University of Birjand

Environmental Stresses in Crop Sciences

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9075.2356

Original article

Effect of gamma-aminobutyric acid (GABA) on some morpho-physiological traits of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) under salt stress

Razieh Biglari Farash[1*], Seyed Najmaddin Mortazavi[2]

1. *PhD student in Horticulture, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran*
2. *Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran*

Received 10 March 2025; Revised 23 June 2025; Accepted 29 June 2025

نسخه پیش از انتشار

Extended abstract

Introduction

Salinity stress is a major limiting factor for plant growth. Gamma-aminobutyric acid (GABA) is known as an important signaling molecule in response to environmental stresses. This study investigated the effect of exogenous GABA application on the morphophysiological and biochemical characteristics of rosemary plants under saline conditions.

Materials and methods

A factorial experiment was conducted using a completely randomized design (CRD) with three replications. The study investigated the effects of NaCl salinity (0, 50, 100, and 150 mM) and foliar-applied GABA (0, 20, 40, and 60 mM) on the morphophysiological traits of rosemary (Rosmarinus officinalis L.) during the summer of 2014 at the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, University of Zanjan. Fifteen-to-twenty cm tall rosemary seedlings, sourced from Zarrin Gyaa Urmia Company, were cultivated in size 3 pots containing equal proportions of perlite, cocopeat, and washed soil. Prior to treatment application, plants were acclimatized for two weeks with Hoagland nutrient solution. Greenhouse environmental conditions were set to a 16 h light/8 h dark cycle, with day/night temperatures of 25/20 °C. Salinity was applied gradually over several stages. Salinity stress was imposed by adding NaCl to the irrigation water, and the pots were irrigated every three days. Foliar spray solutions were prepared by dissolving the required amount of GABA in distilled water. The first foliar spray was applied immediately after the initiation of salinity stress, the second two weeks later, and a third application was performed thereafter, for a total of three applications. Twenty ml of solution was applied to each pot (Vojodi Mehrabani et al., 2016). The entire experiment lasted for 14 weeks. The dry weight of the aerial parts was measured after determining the fresh weight using a digital scale and the stem length with a ruler. Leaf proline content, leaf area, and leaf relative water content were measured. Data were analyzed using SAS software, and graphs were generated using Microsoft Excel. Duncan's multiple range test was used to compare means at the 5% probability level.

Results and discussion

Mean comparison results for shoot fresh weight (Table 2) indicated that the interaction between salinity and GABA was significant at the 1% level. The highest shoot fresh weight (25.130 g) was recorded under non-saline conditions with the application of 40 mM GABA. The lowest shoot dry weight (4.941 g) was related to the independent effect of 150 mM salinity treatment, whereas the highest shoot dry weight

* Corresponding author: Razieh Biglari Farash; E-Mail: razibiglari1365@gmail.com

© 2026, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

(7.745 g) was observed in the salinity control treatment with 20 mM GABA. The interaction effect of salinity stress and GABA treatment on stem length was significant at the 1% level. The highest stem length (25.934 cm) was recorded under non-saline (control) with 60 mM GABA. The interaction effect of salinity and GABA on rosemary leaf area was significant at the 1% level. The highest leaf area (4.5657 cm^2) was observed under non-saline (control) conditions with 60 mM GABA. In contrast, the lowest leaf area (2.1772 cm^2) was recorded in the absence of GABA under 150 mM salinity. The interaction effect of salinity stress and GABA on electrolyte leakage percentage was statistically significant at the 1% level. The highest electrolyte leakage (98.031%) was observed at 150 mM salinity with 60 mM GABA, whereas the lowest value (67.231%) was recorded under non-saline (control) conditions with 60 mM GABA. The main effect of salinity and GABA on leaf proline content was significant at the 1% level. Under salinity treatments, the highest proline content (0.0352 μmol g^{-1} leaf fresh weight) was observed at 100 mM salinity, whereas the lowest value (0.0142 μmol g^{-1} leaf fresh weight) was recorded in the control treatment. Similarly, among the GABA treatments, the highest proline content (0.0218 μmol g^{-1} leaf fresh weight) was recorded at 60 mM GABA

Conclusion

The present study demonstrated that salinity stress significantly affects the growth and physiological characteristics of the medicinal plant rosemary, resulting in reduced growth-related traits and increased stress-related indicators, such as electrolyte leakage and proline content. The application of GABA as a regulatory compound partially mitigated the detrimental effects of salinity. These results suggest that foliar application of GABA may represent an effective strategy to enhance rosemary tolerance to saline conditions and improve the performance of medicinal plants under environmental stresses.

Keywords: Environmental stress, Medicinal plant, Proline

نسخه پیش از انتشار

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences

https://doi.org/10.22077/escs.2026.9075.2356

مقاله پژوهشی

بررسی تأثیر گاما-آمینو بوتیریک اسید (گابا) بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیکی گیاه رزماری (*Rosmarinus Officinalis* L.) تحت تنش شوری

راضیه بیگلری فراش[1*]، سید نجم‌الدین مرتضوی[2]

۱. دانشجوی دکتری باغبانی، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
۲. دانشیار، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
تنش محیطی
گیاه دارویی
پرولین

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

چکیده

تنش شوری یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد و عملکرد گیاهان محسوب می‌شود. گاما آمینوبوتیریک اسید (گابا) به‌عنوان یک ترکیب زیستی مهم در پاسخ به تنش‌های محیطی شناخته شده و می‌تواند در بهبود تحمل گیاهان به شوری نقش مؤثری ایفا کند. در این پژوهش، تأثیر محلول‌پاشی گابا بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی رزماری تحت شرایط شوری بررسی شد. برای ارزیابی اثر گابا بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی رزماری تحت تنش شوری، آزمایشی در تابستان ۱۴۰۳ در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه زنجان به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور اجرا شد. فاکتور اول شامل غلظت‌های مختلف گابا (صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌مولار) و فاکتور دوم کلرید سدیم با سطوح (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار) بود که در ۳ تکرار مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، صفات مرفوفیزیولوژیکی نظیر طول ساقه، وزن تر و خشک اندام هوایی، سطح برگ، محتوای نسبی آب برگ، نشت الکترولیت و محتوای پرولین ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که تنش شوری تأثیر معنی‌داری بر اکثر صفات داشت و با افزایش شوری، طول ساقه، وزن تر و خشک اندام هوایی و سطح برگ به ترتیب به مقدار عددی ۱۸/۹۸۰سانتی‌متر، ۳۳۱ /۱۵ گرم، ۴/۷۰۰۲گرم، ۲/۵۹۷ سانتی‌متر کاهش یافت، اما نشت الکترولیت (۹۸/۰۳۱٪) و محتوای پرولین (۰/۳۴۷میکرو گرم بر گرم) به طور معنی‌داری افزایش پیدا کردند. همچنین، اثر مستقل گابا و اثر متقابل آن با شوری بر وزن خشک اندام هوایی و محتوای نسبی آب برگ معنی‌دار نبود. غلظت ۴۰ میلی‌مولار گابا بیشترین اثر مثبت را بر صفات اندازه‌گیری شده نشان داد. این یافته‌ها حاکی از آن است که کاربرد اسپری برگی گابا می‌تواند مقاومت گیاه رزماری را در برابر تنش شوری افزایش دهد.

مقدمه

رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.)، گیاهی چندساله از خانواده نعناعیان (Lamiaceae) و بومی منطقه مدیترانه است که به دلیل سازگاری بالا و ویژگی‌های متنوع، در بسیاری از نقاط جهان به طور گسترده کشت و استفاده می‌شود. این گیاه به دلیل تولید روغن‌های ضروری، عصاره‌های کاربردی، نقش به‌عنوان ادویه و همچنین تأثیرات بیولوژیکی منحصربه‌فردش شناخته شده است (Jordán et al., 2013). ترکیبات استخراج‌شده از رزماری دارای خواص دارویی فراوانی هستند (Lemos et al., 2015). ترکیبات شیمیایی مانند اسیدهای فنلی از جمله اسید رزماریک، اسید کافئیک و سالیسیلات، همچنین سایر ترکیبات طبیعی شامل فلاونوئیدها و اسیدهای فنلی، دی‌ترپن‌ها، تری‌ترپن‌ها، تانن‌ها، مواد تلخ، رزین، ساپونین، پروتئین، چربی، کربوهیدرات، فیبر، برخی املاح و ویتامین‌ها است (Salehi Sardoei and Khalili, 2020). این ویژگی‌ها، رزماری را به یک گیاه دارویی با کاربردهای گسترده در صنایع غذایی، دارویی و کشاورزی تبدیل کرده است. رزماری علاوه بر خواص دارویی و کاربردهای صنعتی، به دلیل ظاهر زیبا و برگ‌های معطر خود، در دسته گیاهان زینتی نیز قرار می‌گیرد و به‌عنوان یک پوشش گیاهی جذاب، در طراحی فضای سبز به کار گرفته

* نگارنده پاسخگو: راضیه بیگلری فراش. پست الکترونیک: razibiglari1365@gmail.com

می‌شود. انعطاف‌پذیری بالا، رشد آسان و مقاومت در برابر شرایط محیطی، آن را به یک انتخاب محبوب برای زیباسازی محیط‌های مختلف تبدیل کرده است.

شوری یکی از چالش‌های بزرگ زیست‌محیطی است که به طور قابل‌توجهی رشد و نمو گیاهان معطر و دارویی (AMPها) را محدود کرده و منجر به کاهش عملکرد و بهره‌وری آنها می‌شود. این محدودیت عمدتاً ناشی از تجمع بیش از حد یون‌های نمک در بافت‌های گیاهی است که تأثیرات منفی بر فرایندهای فیزیولوژیکی و هموستاز متابولیک سلولی دارد. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که عملکردهای اساسی محرک رشد و بقای گیاهان، نظیر جوانه‌زنی بذر، فتوسنتز و جذب آب و مواد معدنی در AMPهای مختلف تحت شرایط شوری به‌شدت کاهش می‌یابد. استرس شوری با افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) در سلول‌های گیاهی، منجر به آسیب اکسیداتیو به مولکول‌های حیاتی مانند پروتئین‌ها، لیپیدها و اسیدهای نوکلئیک می‌شود. تجمع بیش از حد ROS، فرایند پراکسیداسیون لیپیدی را تشدید کرده و باعث افزایش غلظت مالون‌دی‌آلدئید (MDA) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) می‌گردد. دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه، شامل فعال‌سازی آنزیم‌هایی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD)، نقشی حیاتی در کاهش آسیب‌های ناشی از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن ایفا می‌کند (Li et al., 2018).

خاک‌های شور عموماً به خاک‌هایی با هدایت الکتریکی (EC) برابر یا بالاتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر ($dS\ m^{-1}$) اطلاق می‌شود. خاک‌هایی که EC بالاتر از ۱۶ دسی‌زیمنس بر متر دارند، به‌عنوان خاک‌های به‌شدت شور طبقه‌بندی می‌شوند (USSL Staff, 1954). تأثیر شوری بر رشد گیاهان از طریق تأثیر بر ساختار فیزیکی خاک،کاهش پتانسیل اسمزی محلول خاک و اختلال در متابولیسم گیاه به دلیل غلظت یون‌های خاص که منجر به اختلال در متابولیسم گیاه، کمبود مواد معدنی ضروری و سمیت مواد مغذی می‌گردد عمل می¬کند (Khan, 2001).

باتوجه‌به اهمیت اقتصادی AMPها و نقش حیاتی آنها در سلامت جهانی، تلاش برای بهبود رشد و تولید این گیاهان، به‌ویژه در شرایط تنش شوری، به‌عنوان یک ضرورت مهم و چالش جهانی مطرح است. یکی از راهبردهای مؤثر و پایدار برای کاهش اثرات منفی شوری، اعمال ترکیبات اگزوژن است که به‌عنوان روش‌هایی سازگار با محیط‌زیست شناخته می‌شوند. استفاده از ترکیبات اگزوژن، به‌عنوان یک راهبرد مدیریت تنش، اثرات مفیدی بر بهبود جوانه‌زنی، تنظیم اسمزی، بهبود فعالیت‌های آنتی‌اکسیدانی و تقویت مکانیسم‌های دفاعی گیاهان نشان داده است. از جمله این مواد می‌توان به گاما-آمینوبوتیریک اسید (گابا) اشاره کرد. گابا در اغلب موجودات زنده به‌عنوان یک ترکیب کلیدی در پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی نظیر شوری، گرما، سرما، آفات و بیماری‌ها شناخته می‌شود (Koppitz et al., 2004). گابا یک اسیدآمینه غیرپروتئینی مهم است که در تنظیم فرایندهای متابولیکی گیاهان نقش دارد. این ترکیب توانایی تنظیم چرخه کربس از طریق مصرف نیتروژن و تنظیم pH سلولی را داراست و به‌عنوان یک متابولیت کلیدی در افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌های محیطی شناخته شده است (Verbruggen and Hermans, 2008). سیستم متابولیسم گابا در پاسخ به شرایط فیزیولوژیکی مختلف نظیر محافظت در برابر تنش اکسیداتیو و تنظیم فشار اسمزی فعال می‌شود (Song et al., 2010). در شرایط تنش، تولید گابا به طور چشمگیری افزایش می‌یابد و سطح سلولی این اسیدآمینه از نقش آن به‌عنوان یک آمینواسید دخیل در سنتز پروتئین فراتر می‌رود. برای مثال، مطالعات نشان داده‌اند که در پنبه تحت تنش آبی، سطح گابا افزایش می‌یابد (Dong et al., 2024). همچنین، تحقیقات نشان داده‌اند که کاربرد گابا می‌تواند به‌عنوان یک متابولیت مؤثر در پاسخ به تنش‌های زیستی و غیرزیستی عمل کند (Fait et al., 2007). مطالعات نشان داده‌اند که در گیاهان تحت تنش شوری، تجمع چندین نوع اسیدآمینه از جمله پرولین و گابا به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. این اسیدهای آمینه به‌عنوان اسمولیت عمل کرده و در تنظیم پتانسیل اسمزی نقش دارند (Wang et al., 2019). اخیراً نقش گابا به‌عنوان یک پیام‌رسان مولکولی با دوام طولانی و یک تنظیم‌کننده رشد درون‌زا برای گیاهان مورد توجهه قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از گابا به‌صورت محلول‌پاشی در گیاهانی نظیر کینوا (*Chenopodium quinoa*)، منجر به تشدید متابولیسم گونه‌های فعال اکسیژن، حفظ پایداری غشای سلولی و در نتیجه افزایش تحمل این گیاه به شوری شده است (Kiani-Pouya et al., 2017). علاوه بر این، برخی گزارش‌ها تأیید می‌کنند که استفاده خارجی از گابا سبب خروج کلرید سدیم و افزایش جذب پتاسیم از ریشه‌های گیاهانی نظیر جو و کینوا می‌شود (Rezzouk, 2020). همچنین، مطالعات انجام‌شده

بر روی گندم نشان داده‌اند که محلول‌پاشی گابا می‌تواند تحمل این گیاه به تنش شوری را به طور مؤثری افزایش دهد (Wang et al., 2019). این یافته‌ها نشان می‌دهند که گابا نه‌تنها به‌عنوان یک ترکیب محافظتی در برابر تنش شوری عمل می‌کند، بلکه می‌تواند نقش تنظیمی در بهبود متابولیسم و حفظ تعادل یونی گیاه داشته باشد. هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی نقش ضد تنشی گابا در مقابله با اثرات مضر شوری خاک بر گیاه دارویی رزماری است. این مطالعه بر برخی صفات رشدی و فیزیولوژیکی گیاه تمرکز دارد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌منظور بررسی اثر تنش شوری ناشی از کلرید سدیم با سطوح صفر، ۵۰، ۱۰۰، و ۱۵۰ میلی‌مولار و محلول‌پاشی با گابا با غلظت های صفر، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی-مولار بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی گیاه رزماری، در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کامل تصادفی با سه تکرار در تابستان سال ۱۴۰۳در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان انجام شد. نشاهای ۱۵-۲۰ سانتی‌متری رزماری از شرکت زرین گیاه ارومیه تهیه و در گلدان‌های سایز ۳ حاوی پرلیت، کوکوپیت و خاک شسته شده به نسبت مساوی کشت شدند. شوری خاک قبل از کشت با دستگاه EC متر چک و در محدوده ۱ dS/m - ۰/۵ تنظیم شد. به مدت دو هفته قبل از اعمال تیمارها، گیاهان برای سازگاری با محیط گلخانه‌ای با محلول غذایی هوگلند حاوی عناصر کلیدی نیتروژن (N) ، فسفر (P) و پتاسیم (K)، تغذیه شدند .شرایط محیطی گلخانه شامل تناوب نوری ۱۶ ساعت روشنایی و ۸ ساعت تاریکی و دمای روزانه ۲۵ درجه و شبانه ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. شوری به‌صورت تدریجی و طی چند مرحله اعمال شد. ابتدا غلظت ۲۵ میلی‌مولار نمک به محلول غذایی افزوده شد و پس از سه روز به تدریج افزایش یافت تا به غلظت نهایی مورد نظر (۵۰، ۱۰۰ یا ۱۵۰ میلی‌مولار) برسد. تنش شوری با افزودن کلرید سدیم آزمایشگاهی از شرکت مرک آلمان (Sodium chloride CAS 7647-14-5 106404 Merck) به آب آبیاری اعمال شد، گلدان‌ها هر سه روز یک‌بار آبیاری شدند. میزان هدایت الکتریکی (EC) محلول‌ها شامل آب مقطر با ۱/۲ dS m^{-1} (به عنوان شاهد)، شوری ۵۰ میلی‌مولار با ۳/۴ dS m^{-1}، شوری ۱۰۰ میلی‌مولار با ۷ dS m^{-1} و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار با EC ۱۲ dS m^{-1} بود. جهت تهیه تیمار محلول‌پاشی، مقدار مشخص گابا (4-Aminobutyric acid CAS 56-12-2 Merck) توزین و در آب مقطر حل گردید و به همه محلول ها ۰/۵ درصد توئین ۲۰ جهت امولسیون بهتر اضافه گردید. اولین محلول‌پاشی بلافاصله پس از اعمال تنش شوری و دومین محلول‌پاشی دو هفته بعد و در کل سه بار انجام شد. برای هر گلدان ۲۰ میلی‌لیتر محلول به کار برده شد (Vojodi Mehrabani et al., 2016).

کل آزمایش ۱۴ هفته به طول انجامید و پنج هفته پس از آخرین محلول‌پاشی، نمونه‌برداری از گیاهان برای اندازه‌گیری صفات مختلف صورت گرفت. برای اندازه گیری وزن خشک اندام هوایی گیاه پس از تعیین وزن تر، در داخل پاکت‌های کاغذی قرار گرفته و سپس به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. طول ساقه توسط خط‌کش اندازه گیری شد. جهت اندازه‌گیری پرولین در برگ-ها نیز به طریق بتیس و همکاران (Bates and Waldren, 1973) اندازه گیری شد. سطح برگ گیاه با استفاده از دستگاه Leaf Area Meters مدل CRLA1 ساخت شرکت کیمیا رهاورد پسا راد و بر حسب سانتی‌متر مربع اندازه‌گیری شد. محتوی نسبی آب برگ‌ها با استفاده از روش اینگز و همکاران (Ings et al., 2013) اندازه‌گیری و با رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$RWC = (FW - DW)/(TW - DW)\times 100 \quad [1]$$

که در این فرمول FW وزن تازه برگ،DW وزن خشک و TW وزن برگ پس از اشباع کامل با آب (زمانی که سلول‌ها در حالت تورژسانس کامل هستند) است.

برای اندازه‌گیری نشت الکترولیت برگ‌ها نیز از روش ارائه شده توسط لیو و همکاران (Liu et al., 2011) استفاده گردید و مقدار آن توسط رابطه (۲) محاسبه شد.

$$EL=\frac{EC_1}{EC_2}\times 100 \quad [2]$$

که در آن EC_1 مقدار EC اولیه و EC_2 مقدار EC ثانویه و EL درصد نشت الکترولیت است.

برای آنالیز آماری داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.4M8 (TS1M8)، برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Microsoft Excel 2016 و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ استفاده شد.

نسخه پیش از انتشار

نتایج و بحث

صفات مورفولوژیکی

وزن تر اندام هوایی

وزن تر اندام هوایی یکی از شاخص‌های اصلی برای ارزیابی رشد گیاه است که به طور مستقیم تحت‌تأثیر شرایط محیطی مانند شوری و استفاده از تنظیم‌کننده‌های زیستی، مانند گابا قرار می‌گیرد. نتایج مقایسه میانگین داده‌های مربوط به وزن تر اندام هوایی (جدول ۲) نشان داد که اثر متقابل شوری و گابا روی وزن تر اندام هوایی در سطح یک درصد معنی‌دار گردید به‌طوری که بیشترین وزن تر اندام هوایی در شرایط بدون شوری و استفاده از سطح ۴۰ میلی‌مولار گابا مشاهده شده است، در حالی که کمترین وزن تر در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار و بدون استفاده از گابا به دست آمده است. شوری با ایجاد اختلال در جذب آب و مواد مغذی، فشار اسمزی بالا و تجمع یون‌های سمی (مانند سدیم و کلر)، باعث کاهش رشد اندام‌های هوایی می‌شود. این امر به کاهش فتوسنتز، کاهش سنتز پروتئین‌ها و کاهش تقسیم سلولی منجر می‌گردد. مطالعات محققان نشان داد که شوری به طور قابل‌توجهی رشد اندام هوایی را در گیاهان حساس کاهش می‌دهد، اما گیاهان مقاوم مانند رزماری به دلیل مکانیزم‌های مقابله‌ای نظیر ذخیره یون‌های سدیم در واکوئل یا تولید آنتی‌اکسیدان‌ها، رشد نسبی خود را تا حدی حفظ می‌کنند (Munns and Tester, 2008). گابا در تنش شوری با بهبود تعادل اسمزی، افزایش تولید ترکیبات اسمولیت (مانند پرولین)، کاهش اثرات اکسیداتیو و افزایش تنظیم ژن‌های مرتبط با تحمل تنش، به حفظ وزن تر اندام هوایی کمک می‌کند. در مطالعه ای نتایج نشان داد که استفاده از گابا در گیاه گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*) تحت تنش شوری باعث افزایش وزن تر و خشک گیاه شد که این امر به بهبود کارایی فتوسنتز و کاهش تخریب سلول‌ها نسبت داده شد (Zhao et al., 2019). در غیاب تنش شوری، استفاده از گابا به‌ویژه در سطح ۴۰ میلی‌مولار باعث تقویت رشد و افزایش وزن تر اندام هوایی می‌شود. دلیل این امر به نقش گابا در بهبود متابولیسم نیتروژن، افزایش تقسیم سلولی و بهبود فتوسنتز مرتبط است. بررسی اثر گابا بر افزایش وزن تر گیاه ذرت تحت تنش شوری نشان داد که تیمار ۵۰ میلی‌مولار گابا توانست ۳۰ درصد وزن تر اندام هوایی را در شوری بالا افزایش دهد (Wang et al., 2020). مطالعه روی گیاه سویا (*Glycine max*) تحت تنش شوری نشان داد که اثرات مثبت گابا در بهبود وزن تر و خشک اندام هوایی بیشتر در سطوح شوری پایین‌تر معنی‌دار است .(Li et al., 2018) مطالعه روی گیاه آویشن (*Thymus vulgaris*) نشان داد که در تنش شوری بالا، عدم استفاده از تنظیم‌کننده‌های زیستی مانند گابا منجر به کاهش شدید وزن تر اندام‌های هوایی شد (Saeed et al., 2021). در نهایت اثر مثبت گابا بر وزن تر اندام هوایی در شرایط بدون شوری به دلیل تقویت رشد طبیعی گیاه است. در شرایط شوری بالا، گابا با کاهش اثرات منفی تنش (مانند تنش اسمزی و اکسیداتیو) توانسته وزن تر گیاه را تا حدی حفظ کند، اما در سطح شوری بسیار بالا (۱۵۰ میلی‌مولار) عدم استفاده از گابا باعث کاهش شدید وزن تر اندام هوایی شده است.

وزن خشک اندام هوایی

نتایج آزمایش نشان داد که اثر متقابل تنش شوری و گابا و همچنین اثر مستقل گابا، بر وزن خشک اندام هوایی معنی‌دار نبود. بااین‌حال، اثر شوری به‌تنهایی در سطح یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۱). کمترین میزان وزن خشک اندام هوایی مربوط به اثر مستقل ۱۵۰ میلی‌مولار شوری بود، در حالی که بیشترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار شاهد شوری و ۲۰ میلی مولار گابا مشاهده شد (جدول ۲). این نتایج با یافته‌های بنگال و شانی (Ben-Gal and Shani, 2002) که کاهش وزن تر و خشک بخش هوایی در گیاه گوجه فرنگی را با افزایش شوری گزارش کرده اند مطابقت دارد. همچنین در ۵ رقم کاهو تحت تنش شوری نشان داده شد که با افزایش شوری وزن تر و خشک کاهوها کاهش یافتند (Bijeh Keshavarzi et al., 2011). یکی از دلایل کاهش وزن خشک در شرایط تنش شوری می‌تواند استرس آبی ناشی از تجمع نمک در محیط باشد. این شرایط منجر به کاهش حجم استرومای کلروپلاست و افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. این فرآیندها در نهایت فتوسنتز را مختل کرده، رشد گیاه را کاهش داده و در نتیجه وزن تر و خشک گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Moradi, 2002). کاهش وزن خشک اندام هوایی تحت تنش شوری و عدم تأثیر معنی‌دار گابا به طور مستقل یا در تعامل با شوری، می‌تواند به سازوکارهای فیزیولوژیکی مرتبط با تنش اسمزی و یون‌های سمی در گیاه رزماری مرتبط باشد. شوری بالا منجر به کاهش جذب آب و اختلال در تعادل یونی می‌شود، که در نهایت باعث کاهش فتوسنتز و تولید بیومس می‌گردد. این نتیجه

نشان‌دهنده مقاومت نسبی گیاه رزماری به شوری در سطوح پایین است، اما در شوری‌های بالا (۱۵۰ میلی‌مولار)، حتی گیاهانی مانند رزماری که نسبتاً مقاوم به شوری هستند نیز دچار کاهش رشد می‌شوند. به‌عنوان مثال مطالعه روی گیاه ریحان (*Ocimum basilicum*) تحت تنش شوری، سبب کاهش وزن خشک اندام هوایی شد. این کاهش به اثر مستقیم شوری بر عملکرد فتوسنتز و کاهش تولید مواد فتوسنتزی نسبت داده شد (Munns & Tester, 2008). در مطالعه‌ای کاهش وزن خشک اندام هوایی رزماری با افزایش سطح شوری به کاهش تعادل اسمزی و مختل شدن متابولیسم طبیعی گیاه نسبت داده شد (Hendawy and Khalid, 2005). در مجموع، نتایج به‌دست‌آمده در این آزمایش با سوابق علمی هم‌خوانی دارد و تأکید می‌کند که شوری یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد اندام هوایی است، حتی در گیاهانی که به شوری مقاوم شناخته می‌شوند.

جدول ۱. تجزیه واریانس تأثیر گابا در شرایط تنش شوری بر برخی عملکرد و صفات فیزیولوژیکی رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.)

Table 1. Analysis of variance of Effect of GABA on some morphophysiological characteristics of Rosemary plant (*Rosmarinus officinalis* L.) under salt stress condition

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares						
		وزن تر اندام هوایی Fresh weight	وزن خشک اندام هوایی Dry weight	طول ساقه Stem length	سطح برگ Leaf area	محتوی نسبی آب Relative water content	نشت الکترولیت Electrolyte leakage	پرولین Proline
شوری Salt	3	141.322**	10.894**	39.2367**	4.37654**	9.5621 ns	9.2031**	0.021**
گابا GABA	3	38.355**	0.2301 ns	22.7321**	1.26453**	6.984 ns	73.69**	0.022**
گابا ×شوری GABA ×Salt	9	2.314**	0.7356 ns	2.5493**	8.17460**	28.13 ns	57.02**	0.433 ns
خطا Error	32	0.069	0.4663	0.1042	3.17453	18.765	15.52	0.01
ضریب تغییرات CV(%)		*1.31*	*11.91*	*1.41*	*1.81*	*6.24*	*4.61*	*8.9*

* * ،* ، ns: به ترتیب عبارت از معنی دار بودن در سطح آماری ۱ و ۵ درصد احتمال و غیرمعنی دار بودن می باشد

ns, * and **: Non-significant and significant at the 5 and 1% levels of probability, respectively.

طول ساقه

بر اساس نتایج این پژوهش، اثر متقابل تنش شوری و تیمار گابا بر طول ساقه گیاه به طور معنی‌داری در سطح یک درصد تأثیرگذار بود (جدول ۱). بیشترین طول ساقه در شرایط بدون تنش شوری (شاهد شوری) و تیمار با ۶۰ میلی مولار گابا حاصل شد. در مقابل، کمترین طول ساقه در تیمار بدون گابا (شاهد گابا) و شوری ۱۵۰ میلی‌مولار مشاهده گردید (جدول ۲). این نتایج نشان‌دهنده اثر مثبت گابا در بهبود رشد طولی ساقه، به‌ویژه در شرایط عدم تنش شوری و تأثیر منفی تنش شوری بالا در کاهش رشد گیاه است. نتایج مشابهی در مطالعات پیشین گزارش شده است. به طور مثال، محققان گزارش کردند که گابا با تنظیم سیستم آنتی‌اکسیدانی و کاهش اثرات تنش اکسیداتیو ناشی از شوری، رشد طولی ساقه را در گیاه برنج بهبود می‌بخشد (Khan et al., 2020). مطالعه بر روی گوجه‌فرنگی نشان داد که شوری به طور قابل‌توجهی باعث کاهش طول ساقه می‌شود، اما تیمار گابا به دلیل خاصیت اسمزی و آنتی‌اکسیدانی خود باعث افزایش طول ساقه در گیاهان تحت تنش شوری شده است. این پژوهش بیان داشت که گابا می‌تواند از طریق بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و تنظیم جریان یونی، اثرات شوری را تعدیل کند (Yu et al., 2019). همچنین پژوهش بر روی گیاه کاهو (*Lactuca sativa*) نشان داد که تنش شوری با تأثیر منفی بر تقسیم سلولی و رشد سلولی باعث کاهش طول ساقه و سایر پارامترهای رشدی می‌شود. در مقابل، گابا باعث بهبود رشد ساقه شد، زیرا توانست متابولیسم نیتروژن و تعادل آب را در سلول‌ها بهبود بخشد (Ma et al., 2020). در مطالعه‌ای بر روی رزماری به‌عنوان یک گیاه دارویی با مقاومت نسبی به شوری نشان داده شد که با افزایش سطح شوری،

نسخه پیش از انتشار

کاهش معنی‌داری در طول ساقه، وزن خشک و دیگر صفات رشدی مشاهده می‌شود. در این تحقیق، مکانیسم مقاومت رزماری به تنش شوری به توانایی حفظ تعادل یونی و اسمزی مرتبط دانسته شد (Hendawy and Khalid, 2005). تحقیقات نشان دادند که گابا به طور معنی‌داری اثرات مضر شوری را در گیاه برنج کاهش داده و باعث افزایش طول ساقه و سایر صفات رشدی شد. این امر به افزایش تولید پروتئین‌های شوک حرارتی (HSPs) و بهبود مقاومت سلولی نسبت داده شد (Zhang et al., 2015). توانایی گابا در بهبود طول ساقه احتمالاً ناشی از اثرات آن بر تنظیم فشار اسمزی، کاهش تنش اکسیداتیو، و بهبود جذب مواد مغذی است. نتایج این پژوهش با سوابق ذکر شده همخوانی داشته و تأکید می‌کند که استفاده از گابا راهکاری مؤثر برای کاهش اثرات منفی تنش شوری در گیاهان است.

سطح برگ

بر اساس نتایج این پژوهش، اثر متقابل شوری و گابا بر سطح برگ گیاه رزماری به طور معنی‌داری در سطح یک درصد تأثیرگذار بود (جدول ۱). بیشترین سطح برگ در تیمار بدون شوری (شاهد) و ۶۰ میلی مولار گابا مشاهده شد. در مقابل، کمترین سطح برگ در تیمار بدون گابا و سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار حاصل گردید (جدول ۲). کاهش سطح برگ در شرایط شوری را می‌توان به اثرات منفی تجمع یون‌های سمی سدیم و کلر، عدم تعادل یونی، کاهش جذب مواد غذایی و افزایش تنش اسمزی نسبت داد (Yu et al., 2019). مثلا در گیاه انگور، تجمع یون‌های سدیم و کلر و اثرات ناشی از آن، باعث آسیب به برگ‌ها می شود (Doulati Baneh, 2016). همچنین، در شرایط شوری، انرژی زیادی صرف تنظیم شرایط سلولی برای مقابله با تنش می‌شود که در نتیجه انرژی کمتری برای فرایندهای رشد و توسعه گیاه باقی می‌ماند. به همین دلیل، گیاهان تحت تنش شوری معمولاً ضعیف‌تر هستند و برگ‌های کوچک‌تری نسبت به گیاهان بدون تنش دارند. کاهش سطح برگ تحت شوری ممکن است ناشی از کاهش تعداد برگ‌ها به‌دلیل افت فتوسنتز یا کاهش اندازه برگ‌ها به‌دلیل افت فشار تورژسانس سلولی باشد. در گزارشی علمی عنوان گردید که افزایش فشار اسمزی در محیط ریشه، منجر به کاهش رشد رویشی و کاهش سطح برگ گیاهان می‌شود (El-Khawaga et al., 2013). بر اساس نتایج، تنش شوری به طور معنی‌داری سطح برگ گیاه رزماری را کاهش داد، که می‌تواند ناشی از کاهش تقسیم سلولی، کاهش گسترش سلول‌ها و کاهش جذب آب و مواد مغذی باشد. گابا به عنوان یک مولکول سیگنال‌دهنده در شرایط تنش، اثر مثبتی بر سطح برگ داشته است. این اثر می‌تواند به دلیل افزایش سنتز پروتئین‌ها، بهبود جذب آب و تنظیم فعالیت آنزیم‌های مرتبط با فتوسنتز باشد.. مطالعه‌ای در مورد تأثیر گابا بر برنج نشان داد که گابا می‌تواند اثرات منفی تنش شوری را کاهش دهد و سطح برگ را با تنظیم تعادل یونی و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی افزایش دهد (Zhang et al., 2015). گابا باعث بهبود رشد گیاه از طریق افزایش جذب آب و کاهش آسیب‌های ناشی از تنش شوری می‌شود. این پژوهش در گیاهان مختلف از جمله گندم و سویا اثرات مثبت مشابهی بر شاخص‌های رشد نشان داده است (Ma et al., 2020). مطالعه روی رزماری نشان داد که این گیاه تحمل بالایی به تنش شوری دارد و استفاده از مواد آلی و تنظیم‌کننده‌های رشد می‌تواند اثرات مثبت بر سطح برگ داشته باشد (Hendawy and Khalid, 2005). نقش سیگنال‌دهی گابا در کاهش تنش شوری و افزایش رشد گیاهان در مطالعات پیشین برجسته شد و نشان داد که گابا با کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و تقویت مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی می‌تواند بهبود سطح برگ و رشد کلی گیاه را تسهیل کند (Yu et al., 2019). این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از گابا می‌تواند تأثیر مثبتی بر شاخص‌های رشدی نظیر سطح برگ حتی در شرایط شوری بالا داشته باشد.

صفات فیزیولوژیکی

درصد نشت الکترولیت

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق، اثر متقابل تنش شوری و گابا بر درصد نشت الکترولیت در سطح آماری یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). بیشترین میزان نشت الکترولیت در سطح شوری ۱۵۰ میلی‌مولار همراه با گابا در غلظت ۶۰ میلی مولار در لیتر مشاهده شد، درحالی‌که کمترین نشت الکترولیت مربوط به تیمار بدون شوری (شاهد) و گابا در غلظت ۶۰ میلی مولار در لیتر بود (جدول ۲). تیمار گابا در سطح ۶۰ میلی‌مولار توانسته است میزان نشت الکترولیت را در شرایط بدون تنش کاهش دهد. در تیمارهای ترکیبی با سطح شوری بالا و گابا، افزایش نشت الکترولیت مشاهده شد. این نتیجه احتمالاً به دلیل شدت بالای تنش شوری بوده که حتی با حضور گابا آسیب غشایی به طور کامل

نسخه پیش از انتشار

جبران نشده است. مطالعات نشان داده‌اند که تنش شوری با ایجاد اختلال در ساختار غشای سلولی و افزایش پراکسیداسیون لیپیدها باعث افزایش نشت الکترولیت غیر فعال شدن پروتئین‌های غشایی کاهش کارایی غشای پلاسمایی در جذب آب و مواد محلول، اختلال در فعالیت‌های فتوسنتزی یا عملکرد میتوکندریایی و در نهایت مرگ سلولی در بسیاری از گیاهان می‌شود محققانگزارش دادند که شوری با منجر به افزایش نشت الکترولیت در گیاهان می‌شود (Demiral and Türkan, 2005). گابا از طریق تقویت فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش تجمع یون‌های فعال اکسیژن آسیب به غشای سلولی را کاهش می‌دهد (Shao et al., 2014). در شرایط تنش شوری، گابا به طور مؤثری از نشت الکترولیت جلوگیری می‌کند، اما در تنش‌های بسیار شدید، اثر محافظتی آن کاهش می‌یابد. این تحقیق روی گندم انجام شد و تأیید کرد که گابا از طریق تقویت تعادل یونی و تنظیم فشار اسمزی عمل می‌کند (Li et al., 2016). مطالعات پیشین محققان نشان داد که رزماری به‌عنوان گیاهی مقاوم به شوری، تحمل نسبی بالایی به تنش‌های محیطی دارد. اما شوری بالا می‌تواند منجر به آسیب به غشاهای سلولی شود که با استفاده از ترکیبات تنظیم‌کننده نظیر گابا قابل مدیریت است (Hendawy and Khalid, 2005). در شرایط شوری شدید، حتی با وجود گابا، نشت الکترولیت بالا باقی می‌ماند، اما نسبت به گیاهان فاقد گابا، آسیب کمتری مشاهده می‌شود.

محتوای نسبی آب (RWC)

در این پژوهش، اگرچه محتوای نسبی آب روند کاهشی را نشان داد، اما اثرات مستقل شوری و گابا و همچنین اثر متقابل آنها بر این شاخص معنی‌دار نبود (جدول ۲). این نتایج را می‌توان به مقاومت نسبی بالای گیاه رزماری در برابر تنش شوری نسبت داد، که از کاهش چشمگیر محتوای نسبی آب در طول اعمال تنش جلوگیری کرده است. رزماری به‌عنوان گیاهی که معمولاً در مناطق خشک رشد می‌کند، نیاز آبی کمتری دارد و آبیاری بیش از حد می‌تواند مانع رشد مطلوب آن شود. از این رو، به نظر می‌رسد تنش آبی ناشی از شوری در مدت‌زمان آزمایش، تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش محتوای نسبی آب نداشته است. مقاومت بالای رزماری به شوری به دلایل مختلفی از جمله ویژگی‌های فیزیولوژیکی خاص آن، مانند سازگاری‌های اسمزی، ساختار برگ‌های مقاوم و مکانیزم‌های تنظیمی مؤثر است که مانع از کاهش شدید محتوای نسبی آب حتی تحت شرایط شوری می‌شود. این مطالعه نشان داد که گیاهان دارویی مانند رزماری، با استفاده از سازگاری‌های فیزیولوژیکی، تأثیرات منفی تنش شوری بر محتوای نسبی آب را محدود می‌کنند (Selmar and Kleinwächter, 2013). در مراحل اولیه یا در گیاهان مقاوم مانند رزماری، تأثیر شوری بر محتوای نسبی آب اغلب ناچیز است، زیرا گیاه از مکانیزم‌های تطابقی برای جلوگیری از کاهش شدید آب بهره می‌برد.گابا نقش مهمی در کاهش اثرات تنش اکسیداتیو و تنظیم اسمزی دارد. بااین‌حال، در شرایطی که گیاه به طور طبیعی مقاومت بالایی به شوری دارد، اثر مثبت گابا ممکن است به‌صورت معنی‌داری قابل مشاهده نباشد. در تحقیقی روی گیاه ریحان (که مشابه رزماری مقاومت متوسط به شوری دارد) نشان داده شد که کاربرد گابا تأثیر معنی‌داری بر محتوای نسبی آب برگ در شرایط نرمال نداشت، اما در سطوح شوری بالا (۱۵۰ میلی‌مولار NaCl) و شوری متوسط (۱۱۵ میلی‌مولار NaCl) به ترتیب موجب کاهش محتوای مالون‌دی‌آلدئید و افزایش محتوای نسبی آب برگ گردید (Shetelwy et al., 2023). سایر مطالعات مشابه نیز نشان داده‌اند که گیاهان دارویی مقاوم مانند رزماری حتی تحت شرایط شوری شدید، کاهش قابل‌توجهی در محتوای نسبی آب نشان نمی‌دهند.

محتوای پرولین برگ

نتایج این پژوهش نشان داد که تأثیر مستقل شوری و گابا بر میزان پرولین برگ در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۱ و جدول ۲). در تیمار شوری، بیشترین مقدار پرولین در سطح ۱۰۰ میلی‌مولار شوری و کمترین مقدار آن در شرایط شاهد مشاهده شد (جدول ۲). همچنین، در تیمار گابا، بیشترین میزان پرولین به سطح ۶۰ میلی مولار در لیتر گابا اختصاص یافت، در حالی که کمترین مقدار پرولین در سطح شاهد مشاهده شد. با این حال، اثر متقابل شوری و گابا بر میزان پرولین برگ معنی‌دار نبود (جدول ۲). پرولین یکی از مکانیسم‌های غیرآنزیمی در دفع گونه‌های فعال اکسیژن است و به‌عنوان پاک‌کننده رادیکال‌های هیدروکسیل عمل می‌کند. تجمع پرولین در گیاهان تحت تنش‌های محیطی، یکی از مکانیزم‌های اصلی تنظیم اسمزی است که به حفظ ساختار سلولی، کاهش اثرات تنش اکسیداتیو و پایداری پروتئین‌ها کمک می‌کند. پژوهشی روی گیاه گوجه‌فرنگی نشان داد که

نسخه پیش از انتشار

کاربرد گابا در غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار منجر به افزایش معنادار تجمع پرولین در برگ‌ها و کاهش آسیب سلولی ناشی از شوری شد (Li et al., 2016). استفاده از گابا با غلظت‌های ۱۰، ۲۰ و ۵۰ میلی‌مولار در گیاه برنج تحت تنش خشکی، به افزایش میزان پرولین کمک کرد (Sun et al., 2018). بیشترین تجمع پرولین در تیمار ۵۰ میلی‌مولار گابا مشاهده شد (Zhang et al., 2020). در گیاه گندم، کاربرد گابا در حضور شوری (۵۰ و ۱۰۰ میلی‌مولار NaCl) تجمع پرولین را افزایش داد و آسیب غشای سلولی را کاهش داد (Liu et al., 2013). معمولاً غلظت‌های ۲۰ تا ۶۰ میلی‌مولار گابا مؤثرتر هستند. غلظت‌های بالاتر (مانند ۶۰ میلی‌مولار) بیشترین تأثیر را در افزایش تجمع پرولین نشان داده‌اند تنش شوری به‌تنهایی تجمع پرولین را افزایش می‌دهد، اما استفاده از گابا این پاسخ را تقویت کرده و اثرات منفی تنش را کاهش می‌دهد.

جدول ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل شوری و گابا بر برخی صفات مورفوفیزیولوژیک رزماری(*Rosmarinus officinalis* L.).

Table 2. Comparison of Mean of Effect of GABA on some morphophysiological characteristics of Rosemary plant (*Rosmarinus officinalis* L.) under salt stress condition

گابا GABA	شوری Salinity NaCl	طول ساقه Stem length	وزن تر اندام هوایی Fresh weight	وزن خشک اندام هوایی Dry weight	سطح برگ Leaf area	محتوای نسبی آب Relative water content	نشت الکترولیت Electrolyte leakage	پرولین Proline
(mM)	(mM)	(cm)	(gr)	(gr)	(cm^2)	(%)	(%)	($\mu g.gr^{-1}$)
0	0	22.790 cde	22.431 d	6.0987 abcd	3.4562 d	68.090 a	74.993 efg	0.0121 c
	50	22.541 cde	21.878 e	6.8993 abcd	3.2766 e	70.053 a	96.843 a	0.0136 c
	100	21.041 gh	17.650 h	6.7200 abcd	3.1903 ef	75.065 a	87.771 abcd	0.0164 bc
	150	19.030 j	15.331 i	5.2554 cd	2.1772 i	69.375 a	95.890 ab	0.0156 bc
20	0	23.509 bc	22.765 bc	7.745 a	3.7987 c	66.167 a	76.320 defg	0.0143 bc
	50	21.113 fgh	20.097 d	5.789 bcd	3.5121 d	73.876 a	85.990 abbcde	0.0163 bc
	100	19.098 i	17.901 f	5.890 abcd	2.9834 fg	67.988 a	84.870 abcdef	0.0169 bc
	150	18.980 i	16.801 h	4.885 cd	2.5973 h	72.213 a	93.861 ab	0.0159 bc
40	0	24.654 ab	25.130 a	6.896 abc	4.1789 b	69.872 a	75.630 fg	0.0162 bc
	50	23.434 bc	21.892 c	6.342 abcd	3.6890 c	70.121 a	86.098 bcdef	0.0179 abc
	100	22.989 def	16.055 g	5.7031 cd	3.1962 e	69.533 a	82.904 cdef	0.0347 a
	150	21.896 efg	16.872 g	4.7002 cd	2.9879 fg	71.709 a	93.675 abc	0.0185 abc
60	0	25.934 a	23.768 a	6.9971 ab	4.5657 a	72,907 a	67.231 g	0.0139 bc
	50	25.679 a	22.564 b	6.571 abcd	3.8961 c	70.963 a	86.879	0.0186 abc
	100	22.890 cd	20.982 de	5.253 cd	3.4987 d	69.0345 a	93.674 ab	0.0289 ab
	150	21.781 h	16.850	4.8912 d	2.8853 g	71.093 a	98.031 a	0.0236 abc

میانگین های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون مطابق آزمون میانگین دانکن می باشند در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنی داری ندارند.
The mean of the same letter in each column does not differ significantly at $p \leq 0.05$ according to Duncan's multiple range test.

نتیجه‌گیری نهایی

شوری خاک با ایجاد اختلال در تعادل یونی، استرس اکسیداتیو و کاهش جذب آب، رشد و عملکرد گیاهان دارویی را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. تحقیقات نشان داده است که GABA می‌تواند با مکانیسم‌های مختلف به بهبود تحمل گیاهان دارویی در برابر شوری کمک کند. GABA به‌عنوان یک اسمولیت محافظ عمل می‌کند و با تجمع در سلول‌های گیاهی، پتانسیل اسمزی را تنظیم و از کاهش آب سلول جلوگیری می‌کند. GABA جذب یون‌های سدیم (Na^+) و کلر (Cl^-) را کاهش داده و جذب پتاسیم (K^+) و کلسیم (Ca^{2+}) را افزایش می‌دهد که برای حفظ هومئوستازی یونی ضروری است (Aljuaid and Ashour, 2022). GABA فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند سوپراکسید دیسموتاز (SOD)، کاتالاز (CAT) و پراکسیداز (POD) را افزایش میدهد و از تجمع گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) مانند پراکسید هیدروژن (H_2O_2) جلوگیری می‌کند (Ullah et

نسخه پیش از انتشار

al., 2023). GABA مسیرهای متابولیکی مانند چرخه TCA و سنتز پرولین را تحریک می‌کند (Wang et al., 2023). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کاربرد گابا در غلظت ۴۰ میلی‌مولار به‌صورت اسپری برگی روشی کم‌هزینه و عملی برای کشاورزان است و می‌تواند در توسعه کشت گیاهان دارویی در خاک‌های شور مورداستفاده قرار گیرد. این پژوهش راه را برای مطالعات بیشتر در زمینه بهبود مقاومت به تنش‌های محیطی با استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد طبیعی مانند گابا هموار می‌کند. پژوهش حاضر نشان داد که تنش شوری تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های رشدی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی رزماری دارد و باعث کاهش صفات مرتبط با رشد و افزایش عوامل مرتبط با پاسخ به تنش، نظیر نشت الکترولیت و محتوای پرولین، می‌شود. استفاده از گابا به‌عنوان یک ترکیب تنظیم‌کننده، توانست اثرات مخرب شوری را تا حدی کاهش دهد. غلظت ۴۰ میلی‌مولار گابا بهترین عملکرد را در بهبود صفات رشدی و فیزیولوژیکی نشان داد. این نتایج بیانگر آن است که کاربرد گابا به‌صورت اسپری برگی، می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر برای افزایش مقاومت رزماری در شرایط شوری پیشنهاد شود و پتانسیل قابل‌توجهی در بهبود عملکرد گیاهان دارویی در شرایط تنش‌های محیطی دارد.

منابع

Aljuaid, B.S., Ashour, H., 2022. Exogenous γ-aminobutyric acid (GABA) application mitigates salinity stress in maize plants. Life. 12, 1860. https://doi.org/10.3390/life12111860

Bates, L., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil. 39, 205-207. https://doi.org/10.1007/BF00018060

Ben-Gal, A., Shani, U., 2002. Yield, transpiration and growth of tomatoes under combined excess boron and salinity stress. Plant and Soil. 247, 211-221. https://doi.org/10.1023/A:1021571714307

Bijeh Keshavarzi, M.H., Mousavi Nick, M., Zain Al-Abedin, M., 2011. Effect of salt (NaCl) stress on germination and early seedling growth of *Lactuca sativa* L. 1st National Conference on New Concepts in Agriculture, Islamic Azad University of Saveh. pp. 1-5. [In Persian]

Demiral, T., Türkan, I., 2005. Comparative lipid peroxidation, antioxidant defense systems and proline content in roots of two rice cultivars differing in salt tolerance. Environmental and Experimental Botany. 53, 247-257. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.03.017

Doulati Baneh, H., 2016. Salinity effects on plant tissue nutritional status as well as growth and physiological factors in some cultivars and interspecies hybrids of grape. Iranian Journal of Horticultural Science. 47, 33-44. [In Persian with English Summary]

Dong, Z., Huang, J., Qi, T., Meng, A., Fu, Q., Fu, Y., Xu, F., 2024. Exogenous γ-Aminobutyric Acid Can Improve Seed Germination and Seedling Growth of Two Cotton Cultivars under Salt Stress. Plants. 13, 82. https://doi.org/10.3390/plants13010082

El-Khawaga, A., Zaeneldeen, S.E.M., Youssef, M.A., 2013. Comparative responses of three pomegranates (*Punica granatum* L.) varieties to salinity. p. 454-469. Proceedings of the 1st International Conference on New Horizons in Basic and Applied Science. Hurghada, Egypt, Vol 1(1), 2013.

Fait, A., Fromm, H., Walter, D., Galili, G., Fernie, A., 2008. Highway or byway: The metabolic role of the GABA shunt in plants. Trends in Plant Science. 13, 9-14. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2007.10.005

Franco, J.A., Bañón, S., Vicente, M.J., Miralles, J., Martínez-Sánchez, J.J., 2011. Root development in horticultural plants grown under abiotic stress conditions: A review. Journal of Horticultural Science and Biotechnology. 86, 543-556. https://doi.org/10.1080/14620316.2011.11512805

Hendawy, S.F., Khalid, K.A., 2005. Response of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) plants to salt stress under different levels of phosphorus fertilization. Industrial Crops and Products. 21, 273-277. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.018

Ings, J., Mur, L.A., Robson, P.R., Bosch, M., 2013. Physiological and growth responses to water deficit in the bioenergy crop *Miscanthus*

نسخه پیش از انتشار

× *giganteus*. Frontiers in Plant Science. 4, 468. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00468

Jordán, M.J., Lax, V., Rota, M.C., Lorán, S., Sotomayor, J.A., 2011. Effect of phenological stage and season on the essential oil composition of *Rosmarinus officinalis* L. grown in Murcia (Spain). Food Chemistry. 130, 472-478. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.049

Khan, N.U., Ali, F., 2020. Priming with γ-aminobutyric acid (GABA) alleviates the detrimental effects of osmotic stress and salinity on rice seed germination and seedling growth by modulating antioxidant defense system and secondary metabolism. International Journal of Molecular Sciences. 20(22), 5709. https://doi.org/10.3390/ijms20225709

Khan, M.A., 2001. Experimental assessment of salinity tolerance of *Ceriops tagal* seedlings and saplings from the Indus delta, Pakistan. Aquatic Botany. 70, 259-268. https://doi.org/10.1016/S0304-3770(01)00161-1

Khan, M.A., Duke, N.C., 1998. Halophytes: A resource for the future. Wetlands Ecology and Management. 6, 455-456. https://doi.org/10.1023/A:1008497221412

Kiani-Pouya, A., Roessner, U., Nirupama, S., Rupasinghe, T., Bazihizina, N., 2017. Epidermal bladder cells confer salinity stress tolerance in the halophyte quinoa and *Atriplex* species. Plant, Cell and Environment. 40, 1900-1915. https://doi.org/10.1111/pce.12946

Koppitz, H., Dewender, M., Ostendorp, W., Schmieder, K., 2004. Amino acids as indicators of physiological stress in common reed *Phragmites australis* affected by an extra flood. Aquatic Botany. 79, 277-294. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2004.05.003

Lemos, M.F., Pacheco, H.P., Endringer, D.C., Scherer, R., 2015. Seasonality modifies rosemary's composition and biological activity. Industrial Crops and Products. 70, 41-47. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.008

Li, X., Li, X., Zhang, L., Zhang, Z., Zhang, J., Hu, J., Ma, T., 2018. Exogenous GABA mitigates salt stress by reducing oxidative damage and enhancing proline accumulation in soybean seedlings. Physiology and Molecular Biology of Plants. 24, 947-959. https://doi.org/10.1007/s12298-018-0578-2

Li, Z., Yu, J., Peng, Y., Huang, B., 2016. Physiological effects of gamma-aminobutyric acid application on improving heat and salt tolerance in perennial ryegrass. Journal of the American Society for Horticultural Science. 141, 385-392. https://doi.org/10.21273/JASHS.141.5.385

Liu, C., Zhao, X., Yan, J., Yuan, Z., Gu, M., 2013. Effects of exogenous γ-aminobutyric acid on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings under salt stress. Acta Ecologica Sinica. 33, 2270-2277. https://doi.org/10.5846/stxb201204030468

Ma, X., Zhang, J., Huang, B., Guo, J., 2020. GABA application improves plant tolerance to salt stress by enhancing nitrogen metabolism and antioxidant defense. Plant Physiology and Biochemistry. 151, 680-689. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.029

Moradi, F., 2002. Physiological characterization of rice cultivars for salinity tolerance during vegetative and reproductive stages. Ph.D. Thesis. University of the Philippines at Los Baños, Los Baños, Laguna. 190 p.

Munns, R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology. 59, 651-681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911

Rezzouk, F., Shahid, M., Elouafi, I., Zhou, B., Araus, B., Serret, M., 2020. Agronomic performance of irrigated quinoa in desert areas: Comparing different approaches for early assessment of salinity stress. Agricultural Water Management. 240, 106273. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106273

Saeed, M., Rehman, S., Khan, M.A., Sadiq, M.B., Muhammad, N., 2021. Effect of GABA on growth and physiological responses of thyme under salt stress. Journal of Medicinal Plants Research. 15, 241-250. https://doi.org/10.5897/JMPR2021.7142

Salehi Sardoei, A., Khalili, H., 2020. Phytochemistry of Medicinal Plants (Volume 1). Nowruzi Press. 374 p. [In Persian]

Selmar, D., Kleinwächter, M., 2013. Stress enhances the synthesis of secondary plant products: The impact of stress-related over-reduction on the accumulation of natural products. Plant and Cell Physiology. 54, 817-826. https://doi.org/10.1093/pcp/pct054

Shao, H.B., Chu, L.Y., Shao, M.A., Jaleel, C.A., Zhao, C.X., 2008. Water-deficit stress-induced

anatomical changes in higher plants. Comptes Rendus Biologies. 331, 215-225. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2007.02.004

Shetelwy, M.S., Abd El-Gawad, H.G., El-Sayed, A.I., 2023. Synergistic effect of gamma-aminobutyric acid (GABA) on salt tolerance in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) through modulation of oxidative defense and osmolyte accumulation. BMC Plant Biology. 23, 577. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04312-w

Song, H., Xu, X., Hua, W., Wang, H., Tao, Y., 2010. Exogenous γ-aminobutyric acid alleviates oxidative damage caused by aluminium and proton stresses on barley seedlings. Journal of the Science of Food and Agriculture. 90, 1410-1416. https://doi.org/10.1002/jsfa.3951

Sun, X., Zhu, C., Li, W., Dong, X., Wen, X., Zhang, F., 2018. Application of GABA alleviates drought stress in rice by increasing proline synthesis. Agronomy Journal. 110, 1295-1307. https://doi.org/10.2134/agronj2017.11.0662

Ullah, A., Tariq, A., Zeng, F., Noor, J., Sardans, J., Asghar, M.A., et al., 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.2023.04.031

USSL Staff, 1954. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Handbook No. 60. Washington DC, USA.

Verbruggen, N., Hermans, C., 2008. Proline accumulation in plants: A review. Amino Acids. 35, 753-759. https://doi.org/10.1007/s00726-008-0061-6

Vojodi Mehrabani, L., Hassanpouraghdam, M.B., Ebrahimzadeh, A., Valizadeh Kamran, R., 2016. Effects of $ZnSO_4$ foliar application on vegetative growth and phenolic and essential oil content of geranium (*Pelargonium odoratissimum* L.). Journal of Ornamental Plants. 6, 193-199. [In Persian with English Summary]

Wang, X., Yu, Z., Zhang, L., Huang, R., 2019. Roles of gamma-aminobutyric acid (GABA) and GABA shunt in abiotic stress. Plant Growth Regulation. 87, 3-15. https://doi.org/10.1007/s10725-018-0444-6

Wang, X., Zhang, F., Zhang, Y., Li, T., Dong, J., Zhang, X., 2020. GABA alleviates salt-induced stress in maize by improving antioxidant defense and regulating ion homeostasis. Plant Science. 295, 110244. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110244

Wang, Y., Cao, H., Wang, S., Guo, J., Dou, H., Qiao, J., Yang, Q., Shao, R., Wang, H., 2023. Exogenous γ-aminobutyric acid (GABA) improves salt-inhibited nitrogen metabolism and the anaplerotic reaction of the tricarboxylic acid cycle by regulating GABA-shunt metabolism in maize seedlings. Ecotoxicology and Environmental Safety. 254, 114756. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114756

Wang, Y., Gu, W., Meng, Y., Xie, T., Li, L., Li, J., 2011. The role of gamma-aminobutyric acid in maize growth under salt stress. Plant Physiology and Biochemistry. 59, 120-128.

Yu, Z., Wang, X., Zhang, L., Huang, R., 2019. Roles of gamma-aminobutyric acid and GABA shunt in abiotic stress. Plant Growth Regulation. 87, 3-15. https://doi.org/10.1007/s10725-018-0444-6

Zhang, H., Zhao, F., Tang, R., Yu, Y., Zhang, Z., 2015. Exogenous GABA improves salt tolerance of rice seedlings by regulating ion homeostasis and stress defense responses. Environmental and Experimental Botany. 111, 144-151. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.11.014

Zhang, J., Ma, X., Huang, B., Guo, J., 2020. GABA application improves plant tolerance to salt stress by enhancing nitrogen metabolism and antioxidant defense. Plant Physiology and Biochemistry. 151, 680-689. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.029

Zhao, Y., Wu, X., Tian, X., Wang, Y., Xing, G., Li, Z., 2019. GABA improves tomato plant growth by enhancing carbon and nitrogen metabolism under salt stress. Plant Growth Regulation. 87, 163-174. https://doi.org/10.1007/s10725-018-0465-1