaur, L. & Sharma, A. (2017). Evaluation of Air Pollution Tolerance Index (APTI) as a tool to monitor pollution and green belt development: a review. *Journal of Applied and Natural Science* 9: 1637- 1643. - doi: 10.31018/jans. v9i3.1414.

[53]. Sharma, P., Jha, A.B., Dubey, R.S., & Pessarakli, M. (2012). Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*, 2012(1), 217037. https://doi.org/10.1155/2012/217037.

[54]. Sharavdorj, K., Byambadorj, S. O., Jang, Y., Ahn, Y., & Cho, J. W. (2024). Evaluating the effects of long-term salinity stress on the growth and physiology of mono and mixed crops. *Agronomy*, *14*(2), 287. https://doi.org/10.3390/agronomy14020287

[55]. Singh, R.P. & Jha, P.N. (2020). The PGPR Klebsiella sp. SBP-8 augments resistance against drought stress in wheat plants by modulating osmolytes, antioxidant machinery and expression of stress-responsive genes. *Environmental and Experimental Botany*, 171, 103946.

[56]. Sharifi Kalyani, F., Babaei, S., Zafarsohrabpour, Y., Nosratti, I., Gage, K. & Sadeghpour, A. (2024). Investigating the impacts of airborne dust on herbicide performance on *Amaranthus retroflexus*. *Science Reports*.15;14(1):3785. https://doi.org/10.1038/s41598-024-54134-5.

[57]. Shahraki, A., Mohammadi-Sichani, M., & Ranjbar, M. (2022). The effect of rhizospheric bacteria on the physiological and biochemical characteristics of safflower (Carthamus tinctorius). *Nova Biologica Reperta*, *9*(3), 213-221. 10.29252/nbr.9.3.213. [in Farsi]

[58]. Silva, D. M. R., dos Santos, J. C. C., do Rosário Rosa, V., dos Santos, A. L. F., & de Almeida Silva, M. (2022).

Tolerance to water deficiency in safflower (Carthamus tinctorius L.) modulated by potassium fertilization. *Acta Physiologiae Plantarum*, *44*(10), 99. https://doi.org/10.1007/s11738-022-03444-0

[59]. Shah, S.H., Hussain, M.B. & Zahir, Z.A. (2022). Thermal Plasticity and Cotton Production Enhancing Attributes of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Cotton Rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 22, 3885–3900. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00937-2

[60]. Shilev, S. (2020). Plant-Growth-Promoting Bacteria Mitigating Soil Salinity Stress in Plants. *Applied Science*, 10(20), 7326. https://doi.org/10.3390/app10207326.

[61]. Smirnoff, N. 1996. The function and metabolism ascorbic acid in plants. *Ann Bottany*, 78:661-669. https://doi.org/10.1006/anbo.1996.0175

[62]. Swain, T. & Hillis, W.E. (1959) The phenolic constituents of *Prunus domestica* L. the quantitative analysis of phenolic constituents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 10, 63-68. https://doi.org/10.1002/jsfa.2740100110.

[63]. Tanveer, Y., Yasmin, H., Nosheen, A., Farah, M.A., & Altaf, M.A. (2024). Synergizing *B. halotolerans*, *Pseudomonas sihuiensis* and *Bacillus atrophaeus* with folic acid for enhanced drought resistance in wheat by metabolites and antioxidants. *BMC Plant Biology*, *24*(1), 1003. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05609-0

[64]. Uka, U.N., Hogarh, J. & Belford, E.J.D. (2017). Physiological responses of some plant species as a bio-indicator of roadside automobile pollution stress using the air pollution tolerance index approach. *International Journal of Plant Research*, 3(2), 9-16. https://doi.org/10.5923/j.plant.20130302.01

[65]. 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. https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.12.003

[66]. Waling, I., Van Vark, W., Houba, V.J.G. & Van der Lee, J. J. (1989). Soil and Plant Analysis, A Series of Syllabi: Part 7. Plant Analysis Procedures Wageningen, Agriculture University.

[67]. Wu, X., Fan, Y., Wang, R., Zhao, Q., Ali, Q., Wu, H., Gu, Q., Borriss, R., Xie, Y. & Gao, X. (۲۰۲۲). *B. halotolerans* KKD1induces physiological, metabolic and molecular reprogramming in wheat under saline condition. *Frontier in Plant Science*. 13:978066 doi: 10.3389/fpls.2022.978066.

[68]. Yang, X., Xie, Y., Qiao, Y., Chang, F., Wang, T., Li, J., Wu, L., Li, C. & Gao, Y. (2024) Drought stress tolerance and metabolomics of *Medicago sativa* induced by *B. amyloliquefaciens* DGL1 *Frontier in Plant Science*. 15:1378707 doi: 10.3389/fpls.2024.1378707

Investigation of seed inoculation with plant growth-promoting bacteria on the physiological and biochemical properties of safflower under simultaneous effect of drought and dust stress (Research Paper)

1- Hamid Golarai, PhD Student, Department of Desert Management, Faculty of Natural Resources and Desertification, Yazd University, Yazd, Iran.

2- Asghar Mosleh-Arani*, Professor, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Desertification, Yazd University, Yazd, Iran.

amosleh@yazd.ac.ir

3- Hassan Etesami, Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Karaj, University of Tehran, Karaj, Iran.

4- Reza Dehghani-Bidgoli, Associate Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources, Kashan University, Kashan, Iran.

Received: 22 Sep. 2025
Accepted: 26 Feb. 2026

Abstract

This study investigated the effect of two plant growth promoting bacteria *B. amyloliquefaciens* and *B. halotolerans* on physiological, biochemical and functional traits of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought and dust stress. A factorial experiment was conducted in a randomized complete block design with different treatments including individual and combined inoculation of the two bacteria, irrigation at three levels of irrigation period (every 4, 6 and 8 days) and dust at two levels. The results showed that the simultaneous effect of drought and dust on safflower was more destructive than the effect of each alone. Meanwhile, dust had a less negative effect on safflower than drought. Drought reduced the absorption of mineral elements, soluble sugars, chlorophyll b, seed weight per plant and dry weight of safflower and increased phenol, proline and carotenoids. In contrast, dust only reduced the amount of phosphorus and soluble sugars in safflower and increased ascorbic acid and phenol. Bacterial inoculation improved the physiological and functional conditions of safflower in most cases, while the combination of two bacteria performed better than the individual inoculation of bacteria in most of the measured traits. While *B. halotolerans* and the combination of two bacteria performed better in increasing safflower seed weight, the dry weight of the plant increased more with *B. amyloliquefaciens* inoculation. The findings of this study emphasize the importance of using simultaneous combinations of plant growth-promoting bacteria as a sustainable biological solution to improve the growth of plants that often face multiple stresses.

Keywords: Plant Growth-Promoting Bacteria, Drought, Dust, Ascorbic Acid.