

تأثیر باکتری‌های محرک رشد گیاه بر خصوصیات فیزیولوژیک، محتوای یونی و عملکرد گیاه کاملینا تحت تنش‌های خشکی و گردوغبار

حمید گل‌آرائی^۱، اصغر مصلح‌آرانی^{۲*}، حسن اعتصامی^۳، رضا دهقانی بیدگلی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱۱/۰۳

چکیده

گردوغبار و تنش خشکی در مناطق خشک به عنوان رخدادهایی که وقوع آن‌ها به‌طور هم‌زمان اتفاق می‌افتد، تأثیر مخربی بر اکوسیستم‌های زراعی دارند. این مطالعه به بررسی تأثیر دو باکتری محرک رشد گیاه *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* بر صفات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و عملکردی گیاه کاملینا (*Camelina sativa*) 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 یک بار) و گردوغبار در دو سطح اجرا شد. نتایج نشان داد که تأثیر هم‌زمان خشکی و گردوغبار بر روی کاملینا مخرب‌تر از تأثیر هر کدام به‌تنهایی است. در این میان، گردوغبار تأثیر منفی کمتری نسبت به خشکی بر گیاه کاملینا داشت. تأثیر هم‌زمان کم آبیاری و گردوغبار موجب کاهش جذب عناصر معدنی نیتروژن و فسفر، کلروفیل b، وزن بذر در هر پایه و وزن خشک ریشه و اندام هوایی و افزایش کلسیم، قندهای محلول و کاروتنوئید شد. درحالی‌که خشکی به‌تنهایی موجب کاهش وزن بذر و افزایش فنل شد، گردوغبار تغییری در مقدار آن‌ها ایجاد نکرد در مقابل گردوغبار مقدار کلروفیل b را افزایش داد. تلقیح باکتریایی (هر باکتری به‌تنهایی یا ترکیب باهم) در اغلب موارد موجب بهبود شرایط فیزیولوژیکی و عملکردی کاملینا شد. در این میان، *B. halotolerans* عملکرد بهتری نسبت به *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری در اغلب صفات اندازه‌گیری شده داشت. یافته‌های این تحقیق بر اهمیت استفاده از ترکیب هم‌زمان باکتری‌های محرک رشد گیاه به‌عنوان راهکاری زیستی پایدار برای بهبود رشد گیاهانی که اغلب با چندین تنش روبه‌رو هستند تأکید دارد.

کلیدواژه‌ها: باکتری‌های محرک رشد گیاه، خشکی، گردوغبار، اسید آسکوربیک، کاملینا.

۱. دانشجوی دکتری گروه مدیریت بیابان، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، hamidgolaraei@stu.yazd.ac.ir

۲. استاد گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه یزد، یزد، ایران، amosleh@yazd.ac.ir

۳. استاد گروه علوم خاک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، Hassanetesami@ut.ac.ir

۴. دانشیار گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، dehghanir@kashanu.ac.ir

مقدمه

گیاه کاملینا متعلق به خانواده شب‌بوین (*Brassicaceae*) است که از تطابق‌پذیری بالایی برخوردار بوده و در انواع مختلفی از خاک‌ها و اقلیم‌ها رشد کرده و کشت آن مقرون به صرفه است، زیرا نسبت به دانه‌های روغنی دیگر مانند آفتابگردان، سویا یا کلزا به آب، کود و آفت‌کش کمتری نیاز دارد (پیراوی-وانک^۱ و همکاران، ۲۰۲۲). دانه کاملینا بین ۳۰ تا ۴۰ درصد روغن بر پایه وزن خشک دارد و روغن آن سرشار از اسیدهای چرب غیراشباع، به‌ویژه اسید لینولئیک و لینولنیک است که در مجموع بیش از ۵۰ درصد اسیدهای چرب روغن را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این، به دلیل دارا بودن پروتئین بالا، در صنعت خوراک دام نیز کاربرد دارند (برتی^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). کشت کاملینا در مناطق دارای محدودیت‌هایی مانند کیفیت پایین خاک، حاصلخیزی کم، دسترسی ناکافی به آب، آلودگی‌ها یا شرایط اقلیمی چالش‌برانگیز (ارشاد^۳ و همکاران، ۲۰۲۱) که کشاورزی متداول در آن‌ها دشوار یا غیراقتصادی است، می‌تواند جایگزینی قابل قبول برای استفاده از زمین فراهم کند. بنابراین، گسترش دانش در مورد کاربرد این محصول روغنی چندمنظوره در سطح مزارع اهمیت اساسی دارد، زیرا می‌تواند به چالش‌های مختلف مانند تغییرات اقلیمی، تنش‌های محیطی و یا تنش‌های ترکیبی و توسعه پایدار اقتصاد زیستی پاسخ دهد و مواد اولیه تجدیدپذیر و ارزشمندی را ارائه کند که برای اهداف صنعتی مختلف، به‌ویژه در صنایع دارویی، مکمل‌های تغذیه‌ای و آرایشی جذاب است (اتیآ^۴ و همکاران، ۲۰۲۱). اگرچه هیچ پژوهشی اثر گردوغبار را بر گیاه کاملینا مورد بررسی قرار نداده، (و این تحقیق برای سایر گیاهان زراعی هم انگشت‌شمار است)، اثرات منفی تأثیر خشکی بر روی گیاه کاملینا گزارش شده است. در پژوهشی، چهار ژنوتیپ کاملینا تحت شرایط خشکی و آبیاری مناسب مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج بیانگر تأثیر معنی‌دار خشکی بر پارامترهای فیزیولوژیکی و عملکرد بذر بود. برخی ژنوتیپ‌ها، مانند UNT46، توانستند با حفظ راندمان مصرف آب

و افزایش تعداد غلاف‌ها، عملکرد دانه بالاتری را حتی در شرایط تنش خشکی حفظ کنند. این نوع ژنتیکی در تحمل به خشکی می‌تواند در برنامه‌های اصلاحی و انتخاب ارقام مقاوم نقش مهمی داشته باشد (آلبرگینی^۵ و همکاران، ۲۰۲۵). در پژوهشی با هدف مطالعه خصوصیات زراعی و فیزیولوژیکی سه توده کاملینا تحت شرایط تنش کم‌آبی نشان داده شد که تحت شرایط آبیاری ۳۰ درصد ظرفیت زراعی عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی، شاخص برداشت، ارتفاع بوته، تعداد میوه در بوته، تعداد دانه در میوه، محتوای نسبی آب برگ، سرعت فتوسنتز، سرعت تعرق، هدایت روزنه‌ای و کلروفیل کل در مقایسه با آبیاری مطلوب کاهش یافتند. درضمن، روغن بذر کاملینا تحت شرایط تنش شدید کم‌آبی ۴۰/۸ درصد کاهش یافت (یاری و همکاران، ۲۰۲۴). به دلیل اهمیت کاملینا راهکارهای متعددی برای افزایش محصول و تحمل گیاه به تنش خشکی انجام شده است. برای مثال ژانگ^۶ و همکاران (۲۰۲۵) مکانیسم‌های نقش آمینواسیدها را در تحریک رشد در نهال‌های کاملینا تحت تنش خشکی و شوری بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد تنش‌های خشکی و شوری رشد نهال کاملینا را محدود می‌کنند، اما کاربرد محلول‌پاشی اسیدهای آمینه باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، قندها و پروتئین‌های محلول و بهبود عملکرد فتوسنتزی، تجمع لیپید و رشد نهال‌ها شد و اثرات مخرب تنش‌ها را کاهش داد. در پژوهشی دیگر توسط نازیم^۷ و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که استفاده از میکروارگانیسم‌های مفید و عناصر کم‌مصرف مانند سلنیوم می‌تواند با ارتقای جذب مواد مغذی و تقویت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، به بهبود رشد و عملکرد گیاهان تحت شرایط تنش خشکی کمک می‌کند. تلقیح کاملینا با قارچ‌های میکوریزای آربوسکولار همراه با تیمار سلنیوم، به‌طور قابل توجهی پارامترهای فیزیولوژیکی، رشد و تحمل به تنش خشکی را افزایش داده است.

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های زیست‌فناوری و تلقیح با میکروارگانیسم‌های محرک رشد گیاه (*PGPR*) برای افزایش تحمل به تنش‌ها به‌طور گسترده به کار رفته است (لیو^۸ و

5. Alberghini
6. Zhang
7. Nazim
8. Liu

1. Piravi-vanak
2. Berti
3. Arshad
4. Attia

کاملینا تحت تنش خشکی و گردوغبار در شرایط مزرعه انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور بررسی تأثیر سویه‌های *Bacillus amyloliquefaciens* و *Bacillus halotolerans* بر خصوصیات فیزیولوژیک و مورفولوژیک گیاه کاملینا تحت تنش خشکی و گردوغبار، به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. فاکتورها شامل باکتری محرک رشد گیاه (در چهار سطح شاهد، تلقیح با هریک از دو باکتری و تلقیح ترکیبی)، دوره آبیاری (۴، ۶ و ۸ روز یک بار) و گردوغبار (در دو سطح: بدون گردوغبار و با گردوغبار) بودند. آزمایش در مزرعه خواجه منصور شهرستان آران و بیدگل با موقعیت جغرافیایی UTM 543560 و ۳۷۷۴۸۷۲ انجام شد.

سوسپانسیون باکتریایی با غلظت نهایی 3×10^8 CFU/mL تهیه شد و بذرهاي کاملینا به مدت دو ساعت در آن غوطه‌ور شدند. سپس ۴۰ بذر در هر کرت یک مترمربعی کشت شدند. آبیاری نهال‌ها براساس شرایط اقلیمی منطقه هر ۴ روز یک بار، به عنوان شاهد (مطابق با عرف زارعین محلی)، آبیاری ۶ روزه به عنوان کم‌آبیاری متوسط، آبیاری ۸ روزه به عنوان اعمال کم‌آبیاری شدید اعمال گردید. آبیاری تا زمان استقرار نهال‌ها (یک ماه بعد از کاشت) هر ۴ روزه یک بار انجام شد. با توجه به منشأیابی انجام‌شده و تعیین کانون‌های بحرانی گردوغبار استان اصفهان - شهرستان آران و بیدگل، برای تهیه گردوغبار از نمونه خاک کانون گردوغبار استفاده شد. از آنجا که اندازه ذرات گردوغبار اندازه‌گیری‌شده در استان اصفهان بین ۱ میکرومتر تا ۱۰۰ میکرومتر است، از ذرات زیر ۱۰ میکرومتر برای اعمال ریزگرد استفاده شد. براساس مطالعه میدانی انجام‌شده توسط رنجبر فردویی و همکاران (۲۰۱۸) در منطقه بیابانی کاشان (دشت مرنجاب)، میزان رسوب گردوغبار ریزشی بر سطح برگ‌های گیاه *Smirnovia iranica* در بازه زمانی (آوریل تا ژوئن) مطابق با اواسط فروردین تا اوایل تیر، بین ۰/۰۵۷ تا ۰/۱۱۳ میلی گرم بر سانتی متر مربع در روز گزارش شده است؛ که معادل ۰/۵۷ تا ۱/۱۳ گرم بر مترمربع در روز است. با توجه به اینکه دوره اجرای آزمایش حاضر نیز در همین بازه زمانی انجام شده، مقدار گردوغبار اعمال‌شده بر پایه همین مقادیر

همکاران، ۲۰۲۵). ریزوسفر گیاه، محل تجمع میکروارگانیسم‌های مفید است، نقش مهمی در حفظ سلامت و افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش‌ها دارد. باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) از گروه‌های مهم میکروارگانیسم‌ها هستند که با تأثیر بر رشد و مقاومت گیاهان، نقش مؤثری در افزایش عملکرد دارند (اعتصامی و گلک، ۲۰۲۰). این باکتری‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند تولید هورمون‌های رشد، تثبیت نیتروژن، انحلال فسفات، تولید آنزیم ACC دی‌آمیناز برای کاهش استرس اتیلن، تولید سیدروفورها و افزایش جذب عناصر غذایی، موجب بهبود رشد ریشه و اندام هوایی می‌شوند (امینی حاجی‌آبادی و همکاران، ۲۰۲۱؛ کومار^۱ و همکاران، ۲۰۲۰). برزو و همکاران (۲۰۲۱) در توصیف پاسخ‌های فیزیولوژیکی و ترکیبات اسید چرب ژنوتیپ‌های کاملینا تحت تنش کم‌آبی نشان دادند که هم‌زیستی کاملینا با میکروکوکوس یوننانسیس شرایط گیاه تحت تنش را بهبود بخشید.

سویه‌های *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens*

به دلیل سازگاری با شرایط بیابانی و توانایی تولید اسپور، مقاومت بالا در برابر شرایط نامساعد محیطی و تولید متابولیت‌های ضدباکتری و ضدقارچ، به عنوان باکتری‌های محرک رشد مؤثر شناخته شده‌اند. تأثیر باکتری *B. amyloliquefaciens* بر روی رشد گیاه یونجه تحت شرایط تنش خشکی بررسی و نتیجه‌گیری شد که *B. amyloliquefaciens* می‌تواند به عنوان یک کود سبز بالقوه در کشاورزی پایدار برای بهبود مواد مغذی خاک و افزایش تولید گیاه در شرایط خشکسالی عمل کند (هان^۲ و همکاران، ۲۰۲۴).

تاکنون تحقیقی که تأثیر توأم خشکی و ریزگرد را بر روی کاملینا بررسی کرده باشد وجود نداشته و چون 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 دانه‌های روغنی، این پژوهش با هدف بررسی کارایی و نقش باکتری‌های محرک رشد مقاوم به خشکی *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* بر روی برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک گونه

B. amyloliquefaciens و ترکیب دو باکتری در شرایط اعمال ریزگرد باعث افزایش کلسیم در آبیاری ۴ و ۶ روزه شد. اعمال ریزگرد در شرایط کاربرد باکتری *B. amyloliquefaciens* در دوره آبیاری ۶ روزه باعث افزایش معنی دار کلسیم شد (شکل ۲).

فسفر: نتایج نشان داد که در شرایط بدون باکتری مقدار فسفر تحت تأثیر کم آبیاری قرار گرفت لیکن تحت تأثیر ریزگرد قرار نگرفت. به طوری که با افزایش دوره آبیاری مقدار فسفر کاهش یافت. باکتری *B. halotolerans* در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش معنی دار ۳۳ درصدی فسفر در آبیاری ۸ روزه شد. باکتری *B. halotolerans*، *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری در شرایط اعمال ریزگرد باعث افزایش معنی دار فسفر در آبیاری ۸ روزه شد. در ضمن، اعمال ریزگرد در شرایط کاربرد باکتری *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری در دوره آبیاری ۸ روزه باعث افزایش معنی دار فسفر شد (شکل ۳).

پتاسیم: نتایج نشان داد که در شرایط بدون باکتری مقدار پتاسیم تحت تأثیر کم آبیاری قرار نگرفت، لیکن در شرایط بدون باکتری، مقدار پتاسیم تحت تأثیر اعمال ریزگرد قرار گرفت. تلقیح باکتریایی در شرایط بدون ریزگرد و اعمال ریزگرد باعث افزایش معنی دار پتاسیم نسبت به بدون باکتری در هر سه دوره آبیاری شده است (شکل ۴).

قندهای محلول: تأثیر متقابل باکتری و خشکی بر قندهای محلول نشان داد که در شرایط بدون باکتری، آبیاری ۸ روزه باعث کاهش معنی دار قندهای محلول نسبت به آبیاری ۴ و ۶ روزه شد. همچنین در ترکیب دو باکتری، آبیاری ۶ روزه باعث کاهش معنی دار قندهای محلول نسبت به آبیاری ۴ و ۸ روزه شد. تلقیح با *B. halotolerans*، در آبیاری ۸ روزه باعث افزایش معنی دار قندهای محلول شد. همچنین در شرایط ترکیب دو باکتری، در آبیاری ۶ روزه کاهش معنی دار مقدار قندهای محلول مشاهده شد (شکل ۵). تأثیر متقابل گردوغبار و خشکی بر قندهای محلول برگ نشان داد که در شرایط بدون گردوغبار و در آبیاری ۸ روزه باعث کاهش معنی دار قندهای محلول نسبت به آبیاری ۴ و ۶ روزه شد. در شرایط اعمال گردوغبار و در آبیاری ۸ روزه افزایش معنی دار ۱۰ درصدی قندهای محلول مشاهده شد (شکل ۶).

منطقه‌ای تعیین گردیده است. نمونه برداری از برگ گیاه کاملینا برای آنالیز فاکتورهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی قبل از رسیدن دانه‌ها انجام شد. وزن دانه و صفات رویشی و زایشی گیاه کاملینا بعد از برداشت گیاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

محاسبات آماری

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از پارامترهای مختلف اندازه‌گیری شده از نرم افزار SPSS استفاده شد و نمودارها نیز در نرم افزار Excel رسم گردید. پس از اطمینان از نرمال بودن 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 ($\alpha=0/05$) بررسی گردید.

نتایج

بررسی خصوصیات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهمکنش باکتری × گردوغبار × خشکی بر مقدار کلسیم، کاروتنوئید، کلروفیل b، پتاسیم، فسفر و فنل، برهمکنش باکتری × گردوغبار بر غلظت پرولین، برهمکنش باکتری × خشکی بر غلظت نیتروژن، پرولین و قندهای محلول و برهمکنش گردوغبار × خشکی بر غلظت پرولین و قندهای محلول در برگ کاملینا معنی دار بود سایر صفات اندازه‌گیری شده معنی دار نبودند.

نیتروژن: نتایج نشان داد در شرایط بدون باکتری مقدار نیتروژن تحت تأثیر کم آبیاری و ریزگرد قرار گرفت. باکتری *B. halotolerans* در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش معنی دار به ترتیب ۱۹ و ۲۳ درصدی نیتروژن در دوره آبیاری ۴ و ۸ روزه شد. باکتری *B. halotolerans* و کاربرد ترکیب دو باکتری در شرایط اعمال ریزگرد باعث افزایش معنی دار نیتروژن نسبت به بدون باکتری در دوره آبیاری ۶ روزه شد (شکل ۱).

کلسیم: نتایج نشان داد شرایط بدون باکتری، مقدار کلسیم تحت تأثیر کم آبیاری و ریزگرد قرار گرفت. باکتری *B. halotolerans* و *B. amyloliquefaciens* در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش معنی دار کلسیم در آبیاری ۴ و ۶ روزه و در ترکیب دو باکتری در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش معنی دار در هر سه دوره آبیاری شد. باکتری *B. halotolerans*

پرولین: تأثیر متقابل باکتری و گردوغبار بر پرولین برگ نشان داد که در شرایط بدون باکتری با اعمال ریزگرد افزایش معنی‌دار پرولین به میزان ۸۶ درصد مشاهده شد. تلقیح باکتریایی باعث کاهش معنی‌دار پرولین نسبت به شرایط بدون باکتری شد. (شکل ۷) تأثیر متقابل باکتری و خشکی بر پرولین برگ نشان داد که در شرایط بدون باکتری مقدار پرولین در آبیاری ۸ روزه نسبت به آبیاری ۴ روزه افزایش معنی‌دار به مقدار ۳۵ درصدی شد (شکل ۸). تأثیر متقابل گردوغبار و خشکی بر پرولین برگ نشان داد که در شرایط آبیاری ۸ روزه و با اعمال گردوغبار و بدون گردوغبار افزایش معنی‌دار مقدار پرولین مشاهده شد (شکل ۹).

وزن بذری: نتایج نشان داد که مقدار وزن بذر تحت تأثیر کم‌آبیاری و ریزگرد قرار گرفت. باکتری *B. halotolerans* و ترکیب دو باکتری در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش معنی‌دار وزن بذر در هر سه دوره آبیاری شدند. *B. amyloliquefaciens* نیز در دو دور آبیاری ۴ و ۶ روزه این افزایش را ایجاد کردند. باکتری *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری در شرایط اعمال ریزگرد باعث افزایش معنی‌دار وزن بذر در هر سه دور آبیاری شدند. *B. halotolerans* نیز در آبیاری ۴ و ۶ روزه این افزایش را ایجاد کردند (شکل ۱۳).

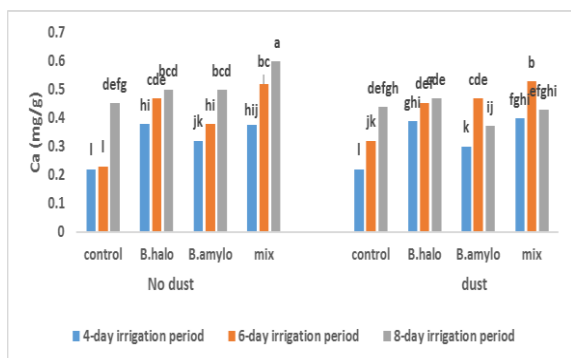
وزن خشک اندام هوایی گیاه: نتایج نشان داد که در شرایط بدون باکتری مقدار وزن خشک اندام هوایی گیاه تحت تأثیر هم‌زمان کم‌آبیاری و ریزگرد قرار گرفت. باکتری *B. halotolerans*، *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری در شرایط بدون ریزگرد و اعمال ریزگرد، باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی گیاه در هر سه دوره آبیاری شدند (شکل ۱۴).

وزن خشک ریشه: نتایج نشان داد که در شرایط بدون باکتری مقدار وزن خشک ریشه تحت تأثیر هم‌زمان کم‌آبیاری و ریزگرد قرار گرفت. باکتری *B. halotolerans*، *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری در شرایط بدون ریزگرد و اعمال ریزگرد، باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک اندام هوایی گیاه در هر سه دوره آبیاری شدند (شکل ۱۵).

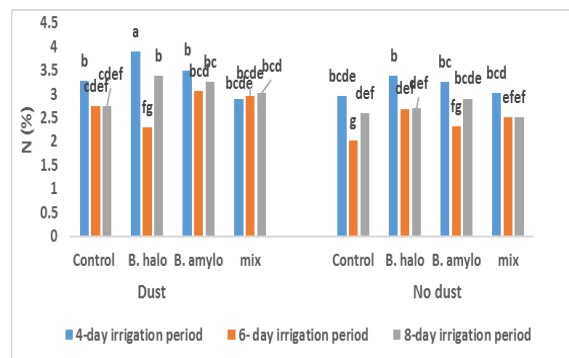
فنل: نتایج نشان داد که در شرایط بدون باکتری، مقدار فنل تحت تأثیر کم‌آبیاری قرار گرفت لیکن تحت تأثیر ریزگرد قرار نگرفت. باکتری *B. halotolerans* و ترکیب دو باکتری در شرایط بدون ریزگرد باعث کاهش معنی‌دار فنل در هر سه دوره آبیاری گردید. باکتری *B. amyloliquefaciens* در آبیاری دوره ۶ روزه فنل را کاهش داد. باکتری *B. halotolerans*، *B. amyloliquefaciens* و ترکیب دو باکتری در شرایط اعمال ریزگرد باعث کاهش معنی‌دار فنل در آبیاری دوره ۴ و ۶ روزه شدند و در ترکیب دو باکتری این کاهش در آبیاری ۸ روزه هم مشاهده گردید (شکل ۱۰).

کلروفیل b: نتایج نشان داد که مقدار کلروفیل b تحت تأثیر کم‌آبیاری و ریزگرد قرار گرفت. باکتری *B. halotolerans* و ترکیب دو باکتری در شرایط بدون ریزگرد باعث افزایش معنی‌دار کلروفیل b در آبیاری ۴، ۶ و ۸ روزه شد. باکتری *B. halotolerans* در شرایط اعمال ریزگرد باعث افزایش ۲۴ درصدی کلروفیل b در آبیاری ۶ روزه شد. باکتری *B. amyloliquefaciens* در شرایط اعمال ریزگرد باعث افزایش معنی‌دار ۲۰ درصدی کلروفیل b در آبیاری ۶ روزه شد. ترکیب دو باکتری در شرایط اعمال ریزگرد باعث افزایش کلروفیل b در آبیاری ۴ و ۸ روزه شد (شکل ۱۱).

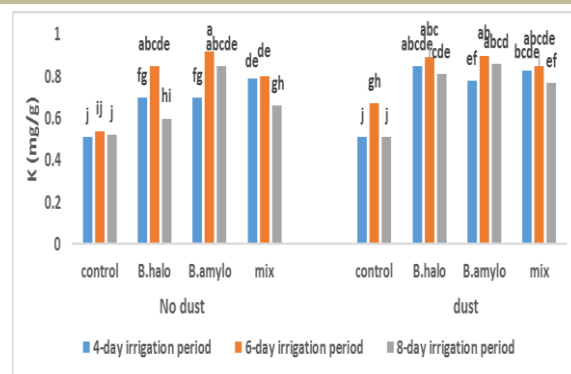
کاروتنوئید: نتایج نشان داد که مقدار کاروتنوئید تحت تنش هم‌زمان کم‌آبیاری و ریزگرد قرار گرفت و مقدار آن در آبیاری ۴ و ۸ روزه افزایش معنی‌داری یافت. باکتری



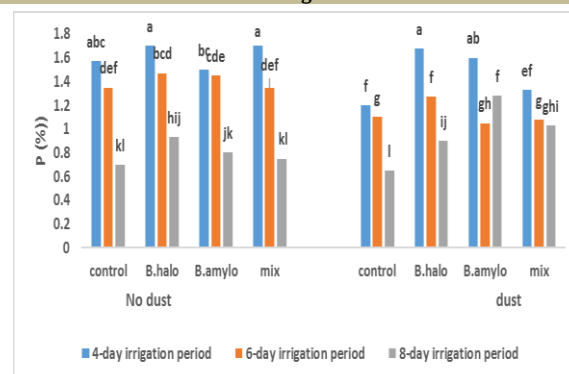
شکل (۲): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر کلسیم برگ
Figure (2): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on leaf calcium



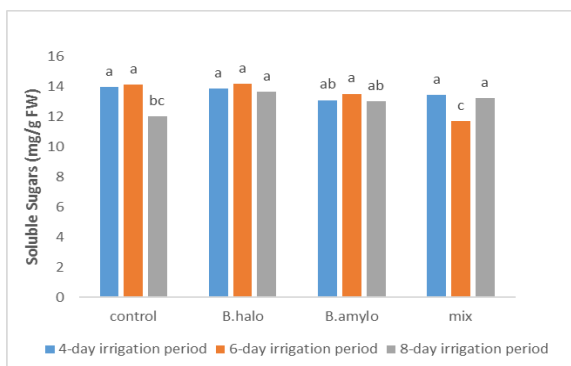
شکل (۱): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر نیتروژن برگ
Figure (1): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on leaf nitrogen



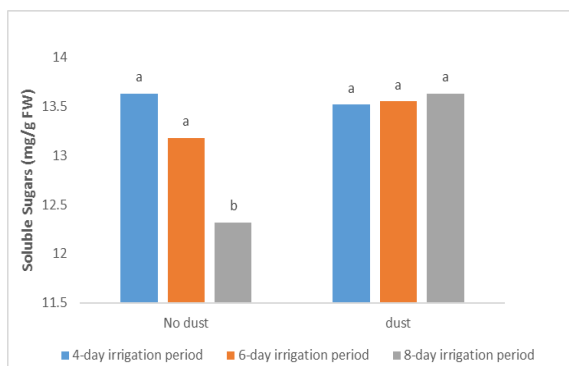
شکل (۴): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر پتاسیم برگ
Figure (4): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on leaf potassium



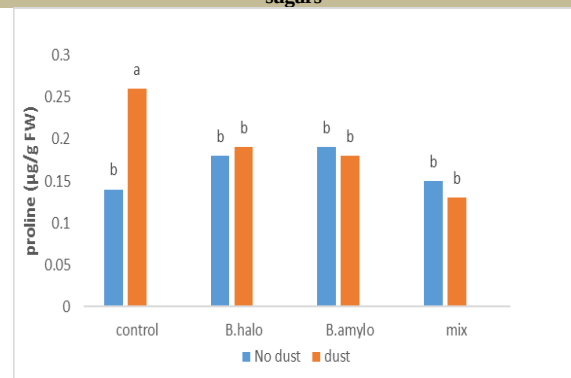
شکل (۳): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر فسفر برگ
Figure (3): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on leaf phosphorus



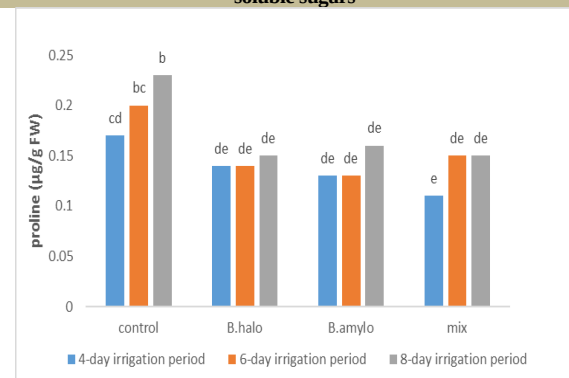
شکل (۶): تأثیر متقابل گردوغبار و خشکی بر قندهای محلول برگ
Figure (6): Interaction effect of dust and drought on leaf soluble sugars



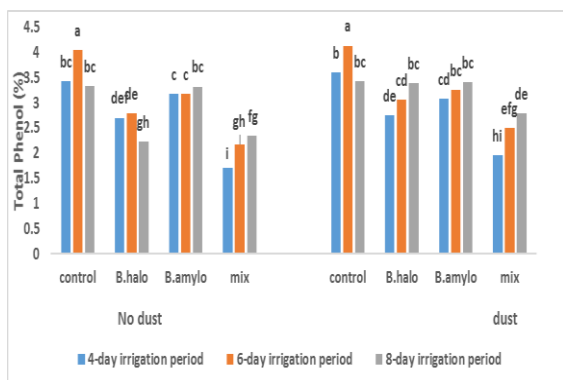
شکل (۵): تأثیر متقابل باکتری و خشکی بر قندهای محلول برگ
Figure (5): Interaction effect of bacteria and drought on leaf soluble sugars



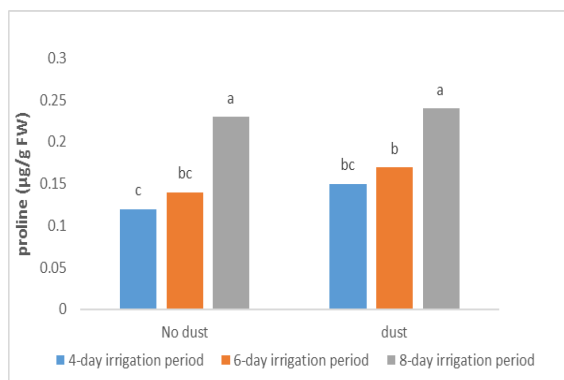
شکل (۸): تأثیر متقابل باکتری و خشکی بر پرولین برگ
Figure (8): Interaction effect of bacteria and drought on leaf proline



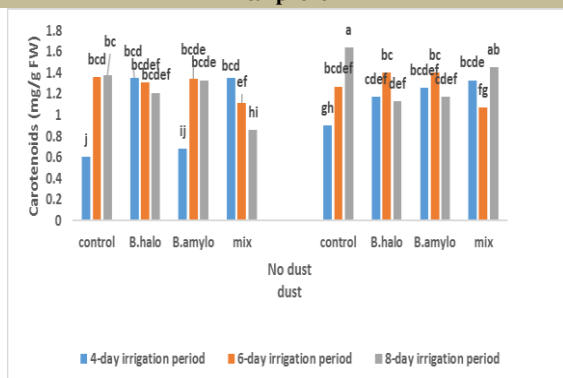
شکل (۷): تأثیر متقابل باکتری و گردوغبار بر پرولین برگ
Figure (7): Interaction effect of bacteria and dust on leaf proline



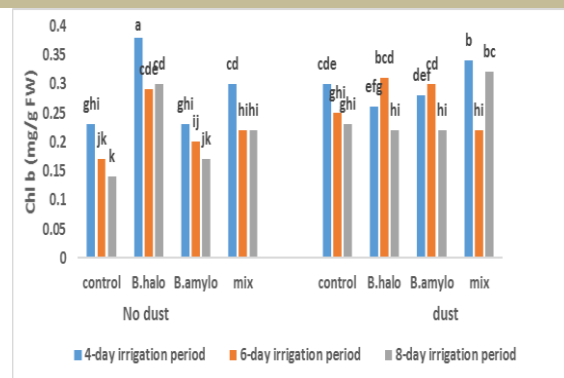
شکل (۱۰): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر فنل برگ
Figure (10): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on leaf phenol



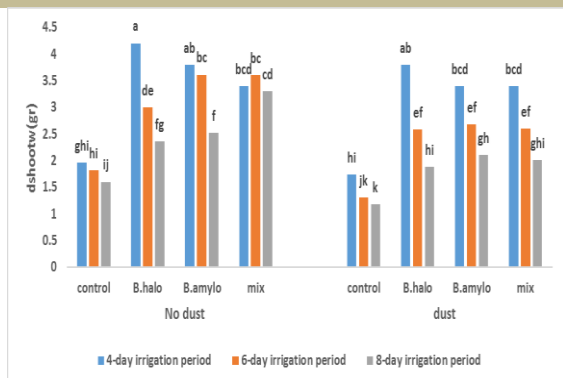
شکل (۹): تأثیر متقابل گردوغبار و خشکی بر پرولین برگ
Figure (9): Interaction effect of dust and drought on leaf proline



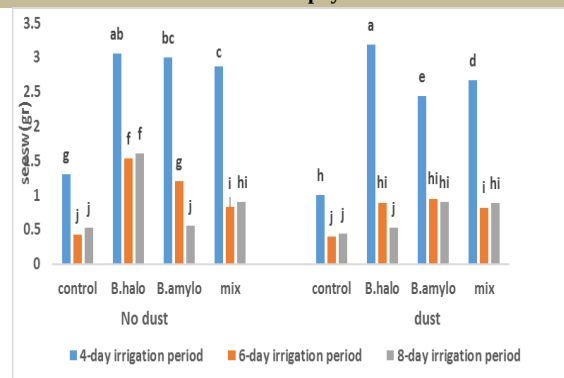
شکل (۱۲): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر کاروتنوئید برگ
Figure (12): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on leaf carotenoids



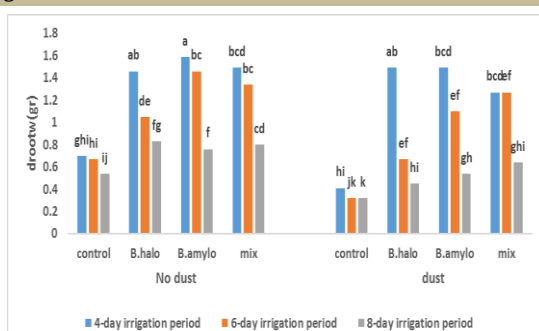
شکل (۱۱): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر کلروفیل b برگ
Figure (11): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on leaf chlorophyll b



شکل (۱۴): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر وزن خشک اندام هوایی
Figure (14): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on shoot dry weight



شکل (۱۳): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر وزن بذر
Figure (13): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on seed weight



شکل (۱۵): تأثیر متقابل باکتری، خشکی و گردوغبار بر وزن خشک ریشه
Figure (15): Interaction effect of bacteria, drought, and dust on root dry weight

بحث

نتایج نشان داد میزان نیتروژن تحت تأثیر تنش‌های کم‌آبیاری و گردوغبار قرار گرفت. نیتروژن عنصری حیاتی برای گیاه تلقی می‌گردد که علاوه بر شرکت در ساختمان پروتئین‌های سلول‌های گیاهی، آنزیم‌ها، اسیدهای نوکلئیک، بخشی از کلروفیل گیاه را نیز تشکیل می‌دهد (شیلوف،^۱ ۲۰۲۰)، تنش خشکی به دلیل سرعت پایین تعرق، کاهش انتقال فعال و اختلال در نفوذپذیری غشا، جذب مواد مغذی توسط ریشه‌ها و انتقال آن‌ها در گیاه را کاهش می‌دهد (حسین^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). نتایج مشابه بر روی کاملینا نشان داد توان تنظیمی تأمین نیتروژن بر پاسخ‌های فتوسنتزی و رشد گیاه، به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر وضعیت رطوبتی خاک قرار دارد (پن^۳ و همکاران، ۲۰۱۱). در شرایط وقوع تنش گردوغبار کاهش مقدار نیتروژن می‌تواند به دلیل کاهش فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز به دلیل کمبود نور و در نتیجه کاهش اسیمیلایون نیترات باشد (خان^۴ و همکاران، ۱۹۹۵). تلقیح با باکتری‌های محرک رشد گیاه در حالت تنش باعث افزایش نیتروژن شد. افزایش مقدار نیتروژن در شرایط تنش محیطی را می‌توان به خصوصیات محرک رشدی PGPR به‌خصوص تثبیت نیتروژن مولکولی نسبت داد. به نظر می‌رسد این باکتری‌ها با تثبیت N₂ و افزایش تولید پروتئین در شرایط تنشی تا حدودی آثار مضر تنش را کاهش می‌دهند (نگالیمات^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). افزایش تولید نیتروژن در شرایط تنشی در تیمارهای تلقیحی با باکتری محرک رشد گیاه در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (پن و همکاران، ۲۰۱۹؛ دومینگز^۶ و همکاران، ۲۰۱۵).

نتایج نشان داد که مقدار کلسیم تحت تأثیر کم‌آبیاری و ریزگرد قرار گرفت. کلسیم به‌عنوان یک عنصر کلیدی در پایداری دیواره سلولی و سیگنال‌دهی به گیاه برای مقابله با تنش‌های محیطی شناخته شده است (ایلیاس^۷ و همکاران، ۲۰۲۱). جذب کلسیم می‌تواند باعث افزایش تحمل کاملینا به

کم‌آبیاری گردد و به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های تحمل به خشکی در گیاه معرفی گردد. تلقیح باکتریایی باعث افزایش کلسیم شد. باکتری‌های محرک رشد گیاه قادرند از طریق انحلال تری کلسیم فسفات (آذر می و همکاران، ۲۰۱۶) و همچنین توسعه سریع سیستم ریشه‌ای و افزایش قابلیت جذب مواد غذایی مانند کلسیم و منیزیم باعث افزایش تحمل گیاه نسبت به تنش شوند (الکهنانی^۸ و همکاران، ۲۰۲۰).

نتایج نشان داد با افزایش تنش کم‌آبیاری و گردوغبار مقدار فسفر برگ کاهش یافت. فسفر از مهم‌ترین عناصر مورد نیاز برای رشد و ترمیم گیاه به شمار رفته که اغلب به‌عنوان ماده انرژی‌زا تعریف می‌شود زیرا این عنصر به ذخیره و انتقال انرژی در فرایند فتوسنتز کمک نموده و برای تقسیم سلولی و تشکیل RNA و DNA بسیار لازم است. تغییر در میزان این عنصر به‌طور مستقیم بر میزان فرایند فتوسنتز (فرایندن‌وانگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۵) و به‌طور غیرمستقیم بر میزان سنتز پروتئین تأثیرگذار است. از آنجاکه فسفر نقش مهمی در اغلب فعالیت‌های متابولیسمی گیاهان دارد، کاهش آن در برگ گیاه به دلیل افزایش گردوغبار باعث کاهش سنتز اسمولیت‌ها و پروتئین‌های محلول می‌شود (بی‌مال و کارموکر^{۱۰}، ۲۰۱۱). کاهش میزان فسفر ناشی از تنش گردوغبار در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (نجفی زیلائی و همکاران، ۲۰۲۲ a و b) در شرایط اعمال ریزگرد *B. amyloliquefaciens*، *B. halotolerans* 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 است (نجفی زیلائی و همکاران، ۲۰۲۳ a و b). *B. amyloliquefaciens* (ژائو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰) و *B. halotolerans* (شاه^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۲) 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. علاوه بر این، تولید سیانید هیدروژن

8. ALKahtani
9. Frydenvang
10. Bimal & Karmoker
11. Zhao
12. Shah

1. Shilev
2. Hussain
3. Pan
4. Khan
5. Ngalimat
6. Dominguez
7. Ilyas

ورود CO₂ به برگ می‌شود (نجیب^۶ و همکاران، ۲۰۲۲)، از طرفی تجمع گردوغبار سبب ایجاد حالت سایه بر گیاه می‌شود (شارما^۷ و همکاران، ۲۰۱۷) و فتوسنتز در برگ را تنزل می‌دهند می‌دهند (شریفی کالیانی و همکاران، ۲۰۲۴؛ مرآوی و همکاران، ۲۰۲۱) و 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 (شتوی^۸ و همکاران، ۲۰۲۱) به دست آمد. سویه *B. halotolerans* باعث بیشترین تأثیر در افزایش قندهای محلول شد. این باکتری با تعدیل سنتز فیتوهورمون‌ها و تنظیم تعادل اسمزی، هموستاز یونی و بیان ژن، از رشد گیاه محافظت می‌کند. *B. halotolerans* در گیاه گندم (وو^۹ و همکاران، ۲۰۲۲) مقدار قندهای محلول را افزایش داد.

نتایج نشان داد که مقدار پرولین تحت تأثیر کم آبیاری و ریزگرد افزایش یافت. از مهم‌ترین نقش‌های فیزیولوژیکی تجمع پرولین در واکنش به کمبود آب، نقش آن به عنوان یک ماده تنظیم‌کننده فشار اسمزی و عامل حفاظت‌کننده آنزیم‌های سیتوپلاسمی و ساختمانی غشاست (غفاری و همکاران، ۲۰۱۹). 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 به عنوان منبع ازت و کربن نیز عمل کرده و تحمل گیاه در برابر تنش را افزایش می‌دهد (حسینی فرد و همکاران، ۲۰۲۲). گزارش مشابه این تحقیق نشان داد که مقدار پرولین تحت تنش خشکی در کاملینا افزایش یافت (احمد^{۱۰} و همکاران، ۲۰۱۷). هر سه سویه باکتریایی در شرایط اعمال ریزگرد و سویه ترکیب دو باکتری در شرایط تنش کم آبیاری 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

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 نشان داد که مقدار پتاسیم تحت تأثیر کم آبیاری قرار نگرفت لیکن مقدار پتاسیم تحت تأثیر اعمال ریزگرد قرار گرفت. پتاسیم از عناصر کلیدی در تنظیم اسمز، باز و بسته شدن روزنه‌ها، و مقاومت گیاه به تنش‌های محیطی است. تلقیح با باکتری‌های محرک رشد گیاه در حالت تنش باعث افزایش یون پتاسیم در گونه کاملینا شد، به طوری که تلقیح با سویه *B. amyloliquefaciens* بیشترین تأثیر را در افزایش پتاسیم داشت. باکتری‌های محرک رشد گیاه با تأثیر بر پتاسیم معدنی، فرم قابل جذب یون پتاسیم برای گیاه را در محیط ریزوسفر افزایش داده (اعتصامی و همکاران، ۲۰۱۷) و به گیاه فرصت می‌دهند تا تعادل یونی را از طریق افزایش جریان یون پتاسیم به بخش هوایی و انتقال سدیم به ریشه‌ها برقرار نمایند (وانگ^۱ و همکاران، ۲۰۱۶). در این زمینه، توانایی تولید بیوپلیمر اگزوپلی ساکارید به وسیله باکتری‌های محرک رشد گیاه (رادهاکریشنان^۲ و همکاران، ۲۰۱۷) با به دام انداختن یون سدیم سدیم نیز می‌تواند به عنوان یک مانع به جهت ورود سدیم اضافی به ریشه گیاه عمل نماید. عملکرد باکتری‌های محرک رشد گیاه در پژوهش حاضر در افزایش غلظت پتاسیم، با نتایج مطالعات دیگر در این زمینه (بیک^۳ و همکاران، ۲۰۲۰؛ پان^۴ و همکاران، ۲۰۱۹) مطابقت دارد.

نتایج نشان داد که اعمال گردوغبار باعث تشدید اثر کم آبیاری بر کاهش قندهای محلول شد. فرونشست و تجمع ذرات ریز گرد 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 (مرآوی^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). گردوغبار باعث بسته شدن دهانه روزنه‌های برگ (که حدود ۵ تا ۷ میکرومترند) گردیده و درعین حال باعث افزایش دمای برگ، عدم تهویه مناسب، عدم تعرق و عدم

6. Najib
7. Sharma
8. Sheteiwy
9. Wu
10. Ahmed

1. Wang
2. Radhakrishnan
3. Baek
4. Pan
5. Meravi

تنش های محیطی از جمله خشکی، شوری و آلودگی هوا دارد. در این پژوهش، مقدار کلروفیل b تحت تأثیر تنش کم آبی و گردوغبار قرار گرفت. استفاده از باکتری های محرک رشد گیاه در این پژوهش، باعث افزایش مقدار کلروفیل b شد. افزایش مقدار کلروفیل ممکن است به علت تولید سیدروفور و اکسین توسط این باکتری ها باشد. سیدروفور میل ترکیبی شدید برای پیوند با برخی از کاتیون ها از جمله آهن III دارد، که از عناصر ضروری برای ساخت کلروفیل است (سانتویو^۳ و همکاران، ۲۰۱۹). باکتری های محرک رشد گیاه با افزایش کارایی مصرف آب، تأثیر تنش بر فتوسنتز را کاهش و با افزایش غلظت مقادیر کلروفیل a و کلروفیل b منجر به بهبود فتوسنتز و رشد گیاه در شرایط تنش می شوند (چنگ^۴ و همکاران ۲۰۰۷). این بهبود احتمالاً ناشی از تحریک تولید مواد تنظیم کننده رشد گیاهی نظیر سیتوکینین ها و کاهش تولید گونه های فعال اکسیژن (ROS) توسط این باکتری ها است که به پایداری غشای کلروپلاست و رنگیزه های آن کمک می کند (وراکوندا^۵ و همکاران ۲۰۱۶؛ سینگ^۶ و همکاران، ۲۰۲۰). سویه *B. halotolerans* مقدار کلروفیل b را بیشتر از سویه دیگر افزایش داد که این موضوع می تواند به دلیل کلونیزاسیون بهتر این سویه بر ریزوسفر گیاه یا توانایی انحلال فسفات بالاتر این سویه نسبت به سویه کاربرد دو باکتری و باکتری *B. amyloliquefaciens* باشد.

کاروتنوئیدها از جمله ترکیبات فتوسنتزی مهم و آنتی اکسیدان های غیر آنزیمی در گیاهان هستند که نقش حیاتی در حفظ ساختار فتوسیستم ها، جذب نور و مقابله با تنش های اکسیداتیو ناشی از شرایط محیطی ایفا می کنند (هاوو^۷، ۲۰۱۴). یافته های این مطالعه نشان داد که کاربرد ریزگرد و کم آبیاری باعث افزایش معنی دار کاروتنوئید شد؛ که می تواند 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 خاموش سازی گونه های اکسیژن فعال (ROS) است (شارما و همکاران، ۲۰۱۲). تلقیح باکتریایی باعث کاهش مقدار کاروتنوئید شد. این کاهش می تواند ناشی از بهبود

خود کاهش تولید پرولین را توجیه می کند (نجفی زیلائی و همکاران، ۲۰۲۲a,b). برزو و همکاران (۲۰۲۱) در توصیف پاسخ های فیزیولوژیکی و ترکیبات اسید چرب ژنوتیپ های کاملینا تحت تنش کم آبی و همزیستی با میکروکوکوس یونانسیس نشان دادند که اگرچه مقدار پرولین تحت تنش خشکی افزایش یافت، باکتری محرک رشد گیاه مقدار آن را کاهش داد.

نتایج نشان داد که در شرایط بدون باکتری، مقدار فنل تحت تأثیر کم آبیاری قرار گرفت لیکن تحت تأثیر ریزگرد قرار نگرفت. آنتی اکسیدان های غیر آنزیمی به طور عمده شامل آسکوربیک اسید، ترکیبات فنلی، فلاونوئید، آنتوسیانین و پرولین می باشند (دوراک^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). ترکیبات آنتی اکسیدان موجب کاهش سطح گونه های فعال اکسیژن در سلول های گیاهی می شوند، و سریع ترین واحدهای مقابله کننده در برابر حمله ROS محسوب می شوند (دیرک و مونتگو^۲، ۲۰۰۲). آنزیم سوپراکسید دیسموتاز (SOD) به عنوان نخستین خط دفاعی گیاهان در مقابل ROS، تبدیل O₂⁻ به H₂O₂ را کاتالیز کرده و باعث کاهش خسارت به DNA و پروتئین ها می شود. ترکیب دوسویه (Mix) غلظت فنل کل را بیشتر از دوسویه مجزا کاهش داد. در شرایط اعمال ریزگرد تلقیح باکتریایی باعث کاهش معنی دار فنل در هر سه دوره آبیاری شد که می تواند ناشی از کاهش شدت تنش و بهبود وضعیت فیزیولوژیکی گیاه باشد. باکتری های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* با افزایش جذب عناصر غذایی، ترشح فیتوهورمون ها و القای مقاومت سیستمیک، موجب کاهش نیاز گیاه به سنتز ترکیبات دفاعی پرهزینه ای مانند فنل ها شده اند (کومار و همکاران ۲۰۲۰). مشابه نتایج این تحقیق برزو و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که ظرفیت آنتی اکسیدانی و محتوای فنل کل با تنش خشکی روند افزایشی داشت. کاربرد PGPB منجر به افزایش وزن دانه، تعداد دانه و خورجین، جذب مواد مغذی و افزایش پروتئین شد.

کلروفیل b به عنوان یکی از رنگیزه های فتوسنتزی نقش مکملی در جذب نور و انتقال انرژی دارد و حساسیت بالایی به

3. Santoyo
4. Cheng
5. Vurukonda
6. Singh
7. Havaux

1. Dvorak
2. Dirk & Montago

خشکی یا کم‌غذایی نقش کلیدی ایفا می‌کنند (شتیوی و همکاران، ۲۰۲۱).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که تنش‌های هم‌زمان خشکی و گردوغبار باعث اختلالات قابل توجهی در فرایندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کاملینا شد؛ به‌طوری‌که کاهش معنی‌دار در قندهای محلول، محتوای نیتروژن، فسفر، کلروفیل b و افزایش اسمولیت‌هایی مانند پرولین و فنل، کلسیم و پتاسیم و کاروتنوئید در اثر تنش خشکی بود. درمقابل، گردوغبار فقط مقدار فسفر و کلسیم کاملینا را کاهش و قندهای محلول، پرولین، فنل، کلروفیل b و کاروتنوئید را افزایش داد. این تغییرات موجب کاهش عملکرد کیفی و کمی گیاه به‌ویژه وزن بذر، وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه گردید. نتایج این تحقیق به‌وضوح نشان داد که اثر تنش خشکی بر کاملینا از اثر گردوغبار بیشتر است. به عبارت دیگر گردوغبار اثر تنش خشکی را تشدید می‌کند. تلقیح باکتری‌های *B. amyloliquefaciens* و *B. halotolerans* و ترکیب دو باکتری، نقش مؤثری در تعدیل اثرات منفی این تنش‌ها ایفا کردند. 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. افزون بر 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 گیاه مقاوم به‌عنوان راهکاری زیستی پایدار برای بهبود بهره‌وری زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید دارد. همچنین، تفاوت در اثربخشی 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.

وضعیت فیزیولوژیک گیاه و کاهش نیاز به سنتز ترکیبات آنتی‌اکسیدانی ثانویه باشد، زیرا 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 (نگوین و همکاران، ۲۰۲۱). نتایج به‌دست‌آمده با گزارش‌های مشابه مطابقت دارد؛ برای مثال، در مطالعه‌ای توسط (وروکوندا و همکاران، ۲۰۱۶)، کاربرد باکتری‌های محرک رشد موجب کاهش سطح کاروتنوئید تحت تنش خشکی شد که به تعدیل تنش در گیاهان نسبت داده شد. سینگ و همکاران (۲۰۲۰) نیز گزارش کردند که تلقیح باکتری‌های مقاوم به خشکی موجب کاهش تجمع کاروتنوئیدها در گندم تحت تنش گردوغبار گردید که بیانگر عملکرد محافظتی این باکتری‌ها بود.

وزن خشک گیاه، وزن بذر و وزن خشک ریشه یکی از شاخص‌های مهم کیفیت و عملکرد گیاه است که تحت تأثیر شرایط محیطی و مدیریتی تغییر می‌کند. نتایج نشان داد که افزایش دوره آبیاری به‌طور معنی‌داری باعث کاهش این دو شاخص شد. خشکی موجب اختلال در فتوسنتز، فرایندهای آنزیمی و بیوشیمیایی و به هم خوردن توازن متابولیسمی گیاهان شده و بر خصوصیات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی آن‌ها تأثیر می‌گذارد (شاراوردورج^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). تغییر در صفات مورفولوژیکی شامل کاهش رشد (آزاری و همکاران، ۲۰۲۰)، کاهش بیومس و درنهایت کاهش در تولید محصول (اعتصامی و گلیک، ۲۰۲۰) می‌شود. (مطلق و همکاران، ۲۰۲۱). تأثیر *B. halotolerans* بر وزن دانه و بر وزن خشک گیاه کاملینا و *B. amyloliquefaciens* بر وزن خشک ریشه در تنش خشکی مؤثرتر بود. قبلاً تأثیر این باکتری‌ها بر افزایش تجمع عناصر نیتروژن، فسفر و کلسیم، افزایش قندهای محلول نشان داده شد. همه این‌ها می‌توانند بر افزایش وزن بذر کاملینا و وزن خشک گیاه در تلقیح باکتری‌های مذکور مؤثر باشند. باکتری‌های مذکور از طریق تولید ایندول-۳-استیک اسید (IAA)، سایتوکینین‌ها و جبرلین‌ها موجب افزایش توسعه ریشه، طولیل شدن سلول‌ها، افزایش سطح برگ و رشد کل گیاه می‌شود. این هورمون‌ها در مراحل مختلف نمو گیاه به‌ویژه در دوره‌های تنش‌زا مانند

منابع

1. Ahmed, Z., E.A. Waraich, R. Ahmad, & M. Shahbaz, 2017. Morpho-physiological and biochemical responses of *camelina* (*Camelina sativa crantz*) genotypes under drought stress. *Int. J. Agric. Biol.*, 19, 1–7.
2. Alberghini, B., Vicino, M., Zanetti, F., Silvestre, S., Haslam, R., Zegada-Lizarazu, W., & Monti, A. (2025). Assessing different physiological, seed yield and quality responses of camelina lines to drought. *Industrial Crops and Products*, 234, 121528. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.121>.
3. 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. doi: 10.3390/agronomy10081180.
4. 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.
5. Arshad, M. N., Donnison, I., & Rowe, R. (2021). Marginal lands: Concept, classification criteria and management. *Supergen Bioenergy Hub*. <https://www.researchgate.net/publication/359847464>
6. Attia, Z., Pogoda, C. S., Reinert, S., Kane, N. C., & Hulke, B. S. (2021). Breeding for sustainable oilseed crop yield and quality in a changing climate. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(5), 1817–1827. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03770-w>.
7. 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.
8. 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.
9. Baek, D., Rokibuzzaman, M., Khan, A., Kim, M.C., Park, H.J., Yun, D.j. & Chung, Y.R. (2020). Plant-Growth Promoting *Bacillus oryzicola* YC7007 Modulates Stress-Response Gene Expression and Provides Protection from Salt Stress. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1646.
10. Berti, M., Gesch, R., Eynck, C., Anderson, J., & Cermak, S. (2016). Camelina uses, genetics, genomics, production, and management. *Industrial Crops and Products*, 94, 690–710. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.034>.
11. 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. doi:10.3329/bjb.v40i1.7992.
12. Borzoo, S., Mohsenzadeh, S., Moradshahi, A. et al. Characterization of physiological responses and fatty acid compositions of *Camelina sativa* genotypes under water deficit stress and symbiosis with *Micrococcus yunnanensis*. *Symbiosis*, 83, 79–90 (2021). <https://doi.org/10.1007/s13199-020-00733-5>.
13. Cheng, Z., Park, E. & Glick, B. R. (2007). 1-Aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase from *Pseudomonas putida* UW4 facilitates the growth of canola in the presence of salt. *Canadian Journal of Microbiology*, 53(7), 912–8.
14. Dirk, I. & Montago, M.V. (2002). *Oxidative Stress in Plants*. Taylor & Francis.
15. Dominguez, J.A., Delgado-Alvez, D., Berrocal-Lobo, M., Anriquez, A. & Albanesi, A. (2015). Controlled-release fertilizers combined with *Pseudomonas fluorescens* rhizobacteria inoculum improve growth in *Pinus halepensis* seedlings. *IForest Journal*, 8(1), 12-18.
16. Dvorak, P., Krasylenko, Y., Zeiner, A., Samaj, J. and Takac, T. 2021. Signaling towards reactive oxygen species-scavenging enzymes in lants. *Front Plant Sci* 11:618835.
17. 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>.
18. Etesami, H., Emami, S. & Alikhani, H. A. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects: A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 897–911.
19. 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.
20. Ghaffari, H., Tadayon, M.R., Nadeem, M., Cheema, M. and Razmjoo, J. 2019. Proline-mediated changes in antioxidant enzymatic activities and the physiology of sugar beet under drought stress. *Acta Physiol. Plant*, 41, 23.
21. 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.
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.12556>.
23. Hosseinfard, M., Stefaniak, S., Ghorbani Javid, M., Soltani, E., Wojtyla, L., & Garnczarska, M. 2022.

- Contribution of Exogenous Proline to Abiotic Stresses Tolerance in Plants: A Review. *Int J Mol Sci.* 6; 23(9), 5186. doi: 10.3390/ijms23095186. PMID: 35563577; PMCID: PMC9101538.
24. 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.
 25. Ilyas, Muhammad & Nisar, M & Khan, Nadeem & Hazrat, Ali & Khan, Aamir & Hayat, Kashif & Sh, F. & Khan, Aziz & Ullah, Abid. (2021). Drought Tolerance Strategies in Plants: A Mechanistic Approach. *Journal of Plant Growth Regulation.* 40. 10.1007/s00344-020-10174-5
 26. Khan, A. N., Qurashi, R. H., Ahmad, N. & Rashid, A. (1995). Response of cotton cultivars to salinity at various growth development stages. *Journal of Agricultural*, 11,729-31.
 27. 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.
 28. Liu, K., Deng, F., Zeng, F., & Qin, Y. (2025). Rhizobacterial enhancement of drought tolerance in safflower (*Carthamus tinctorius* L.): current status and perspectives. *Plant Growth Regulation*, 105, 567–581.
 29. 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.
 30. Motlagh, P., 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.
 31. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., & Etesami, H. 2023a. Evaluation of air pollution (dust) tolerance index of three desert species *Seidlitzia rosmarinus*, *Haloxylon aphyllum*, and *Nitraria schoberi* under salinity stress. *Environment Monitoring and Assessment*, 195, 838.
 32. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., & Etesami, H. 2023b. 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.
 33. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., Etesami, H., & Dinarvand, M. 2022a. 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.
 34. Najafi Zilaie, M., Mosleh Arani, A., Etesami, H., & Dinarvand, M. 2022b. Improved salinity and dust stress tolerance in the desert halophyte *Haloxylon aphyllum* by halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria. *Frontiers in Plant Science*, 13, 948260.
 35. 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/for3959-015. Ngalimat, M. S., Yahaya, R. S. R., Baharudin, M. M. A. A., Yaminudin, S. M., Karim, M., Ahmad, S. A., & Sabri, S. (2021). A review on the biotechnological applications of the operational group B. amyloliquefaciens. *Microorganisms*, 9(3), 614.
 36. Nazim, M., Ali, M., Li, X., Anjum, S., Ahmad, F., Zulfikar, U., Shahzad, K., & Soufan, W. (2023). Unraveling the synergistic effects of microbes and selenium in alleviating drought stress in *Camelina sativa* L. *Plant Stress*, 9, 100193.
 37. Ngalimat, M. S., Yahaya, R. S. R., Baharudin, M. M. A. A., Yaminudin, S. M., Karim, M., Ahmad, S. A., & Sabri, S. (2021). A review on the biotechnological applications of the operational group B. amyloliquefaciens. *Microorganisms*, 9(3), 614.
 38. 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.
 39. Pan, J., Peng, F., Xue, X., You, Q., Zhang, W., Wang, T. & Huang, C. (2019). The Growth Promotion of Two Salt-Tolerant Plant Groups with PGPR Inoculation: A Meta-Analysis. *Sustainability*, 11(1), 1-14.
 40. Pan, X., Smith, J., & Zhang, Y. (2011). Photosynthetic and growth responses of *Camelina sativa* (L.) Crantz to varying nitrogen and soil water status. *Photosynthetica*, 49(3), 316–320.
 41. Piravi-vanak, Z., Azadmard-Damirchi, S., Kahrizi, D., Mooraki, N., Ercisli, S., Savage, G. P., Ahmadvandi, H. R., & Martinez, F. (2022). Physicochemical properties of oil extracted from camelina (*Camelina sativa*) seeds as a new source of vegetable oil in different regions of Iran. *Journal of Molecular Liquids*, 345, 117043.
 42. Radhakrishnan, R., Hashem, A. & Abd-Allah, E. F. (2017). *Bacillus*: A biological tool for crop improvement through bio-molecular changes in adverse environments. *Frontiers in Physiology*, 6(8), 667.
 43. Ranjbar Fordoeil, Abolfazl and Heydarneshad, Somayeh. (2018). 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>.
 44. Santoyo, G., Sánchez-Yáñez, J.M. & Santos-Villalobos, S.D.L. (2019). *Methods for Detecting Biocontrol and Plant Growth-Promoting Traits in Rhizobacteria*. In *Microbes and Signaling Biomolecules against Plant Stress*; Springer: Singapore, pp. 133–149.
 45. Shah, S.H., Hussain, M.B., Zahir, Z.A. et al. Thermal Plasticity and Cotton Production Enhancing

- Attributes of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Cotton Rhizosphere. *J Soil Sci Plant Nutr*, 22, 3885–3900 (2022). <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00937-2>
46. 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, 287. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020287>
 47. 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*. *Sci Rep*, 15, 14(1), 3785. doi: 10.1038/s41598-024-54134-5. PMID: 38360846; PMCID: PMC10869696.
 48. 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.
 49. 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.
 50. Sheteiwy, Mohamed S., et al. (2021). Nodulation 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.
 51. Shilev, S. (2020). Plant-Growth-Promoting Bacteria Mitigating Soil Salinity Stress in Plants. *Applied Science*, 10(20), 7326.
 52. 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. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.103946>
 53. 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.
 54. Wang, Q., Dodd, I. C., Belimov, A. A. & Jiang, F. (2016). Rhizosphere bacteria containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase increase growth and photosynthesis of pea plants under salt stress by limiting Na⁺ accumulation. *Functional Plant Biology*, 43(2), 161-172.
 55. Wu, X., Fan, Y., Wang, R., Zhao, Q., Ali, Q., Wu, H., Gu, Q., Borris, R., Xie, Y., & Gao, X. (2022). *B. halotolerans* KKD1 induces physiological, metabolic and molecular reprogramming in wheat under saline condition *Front. Plant Sci.*, 13, 978066 doi: 10.3389/fpls.2022.978066.
 56. Yari, A., Abbasi, N., & Hajinia, S. (2024). Investigating the morpho-physiological traits, yield and seed quality of three accessions of camelina under water stress conditions. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 55(2), 89-104. DOI: 10.22059/ijfcs.2023.361897.655017
 57. Zhang, C., Zhang, J., Liu, W., Ji, J., Zhang, K., Li, H., Feng, Y., Xue, J., Ji, C., Zhang, L., & Li, R. (2025). Mechanisms of branched chain amino acids promoting growth and lipid accumulation in *Camelina sativa* seedlings under drought and salt stress. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 75, 104201. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104201>
 58. Zhao, Wei-song, Qing-gang Guo, Wen-qian Yu, Pei-pei Wang, Zhen-he Su, Xiao-yun Zhang, Xiu-yun Lu, Ping Ma, & She-zeng Li. (2020). Phosphate-solubilizing characteristics of *B. amyloliquefaciens* PHODB35 and its growth-promoting effect on tomato: 1370-1383.

Effects of Plant Growth-Promoting Bacteria on Physiological Traits, Ion Homeostasis, and Yield of *Camelina sativa* Under Combined Drought and Dust Stress

Hamid Golaraei,¹ Asghar Mosleh Arani,^{2*} Hassan Etesami,³ Reza Dehghani Bidgoli⁴

Received: 23/10/2025

Accepted: 28/12/2025

Extended Abstract

Introduction: Environmental stresses, particularly drought and dust, pose significant constraints to agricultural productivity, especially in arid and semi-arid regions. *Camelina sativa*, an oilseed crop valued for its nutritional and industrial applications, exhibits sensitivity to these abiotic stressors, which can adversely affect its physiological, biochemical, and morphological processes. This study aimed to evaluate the effects of inoculating *C. sativa* with plant growth-promoting bacteria (PGPB)—*Bacillus amyloliquefaciens* and *Bacillus halotolerans*, applied individually and as a 1:1 consortium—on the plant's physiological and biochemical responses, as well as its overall growth performance, under combined drought and dust stress conditions. **Materials and Methods:** The bacterial strains were procured from the Regional Collection Center for Industrial Fungi and Bacteria of Iran. Four inoculation treatments were prepared at a final concentration of 3×10^8 CFU mL⁻¹: a non-inoculated control, **B. amyloliquefaciens** alone, **B. halotolerans** alone, and a 1:1 mixture of both strains. Healthy *Camelina* seeds were bacterized via immersion in the respective suspensions for two hours prior to sowing. Seeds were planted at a density of 40 seeds per square meter in plots arranged in a completely randomized design. Plants were subjected to three irrigation regimes: 4-day intervals (well-watered control), 6-day intervals (moderate drought), and 8-day intervals (severe drought). Simultaneously, dust stress was applied using particulates (<10 µm) collected from identified critical emission sources in Aran and Bidgol, Isfahan Province, simulating natural deposition rates ranging from 0.57 to 1.13 g m⁻² day⁻¹. Leaf samples were collected prior to seed maturity for biochemical analyses, including the quantification of chlorophyll *a*, *b*, and total chlorophyll; carotenoids; ascorbic acid; total phenolic content; proline; soluble sugars; and essential nutrients (N, P, K, Ca). Growth and yield parameters, such as dry biomass, seed yield, and root dry weight, were also measured. All data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using SPSS software, and means were compared using Duncan's multiple range test at a 5% probability level ($\alpha = 0.05$).

Results: Drought and dust stress significantly altered nutrient content and biochemical parameters in *C. sativa*. Nitrogen content declined under both stresses, indicating impaired uptake likely due to reduced transpiration, disrupted membrane integrity, and suppressed nitrate reductase activity under dust exposure. Inoculation with plant growth-promoting bacteria (PGPB) significantly increased nitrogen content under stress, attributable to biological nitrogen fixation and enhanced protein synthesis, consistent with prior studies on PGPR-mediated stress alleviation. Calcium concentration decreased under drought but was elevated by bacterial inoculation, suggesting a role in reinforcing cell wall stability and stress-signaling pathways. Phosphorus content was also reduced under drought and dust stress; however, PGPB inoculation—particularly with **B. amyloliquefaciens** and **B. halotolerans**—increased phosphorus availability through phosphate solubilization, organic acid production, and enzymatic mineralization. Potassium levels were primarily reduced by dust stress, and bacterial inoculation, especially with **B. amyloliquefaciens**, enhanced potassium uptake, likely through improved ion homeostasis and exopolysaccharide-mediated sodium sequestration. Proline and phenolic compounds accumulated significantly under drought and dust stress, functioning as osmoprotectants and antioxidants. Bacterial inoculation reduced stress-induced proline accumulation, indicating improved water status, hormonal modulation (IAA, cytokinins, gibberellins), and enhanced root development. Soluble sugars decreased under stress, particularly under combined drought and dust conditions, due to stomatal closure and reduced photosynthetic efficiency. However, PGPB inoculation—notably with **B. halotolerans**—increased soluble sugar content, reflecting better osmotic adjustment and sustained metabolic activity. Chlorophyll *b* and carotenoids were sensitive to stress, showing marked reductions under drought and dust. Bacterial treatments increased chlorophyll content while lowering carotenoid accumulation, suggesting reduced oxidative stress through improved nutrient uptake and induced antioxidant activity.

1. Department of Arid Land and Desert Management. Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran, Email: hamidgolaraei@stu.yazd.ac.ir

2. Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources, Yazd University, Yazd, Iran, Email: amosleh@yazd.ac.ir

3. Department of Soil Science, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: Hassanetesami@ut.ac.ir

4. Department of Nature Engineering University of Kashan, Iran, Email: dehghanir@kashanu.ac.ir

Morphological traits, including shoot dry weight, root dry weight, and seed yield, were adversely affected by drought and dust stress. Inoculation with **B. halotolerans** significantly improved seed weight and shoot biomass, whereas **B. amyloliquefaciens** primarily enhanced root dry weight. These improvements can be linked to better nutrient acquisition, phytohormonal stimulation, and maintenance of photosynthetic pigments under stress. The combined bacterial inoculation demonstrated synergistic effects, promoting overall plant resilience and yield stability under adverse conditions.

Discussion and Conclusion: This study demonstrates that concurrent drought and dust stress disrupt key physiological and biochemical processes in **C. sativa**, leading to reduced soluble sugars, nitrogen, phosphorus, and chlorophyll *b*, alongside increased proline, phenolics, calcium, potassium, and carotenoids. Dust stress was observed to intensify the effects of drought on several measured parameters.

Inoculation with **B. amyloliquefaciens** and **B. halotolerans**—both individually and in combination—effectively mitigated these adverse effects. The bacterial treatments enhanced nutrient uptake, regulated osmolyte accumulation, boosted antioxidant capacity, and stimulated growth-promoting hormonal activity, collectively improving physiological performance and seed yield under stress conditions.

These findings underscore the potential of plant growth-promoting bacteria (PGPB) as a sustainable and eco-friendly strategy for enhancing crop resilience in arid and semi-arid regions. The results further emphasize the importance of selecting specific bacterial strains based on prevailing environmental conditions and stress types to optimize plant productivity and stress adaptation.

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