

تأثیر محلول پاشی برون زاد گاما-آمینوبوتیریک اسید بر رشد، فعالیت آنزیمی و عملکرد کاملینا در پاسخ به تنش خشکی

محمد حقانی نیا^۱ | علی نجفی فر^۲ | فریدون سلیمانی^۳ | عباس سلیمانی فرد^۴ | عبدالله جوانمرد^۵

۱. نویسنده مسئول، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران. رایانامه: haghani72@gmail.com
۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران. رایانامه: alinajafifar@yahoo.com
۳. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران. رایانامه: fersolaimani@gmail.com
۴. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران. رایانامه: Soleymani877@gmail.com
۵. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی، ایران. رایانامه: javansohaib@gmail.com

چکیده

به کارگیری ترکیبات تنظیم کننده رشد گیاهی، از جمله گاما-آمینوبوتیریک اسید (GABA)، می تواند نقش مهمی در افزایش تحمل گیاهان به تنش های محیطی ایفا کند. این پژوهش با هدف بررسی اثر محلول پاشی گابا بر ویژگی های مورفوفیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و عملکردی گیاه کاملینا (*Camelina sativa*) تحت تنش خشکی در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه پژوهشی واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه انجام شد. آزمایش به صورت کرت های خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار طراحی شد. تیمارها شامل سه سطح آبیاری (۲۵٪ (آبیاری نرمال)، ۵۰٪ (تنش متوسط) و ۷۵٪ (تنش شدید) حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی) به عنوان فاکتور اصلی و پنج غلظت محلول پاشی گابا (۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلی مولار) به عنوان فاکتور فرعی بودند. نتایج نشان داد که اثر تنش خشکی، محلول پاشی گابا و اثر متقابل آن ها بر تمامی صفات بررسی شده معنی دار بود. بیشترین ارتفاع بوته و عملکرد دانه در شرایط آبیاری نرمال و محلول پاشی ۴ میلی مولار گابا مشاهده شد که نسبت به تیمار تنش شدید بدون گابا به ترتیب ۶۲/۲ و ۱۲۰/۸۷ درصد افزایش نشان داد. همچنین، درصد و عملکرد روغن در شرایط نرمال و ۴ میلی مولار گابا به حداکثر رسید و نسبت به تنش شدید بدون گابا به ترتیب ۵۴/۸ و ۲۴۱/۴ درصد بیشتر بود؛ در حالی که محتوای کلروفیل a ، b و کاروتنوئید نیز در این تیمار بیشترین مقدار را داشت و نسبت به تنش شدید بدون گابا به ترتیب ۱۳۷/۱، ۱۳۱/۶ و ۷۶/۴ درصد افزایش یافت. محلول پاشی گابا همچنین موجب افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی و کاهش پراکسید هیدروژن شد، بطوری که بیشترین فعالیت آنزیم های آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در تیمار تنش متوسط و ۴ میلی مولار گابا مشاهده شد که به ترتیب ۲۶۰/۵، ۱۹۰/۸ و ۲۰۱/۱ درصد بیشتر از شاهد بود، در حالی که میزان پراکسید هیدروژن را ۷۶/۴ کاهش داد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که محلول پاشی گابا، به ویژه در غلظت ۴ میلی مولار، موجب بهبود رشد و عملکرد کاملینا تحت تنش خشکی شد. این یافته ها می تواند به عنوان یک راهکار مدیریتی برای کاهش اثرات تنش خشکی و افزایش بهره وری در شرایط تنش خشکی مورد توجه قرار گیرد.

کلیدواژه ها: تنش اکسیداتیو، گابا، محتوای روغن، محلول پاشی، هورمون

۱. مقدمه

یکی از چالش‌های اساسی کشاورزی ایران، کمبود تولید داخلی روغن‌های گیاهی است، به گونه‌ای که بخش عمده‌ای از نیاز کشور از طریق واردات تأمین می‌شود (Mashhour & Haghania, 2025). براساس آخرین گزارش‌ها، ایران سالانه میلیون‌ها دلار برای واردات روغن‌های گیاهی و کنجاله دانه‌های روغنی هزینه می‌کند و حدود ۹۰ درصد روغن خوراکی مورد نیاز کشور از طریق واردات تأمین می‌شود (Omidinasab et al., 2023). از سوی دیگر، با توجه به محدودیت منابع آبی و تغییرات اقلیمی، توسعه کشت گیاهان روغنی مقاوم به تنش‌های محیطی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضروری به نظر می‌رسد (Rad et al., 2024). در این راستا، کاملینا (*Camelina sativa*) به‌عنوان یک گیاه روغنی کم‌نیاز و مقاوم، می‌تواند به تولید پایدار روغن گیاهی کمک کرده و وابستگی کشور به واردات روغن‌های نباتی را کاهش دهد (Borzoo et al., 2021).

کاملینا (*Camelina sativa*) از خانواده Brassicaceae بوده و یک گیاه یک‌ساله با سازگاری بالا به شرایط اقلیمی سخت است که در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است (Sanekhoori et al., 2021). این گیاه بومی مناطق معتدل و سردسیری بوده و به دلیل دوره رشد کوتاه، نیاز آبی اندک، توانایی رشد در خاک‌های کم‌بازده، و مقاومت بالا به خشکی و شوری، گزینه‌ای مناسب برای کشت در اراضی کم‌بازده ایران محسوب می‌شود (Aghdasi et al., 2021). در شرایطی که بخش وسیعی از اراضی کشاورزی کشور با تنش‌هایی مانند کم‌آبی و کاهش حاصلخیزی خاک روبه‌رو هستند، کاملینا می‌تواند جایگزین مناسبی برای دانه‌های روغنی پرنیاز مانند کلزا و سویا باشد (Haghania et al., 2023). علاوه بر مزایای زراعی، روغن کاملینا از نظر ارزش غذایی و صنعتی نیز اهمیت بالایی دارد. این ویژگی‌ها، همراه با توانایی تولید روغن با کیفیت بالا، کاملینا را به یک گزینه استراتژیک برای تأمین روغن‌های گیاهی و کاهش وابستگی کشور به واردات تبدیل کرده است (Bukhari et al., 2022).

تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و تولید در گیاهان روغنی است (Aghdasi et al., 2021). این تنش هنگامی رخ می‌دهد که دسترسی گیاهان به آب برای انجام فرآیندهای فیزیولوژیکی نظیر فتوسنتز، جذب مواد معدنی و تنظیم فشار اسمزی محدود می‌شود، که به تبع آن منجر به کاهش کارایی فتوسنتز، اختلال در رشد ریشه‌ها و کاهش تولید دانه می‌گردد (Nazim et al., 2023). در گیاهان روغنی، اثرات خشکی علاوه بر کاهش عملکرد دانه، موجب تغییر در ترکیب اسیدهای چرب و کاهش تولید روغن می‌شود (Ahmad et al., 2021; Nazim et al., 2023). خشکی همچنین منجر به افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) نظیر سوپراکسید (O_2^-) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) می‌شود که می‌توانند آسیب‌های جدی به غشای سلولی و مولکول‌های حیاتی مانند پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک وارد کنند (Rad et al., 2024). در نهایت، این تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، تأثیرات مستقیم بر کیفیت و کمیت گیاهان روغنی داشته و می‌توانند منجر به کاهش تولید روغن و تغییر در ترکیب اسیدهای چرب شود (Borzoo et al., 2021). در این راستا، در تحقیقی که روی گیاه کاملینا تحت تنش خشکی انجام شد محققان گزارش کردند تنش خشکی بر صفات فیزیولوژیک (محتوای نسبی آب، مقاومت روزه‌ها و محتوای کلروفیل کل) و صفات زراعی (تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد روغن) تأثیر منفی داشت (Rad et al., 2024). در مطالعه‌ای دیگر که بر روی گیاه سویا (*Glycine max*) انجام شد پژوهشگران اظهار داشتند تنش خشکی منجر به کاهش عملکرد دانه، محتوای روغن، عملکرد روغن و تغییرات نامطلوب در ترکیب اسیدهای چرب دانه‌ها شد (Haghania et al., 2025).

افزایش وابستگی به کودهای شیمیایی موجب بروز مشکلات زیست‌محیطی و کاهش پایداری تولیدات کشاورزی شده است؛ از این رو، شناسایی و توسعه‌ی راهکارهای جایگزین و سازگار با محیط‌زیست برای بهبود رشد و عملکرد گیاهان در شرایط نامساعد محیطی ضروری است (Ashraf et al., 2024; Khan et al., 2024). در این راستا، استفاده از مواد طبیعی و راهکارهای زیستی برای تقویت عملکرد گیاهان و کاهش اثرات منفی تنش‌های محیطی، به‌ویژه تنش خشکی، می‌تواند راه‌حلی مناسب و پایدار باشد. در این

زمینه، نقش گاما آمینوبوتیریک اسید (گابا) به عنوان یک پیام‌رسان مولکولی با دوام طولانی و یک تنظیم‌کننده رشد درون‌زا، برای گیاهان در حال بررسی است (Abdel Razik et al., 2021; Qian et al., 2024).

گابا یک اسید آمینه غیرپروتئینی و مولکول سیگنال‌دهنده مهم در گیاهان است که در تنظیم پاسخ‌های فیزیولوژیکی به تنش‌های محیطی، به‌ویژه تنش خشکی، نقش موثری دارد (Al-Quraan et al., 2021). تحت تنش خشکی، مسیر متابولیسم گابا فعال شده و موجب افزایش تجمع این ترکیب در سلول‌های گیاهی می‌شود که به تنظیم اسمزی، تعادل یونی و کاهش اثرات تنش اکسیداتیو کمک می‌کند (Yuan et al., 2023). گابا از طریق تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، کاهش گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) و تثبیت ساختار غشاهای موجب افزایش تحمل گیاهان به خشکی می‌شود (Zhao et al., 2023). مطالعات نشان داده‌اند که کاربرد گابا می‌تواند اثرات منفی خشکی را کاهش داده، رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشد و به عنوان یک راهکار مؤثر در برنامه‌های مدیریتی برای مقابله با تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد (Qian et al., 2024). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر گزارش شد که کاربرد گابا در گیاه سیاه دانه (*Nigella sativa*) با کاهش تولید ROS و افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، به بهبود عملکرد دانه و روغن در شرایط خشکی کمک کرد (Rezaei-Chiyaneh et al., 2018). با این حال، تأثیر گابا بر گیاه کاملینا در شرایط تنش خشکی تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، پژوهش حاضر به بررسی اثرات کاربرد گابا در بهبود ویژگی‌های بیوشیمیایی و عملکردی گیاه کاملینا تحت تنش خشکی پرداخته که می‌تواند در ارتقاء کشاورزی پایدار، کاهش فشارهای تهدیدکننده امنیت غذایی و بهبود تولید روغن گیاهی در شرایط تغییرات اقلیمی ایران مؤثر باشد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مشخصات محل اجرای آزمایش

این پژوهش در سال زراعی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ در مزرعه پژوهشی واقع در دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه، آذربایجان شرقی اجرا گردید. قبل از اجرای آزمایش سه نمونه خاک به‌طور تصادفی از قسمت‌های مختلف اجرای آزمایش انتخاب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه‌گیری شد. داده‌های تکمیلی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکوشیمیایی خاک محل آزمایش (عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر) قبل از کاشت کاملینا.

Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Organic matter (g.kg ⁻¹)	pH	Field capacity (%)	Permanent wilting point (%)	Exchangeable potassium (mg.kg ⁻¹)	Cation exchange capacity (Cmolc.kg ⁻¹)	Available phosphorus (mg.kg ⁻¹)	Total nitrogen (%)
56.6	16.1	27.3	7.9	7.8	27.1	13.7	379.4	26.5	8.7	0.1

۲-۲. طرح آزمایشی و تیمارهای مورد آزمایش

این آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی رژیم‌های مختلف آبیاری شامل آبیاری پس از ۲۵ (MAD₂₅)، ۵۰ (MAD₅₀) و ۷۵ (MAD₇₅) درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی از آب در دسترس به ترتیب به عنوان آبیاری نرمال (شاهد)، تنش ملایم و تنش شدید بود. عامل فرعی شامل محلول‌پاشی گاما آمینوبوتیریک اسید (گابا) در پنج غلظت ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلی‌مولار بود.

۲-۳. آماده سازی زمین و کاشت

¹ Gamma-Aminobutyric Acid (GABA)

² Maximum Allowable Depletion (MAD)

عملیات تهیه بستر شامل شخم، دیسک و تسطیح با توجه به شرایط زمین و رسیدن رطوبت زمین به حد ظرفیت مزرعه انجام شد. در ادامه، کرت‌هایی شامل ۸ ردیف کشت ایجاد شد. لازم بذکر است که فواصل بین خطوط کشت و روی خطوط کشت به ترتیب ۱۵ و ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (Aminbaigi et al., 2023). بذر کاملینا رقم سهیل از شرکت بیستون شفا کرمانشاه تهیه شد. بذرهای در پانزدهم آبان‌ماه به صورت دستی در عمق ۱ سانتی‌متری خاک کشت شدند. به‌منظور جلوگیری از تداخل تیمارها فاصله هر کرت با کرت مجاور ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بلوک‌ها دو متر در نظر گرفته شد. در طول این پژوهش از هیچگونه مواد شیمیایی از قبیل علف‌کش، آفت‌کش و غیره استفاده نشد و مبارزه با علف‌های هرز به صورت منظم و بطور دستی انجام شد.

۲-۴. اعمال تیمارها

۲-۴-۱. رژیم‌های آبیاری

تیمارهای آبیاری با استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای اجرا شدند. برای ایجاد سطوح مختلف تنش خشکی، از دستگاه رطوبت‌سنج جهت پایش رطوبت خاک استفاده شد و رژیم‌های آبیاری بر اساس حداکثر درصد تخلیه مجاز آب در دسترس (MAD) در سه سطح ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد اعمال شدند، به‌طوری‌که به‌ترتیب بیانگر آبیاری نرمال (شاهد)، تنش ملایم و تنش شدید بود. مقدار آب در دسترس خاک (SAW) و عمق آبیاری لازم برای هر تیمار با استفاده از روابط زیر محاسبه شد (Ostadi et al., 2022):

$$\text{SAW} = (\theta_{fc} - \theta_{pwp}) \times d \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

$$I_d = \text{SAW} \times p \quad \text{رابطه ۲}$$

$$I_g = [I_d \times 100] / E_a \quad \text{رابطه ۳}$$

در این روابط θ_{fc} ، θ_{pwp} ، d ، p ، E_a و I_g به ترتیب ظرفیت زراعی خاک (۲۷/۱ درصد)، نقطه پژمردگی دائم (۱۳/۷ درصد)، عمق خاک (۲۰ سانتی‌متر)، درصد تنش اعمال شده (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد)، عمق خالص آبیاری (سانتی‌متر)، کارایی آبیاری (۶۵ درصد) در نظر گرفته شده است و عمق ناخالص آبیاری (سانتی‌متر) در تنش‌های مختلف بودند.

۲-۴-۲. محلول‌پاشی گابا

برای اعمال گابا (Sigma-Aldrich, USA) محلول‌های مورد نیاز برای غلظت‌های ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلی‌مولار در آب مقطر تهیه و با همزن مغناطیسی کاملاً مخلوط شدند تا محلولی یکنواخت حاصل گردد. برای بهبود پوشش برگ‌ها، ۰/۰۵٪ (v/v) ماده مرطوب‌کننده (Tween 20) به محلول اضافه شد. محلول‌پاشی در اوایل صبح و در شرایط بدون باد و باران انجام شد تا تاخیر سریع و شسته شدن محلول جلوگیری شود. محلول‌پاشی گابا در دو مرحله انجام شد؛ اولین مرحله در مرحله رویشی اولیه و دومین مرحله پیش از گلدهی بود که با استفاده از سم‌پاش دستی به صورت یکنواخت روی برگ‌ها انجام شد. روش و غلظت‌های مورد استفاده بر اساس مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین انتخاب گردید (Abd El-Gawad et al., 2021).

۲-۵. نمونه‌برداری و صفات اندازه‌گیری شده

نمونه‌برداری برای اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیک در مرحله گل‌دهی گیاه انجام شد. برگ‌های سالم، کاملاً توسعه‌یافته و هم‌سن از بخش میانی هر بوته، ۷ روز پس از اعمال آخرین تیمار برداشت شدند. نمونه‌ها بلافاصله پس از برداشت در ظروف خنک و تاریک قرار گرفته و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از شست‌وشوی ملایم و خشک کردن سطحی، برگ‌ها در فویل آلومینیومی پیچیده شده و به‌منظور حفظ ویژگی‌های فیزیولوژیک و جلوگیری از تخریب ترکیبات حساس، تا زمان انجام آزمایش‌ها در دمای منفی ۲۰ درجه سانتی‌گراد فریز شدند (Haghaninia et al., 2025).

³ Soil Available Water (SAW)

۱-۵-۲. رنگ‌های فتوستنتزی

مقدار کلروفیل و کاروتنوئید موجود در برگ‌های کاملینا با استفاده از روش آرنون اندازه‌گیری شد (Arnon, 1949). جذب نمونه‌ها در طول موج‌های ۶۶۳ نانومتر (برای کلروفیل a)، ۶۴۵ نانومتر (برای کلروفیل b) و ۴۷۰ نانومتر (برای کاروتنوئید) ثبت شد.

۲-۵-۲. اندازه‌گیری آنتوسیانین و آسکوربیک اسید

به منظور اندازه‌گیری محتوای آنتوسیانین، ابتدا ۰/۵ گرم از برگ‌های تازه کاملینا در ۱۰ میلی لیتر متانول اسیدی استخراج و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی گراد سانتریفیوژ شد. جذب نوری نمونه‌ها در دو طول موج ۵۲۰ و ۷۰۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (Giusti *et al.*, 2001). همچنین، برای تعیین محتوای اسید آسکوربیک، از روش رنگ‌سنجی ۲/۶-دی کلروفنول ایندوفنول استفاده شد (Terada *et al.*, 1978). بدین منظور ۰/۵ گرم از برگ‌های تازه در ۱۰ میلی لیتر متافسفربیک اسید ۳ درصد استخراج شد. پس از سانتریفیوژ، ۱ میلی لیتر از عصاره با ۹ میلی لیتر معرف ۲/۶-دی کلروفنول ایندوفنول مخلوط شد و کاهش رنگ محلول (تغییر از آبی به بی‌رنگ) در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

۳-۵-۲. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدان

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX) با استفاده از روش زیر اندازه‌گیری شد (Nakano *et al.*, 1981). ۰/۵ گرم از برگ‌های تازه در ۱۰ میلی لیتر بافر پتاسیم فسفات همگن و پس از سانتریفیوژ، ۱۰۰ میکرولیتر از عصاره آنزیمی به ترکیب شامل H_2O_2 و آسکوربات اضافه شد. کاهش جذب نوری در ۲۹۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. همچنین، برای اندازه‌گیری فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) بطور خلاصه، ۰/۵ گرم از برگ‌ها در ۱۰ میلی لیتر بافر پتاسیم فسفات همگن شد. سپس، عصاره آنزیمی به ترکیب حاوی نیترو بلو تترازولیوم (NBT) و ربیوفلاوین اضافه گردید. جذب نوری در ۵۶۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Dhindsa *et al.*, 1981). علاوه بر این، برای سنجش فعالیت آنزیم پراکسیداز (POX) ابتدا ۴۹۰ میکرولیتر آب اکسیژنه ۲۲۵ میلی مولار و ۴۹۰ میکرولیتر محلول گایاکول ۴۵ میلی مولار با هم مخلوط گردید و به آن ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه شد. در نهایت، تغییرات جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر خوانده شد (Chance & Maehly, 1995).

۴-۵-۲. اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن

غلظت پراکسید هیدروژن (H_2O_2) با استفاده از روش پتاسیم یدید (KI) اندازه‌گیری شد. بطور خلاصه، ۰/۵ گرم از بافت گیاهی در ۵ میلی لیتر TCA ۰/۱ درصد هموژنیزه و سپس سانتریفیوژ شد. به ۰/۵ میلی لیتر از فاز بالایی، ۰/۵ میلی لیتر بافر فسفات پتاسیم (۵۰ میلی مولار pH=۷) و ۱ میلی لیتر KI یک مولار اضافه شد. جذب نمونه‌ها در ۳۹۰ نانومتر با اسپکتروفتومتر خوانده شد (Alexieva *et al.*, 2001).

۲-۵-۵. ارتفاع بوته و عملکرد دانه

برای هر تیمار، ارتفاع گیاه کاملینا از ۵ بوته انتخاب شده به صورت تصادفی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها با استفاده از خط‌کش مدرج در پایان دوره رشد انجام و میانگین مقادیر برای هر تیمار گزارش گردید. همچنین، برداشت نهایی در بیستم اردیبهشت‌ماه و در مرحله رسیدگی کامل و زمانی که دانه‌ها به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز بودند انجام شد. بدین‌منظور ابتدا دو ردیف کناری و انتهایی کرت به عنوان اثر حاشیه‌ای حذف شده و سپس بوته‌های موجود از سطح یک مترمربع برداشت و پس از خرم‌کنوبی و بوجاری، دانه‌ها از کاه و کلش جدا شده و پس از آن با توزین دانه، عملکرد دانه بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

۲-۵-۶. استخراج روغن

به منظور استخراج روغن موجود در بذور کاملینا، ۵ گرم از نمونه بذری هر تیمار را به وسیله آسیاب به صورت کامل پودر کرده و به آن ۲۵ میلی لیتر پترولیوم اتر به عنوان حلال اضافه شد. پس از آن، نمونه‌ها به شیکر منتقل و با سرعت ۱۶۰ دور در دقیقه به مدت هشت ساعت تکان داده شدند. سپس نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شدند. در ادامه لایه رویی به وسیله کاغذ صافی فیلتر شده و جداسازی انجام شد. لازم بذکر است که به منظور استخراج کامل روغن مراحل ذکر شده دو الی سه بار تکرار گردید.

۲-۶. آنالیز آماری

بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس با استفاده از نرم‌افزار SAS ورژن ۹/۴ و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel صورت پذیرفت. همچنین، مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

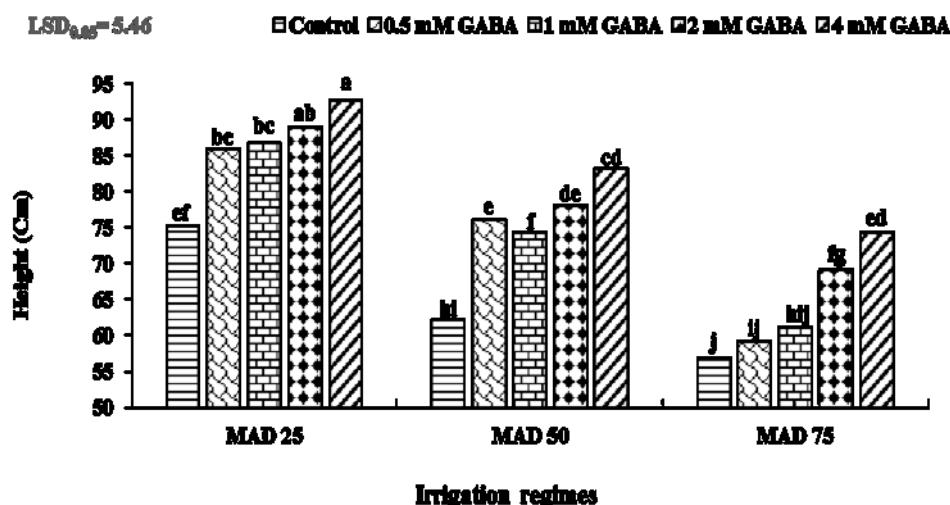
۳. نتایج پژوهش و بحث

۳-۱. ارتفاع

نتایج بدست آمده نشان داد ارتفاع بوته کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری، محلول‌پاشی گابا و اثر متقابل هر دو عامل واقع شد (جدول ۲). بیشترین و کمترین ارتفاع به ترتیب در شرایط عدم تنش خشکی به همراه محلول‌پاشی با غلظت ۴ میلی‌مولار گابا و تنش شدید خشکی بدون مصرف گابا بدست آمد (شکل ۱). همچنین، در شرایط عدم تنش خشکی محلول‌پاشی گابا با غلظت ۴ میلی‌مولار ارتفاع بوته کاملینا را ۶۲/۲ درصد در مقایسه با تنش شدید خشکی بدون مصرف گابا افزایش داد (شکل ۱). تنش خشکی از طریق کاهش دسترسی به آب، بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی تأثیر می‌گذارد (Ahmad et al., 2021; Ashraf et al., 2024). در گیاه کاملینا، تنش خشکی منجر به کاهش ارتفاع شد که این امر به کاهش تقسیم و طول شدن سلولی در نتیجه کاهش تورژسانس سلولی و فعالیت‌های متابولیکی نسبت داده می‌شود (Nazim et al., 2023). در این شرایط، کاربرد گابا نقش مهمی در بهبود ارتفاع بوته کاملینا ایفا کرد. گابا از طریق تعدیل پاسخ‌های فیزیولوژیکی، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود تعادل یونی، اثرات منفی تنش خشکی را کاهش داده و منجر به افزایش ارتفاع گیاه می‌شود (Abdel Razik et al., 2021; Ullah et al., 2023). همسو با این نتایج، پژوهشگران اظهار داشتند گابا از طریق بهبود وضعیت اسمزی و حفظ تعادل آبی در سلول‌ها، تقسیم سلولی و طول شدن ساقه را تسهیل کرده و در نتیجه، کاهش رشد ناشی از تنش را تعدیل می‌کند (Abd El-Gawad et al., 2021; Shala et al., 2024).

جدول ۲. تجزیه واریانس ارتفاع بوته، عملکرد دانه، درصد روغن، عملکرد روغن، کلروفیل (Chl)، کاروتنوئیدها (CARs)، آنتوسیانین و اسید آسکوربیک در گیاه کاملینا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا.

Source of Variation	df	Mean squares								Ascorbic acid
		Height	Seed yield	Oil content	Oil yield	Chl a	Chl b	CARs	Anthocyanin	
Block	2	1.9 ^{ns}	18762.7 ^{ns}	5.2 ^{ns}	3843.3 ^{ns}	2.01 ^{ns}	2.54 ^{ns}	2.57 ^{ns}	0.058*	273.9 ^{ns}
Irrigation regimes (I)	2	2665.8**	690436.3**	225.1**	184720.9**	460.1**	253.7**	148.9**	0.86**	62136.3*
Error a	4	1.66	16510.5	8.2	2888.1	0.78	1.38	0.65	0.038	303.2
GABA	4	98.7**	209227.5**	86.3*	57814.8**	19.98*	12.3*	7.66**	0.042**	2607.4*
I × GABA	8	33.4*	76475.8**	33.1**	21003.7**	6.9**	4.6*	2.7*	0.015**	997.3*
Error b	24	0.81	10100	6.4	2598.1	0.48	0.76	0.23	0.002	42.3
CV (%)		4.3	10.5	6.05	12.5	5.4	8.6	4.9	8.5	3.7



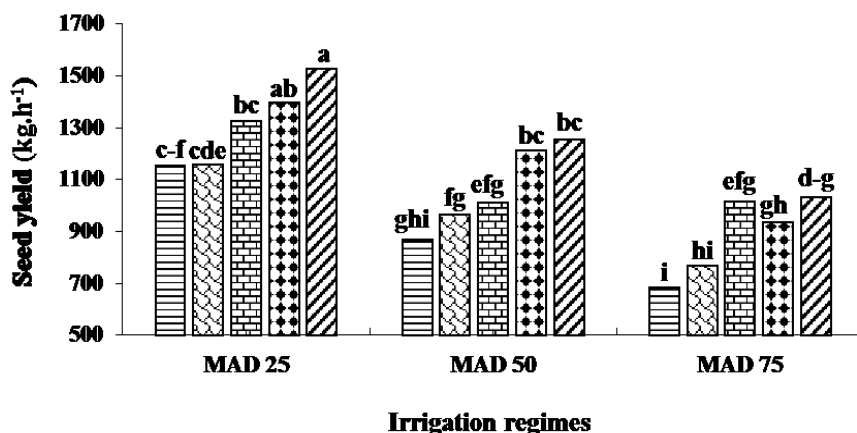
شکل ۱. ارتفاع گیاه کاملینا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا. حروف متمایز نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ است.

۳-۲. عملکرد دانه

براساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) عملکرد دانه کاملینا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری، محلول پاشی گابا و اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و محلول پاشی گابا قرار گرفت. حداکثر عملکرد دانه کاملینا با محلول پاشی ۴ میلی مولار گابا در شرایط بدون تنش ثبت شد و کمترین مقدار هم به تنش شدید بدون مصرف گابا مربوط بود (شکل ۲). همچنین، محلول پاشی گابا با غلظت ۴ میلی مولار در مقایسه با تنش شدید بدون کاربرد گابا عملکرد دانه کاملینا را ۱۲۰/۸۷ درصد افزایش داد (شکل ۲). بنظر می رسد کاهش دسترسی به آب باعث محدودیت در جذب عناصر غذایی، کاهش کارایی فتوسنتزی و افزایش تجمع گونه های فعال اکسیژن (ROS) می شود که در نهایت کاهش عملکرد دانه را در پی دارد (Ahmad *et al.*, 2021). همسو با یافته های پژوهش حاضر، محققان نشان دادند خشکی شدید موجب کوتاه تر شدن دوره پر شدن دانه و افزایش میزان سقط گل و دانه های نابالغ می شود که این عوامل موجب کاهش عملکرد دانه می گردد (Zhao *et al.*, 2023). در مقابل، کاربرد گابا با تعدیل اثرات منفی تنش خشکی، موجب بهبود عملکرد دانه در گیاه کاملینا شد. گابا با تنظیم تعادل اسمزی، کاهش استرس اکسیداتیو و افزایش سنتز ترکیبات آنتی اکسیدانی، اثرات منفی کمبود آب را کاهش داده و سبب افزایش نرخ فتوسنتز و بهبود تخصیص منابع به دانه ها می شود (Chakraborty *et al.*, 2025; Zhao *et al.*, 2023). پژوهشگران مشاهده کردند گابا با حفظ تنظیم اسمزی سلولی، محافظت از گیاهان در برابر استرس اکسیداتیو، متعادل کردن متابولیسم کربن و نیتروژن و حفظ متابولیسم سلولی موجب بهبود عملکرد در گیاهان تحت تنش خشکی شد (Al-Quraan *et al.*, 2021).

LSD_{0.05} = 193

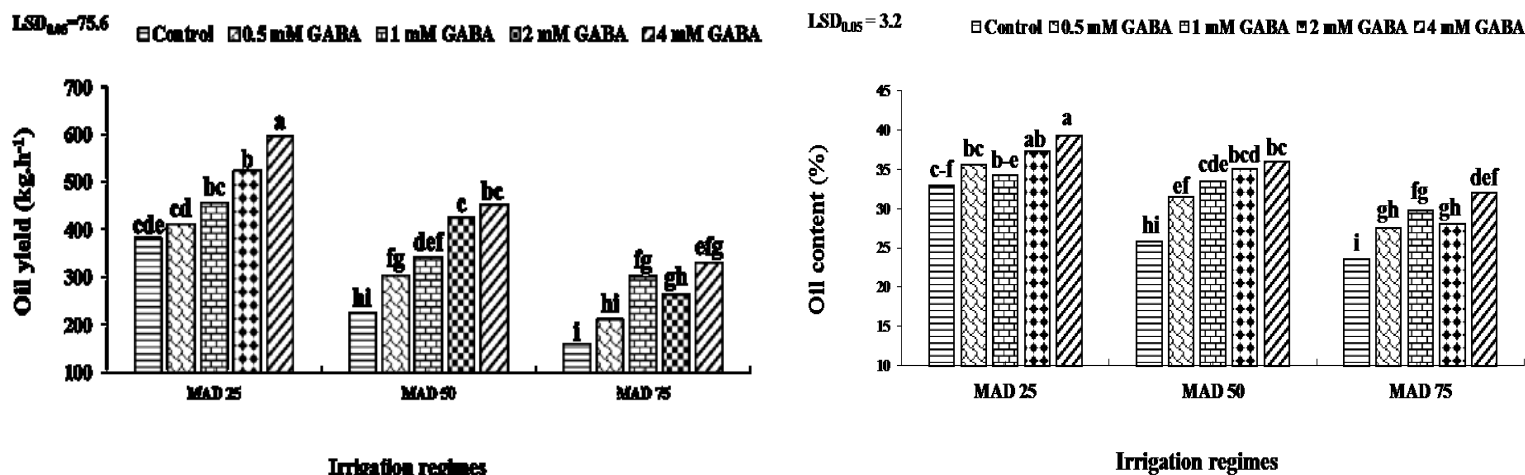
□ Control □ 0.5 mM GABA □ 1 mM GABA □ 2 mM GABA ■ 4 mM GABA



شکل ۲. عملکرد دانه کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا. حروف متمایز نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ است.

۳-۳. درصد و عملکرد روغن

نتایج نشان داد اثر سطوح مختلف آبیاری، محلول پاشی گابا و اثرات متقابل سطوح مختلف آبیاری × محلول پاشی گابا بر درصد و عملکرد روغن کاملینا معنی دار بود (جدول ۲). همچنین، بیشترین درصد و عملکرد روغن در تیمار عدم تنش خشکی با محلول پاشی با غلظت ۴ میلی مولار گابا بدست آمد در حالی که کمترین میزان در تیمار تنش شدید بدون کاربرد گابا مشاهده شد (شکل ۳). علاوه بر این، محلول پاشی با غلظت ۴ میلی مولار گابا در شرایط عدم تنش موجب افزایش ۲۴۱/۴ و ۵۴/۸ درصدی عملکرد و درصد روغن کاملینا در مقایسه با عدم مصرف گابا در شرایط تنش شدید شد (شکل ۳). کاهش دسترسی به آب منجر به اختلال در سنتز لیپیدها، کاهش فعالیت آنزیمهای مرتبط با بیوسنتز اسیدهای چرب و کاهش درصد روغن می شود. این نتایج با مطالعات قبلی که در آن ها گزارش شده است تنش خشکی نه تنها می تواند به کاهش فعالیت آنزیمهای کلیدی در سنتز اسیدهای چرب منجر شود بلکه با کاهش درصد روغن و عملکرد دانه، موجب کاهش عملکرد روغن هم می گردد، هم راستا است (Abdou *et al.*, 2023; Mashhour & Haghaninia, 2025). با این حال، گابا از طریق تنظیم تعادل یونی، افزایش کارایی فتوسنتز و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها، موجب بهبود سنتز و تجمع روغن در دانه ها می شود (Abdel Razik *et al.*, 2021; Chakraborty *et al.*, 2025). همچنین، محققان اظهار داشتند گابا از طریق افزایش بیان آنزیمهای کلیدی در مسیر بیوسنتز اسیدهای چرب مانند اسید چرب سنتتاز و دی استاریل گلیسرول آسیل ترانسفراز، موجب افزایش میزان روغن در دانه ها می شود (Qian *et al.*, 2024).



شکل ۳. درصد روغن (تصویر سمت راست) و عملکرد روغن (تصویر سمت چپ) کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا. حروف متمایز نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح ۵٪ است.

۳-۴. رنگیزه‌های فتوسنتزی

نتایج بدست آمده نشان داد محتوای کلروفیل *a* و *b* و کارتنوئید کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری، محلول پاشی گابا و اثر متقابل سطوح آبیاری و گابا واقع شد (جدول ۲). بیشترین محتوای کلروفیل *a* و *b* و کارتنوئید در شرایط عدم تنش و با مصرف ۴ میلی مولار گابا حاصل شد و کمترین مقادیر نیز در تیمار تنش شدید بدون محلول پاشی مشاهده شد (جدول ۳). همچنین، محلول پاشی ۴ میلی مولار گابا محتوای کلروفیل *a* و *b* و کارتنوئید را در مقایسه با عدم مصرف گابا تحت تنش خشکی شدید به ترتیب ۱۳۷/۱، ۱۳۱/۶ و ۷۶/۴ درصد بهبود بخشید (جدول ۳). در شرایط تنش خشکی، کاهش جذب آب منجر به کاهش فشار اسمزی در سلول‌ها و اختلال در عملکرد سیستم‌های انتقال آب و مواد مغذی می‌شود (Yuan *et al.*, 2023). این امر باعث کاهش فعالیت‌های فتوسنتزی و کاهش سطح کلروفیل‌ها می‌گردد (Al-Quraan *et al.*, 2021; Rad *et al.*, 2024). از سوی دیگر، تحقیقات نشان می‌دهند که تحت شرایط شدید خشکی، کارتنوئیدها نمی‌توانند به اندازه کافی از گیاه محافظت کنند و در نهایت کاهش می‌یابند، زیرا گیاه به دلیل کاهش منابع انرژی و متابولیک قادر به سنتز آن‌ها به مقدار کافی نخواهد بود (Haghaninia *et al.*, 2023). در این شرایط، گابا می‌تواند به عنوان یک مکانیسم دفاعی در برابر اکسیداتیو و استرس‌های محیطی باشد، چرا که گابا باعث فعال سازی سیستم‌های آنتی اکسیدانی و بهبود توازن رادیکال‌های آزاد در گیاه می‌شود و به حفظ سطح کلروفیل‌ها در شرایط خشکی کمک می‌کند (Qian *et al.*, 2024; Shala *et al.*, 2024).

جدول ۳. مقادیر کلروفیل *a* (Chl *a*)، کلروفیل *b* (Chl *b*)، کارتنوئیدها (CARs)، آنتوسیانین و اسید آسکوربیک در گیاه کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا.

Treatments		Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	CARs	Anthocyanin	Ascorbic acid
Irrigation regimens	GABA application	(mg g ⁻¹)	(mg g ⁻¹)	(mg g ⁻¹)	(nmol g ⁻¹)	(nmol g ⁻¹)
MAD ₂₅	0 mM (Control)	19.77de	15.21de	12.12 l	0.388j	233.94j
	0.5 mM	24.33bc	17.97bc	13.24kl	0.469ij	262.47i
	1 mM	25.96ab	18.49b	13.96jk	0.414j	272.13hi
	2 mM	24.71b	19.08ab	13.67kl	0.439ij	252.01ij

	4 mM	27.42a	20.24a	15.33hij	0.518hi	284.49h
	0 mM (Control)	15.89g	12.11fg	14.54ijk	0.756de	355.11de
	0.5 mM	19.47def	14.71e	16.73fg	0.867c	371.52cd
MAD ₅₀	1 mM	18.39ef	15.94cde	15.78ghi	0.903bc	385.72bc
	2 mM	20.87d	14.98e	17.18ef	0.969b	379.48bc
	4 mM	22.87c	17.31bcd	18.24de	1.07a	416.34a
	0 mM (Control)	11.61i	8.50i	16.09fgh	0.613gh	315.71g
	0.5 mM	13.26hi	9.67hi	20.51ab	0.656fg	331.38fg
MAD ₇₅	1 mM	14.23gh	10.56gh	19.88bc	0.693efg	342.61ef
	2 mM	14.94gh	11.45gh	19.12cd	0.714ef	326.12fg
	4 mM	17.96f	13.90ef	21.38a	0.816cd	393.53b
LSD _{0.05}		1.79	2.13	1.38	0.09	20.28

حروف متمایز نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است.

۳-۵. آنتوسیانین و آسکوربیک اسید

نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد اثر سطوح مختلف تنش خشکی، محلول‌پاشی گابا و اثر متقابل هر دو عامل بر محتوای آنتوسیانین و آسکوربیک اسید معنی‌دار بود. بیشترین محتوای آنتوسیانین و آسکوربیک اسید در شرایط تنش متوسط و با محلول‌پاشی گابا با غلظت ۴ میلی‌مولار حاصل شد و کمترین محتوای این صفات هم به شاهد تعلق داشت (جدول ۳). همچنین، محلول‌پاشی گابا با غلظت ۴ میلی‌مولار تحت تنش متوسط در مقایسه با شاهد محتوای آنتوسیانین و آسکوربیک اسید را ۱۷۵/۷ و ۷۷/۹ درصد افزایش داد (جدول ۳). اسید آسکوربیک و آنتوسیانین‌ها به‌عنوان ترکیبات آنتی‌اکسیدانی شناخته شده‌اند که در کاهش اثرات منفی اکسیداتیو نقش حیاتی دارند (Rastegar et al., 2025). گیاهان برای مقابله با آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از تنش، معمولاً میزان اسید آسکوربیک و آنتوسیانین‌ها را افزایش می‌دهند. همسو با این یافته‌ها، محققان گزارش کردند که تحت شرایط خشکی، محتوای آنتوسیانین در کاملینا افزایش می‌یابد تا از آسیب‌های اکسیداتیو جلوگیری کند و گیاه را در برابر استرس محیطی مقاوم‌تر سازد (Haghaninia et al., 2023). در مقابل، گابا به‌عنوان یک تنظیم‌کننده گیاهی شناخته شده است که می‌تواند باعث افزایش محتوای اسید آسکوربیک و آنتوسیانین در گیاهان تحت تنش خشکی شود (Ashraf et al., 2024). این افزایش می‌تواند به‌عنوان یک واکنش دفاعی برای مقابله با استرس اکسیداتیو ناشی از خشکی باشد (Yuan et al., 2023). گابا با تحریک سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی و فعال‌سازی آنزیم‌هایی که در سنتز این ترکیبات نقش دارند، می‌تواند به گیاهان کمک کند تا اسید اسکوربیک و آنتوسیانین بیشتری تولید کنند و به این ترتیب به کاهش آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از خشکی کمک کند (Rastegar et al., 2025).

۳-۶. فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی

نتایج نشان داد اثر سطوح مختلف آبیاری، محلول‌پاشی گابا و اثرات متقابل سطوح مختلف آبیاری × محلول‌پاشی گابا بر فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار بود (جدول ۴). حداکثر فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در تنش متوسط و با محلول‌پاشی گابا با غلظت ۴ میلی‌مولار بدست آمد و کمترین میزان هم در شاهد ثبت شد (جدول ۵). نتایج نشان داد در شرایط تنش متوسط و با محلول‌پاشی گابا با غلظت ۴ میلی‌مولار فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز به ترتیب ۲۶۰/۴، ۱۹۰/۸ و ۲۰۱/۱ درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافتند (جدول ۵). تنش خشکی موجب ایجاد استرس اکسیداتیو در گیاهان می‌شود که منجر به تولید رادیکال‌های آزاد و سایر گونه‌های واکنشی اکسیژن در سلول‌های گیاهی شده و ساختارهای سلولی از جمله غشاها، پروتئین‌ها و DNA را تخریب کنند (Bukhari et al., 2022). گیاهان به‌منظور مقابله با این آسیب‌ها، سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی خود را فعال می‌کنند. محققان مشاهده کردند در شرایط خشکی

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در کاملینا افزایش یافته که سعی در حفظ تعادل رداکس و کاهش آسیب‌های ناشی از گونه‌های واکنشی اکسیژن دارند (Nazim *et al.*, 2018). علاوه بر این، گابا به‌عنوان یک تنظیم‌کننده گیاهی، اثرات مثبتی بر سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاهان در شرایط استرس‌زا به‌ویژه خشکی دارد (Zhao *et al.*, 2023). گابا با فعال‌سازی مسیرهای سیگنال‌دهی گیاهی، می‌تواند تولید آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را در گیاهان تحت تنش خشکی تحریک کند (Shala *et al.*, 2024). این افزایش فعالیت آنزیم‌ها به کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود تعادل رداکس در سلول‌های گیاهی کمک می‌کند (Yuan *et al.*, 2023). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که گابا ممکن است با تنظیم متابولیسم آنتی‌اکسیدانی، به ویژه در مسیرهای که شامل آسکوربات و گلوتاتیون هستند، موجب تقویت پاسخ‌های دفاعی گیاهان و بهبود تحمل به خشکی می‌شود (Chen *et al.*, 2025; Ullah *et al.*, 2023).

جدول ۴. تجزیه واریانس فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (آسکوربات پراکسیداز (APX)، پراکسیداز (POX)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD)) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) در گیاه کاملینا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا

Source of Variation	df	Mean squares			
		APX	POX	SOD	H_2O_2
Block	2	0.056 *	0.047 *	1.36 ^{ns}	0.2 ^{ns}
Irrigation regimes (I)	2	0.622**	0.727*	83.6**	75.8**
Error a	4	0.037	0.006	2.47	0.11
GABA	4	0.049**	0.055**	3.01**	4.45**
I × GABA	8	0.017**	0.019*	1.15*	1.51**
Error b	24	0.0012	0.0009	0.22	0.024
CV (%)		9.2	12.6	10.1	8.3

^{ns}، * و ** به ترتیب عدم تفاوت معنی‌دار، معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد.

جدول ۵. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی (آسکوربات پراکسیداز (APX)، پراکسیداز (POX)، سوپراکسید دیسموتاز (SOD)) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) گیاه کاملینا

Treatments		APX ($\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ protein)	POX ($\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ protein)	SOD ($\text{U mg}^{-1} \text{protein}$)	H_2O_2 ($\text{nmol g}^{-1} \text{FW}$)
Irrigation regimes	GABA application				
MAD ₂₅	0 mM (Control)	0.243k	0.357k	3.11h	3.86hi
	0.5 mM	0.399hi	0.508ij	3.87gh	2.97jk
	1 mM	0.336ij	0.481ijk	3.38h	3.48ij
	2 mM	0.305jk	0.441jk	3.98gh	2.54kl
	4 mM	0.436gh	0.557hij	3.59h	2.12 l
MAD ₅₀	0 mM (Control)	0.605de	0.764c-f	5.99e	6.58d
	0.5 mM	0.812ab	0.802cde	7.69cd	4.76fg
	1 mM	0.655cd	0.896bc	8.24bc	5.12ef
	2 mM	0.729bc	0.949ab	8.84ab	4.32gh
	4 mM	0.876a	1.042a	9.36a	4.07ghi
MAD ₇₅	0 mM (Control)	0.469gh	0.593ghi	4.76fg	8.59a
	0.5 mM	0.497fg	0.621f-i	5.01f	7.95ab
	1 mM	0.515fg	0.677e-h	5.44ef	7.38bc
	2 mM	0.566ef	0.722d-g	5.65ef	6.89cd
	4 mM	0.681cd	0.856bcd	7.17d	5.69e
LSD _{0.05}		0.08	0.14	0.98	0.71

حروف متمایز نشان دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ است.

۷-۳. پراکسید هیدروژن

اثر سطوح مختلف آبیاری، محلول پاشی گابا و اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری $\times$ محلول پاشی گابا بر غلظت پراکسید هیدروژن کاملینا معنی دار بود (جدول ۴). بیشترین پراکسید هیدروژن در شرایط تنش شدید بدون محلول پاشی با گابا بدست آمد و کمترین مقدار هم در شاهد ثبت شد (جدول ۵). پراکسید هیدروژن در شرایط تنش شدید بدون محلول پاشی با گابا در مقایسه با شاهد ۱۲۲/۵ درصد افزایش پیدا کرد. با این وجود، استفاده از غلظت ۴ میلی مولار گابا در شرایط بدون تنش محتوای پراکسید هیدروژن را ۷۶/۴ درصد در مقایسه با تنش شدید بدون گابا کاهش داد (جدول ۵). در شرایط خشکی، تعادل میان تولید و تخریب ROS در سلول های گیاهی به هم می خورد و باعث افزایش سطح H_2O_2 می شود (Bukhari et al., 2022). این افزایش در سطح پراکسید هیدروژن منجر به آسیب به غشای سلولی، پروتئین ها و DNA شده و بر کارایی آنزیم ها و فرآیندهای متابولیک تأثیر منفی می گذارد (Ashraf et al., 2024). با این وجود، گابا به عنوان یک تنظیم کننده گیاهی و همچنین یک ترکیب دفاعی طبیعی با افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانتی نقش مهمی در کاهش سطح پراکسید هیدروژن ایفا می کند (Abdou et al., 2023; Chen et al., 2025). همسو با این نتایج، محققان نشان داده اند که گابا می تواند با بهبود پاسخ های آنتی اکسیدانی، میزان پراکسید هیدروژن را در گیاهان تحت تنش خشکی کاهش داده و از ایجاد آسیب های ناشی از استرس اکسیداتیو جلوگیری کند (Abdel Razik et al., 2021; Khan et al., 2024).

۴. نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که تنش خشکی تأثیرات منفی قابل توجهی بر ویژگی های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کاملینا از جمله کاهش ارتفاع، عملکرد دانه، درصد روغن، فعالیت های آنتی اکسیدانی و کاهش سطح کلروفیل و کاروتنوئیدها دارد. همچنین، پراکسید هیدروژن به عنوان یک نشانگر استرس اکسیداتیو در شرایط تنش خشکی افزایش یافت. با این حال، کاربرد گابا در دو مرحله رشد گیاه، شامل مرحله رویشی اولیه و پیش از گل دهی، اثرات منفی تنش خشکی را تعدیل کرد، که بیشترین اثر محافظتی با استفاده از غلظت ۴ میلی مولار مشاهده شد. گابا با افزایش محتوای آنتوسیانین و آسید آسکوربیک، به طور مؤثر استرس اکسیداتیو را کاهش داد و با تقویت سیستم های آنتی اکسیدانی، توانایی گیاه را در مقابله با تنش های محیطی بهبود بخشید. این افزایش در فعالیت های آنتی اکسیدانی منجر به کاهش پراکسید هیدروژن و تقویت مکانیسم های حفاظتی گیاه در برابر خشکی شد. علاوه بر این، استفاده از ۴ میلی مولار گابا با افزایش سطح کلروفیل ها و کاروتنوئیدها، فرآیند فتوسنتز را بهبود بخشید و موجب افزایش عملکرد دانه، درصد روغن و عملکرد روغن گردید. بنابراین، استفاده از گابا به عنوان یک استراتژی طبیعی و مؤثر می تواند در بهبود تاب آوری گیاهان در برابر تنش های محیطی، به ویژه در شرایط خشکی و تغییرات اقلیمی نقش مهمی در کشاورزی پایدار ایفا کند.

سپاس گذاری

نگارندگان بر خود لازم می دانند از دانشگاه مراغه به خاطر فراهم آوری زیرساخت های پژوهشی این تحقیق صمیمانه قدردانی نمایند.

- Abd El-Gawad, H. G., Mukherjee, S., Farag, R., Abd Elbar, O. H., Hikal, M., Abou El-Yazied, A., Abd Elhady, S. A., Helal, N., ElKelish, A., & El Nahhas, N. (2021). Exogenous γ -aminobutyric acid (GABA)-induced signaling events and field performance associated with mitigation of drought stress in *Phaseolus vulgaris* L. *Plant Signaling & Behavior*, 16(2), 1853384. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1853384>
- Abdel Razik, E. S., Alharbi, B. M., Pirzadah, T. B., Alnusairi, G. S., Soliman, M. H., & Hakeem, K. R. (2021). γ Aminobutyric acid (GABA) mitigates drought and heat stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by regulating its physiological, biochemical and molecular pathways. *Physiologia Plantarum*, 172(2), 505-527. <https://doi.org/10.1111/ppl.13216>
- Abdou, N. M., Roby, M. H., Al-Huqail, A. A., Elkelish, A., Sayed, A. A., Alharbi, B. M., Mahdy, H. A., & Abou-Sreya, A. I. B. (2023). Compost improving morphophysiological and biochemical traits, seed yield, and oil quality of *Nigella sativa* under drought stress. *Agronomy*, 13(4), 1147. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041147>
- Aghdasi, S., AghaAlikhani, M., Modarres-Sanavy, S. A. M., & Kahrizi, D. (2021). Exogenously used boron and 24-epibrassinolide improved oil quality and mitigate late-season water deficit stress in camelina. *Industrial Crops and Products*, 171, 113885. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113885>
- Ahmad, Z., Anjum, S., Skalicky, M., Waraich, E. A., Muhammad Sabir Tariq, R., Ayub, M. A., Hossain, A., Hassan, M. M., Brestic, M., & Sohulul Islam, M. (2021). Selenium alleviates the adverse effect of drought in oilseed crops camelina (*Camelina sativa* L.) and canola (*Brassica napus* L.). *Molecules*, 26(6), 1699. <https://doi.org/10.3390/molecules26061699>
- Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S., & Karanov, E. (2001). The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. *Plant, Cell & Environment*, 24(12), 1337-1344. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>
- Al-Quraan, N. A., Al-Ajlouni, Z. I., & Qawasma, N. F. 2021. Physiological and biochemical characterization of the GABA shunt pathway in pea (*Pisum sativum* L.) seedlings under drought stress. *Horticulturae*, 7(6), 125. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7060125>
- Aminbaigi, A. , Jalilian, J. , Chaghazardi, H. , Kahrizi, D. and khalilzadeh, R. (2023). Evaluation of different fertilizer sources effect on yield, forage quality and oil of camelina (*Camelina sativa* L.) under water deficit stress. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 33(2), 1-14. <https://10.22034/saps.2022.50509.2831> (In Persian)
- Arnon, D. I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in Beta vulgaris. *Plant physiology*, 24(1), 1. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Ashraf, U., Anjum, S. A., Naseer, S., Abbas, A., Abrar, M., Nawaz, M., & Luo, K. (2024). Gamma amino butyric acid (GABA) application modulated the morpho-physiological and yield traits of fragrant rice under well-watered and drought conditions. *BMC Plant Biology*, 24(1), 569. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05272-5>
- Borzoo, S., Mohsenzadeh, S., & Kahrizi, D. (2021). Water-deficit stress and genotype variation induced alteration in seed characteristics of *Camelina sativa*. *Rhizosphere*, 20, 100427. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100427>
- Bukhari, M. A., Yousaf, M., Ahmad, Z., Rafay, M., Shah, A. N., Abbas, A., Shah, A. A., Javed, T., Afzal, M., & Ali, S. (2022). Enhancing drought stress tolerance in Camelina (*Camelina sativa* L.) through exogenous application of potassium. *Physiologia Plantarum*, 174(5), e13779. <https://doi.org/10.1111/ppl.13779>
- Chakraborty, R., Roy, T. S., & Sakagami, J.-I. (2025). Influence of γ -Aminobutyric Acid (GABA) Application on aromatic rice under shading and drought stress conditions: effects on crop yield, grain quality, and 2-acetyl-1-pyrroline biosynthesis. *Journal of Plant Growth Regulation*, 44(2), 1043-1051. <https://doi.org/10.1007/s00344-024-11513-6>
- Chance, B., & Machly, A. C. (1955). [136] Assay of catalases and peroxidases. 764-775. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(55\)02300-8](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(55)02300-8)
- Chen, F., Wang, Y., Liu, Y., Chen, Q., Liu, H., Tian, J., Wang, M., Ren, C., Zhao, Q., & Yang, F. (2025). Exogenous γ -aminobutyric acid (GABA) provides a carbon skeleton to promote the accumulation of sugar and unsaturated fatty acids in vegetable soybean seeds. *Environmental and Experimental Botany*, 229, 106052. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.106052>
- Dhindsa, R. S., Plumb-Dhindsa, P., & Thorpe, T. A. (1981). Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. *Journal of Experimental botany*, 32(1), 93-101. <https://doi.org/10.1093/jxb/32.1.93>
- Giusti, M., & Wrolstad, R. (2001). Anthocyanins. Characterization and measurement with UV-visible spectroscopy. *Current protocols in food analytical chemistry*, 1, 1-13. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0102s00>
- Haghaninia, M., Javanmard, A., Mahdavinia, G. R., Shah, A. A., & Farooq, M. (2023). Co-application of biofertilizer and stress-modulating nanoparticles modulates the physiological, biochemical, and yield responses of camelina (*Camelina sativa* L.) under limited water supply. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(4), 6681-6695. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01521-y>
- Haghaninia, M., Mashhour, S. M., Najafifar, A., Soleimani, F., & Wu, Q.-S. (2025). Combined effects of zinc oxide nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi on soybean yield, oil quality, and biochemical responses under drought stress. *Future Foods*, 100594. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100594>
- Khan, Z., Jan, R., Asif, S., Farooq, M., & Kim, K.-M. (2024). Exogenous GABA enhances copper stress resilience in rice plants via antioxidant defense mechanisms, gene regulation, mineral uptake, and copper homeostasis. *Antioxidants*, 13(6), 700. <https://doi.org/10.3390/antiox13060700>

- Mashhour, S. M., & Haghani, M. (2025). Sustainable enhancement of drought tolerance and oil traits in quinoa using mycorrhizal and seaweed biostimulants. *Plant Stress*, 101151. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.101151>
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant and cell physiology*, 22(5), 867-880. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>
- Nazim, M., Ali, M., Li, X., Anjum, S., Ahmad, F., Zulfiqar, 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. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100193>
- Omidinasab, D., Meskarbashe, M. and Rahnama Ghahfarokhi, A. (2023). Effect of Deficit Irrigation on Grain Yield and Quality Characteristics of Oil content of Sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(3), 97-108. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2023.353827.654972> (In Persian)
- Ostadi, A., Javanmard, A., Amani Machiani, M., Sadeghpour, A., Maggi, F., Nouraein, M., ... & Lorenzo, J. M. (2022). Co-application of TiO₂ nanoparticles and arbuscular mycorrhizal fungi improves essential oil quantity and quality of sage (*Salvia officinalis* L.) in drought stress conditions. *Plants*, 11(13), 1659. <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/13/1659>
- Qian, Z., Lu, L., Zihan, W., Qian, Y., Chungang, Z., Shuheng, Z., Jiali, P., Jiaxin, Y., Shuang, Z., & Jian, W. (2024). Gamma-aminobutyric acid (GABA) improves salinity stress tolerance in soybean seedlings by modulating their mineral nutrition, osmolyte contents, and ascorbate-glutathione cycle. *BMC Plant Biology*, 24(1), 365. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05023-6>
- Rad, A. H. S., Malmir, M., & Eyni-Nargeseh, H. (2024). Potassium Silicate positively affects oil content, physiologic, and agronomic traits of *Camelina sativa* L. Under optimal water supply and drought stress conditions. *Silicon*, 16(3), 1071-1082. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02741-8>
- Rastegar, S., & Sayyad-Amin, P. (2025). GABA and oxidative stress and the regulation of antioxidants. GABA in Plants: Biosynthesis, Plant Development, and Food Security, 225-241. <https://doi.org/10.1002/9781394217786.ch13>
- Rezaei-Chiyaneh, E., Seyyedi, S. M., Ebrahimian, E., Moghaddam, S. S., & Damalas, C. A. (2018). Exogenous application of gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates the effect of water deficit stress in black cumin (*Nigella sativa* L.). *Industrial Crops and Products*, 112, 741-748. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.067>
- Sanekhoori, F. H., Pirdashti, H., & Bakhshandeh, E. (2021). Quantifying water stress and temperature effects on camelina (*Camelina sativa* L.) seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 186, 104450. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104450>
- Shala, A. Y., Aboukamar, A. N., & Gururani, M. A. (2024). Exogenous Application of gamma aminobutyric acid improves the morpho-physiological and biochemical attributes in *Lavandula dentata* L. under salinity stress. *Horticulturae*, 10(4), 410. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10040410>
- Terada, M., Watanabe, Y., Kunitomo, M., & Hayashi, E. (1978). Differential rapid analysis of ascorbic acid and ascorbic acid 2-sulfate by dinitrophenylhydrazine method. *Analytical Biochemistry*, 84(2), 604-608. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(78\)90083-0](https://doi.org/10.1016/0003-2697(78)90083-0)
- Ullah, A., Tariq, A., Zeng, F., Noor, J., Sardans, J., Asghar, M. A., Zhang, Z., & Peñuelas, J. (2023). Application of GABA (γ-aminobutyric acid) to improve saline stress tolerance of chufa (*Cyperus esculentus* L. var. sativus Boeck) plants by regulating their antioxidant potential and nitrogen assimilation. *South African Journal of Botany*, 157, 540-552. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.04.027>
- Yuan, D., Wu, X., Gong, B., Huo, R., Zhao, L., Li, J., Lü, G., & Gao, H. (2023). GABA metabolism, transport and their roles and mechanisms in the regulation of abiotic stress (hypoxia, salt, drought) resistance in plants. *Metabolites*, 13(3), 347. <https://doi.org/10.3390/metabo13030347>
- Zhao, Q., Ma, Y., Huang, X., Song, L., Li, N., Qiao, M., Li, T., Hai, D., & Cheng, Y. (2023). GABA application enhances drought stress tolerance in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.). *Plants*, 12(13), 249. <https://doi.org/10.3390/plants12132495>

Effect of Exogenous Foliar Application of Gamma-Aminobutyric Acid on Growth, Enzymatic Activity, and Yield of Camelina in Response to Drought Stress

Abstract

Introduction: Drought stress is a critical abiotic factor limiting crop productivity, particularly in arid and semi-arid regions. Gamma-aminobutyric acid (GABA), a non-proteinogenic amino acid, plays a pivotal role in modulating stress responses by enhancing osmoprotection, regulating stomatal conductance, and mitigating oxidative damage. Despite its known protective functions, the potential of exogenous GABA application in improving drought tolerance in camelina (*Camelina sativa*), an emerging oilseed crop with promising agronomic attributes, remains insufficiently explored. This study aimed to elucidate the physiological and biochemical responses of camelina to foliar-applied GABA under varying drought stress conditions, with a focus on its effects on growth, photosynthetic pigments, antioxidant enzyme activities, and yield components.

Materials and Methods: A field experiment was conducted during the 2023–2024 growing season at the research farm of the Faculty of Agriculture, University of Maragheh, East Azerbaijan province, Iran. The study employed a split-plot experimental design based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The main factor comprised three irrigation regimes based on soil moisture depletion levels (25%, 50%, and 75% of maximum allowable depletion), while the sub-factor included five concentrations of foliar-applied GABA (0, 0.5, 1, 2, and 4 mM). Morphophysiological traits (plant height, biomass accumulation, chlorophyll content), biochemical responses (antioxidant enzyme activities, hydrogen peroxide accumulation), and agronomic characteristics (seed yield, oil content, and oil yield) were evaluated. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA) using SAS software, and mean comparisons were performed using the LSD test at a significance level of $P < 0.01$.

Results: The findings revealed that drought stress significantly reduced camelina growth, photosynthetic pigment content, and yield attributes. However, foliar application of GABA substantially alleviated the adverse effects of water deficit by enhancing physiological and biochemical responses. The highest plant height (62.2% greater than severe drought without GABA) was observed under optimal irrigation with 4 mM GABA. Similarly, seed yield and oil yield reached their maximum in the same treatment, exhibiting respective increases of 120.87% and 241.4% compared to the severe drought control. Drought stress markedly reduced chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoid contents, but exogenous GABA application significantly improved amount of these pigments. Under non-stressed conditions, foliar-applied GABA at 4 mM enhanced chlorophyll a, chlorophyll b, and carotenoid contents by 137.1%, 131.6%, and 76.4%, respectively, compared to severe drought without GABA. Additionally, GABA application activated key antioxidant enzymes, including ascorbate peroxidase (260.4% increase), peroxidase (190.8% increase), and superoxide dismutase (201.1% increase) under moderate drought stress at 4 mM GABA. Concomitantly, hydrogen peroxide accumulation was reduced by 76.4%, indicating lower oxidative stress levels. These results suggest that GABA-mediated drought tolerance is primarily associated with enhanced antioxidant defense mechanisms and improved photosynthetic efficiency, contributing to higher productivity under water-limited conditions.

Conclusion: This study provides compelling evidence for the efficacy of foliar-applied GABA in mitigating drought-induced damage in camelina. The application of 4 mM GABA proved most effective in enhancing physiological and biochemical responses, leading to substantial improvements in seed yield and oil productivity under drought stress. Given its role in modulating stress tolerance, GABA can be integrated into sustainable agronomic practices to enhance crop resilience in water-limited environments. Future research should explore the molecular mechanisms underlying GABA-mediated drought tolerance and assess its practical applicability across diverse agroecological conditions.

Keywords: Foliar application, GABA, Hormone, Oil content, Oxidative stress