نشریه فرآیند و کارکرد گیاهی، جلد ۱۵، شماره ۷۱، فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۵ صفحه: ۲۵-۱
https://doi.org/10.22034/15.71.1

مقاله پژوهشی

بهبود ویژگی‌های مورفو- فیزیولوژیک کاملینا (*Camelina sativa*) با کاربرد اسید سالیسیلیک و کود زیستی تحت تنش خشکی

سهیلا ساجدی اصل، حمیدرضا بلوچی*، محسن موحدی دهنوی، علیرضا یدوی و فاطمه ابراهیمی
گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

چکیده

به‌منظور بهبود ویژگی‌های مورفو- فیزیولوژیک کاملینا با کاربرد اسید سالیسیلیک (SA) و کود زیستی تحت تنش خشکی، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه یاسوج، در سال ۱۴۰۲ انجام شد. عامل اول شامل تنش خشکی در سه سطح (آبیاری پس از ۲۰، ۴۰ و ۶۰٪ تخلیه رطوبتی)، عامل دوم، کود زیستی فسفات بارور-۲ در دو سطح (کاربرد و عدم کاربرد) و عامل سوم محلول‌پاشی SA در سه سطح (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار) بود. آبیاری در سطوح ۴۰ و ۶۰٪ تخلیه رطوبتی سبب کاهش معنی‌داری در صفات ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، شاخص سبزینگی برگ، محتوای نسبی آب برگ، تعداد دانه در خورجین، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه و وزن کل دانه در بوته شد، اما تعداد خورجین در بوته افزایش یافت. همچنین در شرایط تنش، درصد نشت الکترولیت‌ها و محتوای مالون دی‌آلدهید برگ به‌طور معنی‌داری افزایش یافت که بیانگر بروز تنش اکسیداتیو و آسیب غشایی بود. در مقابل، محتوای قندهای محلول و پرولین برگ تحت شرایط خشکی افزایش یافت که نشان‌دهنده نقش اسمولیت‌ها در سازگاری گیاه بود. کاربرد فسفات بارور-۲ و SA سبب افزایش میزان صفات مورد بررسی شد. بیشترین تعداد خورجین در بوته (۱۹۳ عدد) از ۶۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد فسفات بارور -۲ + ۲۰۰ میکرومولار SA و کم‌ترین آن (۹۷ عدد) از ترکیب تیماری ۲۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد فسفات بارور -۲ + عدم کاربرد SA حاصل شد. همچنین بیشترین و کم‌ترین وزن کل دانه در بوته به‌ترتیب از تیمارهای ۲۰٪ تخلیه رطوبتی + کاربرد فسفات بارور-۲ + کاربرد ۱۰۰ میکرومولار SA و ۶۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد فسفات بارور-۲ + عدم کاربرد SA به‌دست آمد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، هر چند با افزایش تنش خشکی از وزن کل دانه در بوته کاسته می‌شود، اما با به‌کارگیری کود زیستی فسفات بارور-۲ + SA به‌ویژه در سطوح بالای تنش می‌توان تا حدی از بروز اثرات سوء تنش بر عملکرد تولیدی این گیاه کاست. این مسأله را می‌توان به تأثیر مثبت کود زیستی فسفات بارور-۲ + SA در بهبود رشد گیاه در شرایط تنش نسبت داد. در مجموع، براساس معیار عملکرد تولیدی، بهترین تیمار ترکیب کود زیستی فسفات بارور-۲ همراه با اسید سالیسیلیک ۱۰۰ میکرومولار بود که بالاترین وزن کل دانه در بوته را فراهم نمود.

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۴، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲، اولین انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۲

* نویسنده مسئول، رایانامه: balouchi@yu.ac.ir

حق انتشار این مستند، متعلق به انجمن فیزیولوژی گیاهی ایران است. ۱۴۰۳ ©
این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:
Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

واژه‌های کلیدی: کاملینا، تنش خشکی، رنگیزه‌های فتوسنتزی، فسفات بارور-۲، پرولین

مقدمه

گیاه دانه روغنی کاملینا (Camelina sativa) از خانواده Brassicaceae، با قدمتی چند هزار ساله، در سال‌های اخیر به‌دلیل ویژگی‌های زراعی مطلوب و قابلیت رشد در شرایط اقلیمی نامساعد و نیاز آبی کم‌تر، مورد توجه پژوهشگران و کشاورزان قرار گرفته است (Kahrizi *et al.*, 2015). کاملینا نه تنها به خشکی و سرمای بهاره مقاوم است بلکه نسبت به آفات رایج در دانه‌های روغنی مانند سوسک‌های گرده‌خوار نیز مقاومت زیادی دارد. از مهم‌ترین ترکیبات فعال این گیاه می‌توان به آلفا- لینولنیک اسید به‌عنوان یک اسید چرب امگا-۳ (بیش از ۳۰٪) با نقش پیشگیرانه در بیماری‌های قلبی- عروقی، γ-توکوفرول و سایر اشکال ویتامین E با خاصیت آنتی‌اکسیدانی و ضدسرطانی، ترکیبات فنولیک و فلاونوئیدی با اثر ضدالتهابی و گلوکوزینولات‌ها با توانایی مهار رشد سلول‌های سرطانی اشاره کرد (Klinska *et al.*, 2019). سطح زیرکشت این گیاه در جهان ۶۵/۳۰۰ هزار هکتار (Sustainable Oils, 2023) و بر اساس آمار غیررسمی در ایران ۵۰۰۰ هکتار است.

با این حال، توسعه کشت گیاهان روغنی نظیر کاملینا در مناطق خشک، با چالش‌هایی نظیر محدودیت منابع آب و وقوع تنش خشکی روبه‌روست. کشور ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است که با متوسط نزولات آسمانی ۲۴۰ میلی‌متر، کمتر از یک سوم میزان بارندگی سالانه جهانی را دارد (وقار و همکاران، ۱۴۰۰). بنابراین در میان تنش‌های غیرزیستی مانند گرما، شوری و انجماد، تنش خشکی محدودیت شدیدتری بر رشد و بهره‌وری گیاهان زراعی اعمال می‌کند (Ergo *et al.*, 2018). آب به دلیل دخالت مستقیم در انتقال مواد غذایی و متابولیت‌ها در قسمت‌های مختلف گیاه به‌عنوان عامل ضروری برای رشدونمو گیاهان عمل می‌کند. همچنین، برای شروع متابولیسم‌ها، رشد جنین در بذر و فعالیت آنزیم‌ها وجود مقادیر مطلوب رطوبت در بستر بذر ضرورت دارد. عدم وجود مقادیر مناسب آب و سرعت بالاتر تعرق سبب تنش خشکی در گیاهان می‌شود (Hussain *et al.*, 2018). تنش خشکی تأثیر خود را از طریق ایجاد تغییرات تشریحی، ریختی، فیزیولوژیک و بیوشیمیایی به‌صورت تغییر برخی ساختارها در گیاه، تغییر سرعت رشد، پتانسیل اسمزی بافت و دفاع پاداکسیدانی اعمال می‌کند و باعث کاهش فتوسنتز، هدایت روزنه‌ای، زیست‌توده، کاهش میزان رشد، محتوای نسبی آب برگ، پتانسیل آب برگ، گسترش سلولی و در نهایت کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Rahbarian *et al.*, 2011).

در آزمایش امیری دربان و همکاران (۱۴۰۰) روی کاملینا مشاهده شد اعمال تنش خشکی از مرحله گلدهی، سبب کاهش ۱۱/۸٪ کلروفیل کل برگ شد. کاهش محتوای کلروفیل در گیاهان جنبه سازگاری دارد، زیرا با این عمل، مقدار الکترون‌های برانگیخته‌شده در طی فرآیند فتوسنتز کاهش و در نتیجه خسارت‌های ناشی از تشکیل رادیکال‌های آزاد اکسیژن کاهش می‌یابد (Kosar *et al.*, 2021). به همین گونه نتیجه پژوهش شجاعیان‌کیش و همکاران (۱۴۰۰) نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار اعمال تنش خشکی در افزایش میزان مالون دی‌آلدهید و کاهش پروتئین‌های محلول برگ بود. در آزمایش رستمی‌هیر و همکاران (۱۴۰۰) روی کلزا، صفت تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه و عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر تنش خشکی کاهش یافت. کاهش تعداد دانه در خورجین در گیاهان به دلیل تأثیر منفی تنش بر گرده‌افشانی است که باعث عقیم‌شدن دانه‌های گرده و اختلال در فتوسنتز جاری و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها می‌شود که این موضوع می‌تواند دلیلی بر کاهش تعداد دانه در خورجین باشد.

با توجه به این موضوع، کشاورزان و دست‌اندرکاران بخش کشاورزی، باید با مدیریت صحیح منابع آبی، میزان تولید گیاهان زراعی و ثبات در تولید را افزایش دهند تا بتوانند از این طریق پاسخ‌گوی مشکل غذایی جمعیت در حال رشد باشند. در کنار عملیات به‌زراعی یکی دیگر از راهکارهای مناسب در شرایط تنش خشکی استفاده از روش‌هایی است که باعث بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیک در گیاهان شود. این کار با استفاده از

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

تنظیم‌کننده‌های رشدی مانند هورمون اسید سالیسیلیک و کودهای زیستی، امکان‌پذیر خواهد بود.

اسید سالیسیلیک یا اورتوهیدروکسی بنزوئیک اسید که متعلق به گروهی از ترکیبات فنولی است، یک هورمون طبیعی گیاهی است که بر بسیاری از صفات فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی گیاهان مانند رشد، نمو گیاه، جذب یون، فتوسنتز و جوانه‌زنی اثر داشته و با بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه، توان مقاومتی آن نسبت به تنش‌های محیطی از جمله تنش خشکی را افزایش می‌دهد (اکبری و ملکی، ۱۳۹۶). این ماده که یک پاداکسیدان محلول در آب است، صدمات ناشی از تنش خشکی در گیاهان را کاهش می‌دهد (Vaisnad and Talebi, 2015). با کاربرد اسید سالیسیلیک اثر کمبود آب تعدیل، تحمل گیاه نسبت به تنش خشکی بالا رفته و همچنین برخی از پارامترهای رشدی افزایش می‌یابند (Yazdanpanah *et al.*, 2011). نتایج آزمایش سلیمانی و همکاران (۱۳۹۶) روی کلزا مشخص نمود که کاربرد اسید سالسیلیک سبب افزایش تبادل مواد فتوسنتزی و افزایش جذب عناصر درگیر در لایه‌های خاک و میزان جذب آب و افزایش فشار اسمزی در گیاه شده و تیمارهایی که از این مواد ضدتنش استفاده نمودند توانستند محتوای نسبی آب برگ خود را در سطح مطلوبی حفظ نمایند. نیک‌اندیش و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای بر کاملینا ابراز داشتند که بیشترین میزان پرولین برگ، قندهای محلول برگ و عملکرد دانه و عملکرد زیستی مربوط به تیمار ۱/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بود. نتایج آزمایش کلانتر احمدی و همکاران (۱۳۹٤) نشان داد که حداکثر تعداد دانه در خورجین (۳۲/۸) در شرایط تنش شدید و محلول‌پاشی با اسید سالیسیلیک (۳۰۰ میکرومول) به دست آمد.

در سال‌های اخیر، با تشدید آثار منفی ناشی از مصرف نامتعادل کودهای شیمیایی، توجه متخصصان به سوی بکارگیری روش‌های مدیریتی سازگار با اصول کشاورزی پایدار، نظیر استفاده از کودهای زیستی، جلب شده است. یکی از راهبردهای مؤثر در این زمینه، استفاده از کودهای زیستی به‌ویژه ریزجانداران حل‌کننده فسفات است. کودهای زیستی به‌عنوان جایگزین مناسبی برای کاهش مصرف کودهای شیمیایی، ضمن حفظ عملکرد مطلوب گیاهان، نقشی مؤثر در ارتقاء سلامت خاک و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ایفا می‌کنند (Rashid *et al.*, 2016). از میان میکروارگانیسم‌های مؤثر در حل فسفات، جنس‌های Pseudomonas، Bacillus و Rhizobium از قابلیت بالایی برخوردارند که با ترشح اسیدهای آلی، فسفات‌های نامحلول آلی و معدنی را به فرم قابل جذب برای گیاه تبدیل می‌کنند (ستارزاده و همکاران، ۱۴۰۲). کودهای زیستی فسفات بارور-۲، دارای دو نوع باکتری حل‌کننده فسفاته از گونه‌های *Bacillus lentus* و *Pseudomonas putida* است که به شکل ساپروفیت در ریزوسفر فعالیت نموده و با مصرف ترشحات ریشه، ترشح اسیدهای آلی (مالیک، سوکسینیک، پیروپیونیک، لاکتیک، سیتریک و کتوگلونیک اسید) و آنزیم فسفاتاز قادرند فسفر نامحلول خاک (به ویژه در مناطقی که کلسیم خاک بالا باشد) را به فرم محلول جذب گیاه تبدیل کنند (نژاد حبیب‌وش و همکاران، ۱۴۰۰).

مطالعه Vurukonda و همکاران (۲۰۱٦) نشان داد که تلقیح گیاهان با باکتری‌های حل‌کننده فسفات نظیر *Bacillus* spp. سبب آزادسازی فسفر تثبیت‌شده در خاک و افزایش جذب آن توسط گیاه شده و در نتیجه باعث بهبود عملکرد و اجزای عملکرد شد. همچنین، در پژوهشی دیگر، کاربرد فسفات بارور-۱ سبب افزایش تعداد دانه در ساقه اصلی و وزن دانه در گیاه کتان روغنی شد (Safari *et al.*, 2023). به‌علاوه، پژوهشگران گزارش کرده‌اند که کودهای زیستی با تحریک رشد ریشه و بهبود جذب عناصر غذایی، سبب افزایش انتقال مواد فتوسنتزی و در نهایت ارتقای وزن هزار دانه می‌گردند (دانشور و خواجوئی‌نژاد، ۱۳۹۳).

به‌طورکلی با توجه به نتایج پژوهش‌های انجام‌شده، به نظر می‌رسد استفاده از اسید سالیسیلیک و محلول‌پاشی آن قبل از اعمال تنش و نیز کود زیستی با بهبود ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه باعث آمادگی بهتر گیاه، جهت مقابله و روبرو شدن با تنش‌ها، به خصوص تنش خشکی و در نتیجه مقاومت گیاه و

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

احتمالاً افزایش عملکرد می‌شوند. با توجه به اهمیت گیاه کاملینا، وجود تنش خشکی، اهمیت استفاده از کاهش‌دهنده‌های تنش و کمبود اطلاعات در رابطه با پاسخ‌های مورفو- فیزیولوژیک کاملینا در شرایط مختلف، از این‌رو در این پژوهش به بررسی تأثیر کود زیستی و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر برخی ویژگی‌های مورفو- فیزیولوژیک گیاه کاملینا تحت شرایط تنش خشکی در محیط گلخانه پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

کشت و تیمار گیاه کاملینا: این آزمایش در سال ۱۴۰۲ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه یاسوج در استان کهگیلویه و بویراحمد با دمای حداقل ۲۰ و حداکثر ۲۷ درجه سلسیوس و دوره نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل اول شامل تنش خشکی در سه سطح (آبیاری پس از ۲۰، ۴۰ و ۶۰٪ تخلیه رطوبتی خاک) و عامل دوم، کود زیستی فسفات بارور-۲ در دو سطح (کاربرد و عدم کاربرد) و عامل سوم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در سه سطح (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار) بود. در مرحله آماده‌سازی خاک گلدان، نمونه‌هایی از خاک مورد استفاده تهیه و جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن مورد آزمون قرار گرفت. نتایج آزمون ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک در جدول ۱ ارائه شده است.

بذر کاملینا رقم سهیل (از ارقام زمستانه مناسب مناطق معتدل سرد و سرد با وزن هزار دانه ۰/۸ تا یک گرم، میانگین ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر و درصد روغن ۳۰ تا ۳۲ درصد) از شرکت پاکان بذر اصفهان، کود زیستی فسفات بارور-۲ از شرکت زیست‌فناور سبز و اسید سالیسیلیک از شرکت مرک آلمان خریداری شد. گلدان‌های پلاستیکی به ابعاد ۳۲×۱۳×۱۰ سانتی‌متر به نحوی پر شدند که سطح خاک هر گلدان تا دهانه آن ۵ سانتی‌متر فاصله داشت. گلدان‌ها از خاک (نسبت دو به یک، خاک مزرعه به ماسه نرم) پر شده و با دستگاه اتوکلاو به مدت دو ساعت ضدعفونی شد. سپس کود زیستی فسفره با نام تجاری فسفات بارور-۲ حاوی باکتری‌های *Bacillus lentus* و *Pseudomonas putida* با تراکم سلولی ۱۰۸ CFU/ml یک ساعت قبل از کاشت با بذرهای کاملینا تلقیح داده شد. هنگام کاشت به تمام گلدان‌ها کودهای نیتروژن (از منبع اوره)، فسفر (از منبع سوپر فسفات تریپل) و پتاسیم (از منبع سولفات پتاسیم) به مقدار ۰/۵ گرم به خاک اضافه شد و پس از آن یک لایه خاک روی آن اضافه و هفت عدد بذر در هر گلدان در تاریخ ۲۰ فروردین کاشته شد و در پایان آبیاری صورت گرفت. پس از کاشت تا مرحله پنج برگی، آبیاری یک روز در میان صورت گرفت. در مرحله پنج برگی تنک‌کردن و تیمار اسید سالیسیلیک انجام شد و در هر گلدان تعداد پنج بوته (جهت حفظ تراکم ۱۲۰ بوته در مترمربع) باقی ماند. پس از یک هفته تنش خشکی، مجدد تیمار اسید سالیسیلیک اعمال شد. به‌منظور اعمال تنش، رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج خاک (مدل ΔT،SM۱۵۰-۱، انگلستان) (پس از کالیبراسیون برای خاک گلدان)، اندازه‌گیری شد. اسید سالیسیلیک به صورت محلول‌پاشی برگ، یک هفته قبل از اعمال تنش خشکی اعمال شد و یک هفته پس از آن، محلول‌پاشی مجدداً تکرار شد. برای تهیه محلول ۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار به‌ترتیب ۰/۰۰۸۲ و ۰/۰۱۶۴ گرم از اسید سالیسیلیک در چند قطره اتانول ۹۶٪ حل و سپس یک لیتر آب مقطر به آن اضافه شد تا غلظت‌های مورد نظر به دست آمد. در روش محلول‌پاشی برگی، برای افزایش چسبندگی محلول به سطح گیاه، ۲ میلی‌لیتر سورفکتانت Tween-20 به هر کدام از غلظت‌های تهیه‌شده اضافه شد.

اندازه‌گیری صفات مورد بررسی: جهت اندازه‌گیری ارتفاع ساقه اصلی و تعداد شاخه جانبی، سه بوته در مرحله گلدهی به‌صورت تصادفی انتخاب و میانگین آن‌ها برای هر گلدان اندازه‌گیری شد. چهار هفته پس از اعمال تنش خشکی جهت اندازه‌گیری شاخص سبزینگی (SPAD)، در زمان گلدهی از هر

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

بافت خاک	رس	سیلت	شن	کربن آلی	منگنز	مس	روی	آهن	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	اسیدیته
	(٪)			(میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک)							(٪)	
لوم سیلتی	۱۱/٤	٤۳/٤	٤٥/۲	۰/٤۳	٤/٤۰	۰/٦۰	۰/۳٦	۳/۲۰	۱٦٤	۳/۸	۰/۰۲	۷/۸۷

بوته پنج برگ انتخاب و میزان سبزینگی با دستگاه SPAD-502 ساخت کشور ژاپن خوانده و میانگین آن‌ها به عنوان شاخص سبزینگی یادداشت شد. همچنین پس از چهار هفته اعمال تنش خشکی از هر گلدان دو بوته انتخاب و نمونه‌گیری از برگ‌های جوان بالایی بوته‌ها در صبح زود انجام شد. به منظور جلوگیری از تغییر میزان پرولین، قندهای محلول و مالون دی‌آلدهید نمونه‌ها پس از قرارگرفتن در ظرف حاوی یخ، به آزمایشگاه منتقل شده و تا زمان استفاده در دمای ٤۰- درجه سلسیوس نگهداری شد.

جهت اندازه‌گیری محتوای نسبی آب برگ از روش Mishra و Choudhuri (۱۹۹۹) برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت‌ها از روش McKay (۱۹۹۲) استفاده شد. برای اندازه‌گیری قندهای محلول از روش Irigoyen و همکاران (۱۹۹۲) استفاده شد سپس میزان جذب نمونه‌ها در طول‌موج ٦۲٥ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (مدل SHIMADZO 54A) خوانده شد. جهت اندازه‌گیری محتوای پرولین برگ از روش Paquin و Le chasseur (۱۹۷۹) استفاده شد و میزان جذب نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول‌موج ٥۱٥ نانومتر خوانده شد. میزان مالون دی‌آلدهید نمونه‌ها از روش Heath و Pacher (۱۹٦۸) با اندازه‌گیری جذب در طول‌موج‌های ٥۳۲ و ٦۰۰ نانومتر با دستگاه اسپکتوفتومتر و با استفاده از ضریب خاموشی (۱٥٥ $mM^{-1}.cm^{-1}$) محاسبه شد. اجزای عملکرد مورد بررسی تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه و وزن کل دانه در بوته در سه بوته در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک (دانه‌ها به رنگ قهوه‌ای روشن تا قهوه‌ای تیره) اندازه‌گیری شدند. تجزیه آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/٤ و رسم نمودارها با Excel انجام شد. مقایسه میانگین‌ها به روش LSD در سطح ٥٪ انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته: نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد اثر دوگانه تنش خشکی و کود زیستی و همچنین اثر دوگانه تنش خشکی و اسید سالیسیلیک بر ارتفاع بوته در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد. با افزایش سطوح تنش خشکی ارتفاع بوته کاملینا کاهش یافت. در سطوح ۲۰، ٤۰ و ٦۰ ٪ تخلیه رطوبتی با کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ ارتفاع بوته نیز افزایش یافت و در هر سه سطح تنش خشکی بیشترین ارتفاع بوته در شرایط کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ مشاهده شد (جدول ۳). اثر دوگانه تنش خشکی و اسید سالیسیلیک نیز نشان داد با افزایش سطوح تنش خشکی تا سطح ٤۰٪ تخلیه رطوبتی نسبت به ۲۰٪ تخلیه رطوبتی ارتفاع بوته افزایش یافت و سپس در سطح ٦۰٪ تخلیه رطوبتی نسبت به دو سطح دیگر ارتفاع بوته کاهش یافت. همچنین افزایش غلظت اسید سالیسیلیک در سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی سبب افزایش ارتفاع بوته شد اما در سطوح ٤۰ و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی تنها غلظت ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک اثر افزایشی بر ارتفاع بوته از خود نشان داد. به‌گونه‌ای‌که بیشترین و کم‌ترین ارتفاع بوته به‌ترتیب با میانگین‌های ۹۷ و ۷۹/۱۹ سانتی‌متر به سطوح ٤۰٪ تخلیه رطوبتی + ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی + ۲۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک تعلق داشت که اختلاف ۲۲/٤۹٪ با یکدیگر نشان دادند (جدول ٤).

رشد و ارتفاع بوته به شرایط محیطی که گیاه در آن رشد می‌کند وابسته است. یکی از این شرایط، فراهم بودن آب کافی برای گیاه است. در صورت عدم تأمین آب مورد نیاز گیاه، فشار تورژسانس سلول‌ها کاهش می‌یابد و با اثر بر طول

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر خشکی، اسید سالیسیلیک و کود زیستی بر ویژگی‌های مورد بررسی در برگ کاملینا

منابع تغییرات	درجه آزادی	ارتفاع بوته	تعداد شاخه جانبی	شاخص سبزینگی	محتوای نسبی آب	درصد نشت الکترولیت‌ها	مالون دی‌آلدهید	قندهای محلول
خشکی (A)	۲	٤١٨/٠٥**	٠/٨٨ns	٩/٦٨ns	٨٣٨/٩٣**	١٢٣/٩٨**	١/٢٩**	٥٠١٣/٠٠*
اسید سالیسیلیک (B)	۲	٩٢/٧٢*	٢/٣٨ ns	١٥/٣٦ns	٣٨٤/٩٥**	٣٥/٤١**	٠/٣٣**	٤٨٦/٢٧*
کود زیستی (C)	١	٤١٦/٦٦**	١٢/٥١**	١٤٨/٦٦**	٦٠٨/٠٢**	٢٢٣/٦٦**	٠/٤١**	٨/٨٦ns
(B) × (A)	٤	١٢٢/٤٤**	٥/١١**	٥٠/٥٨**	٢٢/٨٩ ns	٢٢/٠١**	٠/٠٦**	١٣٧/٤٩ns
(C) × (A)	۲	١٢٢/٠٥**	٠/٠٧ ns	٣/٥٤ ns	٢/١٠ns	٥٣/٢٥**	٠/٠١*	١٣٤/٣١ns
(C) ×(B)	۲	٢/٧٢ ns	٠/٠١ns	٩/١٤ ns	١/٧٨ ns	١/٨٠ns	٠/٠٠٧ ns	٨٧/٥١ns
(C) × (B) × (A)	٤	٤٤/٤٤ ns	٠/٤٠ns	٨/٦٢ns	١٦/٥١ns	١/٦١ ns	٠/٠٠٢ns	٦٩/٤٣ns
خطا	٣٦	٢١/٥١	٠/٩٤	٨/٦٢	٩/١٨	٣/٧٣	٠/٠٠٤	٧١/٩٤
ضریب تغییرات (٪)		٥/١٥	١٧/٤٩	٨/٠٩	٤/٢٥	١٠/٠١	٩/٨٨	٢٣/٢٦

***، ** و ns: به ترتیب معنی‌دار در احتمال خطا ۵ و ۱٪ و غیر معنی‌دار**

ادامه جدول ۲-

منابع تغییرات	درجه آزادی	محتوای پرولین	تعداد خورجین در بوته	تعداد دانه در خورجین	تعداد دانه در بوته	وزن هزار دانه	وزن کل دانه در بوته
خشکی (A)	۲	٩٣/٨٣**	٤٧٢٣/٦٢**	٦/٢٢ ns	٤٥٥٥٧/٨٥ ns	٠/٠٣*	٠/١٨*
اسید سالیسیلیک (B)	۲	٦/٠٧**	١٦١٦/٥٨**	٦/٠٠ ns	١٣٤٠٧٣/٥٧ ns	٠/٠٠٤ns	٠/١ns
کود زیستی (C)	١	٥/٤٥**	٦٧٧٨/٢٤**	١/١٨ ns	٨٨٦٧٨٥/١٨**	٠/٠٠٨ ns	٠/٥٧**
(B) × (A)	٤	١/٨٦**	٢٧٨٢/٨٦ **	١/٤٧ ns	١٣٢٠٧٩/٩٠ns	٠/٠٢ ns	٠/١٣*
(C) × (A)	۲	٠/٣٢ns	٨٩٠/٠١**	١٢/٩٦ **	١٤٦٣٠٥/٤٠ns	٠/٠٠٠٨ns	٠/١١ns
(C) ×(B)	۲	١/٠٤ns	٧٣/٠٦ ns	١/٤٠ ns	٢٥٨١٠/٧٩ns	٠/٠١ns	٠/٠١ns
(C) × (B) × (A)	٤	٠/٠٨ns	٤١٩٨/٩٢**	٠/٧٦ns	٥٠٢٣٧٦/٨٥**	٠/٠١٧ ns	٠/٥٣**
خطا	٣٦	٠/٣٨	٢٥٢/٥٦	٣/٠٥	٦١٩٠٠/٩٥	٠/٠٠٩	٠/٠٥
ضریب تغییرات (٪)		٨/٥٧	١١/٦١	١٩/١٨	٢٠/٣١	١٠/٧٤	٢٠/٣٨

***، ** و ns: به ترتیب معنی‌دار در احتمال خطا ۵ و ۱٪ و غیر معنی‌دار**

سلول‌ها، کاهش ارتفاع رخ می‌دهد. نتایج حاصل از پژوهش پاینده و همکاران (۱۳۹۹)، بیانگر کاهش رشد رویشی در کلزا تحت تنش خشکی بود. تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه می‌شود زیرا در شرایط خشکی فتوسنتز کاهش یافته و مواد فتوسنتزی کافی برای رشد گیاه در اختیار آن قرار نمی‌گیرد. همچنین به دلیل کاهش رطوبت نسبی برگ، تقسیم و رشد سلولی در منطقه مریستمی تحت تأثیر قرار می‌گیرد که کاهش ارتفاع بوته از نتایج آن است. کودهای زیستی از طریق تولید هورمون‌های تحریک‌کننده رشد گیاه به ویژه اکسین، سیتوکینین و جیبرلین رشدونمو گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و باعث افزایش شاخص‌های رشدی از جمله ارتفاع بوته می‌شوند (Safari *et al.*, 2023). حسنی بلیانی و همکاران، (۱۳۹۹) اظهار داشتند که علت ارتفاع بیشتر بوته در تیمارهای کاربرد کود زیستی می‌تواند به دلیل قابلیت دسترسی بیشتر

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

جدول ۳- مقایسه میانگین برهم‌کنش خشکی و کود زیستی برای ارتفاع بوته در کاملینا

تنش خشکی (درصد تخلیه رطوبت)	کود زیستی فسفات بارور-۲	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	نشت الکترولیت‌ها (٪)	مالون دی‌آلدهید برگ (میکرومول بر گرم وزن تر برگ)	تعداد دانه در خورجین (عدد)
۲۰	عدم کاربرد	۹۱/۰۰^{ab}	۱۹/۹۰^{bc}	۰/۵۲^{e}	۹/۴۴^{abc}
	کاربرد	۹۵/۱۱^{a}	۱۲/۶۴^{d}	۰/۲۸^{f}	۱۰/۱۱^{a}
۴۰	عدم کاربرد	۹۱/۸۸^{ab}	۲۲/۸۳^{a}	۰/۷۲^{c}	۹/۶۶^{ab}
	کاربرد	۹۳/۱۱^{ab}	۱۸/۳۰^{c}	۰/۶۱^{d}	۸/۱۱^{bc}
۶۰	عدم کاربرد	۷۸/۷۷^{c}	۲۱/۲۴^{ab}	۱/۰۲^{a}	۷/۷۷^{c}
	کاربرد	۹۰/۱۱^{b}	۲۰/۸۲^{b}	۰/۸۵^{b}	۹/۵۵^{ab}

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح خطای P≤0.05 است.

جدول ۴- مقایسه میانگین برهم‌کنش خشکی و اسید سالیسیلیک برای ارتفاع بوته و تعداد شاخه جانبی در کاملینا

تنش خشکی (درصد تخلیه رطوبت)	اسید سالیسیلیک (میکرومولار)	ارتفاع بوته (سانتی‌متر)	تعداد شاخه جانبی (عدد)	شاخص سبزینگی برگ (SPAD)	نشت الکترولیت‌ها (٪)	مالون دی‌آلدهید برگ (میکرومول بر گرم وزن تر)	پرولین برگ (میکرومول بر گرم وزن تر)
۲۰	صفر	۸۸/۸۳^{bc}	۵/۶۶^{a}	۳۴/۴۸^{c}	۱۶/۱۱^{e}	۰/۴۴^{e}	۴/۱۳^{f}
	۱۰۰	۹۳/۰۰^{ab}	۵/۵۰^{ab}	۳۵/۳۵^{c}	۱۶/۴۵^{e}	۰/۳۸^{e}	۴/۶۹^{ef}
	۲۰۰	۹۷/۳۳^{a}	۵/۵۰^{ab}	۳۶/۸۰^{bc}	۱۶/۲۵^{e}	۰/۳۹^{e}	۵/۲۴^{e}
۴۰	صفر	۹۱/۵۰^{bc}	۵/۶۶^{a}	۳۶/۵۶^{bc}	۲۴/۲۵^{a}	۰/۸۸^{b}	۷/۳۳^{bc}
	۱۰۰	۹۷/۰۰^{a}	۴/۵۰^{bc}	۳۴/۱۱^{c}	۱۹/۳۳^{cd}	۰/۵۶^{c}	۷/۸۳^{cd}
	۲۰۰	۸۹/۰۰^{bc}	۵/۸۳^{a}	۴۰/۳۵^{a}	۱۸/۱۱^{de}	۰/۵۶^{c}	۸/۲۶^{bc}
۶۰	صفر	۸۶/۰۰^{c}	۴/۳۳^{c}	۳۴/۹۵^{c}	۲۲/۳۳^{ab}	۱/۱۵^{a}	۸/۱۷^{c}
	۱۰۰	۸۷/۸۳^{bc}	۶/۵۰^{a}	۳۹/۶۰^{ab}	۱۹/۲۰^{d}	۰/۹۰^{b}	۱۰/۲۵^{a}
	۲۰۰	۷۹/۱۹^{d}	۶/۵۰^{a}	۳۴/۳۸^{c}	۲۱/۵۶^{bc}	۰/۷۶^{c}	۸/۹۸^{b}

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح خطای P≤0.05 است.

ریشه‌های گیاه به عناصر غذایی باشد. روند تغییرات ارتفاع بوته در پاسخ به کودهای زیستی در طول فصل رشد نشان داد که ارتفاع بوته کاملینا در اثر مصرف کود زیستی نسبت به شاهد افزایش یافته است. به‌طورکلی فراهمی آب و عناصر غذایی ضروری گیاه با افزایش تعداد گره‌ها و طول میان‌گره‌های ساقه، ارتفاع گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد گیاهی، می‌تواند تأثیر مثبتی بر افزایش ارتفاع بوته داشته باشد. این ترکیب با تحریک فرایندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، جذب مواد غذایی و افزایش مقاومت به تنش‌های محیطی (مانند خشکی یا شوری)، باعث رشد بهتر و سریع‌تر گیاه می‌شود. همچنین، اسید سالیسیلیک با بهبود تعادل هورمونی گیاه (به‌ویژه افزایش سطوح جیبرلین‌ها و سیتوکینین‌ها) می‌تواند تقسیم و طویل شدن سلول‌ها را تقویت کرده و در نتیجه باعث افزایش ارتفاع بوته شد. با این حال، اثر آن وابسته به غلظت مصرف، نوع گیاه و شرایط محیطی است (Hayat *et al.*, 2007).

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

تعداد شاخه جانبی: نتایج حاکی از معنی‌داری اثر دوگانه تنش خشکی و اسید سالیسیلیک و اثر اصلی کود زیستی فسفات بارور-۲ در سطح احتمال خطای ۱٪ بر تعداد شاخه جانبی است (جدول ۲). اثر دوگانه تنش خشکی و اسید سالیسیلیک نشان داد بیشترین و کم‌ترین تعداد شاخه جانبی با اختلاف ۵۰/۱۱٪ به‌ترتیب از ۲۰٪ تخلیه رطوبتی +۱۰۰ و ۲۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد اسید سالیسیلیک حاصل شد. همچنین مشاهده شد در سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی با کاربرد اسید سالیسیلیک تعداد شاخه جانبی کاهش یافت، هر چند این کاهش معنی‌دار نبود. در سطح ٤۰٪ تخلیه رطوبتی نیز ابتدا با کاربرد ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک تعداد شاخه جانبی کاهش و سپس در غلظت ۲۰۰ میکرومولار افزایش یافت (جدول ٤). مطابق جدول ٤ کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ به‌طور معنی‌داری تعداد شاخه جانبی کاملینا را بهبود بخشید و سبب افزایش ۱۸/۹۳٪ تعداد شاخه جانبی نسبت به عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ شد.

کاهش تعداد شاخه‌های جانبی در شرایط ٦۰٪ تخلیه رطوبتی به‌ویژه در عدم کاربرد اسید سالیسیلیک، نشان‌دهنده اثرات منفی تنش خشکی بر رشد و توسعه شاخه‌های جانبی است. این کاهش می‌تواند ناشی از محدودیت منابع آب و اختلال در فرایندهای فیزیولوژیکی مانند تقسیم سلولی، توسعه بافت‌ها و تعادل هورمونی باشد (Kaya *et al.*, 2020). با این حال، کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط تنش متوسط (٤۰٪ تخلیه رطوبتی) اثر تعدیلی داشته و افزایش شاخه‌های جانبی را در غلظت بالاتر (۲۰۰ میکرومولار) نشان داده است. این اثر می‌تواند به دلیل نقش تنظیمی اسید سالیسیلیک در کاهش آسیب‌های ناشی از تنش اکسیداتیو و بهبود تعادل هورمونی گیاه باشد که سبب افزایش رشد می‌شود (Hayat *et al.*, 2007). از سوی دیگر، تأثیر مثبت کود زیستی فسفات بارور-۲ در افزایش تعداد شاخه‌های جانبی نشان‌دهنده تأثیر مفید این کود در بهبود رشد گیاه است. کود زیستی با افزایش قابلیت دسترسی فسفر برای گیاه و تقویت فرایندهای متابولیکی، نقش مهمی در توسعه شاخه‌های جانبی ایفا می‌کند. فسفر به‌عنوان یکی از عناصر کلیدی در فرایندهای انرژی‌زایی و سنتز نوکلئیک اسیدها، برای رشد سلولی و تقسیم سلولی ضروری است (Sharma *et al.*, 2013).

شاخص سبزینگی برگ: برهم‌کنش تنش خشکی و اسید سالیسیلیک و همچنین اثر اصلی کود زیستی فسفات بارور-۲ در سطح احتمال خطای ۱٪ بر شاخص سبزینگی برگ کاملینا معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش تنش خشکی و اسید سالیسیلیک نشان داد شاخص سبزینگی برگ ابتدا در سطح ٤۰٪ تخلیه رطوبتی نسبت به سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی افزایش یافت و سپس در سطح ٦۰٪ تخلیه رطوبتی میزان این صفت نسبت به سطح ٤۰٪ تخلیه رطوبتی کاهش یافت. در تنش ۲۰٪ تخلیه رطوبتی سطوح اسید سالیسیلیک در یک گروه آماری قرار گرفتند اما در سطوح ٤۰ و ٦۰ ٪ تخلیه رطوبتی به‌ترتیب کاربرد ۲۰۰ و ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک اثر افزایشی بر شاخص سبزینگی برگ داشتند (جدول ٤). مقایسه میانگین اثر کود زیستی فسفات بارور-۲ برای شاخص سبزینگی برگ بیانگر آن است که با کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲، شاخص کلروفیل برگ نیز افزایش یافت. به‌طوری‌که بیشترین شاخص سبزینگی با میانگین ۳۷/۹٤ از تیمار کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ حاصل شد و به نسبت تیمار عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ به میزان ۹/۵۸٪ افزایش یافته است (جدول ۵).

اسید سالیسیلیک از طریق چندین سازوکار به افزایش شاخص سبزینگی برگ کمک می‌کند. این ماده از تجزیه کلروفیل جلوگیری می‌کند، زیرا بیان ژن‌های مسئول تخریب کلروفیل، مانند کلروفیلاز را کاهش می‌دهد. همچنین، اسید سالیسیلیک فعالیت آنزیم‌های کلیدی مسیر بیوسنتز کلروفیل مانند δ-آمینولوولینیک اسید سنتاز را افزایش می‌دهد و تولید کلروفیل را تقویت می‌کند. علاوه‌براین، اسید سالیسیلیک با افزایش فعالیت آنزیم‌های پاداکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز و کاتالاز، تنش اکسیداتیو را کاهش می‌دهد و از تخریب کلروفیل جلوگیری می‌کند. این هورمون همچنین

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر کود زیستی فسفات بارور-۲ برای صفات مورد بررسی در کاملینا

کود زیستی فسفات بارور-۲	تعداد شاخه جانبی (عدد)	شاخص سبزینگی برگ (SPAD)	محتوای نسبی آب برگ (٪)	پرولین برگ (میکرومول بر گرم وزن تر)
عدم کاربرد	۵/۰۷^{b}	۳٤/٦۲^{b}	۷٤/٦۳^{a}	٦/۸۹^{b}
کاربرد	٦/۰۳^{a}	۳۷/۹٤^{a}	٦۷/۹۲^{b}	۷/۵۳^{a}

میانگین‌های با حروف یکسان در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح خطای $P\leq0.05$ است.

جذب عناصر ضروری کلروفیل مانند نیتروژن و منیزیم را بهبود می‌بخشد و ساختار غشای کلروپلاست را تثبیت می‌کند که باعث حفظ کارایی فتوسنتزی و افزایش کلروفیل می‌شود (Khan *et al.*, 2015). در سطح ٤۰٪ تخلیه رطوبتی، افزایش شاخص کلروفیل برگ احتمالاً به دلیل فعال‌سازی سازوکارهای تنظیمی گیاه در پاسخ به تنش متوسط بوده است. اما در سطح ٦۰٪ تخلیه رطوبتی، کاهش شاخص سبزینگی نشان‌دهنده شدت تنش و تأثیر منفی آن بر فتوسنتز گیاه است. کاربرد اسید سالیسیلیک در سطوح بالاتر تنش توانسته از طریق کاهش تنش اکسیداتیو و تقویت سازوکارهای پاداکسیدانی، به حفظ کلروفیل و بهبود شاخص سبزینگی برگ کمک کند.

باکتری‌های محرک رشد توانایی تولید اکسین و قابلیت انحلال فسفات‌های معدنی و تولید سیدروفور را دارند، به نظر می‌رسد باکتری‌های محرک رشد با استفاده از سازوکارهای ذکر شده در بالابردن شاخص کلروفیل برگ مؤثر باشند. باکتری‌های حل‌کننده فسفات باعث بهبود جذب فسفر و در نتیجه افزایش رشد ریشه می‌شود. افزایش رشد ریشه نیز سبب افزایش تولید کلروفیل از طریق بهبود جذب عناصری مانند منیزیم، منگنز و روی می‌شود (Safari *et al.*, 2023). پاینده و همکاران (۱۳۹۹) بیان داشتند که کاربرد باکتری‌های محرک رشد محتوای کلروفیل کلزا را افزایش داد و اظهار داشتند که باکتری‌ها از طریق سازوکارهایی مانند کاهش محتوای اتیلن، تأمین آهن از طریق تولید سیدروفورها، سبب پایداری بیشتر در محتوای کلروفیل برگ در مراحل انتهایی رشد می‌شوند.

محتوای نسبی آب برگ: نتایج نشان داد اثرات اصلی تنش خشکی، کود زیستی و اسید سالیسیلیک در سطح احتمال خطای ۱٪ بر محتوای نسبی آب برگ در کاملینا معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر تنش خشکی بر محتوای نسبی آب برگ نشان از کاهش این صفت با افزایش سطوح تنش خشکی نسبت به تیمار شاهد (۲۰٪ تخلیه رطوبتی) دارد. بیشترین محتوای نسبی آب برگ با میانگین ۷٦/۵۲٪ از سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی و کم‌ترین آن نیز با اختلاف ۲۰/٤۰٪ با میانگین ٦۳/۵۵٪ از سطح ٦۰٪ تخلیه رطوبتی حاصل شد (جدول ٦). مطابق جدول ٤، کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ به‌طور معنی‌داری محتوای نسبی آب برگ کاملینا را بهبود بخشید و سبب افزایش ۹/۸۷٪ محتوای نسبی آب برگ نسبت به عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ شد. نتایج اثر اسید سالسیلیک بر محتوای نسبی آب برگ نشان داد با کاربرد اسید سالیسیلیک محتوای نسبی آب برگ افزایش یافت، به‌گونه‌ای که بیشترین محتوای نسبی آب برگ (۷٤/۰۳٪) متعلق به تیمار کاربرد ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک بود که با تیمار ۲۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک در یک گروه آماری قرار گرفت و کم‌ترین آن (٦۵/۹۳٪) از تیمار عدم کاربرد اسید سالیسیلیک به‌دست آمد که با یکدیگر اختلاف ۱۲/۲۸٪ نشان دادند (جدول ۷).

مقادیر بالای محتوای نسبی آب برگ، نشان‌دهنده افزایش تحمل گیاه در برابر تنش خشکی است که در نهایت بهبود رشد را به دنبال دارد (Soltys-kalina *et al.*, 2016). محتوای نسبی آب برگ، یکی از خصوصیات تأثیرگذار بر روند امتداد رشد گیاهان در شرایط تنش خشکی است که هر چه بیشتر باشد، گیاهان قادر به حفظ آماس سلولی بوده و فرایند رشد استمرار می‌یابد (Mohammadi *et al.*, 2016). رابطه مستقیمی میان مقدار رطوبت بستر کاشت و محتوای نسبی آب برگ برقرار است. به‌گونه‌ای که در زمان ایجاد تنش خشکی با

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

جدول ٦- مقایسه میانگین اثر سطوح تنش خشکی برای محتوای نسبی آب برگ در کاملینا

تنش خشکی (تخلیه رطوبتی)	محتوای نسبی آب برگ (٪)	محتوای قندهای محلول برگ (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)	وزن هزار دانه (گرم)
۲۰	۷٦/۵۲[a]	۱۵/۰۹[c]	۰/۸۷[b]
٤۰	۷۳/۷٦[b]	٤۰/۵۷[b]	۰/۸۸[b]
٦۰	٦۳/۵۵[c]	۵۰/٦۹[a]	۰/۹۵[a]

میانگین‌های با حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح خطای P≤0.05 است.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر سطوح اسید سالیسیلیک برای محتوای نسبی آب برگ در کاملینا

اسید سالیسیلیک (میکرومولار)	محتوای نسبی آب برگ (٪)	محتوای قندهای محلول برگ (میلی‌گرم بر گرم وزن تر)
صفر	٦۵/۹۳[b]	۳۱/۰۹[c]
۱۰۰	۷٤/۰۳[a]	٤۱/٤۷[a]
۲۰۰	۷۳/۸۵[a]	۳٦/۸۰[b]

میانگین‌های با حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح خطای P≤0.05 است.

کاهش میزان رطوبت بستر کاشت، محتوای نسبی آب برگ‌ها نیز کاهش می‌یابد و در ادامه نیز مسیر جذب عناصر غذایی با اختلال مواجه می‌شود. یافته‌های پژوهش خوشنام و ممنوعی (۱٤۰۰) در گلرنگ حاکی از آن بود که تنش خشکی نسبت به آبیاری کامل، محتوای نسبی آب برگ‌ها را به‌طور معنی‌داری به میزان ۱۱/۵۷٪ کاهش داد.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر چنین می‌نماید که با افزایش سطوح تنش خشکی و کاهش محتوای رطوبتی خاک، پتانسیل آب برگ و در نتیجه محتوای نسبی آب برگ و در پی آن هدایت روزنه‌ای و در نهایت ورود دی‌اکسید کربن به داخل برگ کاهش یافته است. کاهش هدایت روزنه‌ای ناشی از تغییر محتوای نسبی آب بیانگر آن است که احتمالاً عامل بسته‌شدن روزنه‌ها و کاهش فتوسنتز، پیام‌های ارسالی از ریشه در شرایط تنش آبی است (Kaya *et al.*, 2020). پژوهشگران عامل بسته‌شدن روزنه‌ها را در هورمون آبسیزیک اسید تولیدشده در ریشه‌ها، طی وضعیت تنش خشکی می‌دانند که در سلول‌های روزنه‌ای تجمع می‌یابد (احمدپور و همکاران، ۱۳۹۹).

کود زیستی فسفات بارور-۲ به واسطه اثرگذاری بر یاخته‌های روزنه‌ای گیاه، عامل افزایش محتوای نسبی آب برگ می‌شود و از سوی دیگر، نقش مثبتی بر فرآیند فتوسنتز گیاه دارد و به همین خاطر، به رشد گیاه کمک قابل توجهی می‌کند. در واقع این کود زیستی به دلیل افزایش فراهمی عنصر فسفر و تسهیل در جذب عناصر غذایی چون پتاسیم اثر مثبت و معنی‌داری بر تنظیم اسمزی ریشه و اندام‌های هوایی داشته و جذب بیشتر آب و عناصر را تحت شرایط تنش خشکی دارد (Safari *et al.*, 2023). در همین راستا دسترسی کافی یون پتاسیم به یاخته‌های نگهبان روزنه‌ای تأثیر مثبتی بر عملکرد این یاخته‌ها گذاشته و عمل باز و بسته‌شدن آن‌ها را بهبود بخشیده، در نتیجه سبب افزایش محتوای نسبی آب برگ‌ها به واسطه جلوگیری از هدرروی آب بیشتر می‌شود (پاینده و همکاران، ۱۳۹۹). کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌تواند ناشی از کاهش دسترسی گیاه به آب و کاهش ظرفیت نگهداری آب در سلول‌ها باشد. با این حال، کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک توانسته‌اند با بهبود وضعیت فیزیولوژیکی گیاه، محتوای نسبی آب برگ را افزایش دهند. سازوکارهای محتمل شامل افزایش جذب آب توسط ریشه، بهبود کارایی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

تنظیم اسمزی و کاهش خسارات ناشی از تنش اکسیداتیو به کمک این ترکیبات است. در این زمینه، مطالعه‌ای توسط Ghassemi-Golezani و Farhangi-Abriz (۲۰۲۱) گزارش کرده است که تنظیم‌کننده‌های رشد مانند اسید سالیسیلیک، با افزایش کارایی استفاده از آب و کاهش خسارات اکسیداتیو، می‌توانند اثرات منفی تنش خشکی را بر پارامترهای فیزیولوژیک گیاه کاهش دهند.

درصد نشت الکترولیت: نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد اثر دوگانه تنش خشکی و کود زیستی و اثر دوگانه تنش خشکی و اسید سالیسیلیک بر درصد نشت الکترولیت در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج برهم‌کنش تنش خشکی و کود زیستی فسفات بارور-۲ نشان داد که با افزایش سطوح تنش خشکی از ۲۰٪ تخلیه رطوبتی به ٤۰ و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی، درصد نشت الکترولیت افزایش یافت. با این‌حال، کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ در هر سه سطح تنش خشکی اثر کاهشی بر درصد نشت الکترولیت نشان داد. بیشترین درصد نشت الکترولیت (۲۲/۸۳٪) در تیمار ٤۰٪ تخلیه رطوبتی و عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ به‌دست آمد که با ٦۰٪ تخلیه رطوبتی و عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ در یک گروه آماری قرار گرفت، درحالی‌که کم‌ترین درصد نشت الکترولیت (۱۲/٦٤٪) در تیمار ۲۰٪ تخلیه رطوبتی و کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ مشاهده شد (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش تنش خشکی و اسید سالیسیلیک نیز نشان‌دهنده اثر افزایشی تنش خشکی بر درصد نشت الکترولیت است. در سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی سطوح مختلف اسید سالیسیلیک اثر معنی‌داری بر درصد نشت الکترولیت نشان نداد اما در سطوح ٤۰ و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی، کاربرد اسید سالیسیلیک اثر کاهشی بر درصد نشت الکترولیت نشان داد. به‌طوری‌که بیشترین درصد نشت الکترولیت با میانگین ۲٤/۲۵٪ از سطح ٤۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد اسید سالیسیلیک به‌دست آمد و کم‌ترین درصد نشت الکترولیت نیز (۱٦/۱۱٪) به سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد اسید سالیسیلیک تعلق داشت (جدول ٤). همچنین مشاهده شد در سطح ٤۰٪ تخلیه رطوبتی کاربرد ۲۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک و در سطح ٦۰٪ تخلیه رطوبتی کاربرد ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک اثر بهتری نشان دادند.

تنش خشکی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین تنش‌های محیطی، سبب افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در سلول‌های گیاهی می‌شود که در نتیجه آن آسیب‌های اکسیداتیو به غشاهای سلولی و افزایش نشت الکترولیت رخ می‌دهد. این فرآیند به علت پراکسیداسیون لیپیدها و کاهش پایداری غشاهای سلولی اتفاق می‌افتد (Hassan and Mohamed, 2019). در این شرایط، استفاده از کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک می‌تواند با سازوکارهای مختلف، اثرات تنش خشکی را کاهش داده و درصد نشت الکترولیت را محدود کند. نتایج تحقیقات پارسا مطلق و همکاران (۱٤۰۰) نشان از تأثیرپذیری غشای یاخته‌ای گلرنگ تحت محدویت‌های آبی بود، به‌گونه‌ای که با افزایش سطوح قطع آبیاری در مراحل گلدهی و ساقه‌روی، نشت الکترولیت‌ها به میزان ۳۳/۵ و ۳۸/۳٪ نسبت به آبیاری کامل افزایش یافت. در این پژوهش نیز افزایش نشت یونی از یاخته‌های کاملینا احتمالاً به علت افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن در شرایط تنش اکسیداتیو می‌باشد که گیاه سعی کرده است تا به‌واسطه ایجاد راهکارهای دفاعی در مواجهه با تنش اکسیداتیو به وجود آمده مقاومت کند و میزان درصد نشت الکترولیت‌ها را کاهش دهد.

کود زیستی فسفات بارور-۲ حاوی ریزجاندران مفید مانند باکتری‌های حل‌کننده فسفات است که با افزایش فراهمی فسفر در خاک به بهبود رشد ریشه و توسعه آن کمک می‌کند. این کود زیستی همچنین سبب تقویت تولید متابولیت‌های ثانویه و هورمون‌های گیاهی مانند اکسین می‌شود که می‌تواند پایداری غشای سلولی را افزایش دهد. علاوه‌براین، بهبود وضعیت تغذیه‌ای گیاه از طریق افزایش جذب فسفر، پتاسیم و سایر عناصر غذایی ضروری، سبب تقویت سازوکارهای دفاعی مانند سنتز پاداکسیدان‌ها شده و آسیب به غشاهای سلولی کاهش می‌یابد. بنابراین، کود زیستی فسفات بارور-۲ در سطوح

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

مختلف تنش خشکی، با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و تثبیت غشاها، درصد نشت الکترولیت را کاهش می‌دهد (شجاعیان کیش و همکاران، ۱٤۰۰).

اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک مولکول پیام‌رسان گیاهی، نقش کلیدی در تنظیم پاسخ‌های دفاعی گیاه به تنش‌های محیطی ایفا می‌کند. با کاهش تولید ROS و افزایش فعالیت آنزیم‌های پاداکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز باعث کاهش تنش اکسیداتیو و حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی می‌شود (Aftab *et al*., 2011). همچنین، اسید سالیسیلیک با تنظیم بیان ژن‌های مرتبط با سنتز پروتئین‌های حفاظتی مانند پروتئین شوک حرارتی و لیپازهای غشایی، ساختار غشا را تثبیت کرده و از تخریب آن جلوگیری می‌کند. در شرایط تنش خشکی، کاربرد خارجی اسید سالیسیلیک می‌تواند باعث کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و بهبود پایداری اسمزی سلول‌ها شود که این موضوع به‌طور مستقیم سبب کاهش نشت الکترولیت می‌شود (Pakar *et al*., 2016). نتایج پژوهشی نشان داد محلول‌پاشی ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک با افزایش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و جذب عناصر غذایی پرمصرف، سبب کاهش درصد نشت الکترولیت تحت تنش خشکی در کاملینا شد (نیک اندیش و همکاران، ۱٤۰۳).

محتوای مالون دی‌آلدهید برگ: اثر دوگانه تنش خشکی و کود زیستی در سطح احتمال خطای ۵٪ و اثر دوگانه تنش خشکی و اسید سالیسیلیک در سطح احتمال خطای ۱٪ بر محتوای مالون دی‌آلدهید برگ معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که با افزایش سطوح تنش خشکی از ۲۰٪ تخلیه رطوبتی به ٤۰ و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی، محتوای مالون دی‌آلدهید برگ افزایش یافت. کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ اثر کاهشی بر محتوای مالون دی‌آلدهید برگ داشت. بیشترین محتوای مالون دی‌آلدهید برگ (۱/۰۲ میکرومول بر گرم وزن تر برگ) در تیمار ٦۰٪ تخلیه رطوبتی و عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ به‌دست آمد، درحالی‌که کم‌ترین محتوای مالون دی‌آلدهید برگ (۰/۲۸ میکرومول بر گرم وزن تر برگ) در تیمار ۲۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ مشاهده شد (جدول ۳).

نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش تنش خشکی و اسید سالیسیلیک نیز نشان‌دهنده اثر افزایشی تنش خشکی بر محتوای مالون دی‌آلدهید برگ است. در سطح ۲۰ ٪ تخلیه رطوبتی کم‌ترین محتوای مالون دی‌آلدهید برگ حاصل شد اما در سطوح ٤۰ و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی، کاربرد ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک اثر کاهشی از خود نشان داد. به‌طوری‌که کم‌ترین محتوای مالون دی‌آلدهید برگ با میانگین ۰/۳۸ میکرومول بر گرم وزن تر برگ از سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی + ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک به‌دست آمد که اختلاف معنی‌داری با سطوح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و کاربرد ۲۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک نداشت. همچنین بیشترین محتوای مالون دی‌آلدهید برگ نیز (۱/۱۵ میکرومول بر گرم وزن تر برگ) به سطح ٦۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد اسید سالیسیلیک تعلق داشت (جدول ٤).

تنش خشکی به‌طور مستقیم سبب تولید ROS در سلول‌های گیاهی می‌شود که این مولکول‌ها از طریق پراکسیداسیون لیپیدها، سبب تخریب غشاهای سلولی و افزایش محتوای مالون دی‌آلدهید (MDA) می‌شوند (امیری دربان و همکاران، ۱٤۰۰). محتوای مالون دی‌آلدهید به‌عنوان یکی از شاخص‌های پراکسیداسیون لیپیدها، نشان‌دهنده شدت آسیب اکسیداتیو در سلول‌ها است. با افزایش سطوح تنش خشکی (۲۰٪ به ٤۰ و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی)، تولید ROS افزایش یافته و در پی آن محتوای MDA بیشتر می‌شود. یافته‌های حاضر نشانگر آن است که متناسب با کاهش محتوای نسبی آب (جدول ٦) و افزایش درصد نشت الکترولیت (جدول ٤)، میزان محتوای مالون دی‌آلدهید نیز به واسطه خسارت واردشده به یاخته‌ها بیشتر شد. همچنین با کاهش محتوای آب برگ، تجمع اسمولیت‌های سازگار با تنش سبب تنظیم اسمزی درون یاخته‌ای شد و از این طریق تنش واردشده به غشا را کاهش داد، در نتیجه پایداری غشای پلاسمایی را به دنبال داشتند.

کود زیستی فسفات بارور-۲ حاوی ریزجاندارانی است که

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

با افزایش دسترسی فسفر و تولید متابولیت‌های مفید، نقش مهمی در کاهش تنش اکسیداتیو ایفا می‌کند. این کود با تقویت سامانه دفاعی پاداکسیدانی گیاه، باعث کاهش تولید ROS می‌شود. همچنین، افزایش جذب فسفر از طریق این کود، سبب بهبود سنتز ATP و تثبیت انرژی در سلول‌ها شده که سبب افزایش مقاومت غشاهای سلولی در برابر تخریب می‌شود. به این ترتیب، کاهش محتوای MDA در نتیجه کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ نشان‌دهنده کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و آسیب غشایی است (Sahin *et al.*, 2018). در این رابطه سلیمانی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعات خود بر گیاه کلزا دریافتند که اگر چه بیشترین میزان مالون دی‌آلدهید از تیمار تنش خشکی به دست آمد، اما کاربرد کود زیستی با افزایش دیواره یاخته‌ای و پایداری غشای سیتوپلاسمی از میزان بیومارکر تخریب کاست، به‌گونه‌ای که از لحاظ آماری با تیمار آبیاری معمول تفاوت معنی‌داری نداشت. شجاعیان کیش و همکاران (۱۴۰۰) بیان داشتند که تیمار کود زیستی فسفات بارور-۲ کاهش ۱۱/۱ ٪ را نسبت به تیمار بدون کود زیستی، در میزان محتوای مالون دی‌آلدهید گلرنگ ایجاد کرده است.

اسید سالیسیلیک نقش تنظیم‌کننده در کاهش اثرات تنش‌های اکسیداتیو ایفا می‌کند. اسید سالیسیلیک با افزایش فعالیت آنزیم‌های پاداکسیدانی مانند کاتالاز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز باعث خنثی‌سازی ROS و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها می‌شود. همچنین اسید سالیسیلیک با بهبود ساختار و پایداری غشاها و کاهش نفوذپذیری آن‌ها، از تخریب غشاهای سلولی جلوگیری می‌کند. در شرایط تنش خشکی، کاربرد ۱۰۰ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک به‌طور مؤثری باعث کاهش تولید MDA شده و این موضوع به دلیل تقویت سامانه دفاعی پاداکسیدانی گیاه است (Tari, 2002). نتایج پژوهشی نشان داد محلول‌پاشی ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک سبب کاهش محتوای مالون دی‌آلدهید در کاملینا شد (نیک‌اندیش و همکاران، ۱۴۰۳). در این پژوهش اندازه‌گیری نشت یونی برگ‌های کاملینا حاکی از آن بود که در همان تیمارهایی که کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک به کار رفته بود، علاوه بر کاهش مقدار هدایت الکتریکی، محتوای مالون دی‌آلدهید نیز کاهش یافت.

محتوای قندهای محلول برگ: نتایج نشان داد اثرات اصلی تنش خشکی و اسید سالیسیلیک در سطح احتمال خطای ۱٪ بر محتوای نسبی آب برگ در کاملینا معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثر تنش خشکی بر محتوای قندهای محلول برگ حاکی از افزایش این صفت با افزایش سطوح تنش خشکی نسبت به تیمار شاهد (۲۰٪ تخلیه رطوبتی) است. بیشترین محتوای قندهای محلول برگ با میانگین ۵۰/۶۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ از سطح ۶۰٪ تخلیه رطوبتی و کم‌ترین آن نیز با اختلاف ۲/۳۵ برابری با میانگین ۱۵/۰۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ از سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی حاصل شد (جدول ۶).

نتایج اثر اسید سالسیلیک بر محتوای قندهای محلول برگ نشان داد با کاربرد اسید سالیسیلیک محتوای قندهای محلول برگ افزایش یافت، به‌گونه‌ای که بیشترین محتوای قندهای محلول برگ (۴۱/۴۷ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) متعلق به تیمار کاربرد ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک و کم‌ترین آن (۳۱/۰۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تر برگ) از تیمار عدم کاربرد اسید سالیسیلیک به‌دست آمد که با یکدیگر اختلاف ۳۳/۳۸٪ نشان دادند (جدول ۷).

سازوکار تنظیم اسمزی یکی از اجزا تأثیرگذار بر میزان تحمل گیاهان به تنش خشکی است. گیاهان در زمان بروز شرایط محیطی نامساعد، مجموعه مواد محلول سازگار را تحت عنوان اسمولیت‌ها، که وزن مولکولی کمی نیز دارند، گردآوری می‌کنند. نتایج کار پژوهشگران نشان می‌دهد که تجمع قندهای محلول تحت تنش خشکی به جهت القا سازوکار تحمل، مرتبط هستند (امیری دربان و همکاران، ۱۴۰۰). از این جهت سیدشریفی و سیدشریفی (۱۳۹۸) در پژوهشی که روی گیاه آفتابگردان انجام دادند، ابراز نمودند بیشترین محتوای قندهای محلول در شرایط قطع آبیاری در مرحله گلدهی با مقدار ۷۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ به دست آمد، درحالی‌که کم‌ترین مقدار در وضعیت آبیاری کامل دیده شد.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

به دلیل آن که قندها از اسمولیت‌های سازگار به تنش خشکی محسوب می‌شوند و انباشت آن‌ها، تنظیم اسمزی، توانایی نگهداشت آماس سلولی و پایداری پروتئین‌ها را سبب می‌شود، در نتیجه افزایش محتوای قندهای محلول نظیر ساکارز، فروکتوز و گلوگز در اثر تنش خشکی، راهکار دفاعی گیاه برای افزایش تحمل نسبت به وضعیت نامناسب موجود است. همچنین تنش خشکی به علت اثرگذاری بر فتوسنتز گیاهان و کاهش انتقال الکترون‌ها، بر فرآیند تولید مواد اولیه فتوسنتزی مؤثر بوده و به همین علت به واسطه افزایش کربوهیدارت‌های ساده، میزان قندهای محلول را افزایش می‌دهد (Pessarakli and Szabolcs, 2019).

از سوی دیگر، کاربرد اسید سالیسیلیک به‌طور مؤثری باعث افزایش محتوای قندهای محلول برگ می‌شود. اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد و دفاعی، مسیرهای متابولیکی متعددی را فعال می‌کند که شامل تحریک سنتز قندها و ترکیبات محافظتی است. این ماده از طریق تقویت فعالیت آنزیم‌های کلیدی در مسیرهای متابولیکی مانند گلیکولیز و سنتز قندها عمل کرده و باعث افزایش تولید قندهای محلول می‌شود. همچنین، اسید سالیسیلیک با کاهش اثرات منفی تنش خشکی، از جمله تولید گونه‌های فعال اکسیژن، به حفظ تعادل متابولیکی کمک می‌کند. این نقش دوگانه اسید سالیسیلیک در تنظیم متابولیسم و تقویت مقاومت گیاه، سبب بهبود شرایط فیزیولوژیکی و افزایش تجمع قندهای محلول حتی در شرایط تنش شدید می‌شود (فاضلی کاخکی و همکاران، ۱۳۹٤).

مطالعات نشان داده‌اند که اسید سالیسیلیک با بهبود فعالیت آنزیم‌های هیدرولیتیک نظیر آمیلاز و افزایش تجزیه نشاسته، سبب تجمع قندهای محلول می‌شود (Tari, 2002). این افزایش قندها به تنظیم فشار اسمزی کمک کرده و نقش حیاتی در تحمل تنش‌های محیطی مانند شوری و خشکی ایفا می‌کند. به‌علاوه، اسید سالیسیلیک از طریق بهبود انتقال مواد فتوسنتزی و تقویت مسیرهای پیام‌رسانی مرتبط با تنش، بر تجمع قندها تأثیر مثبت دارد (Yusuf *et al.*, 2008). در این رابطه نیک‌اندیش و همکاران (۱٤۰۳) در مطالعه‌ای بر کاملینا ابراز داشتند که بیشترین میزان قند محلول مربوط به تیمار ۱/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بود و از این جهت به میزان ۵۹ ٪ افزایش را به نسبت تیمار شاهد نشان داد.

محتوای پرولین برگ: نتایج نشان داد برهم‌کنش تنش خشکی و اسید سالیسیلیک و همچنین اثر اصلی کود زیستی فسفات بارور-۲ در سطح احتمال خطای ۱٪ بر محتوای پرولین برگ کاملینا معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین برهم‌کنش تنش خشکی و اسید سالیسیلیک نشان از روند افزایشی محتوای پرولین برگ با افزایش سطوح تنش خشکی دارد. در سطوح ۲۰ و ٤۰٪ تخلیه رطوبتی سطوح مختلف اسید سالیسیلیک اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نشان ندادند و در سطح ٦۰٪ تخلیه رطوبتی تنها کاربرد ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک که از بیشترین محتوای پرولین (۱۰/۲۵ میکرومولار بر گرم وزن تر برگ) برخوردار بود اختلاف معنی‌داری با سایر سطوح تیماری نشان داد (جدول ٤). اثر کود زیستی فسفات بارور-۲ برای محتوای پرولین برگ بیانگر آن است که با کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲، محتوای پرولین برگ نیز افزایش یافت. به‌طوری‌که کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ سبب افزایش ۹/۲۸٪ محتوای پرولین برگ نسبت تیمار عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ شد (جدول ۵).

یکی از سازگاری‌های گیاهان جهت مواجهه با شرایط تنش خشکی، افزایش غلظت پرولین است. پرولین طی شرایط تنش می‌تواند عامل تعادل اسمزی، محافظت از غشا یاخته‌ها و ساختار پروتئینی باشد و همچنین وظیفه مقابله با رادیکال‌های آزاد را ایفا کند. پرولین در افزایش توانایی ظرفیت آبگیری سیتوپلاسم یاخته‌ها و دفاع از درشت مولکول‌هایی چون آنزیم‌ها مؤثر است (Deka *et al.*, 2018). نتایج آزمایش حاضر، نشان داد که نشت یونی از غشای یاخته‌های برگ با افزایش سطوح تنش خشکی، بیشتر شد. متناسب با شرایط ایجادشده، محتوای پرولین برگ نیز افزایش یافته است. سیدشریفی و سیدشریفی (۱۳۹۸) در مطالعات خود ابراز کردند که میزان پرولین در شرایط تنش خشکی در گیاه آفتابگردان، بیشترین مقدار پرولین را در مقایسه با آبیاری کامل نشان داد.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

همچنین باید اشاره کرد به دلیل آن که هم پرولین و هم کلروفیل از گلوتامات که پیش‌ماده هر دو است ساخته می‌شوند، می‌توان نتیجه گرفت که به هنگام ظهور تنش‌های خشکی با افزایش ساخت پرولین، مقدار کلروفیل رو به کاهش می‌رود، که در این پژوهش نیز چنین بود. این افزایش میزان پرولین در برگ‌ها و دیگر اندام‌های گیاهی در زمان تنش‌ها، ممکن است به علت بیوسنتز پرولین، افزایش تبدیل پروتئین به پرولین و یا کاهش اکسیداسیون پرولین به گلوتامات باشد (شجاعیان کیش و همکاران، ۱۴۰۰).

کود زیستی فسفات بارور-۲ با ترکیب ریزجانداران مفید، چندین سازوکار را برای بهبود تحمل گیاه به تنش خشکی فعال می‌کند. یکی از مهم‌ترین عملکردهای این کود، افزایش دسترسی به فسفر است. ریزجانداران حل‌کننده فسفات موجود در این کود، فسفر غیرقابل جذب خاک را به فرم‌های محلول و قابل جذب برای ریشه تبدیل می‌کنند. فسفر نقش مهمی در تولید انرژی (ATP) و تنظیم متابولیسم گیاه دارد که این فرآیندها در شرایط تنش خشکی بسیار حیاتی هستند. این تأمین فسفر همچنین باعث افزایش سنتز ترکیباتی مانند پرولین می‌شود که به تنظیم فشار اسمزی سلول‌ها و حفاظت از ساختارهای سلولی کمک می‌کند (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۶). علاوه‌براین، کود زیستی فسفات بارور-۲ از طریق تحریک رشد و توسعه سامانه ریشه، توانایی گیاه را در جذب آب و مواد مغذی بهبود می‌بخشد. ریزجانداران موجود در این کود همچنین ترکیبات تنظیم‌کننده رشد مانند اکسین‌ها را تولید می‌کنند که باعث افزایش فعالیت متابولیکی و بهبود مقاومت گیاه به تنش خشکی می‌شود. این کود با افزایش فعالیت پاداکسیدانی گیاه، از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن که در اثر تنش خشکی ایجاد می‌شوند، جلوگیری کرده و در نتیجه آسیب اکسیداتیو سلول‌ها را کاهش می‌دهد. به همین دلیل، استفاده از این کود می‌تواند تأثیر چشم‌گیری در کاهش اثرات منفی تنش خشکی بر گیاه داشته باشد (خیاط مقدم همکاران، ۱۴۰۱).

کاربرد اسید سالیسیلیک مسیر بیوسنتز پرولین در گیاهان تحت تنش کم‌آبی را القا می‌کند که می‌تواند سبب افزایش پرولین در گیاهان تحت تنش خشکی شود (Tari, 2002). Yusuf و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند کاربرد اسید سالیسیلیک قبل از اعمال تنش در گیاهان می‌تواند سبب تغییراتی در سطوح هورمون‌های گیاهی درون‌زا و محتوای پرولین شود که در نهایت ممکن است به گیاه در کاهش اثرات مضر تنش کمک کند. در این رابطه نیک‌اندیش و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای بر کاملینا ابراز داشتند که بیشترین میزان پرولین برگ مربوط به تیمار ۱/۵ میلی‌مولار اسید سالیسیلیک بود و از این جهت به میزان ۲۲٪ افزایش را به نسبت تیمار شاهد نشان داد.

تعداد خورجین در بوته: اثر سه‌گانه تنش خشکی، اسید سالیسیلیک و کود زیستی بر تعداد خورجین در بوته در کاملینا در سطح احتمال خطای ۱٪ معنی‌دار است (جدول ۲). افزایش سطح تنش خشکی سبب افزایش تعداد خورجین در بوته شد. علاوه‌براین، استفاده از کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک نیز به بهبود تعداد خورجین در بوته کمک کرد. بیشترین تعداد خورجین در بوته با میانگین ۱۹۳ عدد از ترکیب تیماری ۶۰ ٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور -۲ + ۲۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک و کم‌ترین آن نیز با میانگین ۹۷ عدد از ترکیب تیماری ۲۰ ٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور -۲ + عدم کاربرد اسید سالیسیلیک حاصل شد (جدول ۸).

افزایش تعداد خورجین در بوته تحت تنش خشکی می‌تواند به عنوان یک سازوکار سازگاری گیاه برای بقا در شرایط نامطلوب تعبیر شود. در شرایط تنش خشکی، گیاهان ممکن است منابع خود را به سمت تولید اندام‌های زایشی مانند خورجین هدایت کنند تا از تولید بذر و بقای نسل اطمینان حاصل کنند. این پاسخ فیزیولوژیکی می‌تواند ناشی از تغییر در هورمون‌های گیاهی، به‌ویژه افزایش غلظت اکسین و کاهش سیتوکینین در شرایط تنش باشد که باعث تسریع فرآیند گلدهی و افزایش تعداد خورجین می‌شود (Kadam *et al*., 2017).

علاوه‌براین، استفاده از کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک می‌تواند با بهبود شرایط تغذیه‌ای و تنظیم

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

جدول ۸- مقایسه میانگین برهم‌کنش خشکی، اسید سالیسیلیک و کود زیستی برای اجزای عملکرد در کاملینا

تنش خشکی (٪ تخلیه رطوبت)	کود زیستی فسفات بارور-۲	اسید سالیسیلیک (میکرومولار)	تعداد خورجین در بوته (عدد)	تعداد دانه در بوته (عدد)	وزن کل دانه در بوته (گرم)
۲۰	عدم کاربرد	صفر	۹۷/۵۰^{f}	۱۱۷۸/۳$^{c-g}$	۱/۱۶$^{c-g}$
		۱۰۰	۱۰۱/۰۰^{ef}	۹۳۴/۳^{fg}	۰/۸۷^{fgh}
		۲۰۰	۱۲۴/۶۷ ^{cde}	۹۷۷/۰^{efg}	۰/۸۱^{gh}
	کاربرد	صفر	۱۰۷/۰۰^{ef}	۱۰۷۲/۳$^{d-g}$	۰/۹۰$^{e-h}$
		۱۰۰	۱۸۳/۵۰^{a}	۱۷۵۲/۰^{a}	۱/۶۷^{a}
		۲۰۰	۱۳۷/۰۰^{cd}	۱۲۹۸/۰$^{b-f}$	۱/۰۵$^{d-h}$
۴۰	عدم کاربرد	صفر	۱۰۹/۵۰^{ef}	۹۹۴/۰^{efg}	۰/۸۸^{fgh}
		۱۰۰	۱۱۷/۵۰^{def}	۱۱۴۵/۷$^{c-g}$	۰/۹۸$^{d-h}$
		۲۰۰	۱۴۰/۶۷^{cd}	۱۳۵۵/۰$^{a-e}$	۱/۲۰$^{b-f}$
	کاربرد	صفر	۱۷۲/۰۰^{ab}	۱۵۹۶/۷^{ab}	۱/۲۶$^{b-e}$
		۱۰۰	۱۲۱/۵۰$^{c-f}$	۱۰۵۹/۳$^{d-g}$	۰/۷۸^{fgh}
		۲۰۰	۱۲۰/۰۰^{def}	۹۸۵/۳^{efg}	۰/۹۹$^{d-h}$
۶۰	عدم کاربرد	صفر	۱۱۷/۰۰^{def}	۷۸۰/۳^{g}	۰/۷۵^{h}
		۱۰۰	۱۱۸/۰۰^{def}	۱۵۹۴/۷^{ab}	۱/۵۷^{ab}
		۲۰۰	۱۹۳/۰۰^{a}	۹۰۷/۷^{fg}	۰/۸۷^{fgh}
	کاربرد	صفر	۱۴۷/۰۰^{bc}	۱۴۳۱/۰$^{a-d}$	۱/۳۴^{abc}
		۱۰۰	۱۷۸/۵۰^{a}	۱۴۴۱/۷$^{a-d}$	۱/۲۹^{bcd}
		۲۰۰	۱۷۸/۵۰^{a}	۱۵۳۷/۳^{abc}	۱/۵۰^{abc}

میانگین‌های با حروف یکسان نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح خطای P≤0.05 است.

سازوکارهای پاداکسیدانی در گیاه، توانایی مقابله با تنش را افزایش داده و عملکرد زایشی گیاه را تقویت کند. کود زیستی فسفات بارور-۲ با افزایش دسترسی فسفر برای گیاه، نقش کلیدی در بهبود فرآیندهای متابولیکی دارد (Abbasi *et al.*, 2020)، درحالی‌که اسید سالیسیلیک به عنوان یک مولکول پیام‌رسان در تنظیم پاسخ‌های دفاعی گیاه و کاهش اثرات اکسیداتیو ناشی از تنش عمل می‌کند. این عوامل در مجموع می‌توانند به افزایش تعداد خورجین در بوته حتی در شرایط تنش کمک کنند (نیک‌اندیش و همکاران، ۱۴۰۳).

تعداد دانه در خورجین: اثر دوگانه تنش خشکی و کود زیستی در سطح احتمال خطای ۱٪ بر تعداد دانه در خورجین در کاملینا معنی‌دار شد (جدول ۲). نتایج نشان داد افزایش سطوح تنش خشکی از ۲۰٪ تخلیه رطوبتی به ۶۰٪ تخلیه رطوبتی، سبب کاهش تعداد دانه در خورجین شد. کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ اثر افزایشی بر تعداد دانه در خورجین داشت. بیشترین تعداد خورجین در بوته (۱۰/۱۱ عدد) در تیمار ۲۰٪ تخلیه رطوبتی و کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ به‌دست آمد، درحالی‌که کم‌ترین تعداد خورجین در بوته (۷/۷۷ عدد) در تیمار ۶۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ مشاهده شد (جدول ۳).

با افزایش شدت تنش، ظرفیت فتوسنتزی گیاه کاهش می‌یابد که به‌دلیل بسته شدن روزنه‌ها و کاهش جذب دی‌اکسید کربن رخ می‌دهد. این شرایط سبب کاهش تولید مواد فتوسنتزی و کاهش انتقال آن‌ها به بخش‌های زایشی مانند

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

خورجین‌ها و دانه‌ها می‌شود. همچنین، تنش خشکی تعادل هورمونی گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و با کاهش هورمون‌های زایشی (مانند اکسین و سیتوکینین)، فرآیند گرده‌افشانی و لقاح را مختل می‌کند. در نتیجه، کاهش تعداد دانه در خورجین قابل پیش‌بینی است (Kadam *et al.*, 2017).

کود زیستی فسفات بارور-۲ می‌تواند با تحریک رشد ریشه، به‌ویژه ریشه‌های جانبی، به افزایش سطح تماس ریشه با خاک کمک کند. این موضوع باعث می‌شود که جذب آب و مواد معدنی، حتی در شرایط تنش خشکی، بهبود یابد. ریشه‌های قوی‌تر، ظرفیت بیشتری برای تأمین مواد مغذی و آب به اندام‌های هوایی گیاه دارند و در نتیجه، رشد و تکامل خورجین‌ها و دانه‌ها بهتر انجام می‌شود (رستمی‌هیر و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین ریزجانداران موجود در کود زیستی می‌توانند تولید و تجمع مواد اسمزی مانند پرولین، قندهای محلول و سایر ترکیبات سازگار را تحریک کنند. این ترکیبات به حفظ تعادل آب در گیاه کمک می‌کنند و مانع از افت شدید عملکرد در شرایط تنش خشکی می‌شوند. بهبود تحمل به خشکی در سطح سلولی و بافتی می‌تواند دلیل افزایش تعداد دانه‌ها باشد (حسنی بلیانی و همکاران، ۱۳۹۹).

تعداد دانه در بوته: اطلاعات جدول تجزیه واریانس نشان از معنی‌داری اثر سه‌گانه تنش خشکی، اسید سالیسیلیک و کود زیستی در سطح احتمال خطای ۱٪ تعداد دانه در بوته در کاملینا دارد (جدول ۲). نتایج نشان داد با اعمال تنش خشکی از تعداد دانه در بوته کاسته شد و تیمارهای کود زیستی و همچنین اسید سالیسیلیک اثر افزایشی بر این صفت نشان داد. بیشترین و کم‌ترین تعداد دانه در بوته با اختلاف ۱/۲ برابری به ترکیب تیماری ۲۰ ٪ تخلیه رطوبتی + کاربرد کود زیستی فسفات بارور -۲ + ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک و ۶۰ ٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور -۲ + عدم کاربرد اسید سالیسیلیک حاصل شد (جدول ۸).

در شرایط تنش خشکی، گیاه با کمبود آب مواجه شده و سازوکارهای دفاعی خود را فعال می‌کند. این شرایط باعث کاهش فشار تورژسانس در سلول‌ها، کاهش فعالیت فتوسنتزی و تولید انرژی و کاهش سنتز کربوهیدرات‌ها می‌شود. در نتیجه، انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی کاهش یافته و تعداد دانه‌های تشکیل‌شده کمتر می‌شود. همچنین، تنش خشکی سبب افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن در سلول‌ها شده که در غیاب سازوکارهای پاداکسیدانی قوی می‌تواند به تخریب ساختارهای سلولی و کاهش عملکرد گیاه منجر شود (Kadam *et al.*, 2017).

از سوی دیگر، استفاده از کود زیستی فسفات بارور-۲ به دلیل افزایش دسترسی به فسفر، که یک عنصر کلیدی در فرآیندهای انرژی‌زایی و سنتز نوکلئیک اسیدها است، می‌تواند به بهبود رشد و توسعه دانه‌ها کمک کند. فسفر نقشی کلیدی در تشکیل ATP و انتقال انرژی در گیاه ایفا می‌کند و به این ترتیب، انرژی بیشتری برای ساخت و توسعه دانه‌ها فراهم می‌شود. همچنین، ریزجانداران موجود در کود زیستی ممکن است با تولید هورمون‌های گیاهی مانند اکسین و سیتوکینین، رشد و توسعه اندام‌های زایشی را تحریک کرده و مقاومت گیاه به تنش را افزایش دهند (احمدپور و همکاران، ۱۳۹۹).

اسید سالیسیلیک نیز به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد گیاهی، با فعال‌سازی سامانه پاداکسیدانی گیاه و کاهش تولید ROS، از آسیب‌های ناشی از تنش جلوگیری می‌کند. علاوه‌براین، اسید سالیسیلیک می‌تواند از طریق تنظیم تعادل اسمزی و افزایش تولید ترکیبات اسمولیت مانند پرولین، تعادل آبی گیاه را بهبود بخشد. این سازوکارها به گیاه اجازه می‌دهند تا تحت شرایط تنش خشکی، انتقال مواد فتوسنتزی به اندام‌های زایشی را حفظ کرده و تعداد دانه‌ها را افزایش دهد. بنابراین، ترکیب کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک می‌تواند اثرات منفی تنش خشکی را کاهش داده و با افزایش دسترسی گیاه به منابع انرژی و بهبود مقاومت فیزیولوژیکی آن، تعداد دانه در بوته را بهبود بخشد (عزتی و همکاران، ۱۳۹۸).

وقتی تعداد خورجین در بوته در یک تیمار خاص زیاد است، اما تعداد دانه‌ها در بوته کمتر از حد انتظار است، این موضوع به دلایل پیچیده‌ای باز می‌شود که بیشتر با فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه مرتبط است. احتمالاً تشکیل تعداد زیادی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

خورجین ممکن است نشان‌دهنده این باشد که گیاه در پاسخ به تنش یا تیمار اعمال‌شده، اولویت خود را به تولید اندام‌های زایشی بیشتری اختصاص داده است. با این حال، این افزایش خورجین به معنای تضمین تولید دانه‌های بیشتر نیست. در واقع، برای تکمیل فرآیند تولید دانه، گرده‌افشانی و لقاح باید به‌درستی انجام شود. درصورتی‌که این فرآیندها به دلیل تنش خشکی یا سایر عوامل مختل شوند، حتی خورجین‌های تشکیل‌شده ممکن است دانه‌های کمتری تولید کنند (غلامی و همکاران، ۱٤۰۱).

همچنین تنش خشکی سبب محدودیت در دسترسی به منابع فتوسنتزی و عناصر غذایی می‌شود. وقتی گیاه تعداد زیادی خورجین تشکیل می‌دهد، رقابت شدیدی بین این خورجین‌ها برای دریافت منابع ایجاد می‌شود. این رقابت می‌تواند باعث شود که برخی خورجین‌ها به‌خوبی پر نشوند یا دانه‌های ناقص و کوچک تولید کنند. در نتیجه، اگر چه تعداد خورجین‌ها زیاد است، اما توانایی گیاه برای پر کردن کامل آن‌ها کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، هورمون‌های گیاهی تحت تأثیر تنش خشکی و تیمارهای مختلف ممکن است رشد و توسعه دانه‌ها را اولویت‌بندی نکرده و به‌جای آن بر تشکیل خورجین‌ها متمرکز شوند، که این نیز سبب کاهش تعداد نهایی دانه‌ها در بوته می‌شود (غلامیان و همکاران، ۱۳۹٦). به همین دلیل، تناقض میان تعداد خورجین زیاد و تعداد دانه کم در بوته می‌تواند از این تعادل نامناسب بین تخصیص منابع و فرآیندهای فیزیولوژیکی ناشی شود.

وزن هزار دانه: نتایج نشان داد اثر تنش خشکی در سطح احتمال خطای ۱٪ بر وزن هزار دانه در کاملینا معنی‌دار شد (جدول ۲). مطابق جدول ٦ اعمال تنش خشکی سبب افزایش وزن هزار دانه در گیاه کاملینا شد. تنش خشکی در سطح ٦۰٪ تخلیه رطوبتی سبب ایجاد بیشترین وزن هزار دانه (۰/۹۵ گرم) در گیاه کاملینا شد و کم‌ترین وزن هزار دانه نیز با اختلاف ۹/۱۹٪ به تنش خشکی در سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی ایجاد شد.

نتایج نشان داد که اعمال تنش خشکی باعث افزایش وزن هزار دانه در گیاه کاملینا شد. این موضوع ممکن است به‌دلیل تغییرات فیزیولوژیکی و متابولیکی در گیاه تحت شرایط خشکی باشد. در شرایط تنش خشکی، گیاه برای مقابله با کمبود آب و حفظ بقای خود، مواد ذخیره‌ای را در دانه‌ها جمع‌آوری کرده و این فرآیند می‌تواند سبب افزایش وزن دانه‌ها شود (Gholinezhad *et al.*, 2014). افزایش وزن هزار دانه در سطح ٦۰٪ تخلیه رطوبتی به‌احتمال زیاد به‌دلیل کاهش تعداد دانه در خورجین و همچنین کاهش تعداد دانه در بوته باشد که این سبب ذخیره بیشتر مواد غذایی و انرژی در دانه‌ها در پاسخ به تنش خشکی است و سبب بهبود ظرفیت ذخیره‌سازی و رشد دانه‌ها می‌شود. در این شرایط، گیاه تلاش می‌کند تا با تجمع منابع غذایی مانند قندها و پروتئین‌ها در دانه‌ها، توانایی خود را برای تولید نسل بعدی حفظ کند. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات مشابه که نشان‌دهنده افزایش وزن دانه‌ها در گیاهان تحت تنش خشکی است، هم‌خوانی دارد (Khan *et al.*, 2015).

وزن کل دانه در بوته: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد اثر سه‌گانه تنش خشکی، اسید سالیسیلیک و کود زیستی بر وزن کل دانه در بوته در کاملینا در سطح احتمال خطای ۱٪ معنی‌دار است (جدول ۲). با افزایش سطوح تنش خشکی وزن کل دانه در بوته در کاملینا کاهش یافت و تیمارهای کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک سبب افزایش وزن کل دانه در بوته شد. همچنین مشاهده شد در سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ نسبت به عدم کاربرد آن سبب کاهش وزن کل دانه در بوته شد اما در سطوح ٤۰ و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی کود زیستی فسفات بارور-۲ اثر افزایشی بر این صفت نشان داد (جدول ۸). بیشترین و کم‌ترین وزن کل دانه در بوته با اختلاف ۱/۲ برابری به‌ترتیب از تیمارهای ۲۰٪ تخلیه رطوبتی + کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ + کاربرد ۱۰۰ میکرومولار اسید سالیسیلیک و ٦۰٪ تخلیه رطوبتی + عدم کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ + عدم کاربرد اسید سالیسیلیک به‌دست آمد (جدول ۸).

نتایج نشان داد که با افزایش سطوح تنش خشکی، وزن کل

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

دانه در بوته کاهش یافت که این موضوع به‌دلیل محدودیت در فرآیندهای فیزیولوژیکی مانند فتوسنتز، تولید و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها و کاهش رشد گیاه در شرایط خشکی قابل توجیه است. در تنش خشکی، کاهش دسترسی به آب سبب کاهش فعالیت متابولیکی و محدودیت انتقال مواد مغذی به دانه‌ها می‌شود و در نتیجه وزن کل دانه کاهش می‌یابد (Gholinezhad *et al.*, 2014). کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک، اثرات مثبتی بر وزن کل دانه در بوته نشان دادند. کود زیستی فسفات بارور-۲ احتمالاً از طریق افزایش دسترسی به فسفر و بهبود سامانه ریشه‌ای گیاه توانسته است ظرفیت جذب آب و مواد غذایی را افزایش دهد، که این موضوع به بهبود رشد و عملکرد گیاه کمک می‌کند. از سوی دیگر، اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک تنظیم‌کننده رشد و مولکول پیام‌رسان در گیاهان، نقش مؤثری در تعدیل تنش اکسیداتیو و افزایش فعالیت آنزیم‌های پاداکسیدانی دارد که سبب بهبود تحمل گیاه در شرایط تنش خشکی شده و انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌ها را تقویت می‌کند (عزتی و همکاران، ۱۳۹۸).

مشاهده شد که در سطح ۲۰٪ تخلیه رطوبتی، کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ نسبت به عدم کاربرد آن سبب کاهش وزن کل دانه شد. این موضوع ممکن است به دلیل افزایش رقابت بین رشد رویشی و زایشی باشد که در شرایط آبی مطلوب‌تر، گیاه انرژی بیشتری را صرف رشد رویشی می‌کند. با این حال، در سطوح ۴۰ و ۶۰٪ تخلیه رطوبتی، کود زیستی اثر افزایشی داشت که احتمالاً به دلیل بهبود توان گیاه برای جذب آب و مواد غذایی تحت شرایط تنش است. بیشترین وزن کل دانه در بوته در تیمار ۲۰٪ تخلیه رطوبتی همراه با کاربرد کود زیستی و اسید سالیسیلیک حاصل شد که نشان‌دهنده هم‌افزایی مثبت این تیمارها در بهبود رشد و عملکرد گیاه است. در مقابل، کم‌ترین وزن دانه در بوته مربوط به تیمار ۶۰٪ تخلیه رطوبتی بدون کاربرد کود زیستی و اسید سالیسیلیک بود، که اثرات منفی تنش خشکی بدون حمایت تغذیه‌ای و تنظیمی را به وضوح نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که افزایش سطوح تنش خشکی از ۲۰٪ به ۴۰ و ۶۰٪ تخلیه رطوبتی، اثرات منفی قابل‌توجهی بر بسیاری از صفات گیاه کاملینا رقم سهیل داشت. با این حال، تیمارهای کود زیستی و اسید سالیسیلیک در کاهش اثرات منفی تنش و بهبود برخی از صفات نقش مهمی ایفا کردند. تنش خشکی باعث کاهش محتوای نسبی آب برگ و افزایش قابل توجهی در محتوای مالون دی‌آلدهید و درصد نشت الکترولیت‌ها در گیاهان شد. این تغییرات ناشی از آسیب‌های اکسیداتیو در سلول‌های گیاهی است که در پاسخ به این آسیب‌ها، محتوای پرولین و قندهای محلول برگ نیز به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. از سوی دیگر، کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک تأثیر مثبتی بر کاهش محتوای مالون دی‌آلدهید و درصد نشت الکترولیت‌ها داشت و در عین حال باعث افزایش محتوای پرولین و قندهای محلول برگ شد. کود زیستی فسفات بارور-۲ با افزایش جذب فسفر و بهبود فرآیندهای متابولیکی و اسید سالیسیلیک با فعال‌سازی سامانه‌های دفاعی، افزایش فعالیت پاداکسیدانی، تثبیت غشا و حفظ تعادل آبی، اثرات منفی تنش خشکی را تعدیل کردند. این تیمارها با کاهش محتوای مالون دی‌آلدهید و نشت الکترولیت، و افزایش پرولین، قندهای محلول و محتوای نسبی آب برگ، موجب شدند گیاهان حتی تحت سطوح بالای خشکی، عملکرد بهتری داشته باشند. همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش سطوح تنش خشکی سبب افزایش تعداد خورجین در بوته‌های گیاه کاملینا شد. این افزایش می‌تواند به‌دلیل سازگاری گیاه با شرایط خشک و تلاش برای تولید بذر بیشتر به‌منظور بقای نسل‌های بعدی باشد. این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد کود زیستی فسفات بارور-۲ و اسید سالیسیلیک می‌تواند به‌عنوان یک راهبرد مؤثر برای کاهش اثرات منفی تنش خشکی و بهبود عملکرد تولیدی گیاهان در شرایط خشک مورد استفاده قرار گیرد. به‌طورکلی، تنش خشکی سبب کاهش عملکرد و صفات مورد مطالعه شد، اما کاربرد کود زیستی و اسید سالیسیلیک توانست تا حد زیادی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

اثرات منفی آن را جبران کند. این دو تیمار از طریق تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک و هورمونی گیاه سبب افزایش مقاومت به تنش خشکی شدند. این نتایج بر اهمیت استفاده از روش‌های مدیریت پایدار مانند استفاده از کودهای زیستی و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی در مقابله با اثرات منفی تغییرات اقلیمی بر تولید محصولات کشاورزی تأکید می‌کند.

منابع

احمدپور، راحله، محمدی، فرنوش، و آرمند، نظام (۱۳۹۹). برهم‌کنش عصاره جلبک دریایی (*Ascophyllum nodosum*) و تنش خشکی بر شاخص‌های جوانه‌زنی بذر گیاه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon sculentum*). *تحقیقات بذر*، ۱۰(۳۵)، ٤٤-۳۱.

اکبری، ژاله، و ملکی، عباس (۱۳۹٦). تأثیر محلول‌پاشی اسید آسکوربیک و اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های رویشی و عملکرد و اجزای عملکرد گیاه ماش (*Vigna unguiculata* L.) تحت تنش خشکی. *تحقیقات کاربردی اکوفیزیولوژی گیاهی*، ٤(۲)، ۱۵۹-۱۸۰.

امیری دربان، ندا، نورمحمدی، قربان، شیرانی‌راد، سید محمد جواد، و مجیدی، اسلام (۱٤۰۰). بررسی پاسخ فیزیولوژیک و عملکرد دانه و روغن کاملینا (*Camelina sativa* L. Crantz) به کاربرد سولفات آمونیوم و سولفات پتاسیم تحت تنش خشکی انتهای فصل. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۲(٤)، ۹۹-۸۷. https://doi.org/10.22059/ijfcs.2020.308214.654746

پارسامطلق، بهاره، میرمیران، سیده محبوبه، فاطمی‌نیک، فاطمه، و محمودی، مجید (۱٤۰۰). ارزیابی تنش خشکی بر اسیدهای چرب غیراشباع و برخی صفات فیزیولوژیک چهار رقم گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در جیرفت. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱٤(۳)، ٦۲۷-٦۱۹. https://doi.org/10.22077/escs.2020.3179.1812

پاینده، خوشناز، مجدم، مانی، و دروگر، نازلی (۱۳۹۹). مطالعه کیفیت و عملکرد دانه کلزا رقم هایولا ٤۰۱ با کود مرکب آهن، روی و منگنز تحت تنش قطع آبیاری. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۳(۱)، ۱۱۹-۱۰۹.

حسنی بلیانی، مرضیه، تدین، محمودرضا، و فدایی تهرانی، علی اکبر (۱۳۹۹). بررسی برخی صفات رشدی و عملکردی گیاه کاملینا (*Camelina sativa* L.) تحت تأثیر کودهای زیستی و شیمیایی. *مجله تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*، ۱۰(۱)، ۵۱-۳۹. http://dx.doi.org/10.47176/jcpp.10.1.209111

خوشنام، علی، و ممنوعی، ابراهیم (۱٤۰۰). بررسی اثر تنش کم‌آبی و تراکم بوته بر عملکرد و اجزایی عملکرد گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) در جنوب کرمان. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ٤(۱)، ٤٦-۳۹. https://doi.org/10.22077/escs.2020.2526.1665

خیاط مقدم، مژده سادات، غلامی، احمد، شیرانی‌راد، امیر حسین، برادران فیروزآبادی، مهدی، و عباس‌دخت، حمید (۱٤۰۱). تأثیر محلول‌پاشی سیلیکات پتاسیم بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی ژنوتیپ های بهاره کلزا تحت تنش خشکی آخر فصل. *مجله پژوهش‌های گیاهی (مجله زیست‌شناسی ایران)*، ۳۵(۳)، ۵۲۷-۵۱٤.

دانشور، فهیمه، و خواجوئی‌نژاد، غلامرضا (۱۳۹۳). تأثیر کاربرد کودهای بیولوژیک بر پتانسیل عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ (*Cartahamus tinctorius* L.) تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. *مجله علمی مهندسی آبیاری و آب*، ۱٦، ۵۹-٦۹.

رستمی هیر، میترا، شیخ‌زاده، پریسا، خماری، سعید، و زارع، ناصر (۱٤۰۰). تأثیر نانواکسید مولیبدن بر برخی خصوصیات فیزیولوژیک و زراعی کلزای پاییزه تحت تنش کم‌آبی. *مجله تولید گیاهان زراعی*، ۱٤ (۳)، ٦٤-٤۳. https://doi.org/10.22069/ejcp.2022.18786.2398

ستارزاده، النار، یارنیا، مهرداد، خلیلوند بهروزنیا، ابراهیم، میرشکاری، بهرام، و رشیدی، ورهرام (۱٤۰۲). بررسی امکان کاهش اثرات کم‌آبیاری گیاه دارویی اسطوخودوس (*Lavandula officinalis* L.) با استفاده از کودهای زیستی و فسفره از طریق تغییرات برخی

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

ویژگی‌های مورفولوژیکی و بیوشیمیایی. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۶(٤)، ۱۱۵۳-۱۱۷۱. https://doi.org/10.22077/escs.2023.5327.2140

سلیمانی، داود، نصری، محمد، و اویسی، میثم (۱۳۹۶). بررسی تأثیر عوامل کاهش‌دهنده تنش خشکی (باکتری تیوباسیلوس، بتائین گلایسین، تیوفول و اسید سالیسیلیک) بر عملکرد و صفات فیزیولوژیک کلزا (*Brassica napus* L.) در شرایط قطع آبیاری. *پژوهش‌های زراعی در حاشیه کویر*، ۱٤(۲)، ۱۱۰-۱۰۱.

سیدشریفی، رئوف، و سیدشریفی، رضا (۱۳۹۸). اثر مصرف کودهای زیستی بر عملکرد، میزان روغن و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) در تیمارهای قطع آبیاری. *مجله فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۸(۲۹)، ۱۰۷–۹۷.

شجاعیان کیش، فاطمه، یدوی، علیرضا، موحدی دهنوی، محسن، صالحی، امین، و حمیدیان، محمد (۱٤۰۰). بهبود خصوصیات فیزیولوژیک و جذب عناصر غذایی در کتان روغنی (*Linum usitatissimum* L.) با کاربرد کودهای زیستی تحت شرایط قطع آبیاری در مراحل مختلف رشد. *فرآیند و کارکرد گیاهی*،۱۰(٤٤)، ۲۸۲-۲٦۵.

عزتی، ناصر، ملکی، عباس، و فتحی، امین (۱۳۹۸). تأثیر تنش خشکی و محلول پاشی اسید جیبرلیک و اسید سالیسیلیک بر عملکرد کمی و کیفی کلزا (*Brassica napus* L.). *فیزیولوژی محیطی گیاهی*، ۱٤(٥٦)، ۱۰۹-۹٤.

غلامی، مسعود، سیادت، سید عطاالله، کوچک‌زاده، احمد، مرادی تلاوت، محمدرضا، و رفیعی، مسعود (۱٤۰۱). بررسی تلقیح ازتوباکتر و قطع آبیاری بر عملکرد و برخی خصوصیات فیزیولوژیک ارقام کلزا. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱۵(۲)، ۳۹۲- ۳۷۵. https://doi.org/10.22077/escs.2021.3740.1908

غلامیان، سید محسن، قمرنیا، هوشنگ، و کهریزی، دانیال (۱۳۹٦). بررسی عملکرد کاملینا تحت رژیم‌های مختلف شوری آب در شرایط گلخانه. *مدیریت آب و آبیاری*، ۷(۲)، ۳٤۸-۳۳۳. https://doi.org/10.22059/jwim.2018.248556.582

فاضلی کاخکی، سید فاضل، غیاث آبادی، محمد، و گلدانی، مرتضی (۱۳۹٤). اثر سالیسیلیک اسید در تخفیف تنش خشکی از طریق بهبود برخی صفات مورفولوژیک، فیزیولوژیک، عملکرد بوته و اجزای آن در گیاه خردل (*Brassica compestris* var. parkland.). *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۷(۱)، ۷۷-٦۵. https://doi.org/10.22077/escs.2014.156

کلانتر احمدی، سید احمد، شیرانی‌راد، امیر حسین، و سیادت، سید عطاله (۱۳۹٤). تأثیر تنش کم آبیاری بر عملکرد برخی ارقام کلزا در شرایط شمال خوزستان. *سامانه نشریات دانشگاه یاسوج- مجله تولید گیاهان روغن*، ۱(۲)، ٦۵-۵۳.

نژاد حبیب‌وش، فاطمه، شکری، بهروز، و محمودی، عبدالباسط (۱٤۰۰). بررسی تأثیر کودهای زیستی ازتوبارور-۲ و فسفاته بارور-۲ بر مقدار و ترکیبات اسانس آویشن دنایی *Thymus daenensis* Celak. در مرحله گلدهی کامل. *علوم زیستی گیاهی*، ۱۳(۱)، ۳٦- ۱۹. https://doi.org/10.22108/ijpb.2021.122978.1213

نیک‌اندیش، وحید، قربانی، حمیدرضا، مجیدیان، پرستو، و گرامی، مهیار (۱٤۰۳). بررسی تغییرات صفات فیزیولوژیک و عملکرد دانه گیاه کاملینا (*Camelina sativa* L.) تحت تأثیر محلول‌پاشی محرک‌های مختلف رشدی. *مجله علمی فیزیولوژی گیاهان زراعی*، ۱٦ (٦۱)، ۸۵-۱۰۱.

وقار، محمد سعید، سیف‌زاده، سعید، ذاکرین، حمیدرضا، کبرایی، سهیل، و ولدآبادی، سید علیرضا (۱٤۰۰). اثر محلول‌پاشی نانو کلات آهن، روی و منگنز بر برخی خصوصیات کمی و کیفی سویا (*Glycine max* L.) تحت تنش کم‌آبی. *تنش‌های محیطی در علوم زراعی*، ۱٤(۳)، ۷۰۳-۷۱۸. https://doi.org/10.22077/escs.2020.3197.1816

Abbasi, F., Khaleghi, A., & Khadivi, A. (2020). The effect of salicylic acid on physiological and morphological traits of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Gesunde Pflanzen*, *72*, 155-162.

Aftab, T., Khan, M. M. A., da Silva, J. A. T., Idrees, M., Naeem, M., & Moinuddin, (2011). Role of salicylic acid in promoting salt stress tolerance and enhanced artemisinin production in *Artemisia annua* L. *Journal of Plant Growth Regulation*, *30*, 425-435.

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

Deka, D., Singh, A. K., & Singh, A. K. (2018). Effect of drought stress on crop plants with special reference to drought avoidance and tolerance mechanisms: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 7*, 2703-2721.

Ergo, V. V., Lascano, R., Vega, C. R. C., Parola, R., & Carrera, C. S. (2018). Heat and water stressed field-grown soybean: A multivariate study on the relationship between physiological biochemical traits and yield. *Environmental and Experimental Botany, 148*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.023

Ghassemi-Golezani, K, & Farhangi-Abriz, S. (2021). Plant responses to exogenous salicylic and jasmonic acids under drought stress. *In: Jasmonates and Salicylates Signaling in Plants*, 65-85.

Gholinezhad, E., Mohammadi, S. A., & Rahimian Mashhadi, H. (2014). Effect of drought stress and phosphorus biofertilizer on yield and yield components of *Brassica napus* L. *Agricultural Water Management, 143*, 113-118. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.005

Hassan, A. M, & Mohamed, H. E. (2019). L-arginine pretreatment enhances drought resistance of sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants by increase in polyamines content. *Journal of Plant Growth Regulation, 38*, 600-605.

Hayat, S., Ali, B., Hasan, S. A., & Ahmad, A. (2007). Salicylic Acid: A Plant Hormone. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6352-5_1

Heath, R. L, & Pacher, L. (1968). Photo peroxidation in isolated chloroplast. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid per oxidation. *Archives of Biochemical Biophysics, 125*, 189-198. https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1

Hussain, N., Rigoni, U., & Orij, R. P. (2018). Corporate governance and sustainability performance: Analysis of triple bottom line performance. *Journal of Business Ethics*, *149*, 411-432.

Irigoyen, J. J., Einerich, D. W., & Sanchez-Diaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, *84*(1), 55-60. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x

Kadam, S., Shukla, S. K., Chattha, S. H., & Qi, J. (2017). Drought stress tolerance in *Camelina sativa*: Physiological and biochemical perspectives. *Frontiers in Plant Science, 8*(12), 1365. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01365

Kahrizi, D., Ahmadvandi, H., & Akbarabadi, A. (2015). Feasibility cultivation of camelina (*Camelina sativa*) as medicinal-oil plant in rainfed conditions in Kermanshah-Iran's first report. *Journal of Medicinal plants and By-product, 4*(2), 215-217.

Kaya, C., Ashraf, M., Sonmez, O., Tuna, A. L., & Polat, T. (2020). Exogenous application of nitric oxide and salicylic acid improves tolerance to salt stress in maize plants. *Journal of Plant Nutrition, 43*(1), 1-14. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123020

Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science, 6*, 462. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462

Klinska, S., Gazarkiewicz, K., & Banas, A. (2019). Acyl-CoA: Lysophosphatidylcholine acyltransferases (LPCATs) of *Camelina sativa* seeds: Biochemical properties and function. *Planta, 250*(5), 1655-1670.

Kosar, F., Akram, N. A., Ashraf, M., Ahmad, A., Alyemeni, M. N., & Ahmad, P. (2021). Impact of exogenously applied trehalose on leaf biochemistry, achene yield and oil composition of sunflower under drought stress. *Physiologia Plantarum*, *172*(2), 317-333. https://doi.org/10.1111/ppl.13155

McKay, H. M. (1992). Electrolyte leakage from fine roots of conifer seedlings; a rapid index of plant vitality following cold storage. *Canadian Journal of Forest Research, 22*, 1371-1377. https://doi.org/10.1139/x92-182

Mishra, A, & Choudhuri, M. A. (1999). Effects of salicylic acid on heavy metal-induced membrane deterioration mediated by lipoxygenase in rice. *Biology Plant, 42*, 409-415.

Mohammadi, M., Ghassemi Golezani, K., ZehtabSalmasi, S., & Nasrollahzade, S. (2016). Assessment of some physiological traits in spring safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars under water stress. *International Journal of Life Sciences, 10*(1), 58-64. https://doi.org/10.3126/ijls.v10i1.14512

Pakar, N., Pirasteh-Anosheh, H., Emam, Y., & Pessarakli, M. (2016). Barley growth, yield, antioxidant enzymes, and ion accumulation affected by PGRs under salinity stress conditions. *Journal of Plant Nutrition*, *39*(10), 1372-1379. https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1143498

Paquin, R, & Le chasseur, P. (1979). Observation surune method dosage Labrie dans lesde plants. *Canadian Journal of Botany, 57*, 1851-1854. https://doi.org/10.1139/b79-233

Pessarakli, M, & Szabolcs, I. (2019). Handbook of Plant and Crop Stress. 4th Ed. CRC press.

Rahbarian, R., Khavari-Nejad, R., Ganjeali, A., Bagheri, A., & Najafi, F. (2011). Drought stress effects on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and water relations in tolerant and susceptible chickpea (*Cicer arietinum* L.) genotypes. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica, 53*(1), 66-82. https://doi.org/10.2478/v10182-011-0007-2

Rashid, M. I., Mujawar, L. H., Shahzad, T., Almeelbi, T., Ismail, I. M. I., & Oves, M. (2016). Bacteria and fungi can contribute to nutrients bioavailability and aggregate formation in degraded soils. *Microbiological Research, 183*, 26-41. https://doi.org/ 10.1016/j.micres.2015.11.007

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

Safari, M. R., Dadashi, M. R., Faraji, A., & Armin, M. (2023). Effect of biofertilizer and drought stress on quantitative and qualitative traits in some winter rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. *Romanian Agricultural Research*, *40*, 1563-1578. https://doi.org/10.59665/rar4038

Sahin, U., Ekinci, M., Ors, S., Turan, M., Yildiz, S., &Yildirim, E. (2018). Effects of individual and combined effects of salicylic acid and humic acid on plant growth, essential oil components, and physiological properties of basil (*Ocimum basilicum* L.) under drought stress. *Industrial Crops and Products*, *125*, 209-213.

Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *Springer Plus*, *2*, 1-14.

Soltys-Kalina, D., Plich, J., Strzelczyk-Zyta, D., Sliwka, J., & Marczewski, W. (2016). The effect of drought stress on the leaf relative water content and tuber yield of a half-sib family of 'Katahdin'-derived potato cultivars. *Breeding Science*, *66*(2), 328-331. https://doi.org/10.1270/jsbbs.66.328

Sustainable Oils. (2023). Camelina: The Future of Sustainable Feedstock. Sustainable Oils, LLC. Retrieved from https://sustainableoils.com/

Tari, I. (2002). Acclimation of tomato plants to salinity stress after a salicylic acid pre-treatment. *Acta Biologica Szegediensis*, *46*(3-4), 55-56.

Vaisnad, S, & Talebi, R. (2015). Salicylic acid-enhanced morphological and physiological responses in chickpea (*Cicer arietinum*) under water deficit stress. *Environmental and Experimental Biology*, *13*(3), 109-115.

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

Yazdanpanah, N., Pazira, E., Neshat, A., Naghavi, H., Moezi, A., & Mahmoodabadi, M. (2011). Effect of some amendments on leachate properties of a calcareous saline-sodic soil. *International Agrophysics*, *25*(3), 307-310.

Yusuf, M., Hasan, S. A., Ali, B., Hayat, S., Fariduddin, Q., & Ahmad, A. (2008). Effect of salicylic acid on salinity induced changes in *Brassica juncea*. *Journal of Integrative Plant Biology*, *50*(9), 1096-1102. https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00697.x

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

Improving morpho-physiological characteristics of camelina (*Camelina sativa*) by application of salicylic acid and bio-fertilizer under drought stress

Soheila Sajediasl, Hamidreza Balouchi *, Mohsen Movahhedi Dehnavi, Alireza Yadavi, Fatemeh Ebrahimi

Department of Agriculture and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Yasouj University, Yasouj, Iran

Abstract

In order to improve the morpho-physiological characteristics of Camelina by applying salicylic acid (SA) and biofertilizer under drought stress, a factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications in the research greenhouse of Yasouj University in 2024. The first factor included drought stress at 3 levels (irrigation after 20, 40, and 60% moisture depletion), the second factor was the Barvar-2 phosphate biofertilizer at two levels (application and non-application), and the third factor was foliar spraying of SA at three levels (0, 100, and 200 µM). Irrigation at 40% and 60% depletion of available soil moisture significantly reduced plant height, number of lateral branches, leaf chlorophyll index, relative water content, number of seeds per pod, number of seeds per plant, thousand-seed weight and total seed weight per plant, whereas the number of pods per plant increased. Under drought stress, electrolyte leakage and leaf malondialdehyde content were significantly increased, indicating the occurrence of oxidative stress and membrane damage. In contrast, the contents of soluble sugars and proline in leaves increased under water deficit, highlighting the critical role of compatible osmolytes in plant adaptation to drought conditions. The application of Barvar-2 phosphate biofertilizer and SA increased the studied traits. The highest number of pods per plant (193) was obtained from 60% moisture depletion + no application of Barvar-2 phosphate + 200 µM SA and the lowest number (97) was obtained from the treatment combination of 20% moisture depletion + no application of Barvar-2 phosphate + no application of SA. Also, the highest and lowest total grain weight per plant were obtained from the treatments of 20% moisture depletion + application of Barvar-2 phosphate + application of 100 µM SA and 60% moisture depletion + no application of Barvar-2 phosphate + no application of SA, respectively. Based on the obtained results, although increasing drought stress reduced the total seed weight per plant, the application of phosphate biofertilizer (Barvar-2) in combination with salicylic acid (SA), particularly under severe stress levels, was able to partially alleviate the adverse effects of drought on the productive performance of camelina. This positive effect can be attributed to the role of phosphate biofertilizer and SA in enhancing plant growth under stress conditions. Overall, according to the general yield performance criterion, the best treatment was the combination of phosphate biofertilizer (Barvar-2) with 100 µM salicylic acid, which resulted in the highest total seed weight per plant.

Keywords: Camelina, Drought Stress, Photosynthetic Pigments, Barvar-2 phosphate, Proline

[Downloaded from jispp.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOI: DOI: 10.22034/15.71.1]

Received: May. 24, 2025; Revised: Aug. 26, 2025; Accepted: Oct. 14, 2025; Published Online: May. 2, 2026
*Corresponding Author: balouchi@yu.ac.ir

Copyright © 2025 Iranian Society of Plant Physiology, Published by Isfahan University of Technology press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.