



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

Mohammad Haghaninia¹ | Ali Najafifar² | Freidoon Soleimani³ |
Abbas Soleimanifard⁴ | Abdollah Javanmard⁵

1. Corresponding Author, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ilam Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran. Email: m.haghaninia@areeo.ac.ir
2. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ilam Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran. Email: alinajafifar@yahoo.com
3. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ilam Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran. Email: fersolaimani@gmail.com
4. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center of Ilam Province, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran. Email: soleymani877@gmail.com
5. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, East Azarbaijan, Iran. Email: javansohaib@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: August 12, 2025

Revised: December 10, 2025

Accepted: December 11, 2025

Keywords:

Foliar application,
GABA,
hormone,
oil content,
oxidative stress

Extended 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 Azarbaijan province, Iran. The study was 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 and Discussion. 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 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 the 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.

Cite this article: Haghaninia, M., Najafifar, A., Soleimani, F., Soleimanifard, A., & Javanmard, A. (2026). Effect of exogenous foliar application of gamma-aminobutyric acid on growth, enzymatic activity, and yield of camelina in response to drought stress. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 57(1), 139-152. DOI: [10.22059/ijfcs.2025.400419.655153](https://doi.org/10.22059/ijfcs.2025.400419.655153).





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: m.haghaninia@areeo.ac.ir
۲. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ایلام، ایران. رایانامه: alinajaffar@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

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۰</p>	<p>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 (<i>Camelina sativa</i>) 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، ۵، ۱، ۲، 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 چهار 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 چهار 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 <i>a</i>، <i>b</i> 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، به طوری که بیشترین فعالیت آنزیم های آسکوربات پراکسیداز، پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در تیمار تنش متوسط و چهار 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 چهار 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.</p>
<p>کلیدواژه ها:</p> <p>تنش اکسیداتیو، گابا، محتوای روغن، محلول پاشی، هورمون.</p>	

استناد: حقانی نیا، م.، نجفی فر، ع.، سلیمانی، ف.، سلیمانی فرد، ع.، و جوانمرد، ع. (۱۴۰۴). تأثیر محلول پاشی برون زاد گاما-آمینوبوتیریک اسید بر رشد، فعالیت آنزیمی و عملکرد کاملینا در پاسخ به تنش خشکی. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۷(۱)، ۱۳۹-۱۵۲. DOI: 10.22059/ijfcs.2025.400419.655153



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 & Haghaninia, 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 روبرو هستند، کاملینا می‌تواند جایگزین مناسبی برای دانه‌های روغنی پرنیاز مانند کلزا و سویا باشد (Haghaninia 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 می‌شود (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 شوند (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 روزنه‌ها 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 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 (Haghaninia et al., 2025).

افزایش وابستگی به کودهای شیمیایی موجب بروز مشکلات زیست‌محیطی و کاهش پایداری تولیدات کشاورزی شده است؛ از این رو، شناسایی و توسعه 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^۱ (گابا) به عنوان یک پیام رسان مولکولی با دوام طولانی و یک تنظیم کننده رشد درون زاء، برای گیاهان در حال بررسی است (Abdel Razik et al., 2021; Qian et al., 2024).

گابا یک اسید آمینه غیر پروتئینی و مولکول سیگنال دهنده مهم در گیاهان است که در تنظیم پاسخ های فیزیولوژیکی به تنش های محیطی، به ویژه تنش خشکی، نقش موثری دارد (Al-Quraan et al., 2021). تحت تنش خشکی، مسیر متابولیکی گابا فعال شده و موجب افزایش تجمع این ترکیب در سلول های گیاهی می شود که به تنظیم اسمزی، تعادل یونی و کاهش اثرات تنش اکسیداتیو کمک می کند (Yuan et al., 2023). گابا از طریق تنظیم باز و بسته شدن روزنه ها، افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی، کاهش گونه های فعال اکسیژن (ROS) و تثبیت ساختار غشاهای، موجب افزایش تحمل گیاهان به خشکی می شود (Zhao et al., 2023). مطالعات نشان داده اند که کاربرد گابا می تواند اثرات منفی خشکی را کاهش داده، رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشد و به عنوان یک راهکار مؤثر در برنامه های مدیریتی برای مقابله با تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد (Qian et al., 2024). همچنین، در مطالعه ای دیگر گزارش شد که کاربرد گابا در گیاه سیاه دانه (*Nigella sativa*) با کاهش تولید ROS و افزایش فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی، 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 ویژگی های بیوشیمیایی و عملکردی گیاه کاملینا تحت تنش خشکی پرداخته که می تواند در ارتقاء کشاورزی پایدار، کاهش فشارهای تهدید کننده امنیت غذایی و بهبود تولید روغن گیاهی در شرایط تغییرات اقلیمی ایران مؤثر باشد.

۲. روش شناسی 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 شد. قبل از اجرای آزمایش سه نمونه خاک به طور تصادفی از قسمت های مختلف اجرای آزمایش انتخاب و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن اندازه گیری شد. داده های تکمیلی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش (عمق صفر تا ۳۰ سانتی متر) قبل از کاشت کاملینا.

Table 1. Physicochemical properties of soil at the experimental site (0-30 cm depth) prior to *Camelina sativa* (L.) sowing.

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 کرت های خرد شده بر پایه طرح بلوک های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اصلی رژیم های 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 محلول پاشی گاما آمینوبوتیریک اسید (گابا) در پنج غلظت ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلی مولار بود.

۲-۳. آماده سازی زمین و کاشت

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، کرت هایی شامل هشت ردیف کشت ایجاد شد. لازم به ذکر است که فواصل بین خطوط کشت و روی خطوط کشت به ترتیب

1. Gamma-Aminobutyric Acid (GABA)

2. Maximum Allowable Depletion (MAD)

۱۵ و پنج سانتی متر در نظر گرفته شد (Aminbaigi et al., 2023). بذر کاملینا رقم سهیل از شرکت بیستون شفا کرمانشاه تهیه شد. بذرها در پانزدهم آبان ماه به صورت دستی در عمق یک سانتی متری خاک کشت شدند. به منظور جلوگیری از تداخل تیمارها فاصله هر کرت با کرت مجاور ۵۰ سانتی متر و فاصله بین بلوکها دو متر در نظر گرفته شد. در طول این پژوهش از هیچگونه مواد شیمیایی از قبیل علف کش، آفت کش و ... استفاده نشد و مبارزه با علفهای هرز به صورت منظم و به طور دستی انجام شد.

۲-۴. اعمال تیمارها

۲-۴-۱. رژیم های آبیاری

تیمارهای آبیاری با استفاده از سامانه آبیاری قطره ای اجرا شدند. برای ایجاد سطوح مختلف تنش خشکی، از دستگاه رطوبت سنج جهت پایش رطوبت خاک استفاده شد و رژیم های آبیاری بر اساس حداکثر درصد تخلیه مجاز آب در دسترس (MAD) در سه سطح ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد اعمال شدند، به طوری که به ترتیب 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 ، I_d و I_g به ترتیب ظرفیت زراعی خاک (۲۷/۱ درصد)، نقطه پژمردگی دائم (۱۳/۷ درصد)، عمق خاک (۲۰ سانتی متر)، درصد تنش اعمال شده (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد)، عمق خالص آبیاری (سانتی متر)، کارایی آبیاری (۶۵ درصد در نظر گرفته شده است) و عمق ناخالص آبیاری (سانتی متر) در تنش های مختلف بودند.

۲-۴-۲. محلول پاشی گابا

برای اعمال گابا (Sigma-Aldrich, USA) محلول های مورد نیاز برای غلظت های ۰، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلی مولار در آب مقطر تهیه و با همزن مغناطیسی کاملاً مخلوط شدند تا محلولی یکنواخت حاصل شود. برای بهبود پوشش برگها، ۰/۵٪ (v/v) ماده مرطوب کننده (Tween 20) به محلول اضافه شد. محلول پاشی در اوایل صبح و در شرایط بدون باد و باران انجام شد تا از تبخیر سریع و شسته شدن محلول جلوگیری شود. محلول پاشی 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 غلظت های مورد استفاده بر اساس مقادیر گزارش شده در مطالعات پیشین انتخاب شد (Abd El-Gawad et al., 2021).

۲-۵. نمونه برداری و صفات اندازه گیری شده

نمونه برداری برای اندازه گیری صفات فیزیولوژیک در مرحله گل دهی گیاه انجام شد. برگ های سالم، کاملاً توسعه یافته و هم سن از بخش میانی هر بوته، هفت روز پس از اعمال آخرین تیمار برداشت شدند. نمونه ها بلافاصله پس از برداشت در ظروف خنک و تاریک قرار گرفته و به آزمایشگاه منتقل شدند. پس از شست و شوی ملایم و خشک کردن سطحی، برگها در فویل آلومینیومی پیچیده شده و به منظور حفظ ویژگی های فیزیولوژیک و جلوگیری از تخریب ترکیبات حساس، تا زمان انجام آزمایشها در دمای منفی ۲۰ درجه سانتی گراد فریز شدند (Haghaninia et al., 2025).

۲-۵-۱. رنگیزه های فتوسنتزی

مقدار کلروفیل و کاروتنوئید موجود در برگ های کاملینا با استفاده از روش آرنون اندازه گیری شد (Arnon, 1949). جذب نمونه ها در طول موج های 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 میلی‌لیتر متانول اسیدی استخراج و سپس به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد سانتریفیوژ شد. جذب نوری نمونه‌ها در دو طول موج ۵۲۰ و ۷۰۰ نانومتر با استفاده از اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد (Giusti et al., 2001). همچنین، برای تعیین محتوای اسیدآسکوربیک، از روش رنگ‌سنجی ۲/۶-دی‌کلروفنول‌ایندوفنول استفاده شد (Terada et al., 1978). بدین منظور ۰/۵ گرم از برگ‌های تازه در ۱۰ میلی‌لیتر متافسفریک اسید سه درصد استخراج شد. پس از سانتریفیوژ، یک میلی‌لیتر از عصاره با نه میلی‌لیتر معرف ۲/۶-دی‌کلروفنول‌ایندوفنول مخلوط شد و کاهش رنگ محلول (تغییر از آبی به بی‌رنگ) در طول موج ۵۲۰ نانومتر اندازه‌گیری شد.

۲-۵-۳. اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان

فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز (APX) با استفاده از روش زیر اندازه‌گیری شد (Nakano et al., 1981). ۰/۵ گرم از برگ‌های تازه در ۱۰ میلی‌لیتر 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) به طور خلاصه، ۰/۵ گرم از برگ‌ها در ۱۰ میلی‌لیتر بافر پتاسیم فسفات همگن شد. سپس، عصاره آنزیمی به ترکیب حاوی نیتروبلوتترازولیوم (NBT) و ربیوفلاوین اضافه شد. 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 میلی‌مولار و ۴۹۰ میکرولیتر محلول گایاکول ۴۵ میلی‌مولار با هم مخلوط و به آن ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیمی اضافه شد. در نهایت، تغییرات جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر خوانده شد (Chance & Maehly, 1995).

۲-۵-۴. اندازه‌گیری پراکسید هیدروژن

غلظت پراکسید هیدروژن (H_2O_2) با استفاده از روش پتاسیم‌یدید (KI) اندازه‌گیری شد. به طور خلاصه، ۰/۵ گرم از بافت گیاهی در پنج میلی‌لیتر TCA ۰/۱ درصد هموزنیزه و سپس سانتریفیوژ شد. به ۰/۵ میلی‌لیتر از فاز بالایی، ۰/۵ میلی‌لیتر بافر فسفات پتاسیم (۵۰ میلی‌مولار pH=۷) و یک میلی‌لیتر KI یک مولار اضافه شد. جذب نمونه‌ها در ۳۹۰ نانومتر با اسپکتروفوتومتر خوانده شد (Alexieva et al., 2001).

۲-۵-۵. ارتفاع بوته و عملکرد دانه

برای هر تیمار، ارتفاع گیاه کاملینا از پنج 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 شد. همچنین، برداشت نهایی در بیستم اردیبهشت‌ماه و در مرحله رسیدگی کامل و زمانی که دانه‌ها به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز بودند انجام شد. بدین منظور ابتدا دو ردیف کناری و انتهایی کرت به عنوان اثر حاشیه‌ای حذف شده و سپس بوته‌های موجود از سطح یک متر مربع برداشت و پس از خرم‌ن کوبی 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، پنج گرم از نمونه بذری هر تیمار را با آسیاب به صورت کامل پودر کرده و به آن ۲۵ میلی‌لیتر پترولیوم‌تر 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 با کاغذ صافی فیلتر و جداسازی شد. لازم به ذکر است که به منظور استخراج کامل روغن مراحل ذکر شده دو الی سه بار تکرار شد.

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 انجام شد. همچنین، مقایسه میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

۳-۱. ارتفاع

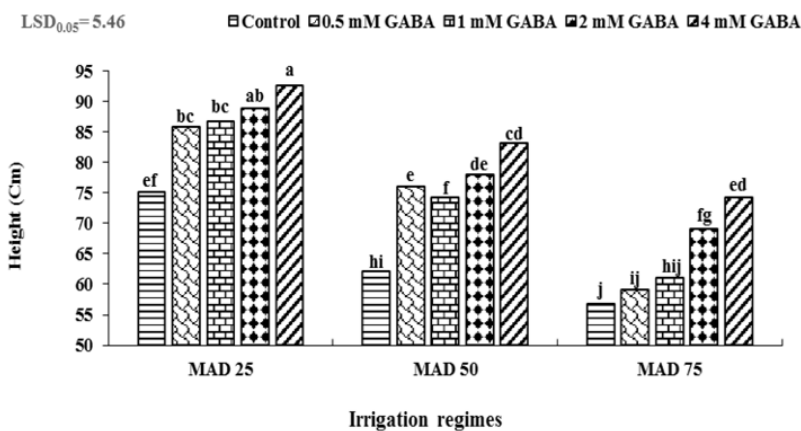
نتایج به دست آمده نشان داد که ارتفاع بوته کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری، محلول پاشی گابا و اثر متقابل هر دو عامل واقع شد (جدول ۲). بیشترین و کمترین ارتفاع به ترتیب در شرایط عدم تنش خشکی به همراه محلول پاشی با غلظت چهار میلی مولار گابا و تنش شدید خشکی بدون مصرف گابا به دست آمد (شکل ۱). همچنین، در شرایط عدم تنش خشکی محلول پاشی گابا با غلظت چهار میلی مولار 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 تورژانس 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 اسیدآسکوربیک در گیاه کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا.

Table 2. Analysis of variance (ANOVA) for *Camelina sativa* (L.) height, seed yield, oil content, oil yield, Chl a, Chl b, CARs, anthocyanins, and ascorbic acid as affected by different irrigation levels and GABA application.

Source of Variation	df	Mean squares								
		Height	Seed yield	Oil content	Oil yield	Chl a	Chl b	CARs	Anthocyanin	Ascorbic acid
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

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



شکل ۱. ارتفاع گیاه کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا.

حروف متمایز نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

Figure 1. Height of *Camelina sativa* (L.) under different irrigation levels and GABA application. Distinct letters indicate significant differences at the 5% level.

۳-۲. عملکرد دانه

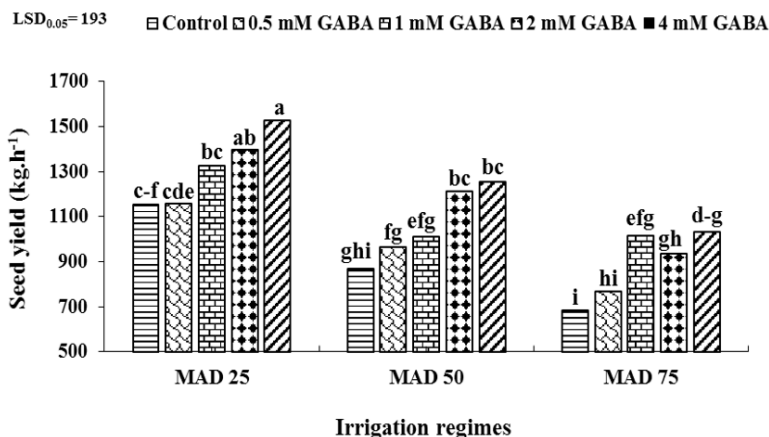
براساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) عملکرد دانه کاملینا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری، محلول پاشی گابا و اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری و محلول پاشی گابا قرار گرفت. حداکثر عملکرد دانه کاملینا با محلول پاشی چهار میلی مولار گابا در شرایط بدون تنش ثبت شد و کمترین مقدار هم به تنش شدید بدون مصرف گابا مربوط بود (شکل ۲). همچنین، محلول پاشی گابا با غلظت چهار میلی مولار در مقایسه با تنش شدید بدون کاربرد گابا عملکرد دانه کاملینا را ۱۲۰/۸۷ درصد افزایش داد (شکل ۲). به نظر 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 شود (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).

۳-۳. درصد و عملکرد روغن

نتایج نشان داد اثر سطوح مختلف آبیاری، محلول پاشی گابا و اثرات متقابل سطوح مختلف آبیاری \times 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 چهار میلی مولار گابا به دست آمد؛ در حالی که کمترین میزان در تیمار تنش شدید بدون کاربرد گابا مشاهده شد (شکل ۳). علاوه بر این، محلول پاشی با غلظت چهار 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 آنزیم های 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 آنزیم های کلیدی در سنتز اسیدهای چرب منجر شود بلکه با کاهش درصد روغن و عملکرد دانه، موجب کاهش عملکرد روغن هم می شود، هم راستا است (Abdou et al., 2023; Mashhoury & 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 آنزیم های کلیدی در مسیر بیوسنتز اسیدهای چرب مانند اسید چرب سنتتاز و دی استتاریل گلیسرول آسیل ترانسفراز، موجب افزایش میزان روغن در دانه ها می شود (Qian et al., 2024).

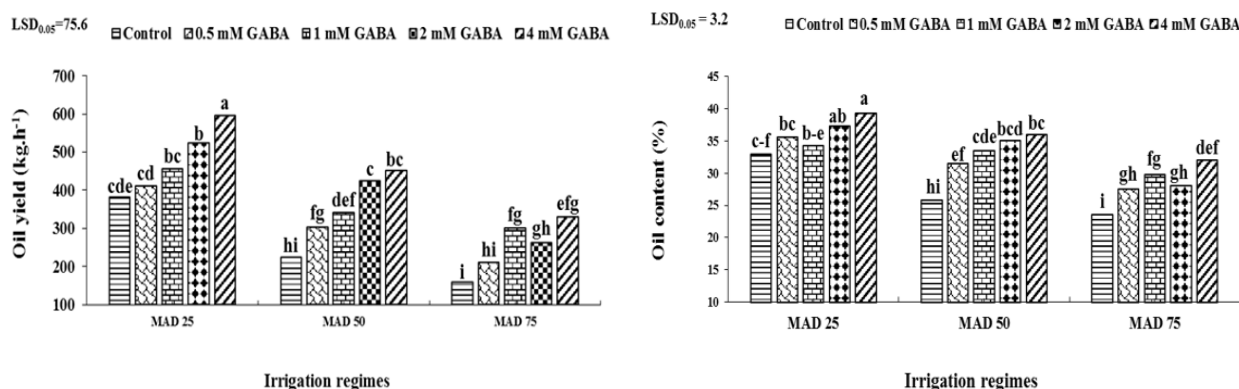
۳-۴. رنگیزه های فتوسنتزی

نتایج به دست آمده نشان داد محتوای کلروفیل a ، b و کارتنوئید کاملینا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری، محلول پاشی گابا و اثر متقابل سطوح آبیاری و گابا واقع شد (جدول ۲). بیشترین محتوای کلروفیل a ، b و کارتنوئید در شرایط عدم تنش و با مصرف چهار میلی مولار گابا حاصل شد و کمترین مقادیر نیز در تیمار تنش شدید بدون محلول پاشی مشاهده شد (جدول ۳). همچنین، محلول پاشی چهار میلی مولار گابا محتوای کلروفیل a ، 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 سلول ها و اختلال در عملکرد سیستم های انتقال آب و مواد مغذی می شود (Yuan et al., 2023). این امر باعث کاهش فعالیت های فتوسنتزی و کاهش سطح کلروفیل ها می شود (Al-Quraan et al., 2021; Rad et al., 2024).



شکل ۲. عملکرد دانه کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا. حروف متمایز نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

Figure 2. Seed yield of *Camelina sativa* (L.) under different irrigation levels and GABA application. Distinct letters indicate significant differences at the 5% level.



شکل ۳. درصد روغن (تصویر سمت راست) و عملکرد روغن (تصویر سمت چپ) کاملینا تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا. حروف متمایز نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

Figure 3. Oil content (right) and oil yield (left) of *Camelina sativa* (L.) under different irrigation levels and GABA application. Distinct letters indicate significant differences at the 5% level.

از سوی دیگر، تحقیقات نشان می‌دهند که تحت شرایط شدید خشکی، کارتنوئیدها نمی‌توانند به‌اندازه کافی از گیاه محافظت کنند و در نهایت کاهش می‌یابند، زیرا گیاه به‌دلیل کاهش منابع انرژی و متابولیک قادر به سنتز آن‌ها به مقدار کافی نخواهد بود (Haghaninia *et al.*, 2023). در این شرایط، گابا می‌تواند به‌عنوان یک مکانیسم دفاعی در برابر اکسیداتیو و استرس‌های محیطی باشد، چرا که گابا باعث فعال‌سازی سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی 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).

۳-۵. آنتوسیانین و آسکوربیک اسید

نتایج حاصل از تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر سطوح مختلف تنش خشکی، محلول پاشی 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 محلول پاشی گابا با غلظت چهار میلی‌مولار حاصل شد و کمترین محتوای این صفات هم به شاهد تعلق داشت (جدول ۳). همچنین، محلول پاشی گابا با غلظت چهار میلی‌مولار تحت تنش متوسط در مقایسه با شاهد محتوای آنتوسیانین و آسکوربیک اسید را ۱۷۵/۷

و ۷۷/۹ درصد افزایش داد (جدول ۳). اسیدآسکوربیک 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 اسیدآسکوربیک 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 اسیدآسکوربیک 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 اسیدآسکوربیک 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 آسکوربات‌پراکسیداز، پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز معنی‌دار بود (جدول ۴). حداکثر فعالیت آنزیم‌های آسکوربات-پراکسیداز، پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز در تنش متوسط و با محلول‌پاشی گابا با غلظت چهار میلی‌مولار به‌دست آمد و کمترین میزان هم در شاهد ثبت شد (جدول ۵). نتایج نشان داد در شرایط تنش متوسط و با محلول‌پاشی گابا با غلظت چهار میلی‌مولار فعالیت آنزیم‌های آسکوربات‌پراکسیداز، پراکسیداز و سوپراکسیددیسموتاز به‌ترتیب 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 غشاهای پروتئین‌ها و DNA را تخریب کنند (Bukhari et al., 2022). گیاهان به‌منظور مقابله با این آسیب‌ها، سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی خود را فعال می‌کنند.

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

Table 3. Chlorophyll *a* (Chl *a*), chlorophyll *b* (Chl *b*), carotenoids (CARs), anthocyanins, and ascorbic acid in *Camelina sativa* (L.) under different irrigation levels and GABA application.

Treatments		Chl <i>a</i> (mg g ⁻¹)	Chl <i>b</i> (mg g ⁻¹)	CARs (mg g ⁻¹)	Anthocyanin (nmol g ⁻¹)	Ascorbic acid (nmol g ⁻¹)
Irrigation regimens	GABA application					
MAD ₂₅	0 mM (Control)	19.77 ^{de}	15.21 ^{de}	12.12 ^l	0.388 ^j	233.94 ^j
	0.5 mM	24.33 ^{bc}	17.97 ^{bc}	13.24 ^{kl}	0.469 ^{ij}	262.47 ⁱ
	1 mM	25.96 ^{ab}	18.49 ^b	13.96 ^{jk}	0.414 ⁱ	272.13 ^{hi}
	2 mM	24.71 ^b	19.08 ^{ab}	13.67 ^{kl}	0.439 ^{ij}	252.01 ^{ij}
	4 mM	27.42 ^a	20.24 ^a	15.33 ^{hij}	0.518 ^{hi}	284.49 ^h
MAD ₅₀	0 mM (Control)	15.89 ^g	12.11 ^{fg}	14.54 ^{ijk}	0.756 ^{de}	355.11 ^{de}
	0.5 mM	19.47 ^{def}	14.71 ^e	16.73 ^{fg}	0.867 ^c	371.52 ^{cd}
	1 mM	18.39 ^{ef}	15.94 ^{cde}	15.78 ^{ghi}	0.903 ^{bc}	385.72 ^{bc}
	2 mM	20.87 ^d	14.98 ^e	17.18 ^{ef}	0.969 ^b	379.48 ^{bc}
	4 mM	22.87 ^c	17.31 ^{bcd}	18.24 ^{de}	1.07 ^a	416.34 ^a
MAD ₇₅	0 mM (Control)	11.61 ⁱ	8.50 ⁱ	16.09 ^{fgh}	0.613 ^{gh}	315.71 ^g
	0.5 mM	13.26 ^{hi}	9.67 ^{hi}	20.51 ^{ab}	0.656 ^{fg}	331.38 ^{fg}
	1 mM	14.23 ^{gh}	10.56 ^{gh}	19.88 ^{bc}	0.693 ^{efg}	342.61 ^{ef}
	2 mM	14.94 ^{gh}	11.45 ^{gh}	19.12 ^{cd}	0.714 ^{ef}	326.12 ^{fg}
	4 mM	17.96 ^f	13.90 ^{ef}	21.38 ^a	0.816 ^{cd}	393.53 ^b
LSD 0.05		1.79	2.13	1.38	0.09	20.28

حروف متمایز نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار در سطح پنج درصد است.

محققان مشاهده کردند در شرایط خشکی فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در کاملینا افزایش یافته که سعی در حفظ تعادل ردکس و کاهش آسیب‌های ناشی از گونه‌های واکنشی اکسیژن دارند (Nazim et al., 2018). علاوه‌براین، گابا به‌عنوان یک

تنظیم کننده گیاهی، اثرات مثبتی بر سیستم آنتی اکسیدانی گیاهان در شرایط استرس زا به ویژه خشکی دارد (Zhao et al., 2023). گابا با فعال سازی مسیرهای سیگنال دهی گیاهی، می تواند تولید آنزیم های آنتی اکسیدانی را در گیاهان تحت تنش خشکی تحریک کند (Shala et al., 2024). این افزایش فعالیت آنزیم ها به کاهش استرس اکسیداتیو و بهبود تعادل رد اکس در سلول های گیاهی کمک می کند (Yuan et al., 2023). پژوهش ها نشان داده اند که گابا ممکن است با تنظیم متابولیسم آنتی اکسیدانی، به ویژه در مسیرهایی که شامل آسکوربات و گلوتاتیون هستند، موجب تقویت پاسخ های دفاعی گیاهان و بهبود تحمل به خشکی شود (Chen et al., 2025; Ullah et al., 2023).

جدول ۴. تجزیه واریانس فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی (آسکوربات پراکسیداز (APX)، پراکسیداز (POX)، سوپراکسیددیسموتاز (SOD)) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) در گیاه کاملینا تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا.

Table 4. Analysis of variance (ANOVA) for *Camelina sativa* (L.) ascorbate peroxidase (APX), peroxidase (POX), superoxide dismutase (SOD), and hydrogen peroxide (H_2O_2) levels under the influence of irrigation levels and GABA application.

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

*، ** و *** به ترتیب عدم تفاوت معنی دار، معنی داری در سطح احتمال پنج و یک درصد.

جدول ۵. تأثیر سطوح مختلف آبیاری و کاربرد گابا بر فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی (آسکوربات پراکسیداز (APX)، پراکسیداز (POX)، سوپراکسیددیسموتاز (SOD)) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) گیاه کاملینا.

Table 5. Antioxidant enzyme activity levels of ascorbate peroxidase (APX), peroxidase (POX), superoxide dismutase (SOD), and hydrogen peroxide (H_2O_2) in *Camelina sativa* (L.) subjected to different irrigation levels and GABA application.

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

حروف متمایز نشان دهنده اختلاف معنی دار در سطح پنج درصد است.

۳-۷. پراکسید هیدروژن

اثر سطوح مختلف آبیاری، محلول پاشی گابا و اثر متقابل سطوح مختلف آبیاری × 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 به دست 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 چهار 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 سلول‌های گیاهی بهم می‌خورد و باعث افزایش سطح H_2O_2 می‌شود (Bukhari et al., 2022). این افزایش در سطح پراکسید هیدروژن منجر به آسیب به غشای سلولی، پروتئین‌ها و DNA شده و بر کارایی آنزیم‌ها و فرآیندهای متابولیک تأثیر منفی می‌گذارد (Ashraf et al., 2024). با این وجود، گابا به‌عنوان یک تنظیم‌کننده گیاهی و همچنین یک ترکیب دفاعی طبیعی با افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانتی نقش مهمی در کاهش سطح پراکسید هیدروژن ایفا می‌کند (Abdou et al., 2023; Chen et al., 2025). همسو با این نتایج، محققان نشان داده‌اند که گابا می‌تواند با بهبود پاسخ‌های آنتی‌اکسیدانی، میزان پراکسید هیدروژن را در گیاهان تحت تنش خشکی کاهش داده و از ایجاد آسیب‌های ناشی از استرس اکسیداتیو جلوگیری کند (Abdel Razik et al., 2021; Khan et al., 2024).

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که تنش خشکی تأثیرات منفی قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه کاملینا از جمله کاهش ارتفاع، عملکرد دانه، درصد روغن، فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش سطح کلروفیل و کاروتنوئیدها دارد. همچنین، پراکسید هیدروژن به‌عنوان 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 گل‌دهی، اثرات منفی تنش خشکی را تعدیل کرد که بیشترین اثر محافظتی با استفاده از غلظت چهار میلی‌مولار مشاهده شد. گابا با افزایش محتوای آنتوسیانین و آسیدآسکوربیک، به‌طور مؤثر استرس اکسیداتیو را کاهش داد و با تقویت سیستم‌های آنتی‌اکسیدانی، توانایی گیاه را در مقابله با تنش‌های محیطی بهبود بخشید. این افزایش در فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی منجر به کاهش پراکسید هیدروژن و تقویت مکانیسم‌های حفاظتی گیاه در برابر خشکی شد. علاوه بر این، استفاده از چهار میلی‌مولار گابا با افزایش سطح کلروفیل‌ها و کاروتنوئیدها، فرآیند فتوسنتز را بهبود بخشید و موجب افزایش عملکرد دانه، درصد روغن و عملکرد روغن شد. بنابراین، استفاده از گابا به‌عنوان یک استراتژی طبیعی و مؤثر می‌تواند در بهبود تاب‌آوری گیاهان در برابر تنش‌های محیطی، به‌ویژه در شرایط خشکی و تغییرات اقلیمی نقش مهمی در کشاورزی پایدار ایفا کند.

۵. سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از دانشگاه مراغه به‌خاطر فراهم‌آوری زیرساخت‌های پژوهشی این تحقیق صمیمانه قدردانی نمایند.

۶. منابع

- 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-Sreca, 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., & Sohidel 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., & 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., & Maehly, A.C. (1955). 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., & Haghaninia, 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., Zulfikar, U., Shahzad, K., & Soufan, W. (2023). Unraveling the synergistic effects of microbes and selenium in alleviating drought stress in *Camelina sativa* (L.). *Plant Stress*, 9, 100193. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100193>.
- Omidinasab, D., Meskarbasheh, M., & 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://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., Qianyue, B., 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>.