Journal of Rangeland

Print ISSN: 2008-0891
Online ISSN: 2676-5039

Determining the Salt Tolerance Threshold of Mentha suaveolens Ehrh. under Gamma-Aminobutyric Acid (GABA) Influence

Mohammad Reza Morshedloo*[1,2], Habib Farhadi[1], Hosein Ahmadi[3], Filippo Maggi[4]

1. Corresponding author; Department of Horticultural Science, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran. E-mail: morshedlooreza@gmail.com; morshedloo@maragheh.ac.ir
2. Center of International Scientifc and Collaborations (CISSC), Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran.
3. Department of Horticulture Science, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
4. School of Pharmacy, Chemistry Interdisciplinary Project (ChIP), University of Camerino, Italy.

Article Info

Article type:
Research Full Paper

2024; Vol 17, Issue 4

Article history:
Received: 09.09.2023
Revised: 29.11.2023
Accepted: 19.12.2023

Keywords:
Plant biomass, Environmental stresses, Functional characteristics, Principal component analysis (PCA).

Abstract

Background and objectives: Salinity stress poses a significant challenge worldwide, particularly in arid and semi-arid regions, impacting the physiological processes and secondary metabolites of medicinal plants like Mentha suaveolens Ehrh. Distributed in humid rangelands, this species is notably affected by environmental salinity rise and excessive exploitation. Therefore, enhancing or preserving the quality and quantity of its metabolites under natural or cultivated conditions, including irrigation with unconventional saline waters, using modern methods, becomes imperative. Recently, gamma-aminobutyric acid (GABA), a biomolecule known to induce plant tolerance in various physiological processes, has been explored to optimize conditions and enhance plant performance under stress. This study aimed to model and evaluate the effects of GABA concentrations on the secondary metabolites and physiological characteristics of Mentha suaveolens under varying salinity levels.

Methodology: The influence of GABA concentrations ranging from 0 to 2.4 mM on secondary metabolites and physiological traits of apple mint species under salinity levels of 0 to 150 mM NaCl was assessed in a greenhouse at the Faculty of Agriculture, Maragheh University, during the year 1401. At the end of the trial period, parameters such as biomass performance, relative water content of aerial organs, and secondary metabolites including flavonoids, phenols, DPPH radical scavenging activity, proline, malondialdehyde (MDA), carotenoids, chlorophyll, and essential oil content were evaluated. Statistical analysis and Principal Component Analysis (PCA) were performed on the collected data.

Results: Salinity stress led to reductions in root and shoot dry weight, piperitone oxide content, relative water content, chlorophyll content, and PSII maximum quantum yield (Fv/Fm). Conversely, malondialdehyde (MDA), total flavonoids, and DPPH radical scavenging activity increased under salinity. Application of GABA mitigated the negative effects of salinity stress, with the most significant changes observed under higher salinity (150 mM) and GABA (2.4 mM) levels. PCA

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

analysis accounted for 90.58% of changes under different treatments. DPPH activity, piperitone oxide, and essential oil content showed the highest gradients, indicating their sensitivity to salinity levels and GABA application. Notably, NaCl(0)-GABA(0) and NaCl(0)-GABA(2.4) treatments exhibited the most significant combined effects on plant physiological characteristics. Salinity stress had varying effects on phenol and biomass content, while GABA application showed minimal to moderate effects on these parameters. Overall, severe salinity stress (>120 mM NaCl) adversely impacted plant performance and evaluated characteristics.

Conclusion: Salinity stress significantly altered functional characteristics of Mentha suaveolens, inducing metabolic changes to cope with or enhance tolerance to salinity stress. Modeling indicates that optimal GABA application could maintain or improve medicinal performance under moderate salt stress conditions. However, extreme salinity stress (120 to 150 mM) adversely affects plant performance, suggesting limited efficacy of GABA application in such conditions.

Cite this article: Morshedloo, M.R., H. Farhadi, H. Ahmadi, F. Maggi, 2024. Determining the Salt Tolerance Threshold of Mentha suaveolens Ehrh. under Gamma-Aminobutyric Acid (GABA) Influence. Journal of Rangeland, 17(4): 622-639.

© The Author(s).
DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3
Publisher: Iranian Society for Range Management

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

مـــرتـــع

شاپا چاپی: ۰۸۹۱-۲۰۰۸

شاپا الکترونیکی: ۵۰۳۹-۲۶۷۶

تعیین آستانه تحمل شوری گونه *Mentha suaveolens* Ehrh. تحت کاربرد گاما آمینو بوتیریک اسید (GABA)

محمدرضا مرشدلو*[۱و۲]، حبیب فرهادی[۱]، حسین احمدی[۳]، فیلیپو مگی[۴]

۱. نویسنده مسئول، گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران. رایانامه: morshedlooreza@gmail.com; morshedloo@maragheh.ac.ir

۲. مرکز همکاری‌های علمی و بین‌المللی (CISSC)، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران.

۳. گروه علوم باغبانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۴. دانشکده داروسازی، پروژه میان‌رشته‌ای شیمی (ChIP)، دانشگاه کامرینو، ایتالیا.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل – پژوهشی

۱۴۰۲؛ جلد ۱۷، شماره ۴

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۰۶/۱۸
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸

واژه‌های کلیدی:
زی‌توده گیاهی،
تنش‌های محیطی،
خصوصیات عملکردی،
تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA).

چکیده

سابقه و هدف: تنش شوری همواره به‌عنوان یک مسئله جدی در سراسر جهان مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک، فرایندهای فیزیولوژیکی و متابولیت‌های ثانویه گیاهان دارویی را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. گونه دارویی نعناع آناناسی (*Mentha suaveolens* Ehrh.) با پراکنش در مراتع مرطوب شدیداً تحت تأثیر افزایش شوری محیط و بهره‌برداری بی‌رویه قرارگرفته است. لذا بهبود یا حفظ کیفیت و کمیت متابولیت‌های آن تحت شرایط طبیعی یا کشت و آبیاری با آب‌های نامتعارف شور به کمک روش‌های مدرن مؤثر ضروری به نظر می‌رسد. امروزه کاربرد انواع اصلاحگرها و آمینواسیدها مانند گاما آمینو بوتیریک اسید (GABA) که یک مولکول زیستی نشانگر القاکننده تحمل در فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی گیاه است، برای تعیین شرایط بهینه و بهبود عملکرد گیاهان تحت تنش معرفی‌شده است که مدل‌سازی و ارزیابی این اثرات نتایج دقیق‌تری را ارائه خواهد داد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش تأثیر غلظت‌های ۰ تا ۲/۴ میلی‌مولار GABA بر متابولیت‌های ثانویه و خصوصیات فیزیولوژیکی گونه نعناع آناناسی تحت سطوح شوری ۰ تا ۱۵۰ میلی‌مولار نمک طعام (NaCl) تحت شرایط گلخانه در دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه در سال ۱۴۰۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتهای دوره آزمایش خصوصیات فیزیولوژیکی مانند عملکرد زی‌توده، رطوبت نسبی اندام‌های هوایی و متالبولیت‌های ثانویه گیاه از جمله محتوای کل فلاونوئیدها، فنل‌ها، فعالیت مهار رادیکال DPPH، محتوای پرولین، مالون‌دی‌آلدئید (MDA)، کاروتنوئیدها، محتوای کلروفیل و مقدار اسانس مورد ارزیابی قرار گرفت. برای داده‌های به‌دست‌آمده، آنالیز آماری و تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام شد.

نتایج: تنش شوری به طور اجتناب‌ناپذیری ویژگی‌هایی مانند وزن خشک ریشه و اندام هوایی، محتوای اکسید پیپریتنون، محتوای نسبی آب، محتوای رنگ‌دانه و حداکثر عملکرد کوانتومی PSII (Fv/Fm) را کاهش داد. اما محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA) و فلاونوئید کل و فعالیت مهار رادیکال DPPH تحت شوری افزایش یافت. از سویی کاربرد GABA تا حدودی اثرات منفی تنش شوری را کاهش داد. بیش‌ترین تغییرات تحت سطوح بالاتر شوری (۱۵۰ میلی‌مولار) و GABA (۲/۴ میلی‌مولار) مشاهده شد. آنالیز PCA ۹۰/۵۸ درصد تغییرات را تحت

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

تأثیر سطوح مختلف تیمارها توجیه نمود. بر این اساس فعالیت DPPH، اکسید پیپریتنون و محتوای اسانس به ترتیب با گرادیان ۰/۹۴۱، ۰/۹۰۱ و ۰/۸۵۰به ترتیب بالاترین گرادیان را تحت تأثیر سطوح شوری و کاربرد GABA داشتند. همچنین تیمار NaCl(0)-GABA(0) و NaCl(0)-GABA(2.4) به ترتیب با طول گرادیان ۰/۷۵۴ و ۰/۷۶۱ مؤثرترین اثر ترکیبی را بر خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه داشتند. تنش شوری با ضرایب استانداردشده ۰/۰۰۸ و ۰/۸۳- به‌ترتیب حداقل و حداکثر تأثیر را بر محتوای فنل و زی‌توده ریشه داشته‌اند. کاربرد GABA نیز به‌ترتیب با ضرایب ۰/۰۰۳ و ۰/۲۷۴ حداقل و حداکثر تأثیر را بر محتوای فنل و زی‌توده هوایی داشته‌اند. به‌طورکلی، تنش بسیار شدید NaCl (یعنی بیش از ۱۲۰ میلی‌مولار) بالاتر از تحمل گیاه نعناع آناناسی بوده که کاهش شدید در مقدار و عملکرد ویژگی‌های مورد ارزیابی را موجب شد.

نتیجه‌گیری: تنش شوری کلیه خصوصیات عملکردی گونه نعناع آناناسی را تغییر داد. درواقع تنش اسمزی ایجادشده تحت تنش اعمال‌شده موجب تغییر در فرایندهای متابولیسمی گیاه شده که به‌منظور دفع اثر تنش و یا افزایش تحمل خود در مقابل تنش شوری، موجب تغییرات شده است. بر اساس مدل‌سازی صورت گرفته و با توجه به جنبه ارزش دارویی متابولیت‌های ثانویه گیاه نعناع آناناسی می‌توان با اعمال نمودن مقدار بهینه GABA در تنش‌های نه‌چندان شدید موجب حفظ و یا بهبود عملکرد دارویی گیاه شد. تحت تنش شدید شوری در (۱۲۰ تا ۱۵۰ میلی‌مولار) حفظ و یا بهبود عملکرد گیاه از طریق کاربرد GABA نتایج مطلوبی را نخواهد داشت.

استناد: مرشدلو، م.ر.، ح. فرهادی، ح. احمدی، ف. مگی، ۱۴۰۲. تعیین آستانه تحمل شوری گونه *Mentha suaveolens* Ehrh. تحت کاربرد گاما آمینو بوتیریک اسید (GABA). مرتع، ۱۷(۴): ۶۲۲-۶۳۹.

DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3

© نویسندگان

ناشر: انجمن علمی مرتعداری ایران

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

مقدمه

جنس نعناع (Mentha) از تیره Lamiaceae شامل بیش از ۶۰ گونه است که به‌طور گسترده در مناطق معتدل و نیمه معتدل جهان پراکنده‌شده‌اند (۱). گونه‌های جنس نعناع به‌عنوان گونه‌های دارویی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. متابولیت‌های ثانویه مانند اسانس از مهم‌ترین ترکیبات تولیدشده در این جنس هستند که از نظر اقتصادی اهمیت ویژه‌ای دارند.

در بین گونه‌های نعناع، گونه نعناع آناناسی با نام علمی *Mentha suaveolens* Ehrh. یکی از مهم‌ترین گونه‌های این جنس است که دارای برگ‌های انبوه و کرکی با حاشیه سفید است (۲). نعناع آناناسی عمدتاً در مراتع مرطوب رشد می‌کند و همچنین به‌عنوان یک گیاه زینتی معطر در زمین (مزرعه) و گاهی در سبدهای آویزان کاشته می‌شود. این گیاه دارویی عمدتاً به‌عنوان چاشنی مورد استفاده قرار می‌گیرد و در طب سنتی برای طیف وسیعی از اثرات دارویی استفاده می‌شود. اسانس نعناع آناناسی منبعی غنی از اکسید پیپریتنون، یک مونوترپن اکسیژن‌دار با طیف گسترده‌ای از اثرات مفید مانند ضد درد، ضد میکروبی و دافع حشرات است (۳). این گونه به‌دلیل ارزشمندی دارویی در برخی از رویشگاه‌های اصلی به شدت مورد بهره‌برداری و حتی در معرض انقراض و نابودی قرار دارد (۴). از سویی با بحران کمبود آب و افزایش شوری منابع آب‌وخاک، عملکرد اولیه و ثانویه گیاه تحت شرایط کشت نیز دچار تغییر و تحول شده است.

متابولیت‌های ثانویه در گونه‌های دارویی مختلف به‌طور قابل‌توجهی تحت تنش‌های محیطی متعددی کنترل، افزایش یا کاهش می‌یابند (۵ و ۶). جنبه معکوس این پدیده یکی از موانع اولیه تولید گیاهان دارویی با بازده بالا است (۷). بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه توسط عوامل مختلف مانند بیان ژن، آنزیم‌ها و انواع مختلف تنش‌های غیرزیستی تنظیم می‌شود که در نهایت یک مکانیسم دفاعی پیچیده را از طریق طیف گسترده‌ای از مولکول‌های سیگنال برای زنده ماندن در شرایط نامساعد ایجاد می‌کند که عملکرد گیاه را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد (۶ و ۸).

عموماً از بین تنش‌های غیرزیستی، شوری محیط چه به صورت طبیعی و چه به شکل یک فرآیند غیرطبیعی به یک بحران نگران‌کننده تبدیل‌شده که می‌تواند رشد گیاه را از طریق عدم تعادل یونی شدید، سمیت یونی (مقدار بیش‌ازحد سدیم و کلر)، انفجار اکسیداتیو، تخریب رنگ‌دانه‌ها، محدود کردن جذب دی‌اکسیدکربن، و مهار جذب K^+ به عنوان یک عنصر ضروری برای رشد گیاه تحت تأثیر قرار دهد (۹ و ۱۰). به همین دلیل تنش شوری شدیداً عملکرد گونه‌هایی مانند نعناع را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۴).

تنش‌های محیطی ساختار و کارایی فتوسیستم را از بین می‌برد و موجب کاهش شدید در حداکثر بازده و عملکرد گیاهان یا موجب تغییر آن می‌شود (۹). از سویی متابولیت‌های ثانویه گیاهان نیز ممکن است تحت تنش افزایش یابند (۷ و ۱۰). بااین‌حال امروزه به‌منظور کاهش خسارت ناشی از شوری از طریق محلول‌پاشی اسیدهای آمینه به روشی سریع و جایگزین برای جلوگیری از صدمات اسمزی از طریق تأمین کربن و نیتروژن کافی در هنگام مشکلات تغذیه‌ای گیاهان و همچنین با فعال کردن سیگنالینگ تبدیل‌شده است. مسیرها، انتقال یون و متابولیسم مربوطه اقدام شده است (۱۱).

گاما آمینو بوتیریک اسید (GABA)، یک اسیدآمینه غیر پروتئین‌زا بوده که دو مسیر متابولیکی اولیه کربن و نیتروژن را به هم مرتبط می‌کند و اعتقاد بر این است که به‌عنوان یک مولکول زیستی سیگنالینگ القاکننده تحمل در فرآیندهای فیزیولوژیکی مختلف عمل می‌کند (۱۲). کاربرد GABA تأثیرات فیزیوشیمیایی متعددی را در گیاهان موجب می‌شود (۱۳) که مقاومت گیاهان در برابر انواعی از تنش‌های محیطی را موجب می‌شود (۱۴). اثرات مینت این آمینواسید برای افزایش مقاومت برخی گیاهان در مقابل تنش شوری تا حدودی موردمطالعه قرارگرفته است (۱۵).

بر اساس تحقیقات صورت گرفته بهبود تحمل تنش در گیاهان با کاربرد GABA معمولاً با فعالیت بیشتر سیستم آنتی‌اکسیدانی، تجمع پرولین بالاتر به دلیل پیرولین، کربوکسیلات سنتتاز بالاتر و فعالیت کمتر پرولین

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

دهیدروژناز و تجمع بیشتر ترکیبات فنلی به دلیل نسبت فعالیت آنزیم فنیل‌آلانین آمونیاک-لیاز/پلی‌فنل‌اکسیداز بالاتر همراه بوده است (۹ و ۱۶).

با توجه به اینکه تجزیه تحلیل ارتباط بین عملکرد گیاهان و خصوصیات محیطی برای تعیین شرایط بهینه رویش گیاه در انتخاب محیط مناسب و بهبود عملکرد گیاهی مؤثر است (۸)، لذا روش‌های آماری مختلفی برای کاهش روابط اکولوژیکی و دسته‌بندی عوامل محیطی مؤثر بر عملکرد گیاهان می‌تواند مورداستفاده قرار بگیرد. به همین منظور در مطالعه حاضر، تأثیر غلظت‌های ۰ تا ۲/۴ میلی‌مولار GABA بر متابولیت‌های ثانویه و خصوصیات فیزیولوژیکی گونه نعناع آناناسی تحت سطوح شوری ۰ (آب خالص)، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl برای تعیین آستانه‌ها و شرایط بهینه رشد تحت تنش به کمک یکی از مدل‌های رسته‌بندی محدود مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

روش آزمایش

مطالعه حاضر تحت شرایط گلخانه در دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه انجام شد. برای انجام آزمایش از طریق تکثیر رویشی به‌عنوان اولین مرحله برای تضمین یکنواختی ژنتیکی مواد گیاهی اقدام شد. برای این منظور ریزوم گونه نعناع در سینی تکثیر حاوی محیط کوکوپیت-پرلیت ۵۰:۵۰ (v/v) کشت داده شدند. با توجه به ماهیت این مطالعه و آنالیز به روش رسته‌بندی، لذا تکرار تیمارها متغیر بوده که مجموعاً ۳۰ نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت. به عبارتی متناظر برای هریک از سطوح شوری، سطح مشخص شده از GABA مورد استفاده قرار گرفت که شش گلدان را شامل می‌شد. به همین ترتیب زمانی که نشاءها رشد مستقل نموده و به ارتفاع ۱۰سانتی‌متر رسیدند، به ۳۰ گلدان ۱۰ لیتری حاوی خاک، ماسه و کودبرگ به نسبت‌های ۲، ۱ و ۱، منتقل شدند. با توجه به درصد اجزای خاک، بافت نهایی خاک در گلدان‌ها لوم شنی تعیین گردید. همچنین مقادیر pH، کربن آلی، نیتروژن، پتاسیم، فسفر و کربنات کلسیم خاک گلدان‌ها به‌ترتیب معادل ۷/۵، ۱۸/۷درصد، ۵۰/۷۰، ۴۲/۷۱، ۳۵/۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۲۵/۶۲ درصد بود.

اعمال تیمارهای آزمایش

یک ماه پس از کاشت، گیاهان در معرض ۵ سطح مختلف تنش شوری شامل شاهد (آب خالص)، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ و ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl قرار گرفتند. برای این منظور نمک طعام با درجه خلوص ۹۹/۵ درصد (MERK) استفاده شد. برای جلوگیری از شوک اسمزی، تیمار NaCl با محلول ۲۰ میلی مولار NaCl آغاز شد و سپس غلظت‌ها به‌تدریج (هر دو روز) افزایش یافت تا به حداکثر مقادیر رسید. آبیاری گلدان‌ها با محلول هر ۳ روز یک‌بار انجام شد. شرایط گلخانه دارای دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، دوره نوری ۱۶ ساعت و رطوبت نسبی ۸۰ درصد بود.

مقدار موردنیاز GABA از شرکت Sigma-Aldrich خریداری شد. محلول‌پاشی پنج روز قبل از تیمارهای شوری شروع شد و درمجموع پنج غلظت مختلف (شاهد، ۰/۸، ۱/۲، ۱/۶ و ۲/۴ میلی‌مولار) اعمال شد. اعمال تیمارها به این شکل بود که هر یک از سطوح GABA با تمام سطوح شوری تلفیق شد که نهایتاً ۳۰ نمونه به دست آمد. تیمارهای شاهد تحت محلول‌پاشی آب مقطر قرار گرفتند. هر گلدان در هفته با ۰/۵ لیتر آب خالص (مقطر) آبیاری شد تا از تجمع بیش‌ازحد مواد معدنی نمک جلوگیری شود. این امر به منظور جلوگیری از خطا، برای تمام نمونه‌ها انجام شد. برای جلوگیری از کمبود مواد مغذی، تمام گیاهان درون گلدان‌ها با محلول هوگلند با قدرت یک‌چهارم هر دو هفته یک‌بار و در طول فصل رشد تغذیه شدند (۱۷). در نهایت، اجزای گیاهی موردنیاز در دمای منفی ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای آنالیزهای بیوشیمیایی بعدی نگهداری شدند و مواد گیاهی باقیمانده برای ارزیابی اسانس و پلی‌فنل کل در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد در آون خشک شدند.

ارزیابی خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه

محتوای نسبی آب و وزن خشک

در مرحله رشد کامل (زمان گل‌دهی)، تمام قسمت‌های گیاه به‌طور کامل برداشت شد. اجزای ریشه و اندام هوایی به‌صورت مجزا خشک و وزن شدند. برای

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

اندازه‌گیری تغییرات محتوای نسبی آب برگ (RWC) در پاسخ به تیمارهای تنش شوری، وزن تازه و وزن خشک نمونه اندام گیاهان که به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داشتند محاسبه و محتوای نسبی آب تعیین شد. با توجه به اینکه ماهیت آزمایش به شکل رسته‌بندی و شامل اثرات ترکیبی سطوح صفر تا سطوح حداکثر تیمارها بود، لذا ارزیابی برای تمام ۳۰ نمونه انجام شد.

محتوای پرولین و مالون‌دی‌آلدئید (MDA)

محتوای پرولین برگ‌های تازه با استفاده از یک معرف نین‌هیدرین برآورد شد. به دنبال این روش، محتوای پرولین کل از فاز تولوئن استخراج و برای اندازه‌گیری‌های اسپکتروفتومتری (مدل UV/Vis1800) در صفحه کوارتز ۹۶ چاهی آماده شد (۱۸). درنهایت اندازه‌گیری‌ها توسط صفحه خوان در طول‌موج ۵۲۰ نانومتر انجام شد. محتوای کل پرولین به‌صورت میکرومول پرولین در ۱ گرم وزن تازه بیان شد. همچنین محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA) به‌عنوان شاخص یکپارچگی غشاء در برگ‌های تازه بر اساس روش پیشنهادی پیشین تعیین شد. بر این اساس، از معرف تیوباربیتوریک اسید (TBA) برای جذب ترکیب اضافی MDA-TBA در طول‌موج‌های ۵۳۲ و ۶۰۰ نانومتر استفاده شد (۱۹).

محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدها، فلوئورسانس کلروفیل

مقدار کلروفیل a، کلروفیل b و کاروتنوئید کل به روش Porra صورت گرفت (۲۰) . برای این منظور، ۰/۲گرم نمونه برگ تازه در ۱۰ میلی‌لیتر محلول استون ۸۰ درصد ساییده شد و نمونه‌ها به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شدند. طیف جذبی عصاره‌های رنگ‌دانه در ۶۶۳، ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر ثبت شد و محتویات کل با استفاده از معادلات مربوطه محاسبه شدند. همچنین فلوئورسانس کلروفیل (F0، Fm، Fv، Fv/F0، و Fv/Fm) با استفاده از دستگاه فلوئورسانس‌سنج کلروفیل قابل‌حمل (Pam 2500-Walz، آلمان) بین ساعت ۹ تا ۱۱ صبح ثبت شد.

محتوای کل فنل‌ها و فلاونوئیدها

۰/۲ گرم از برگ‌های خشک پودر شده را با ۱۰ میلی‌لیتر متانول ۸۰ درصد مخلوط کرد. پروتکل با تکان دادن نمونه‌ها در ۲۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۲ ساعت تکمیل شد. پس از سانتریفیوژ، مواد رویی جدا شدند و سپس باقیمانده‌ها برای بار دوم به مدت ۲۴ ساعت مجدداً استخراج شدند. محتوای کل پلی فنل با استفاده از معرف ۱۰ برابر رقیق‌شده Folin-Ciocalteu و محلول ۳ درصد NaHCO3 اندازه‌گیری شد. مقادیر جذب در طول‌موج ۷۶۵ نانومتر ثبت شد. محتوای کل پلی‌فنل در میلی‌گرم معادل اسید گالیک (GAE) به ازای هر گرم وزن خشک‌شده بیان شد (۲۱). محتوای کل فلاونوئیدها با استفاده از واکنش AlCl3 و با خواندن جذب نمونه‌ها در طول‌موج ۴۱۵ نانومتر ادامه یافت. کل فلاونوئیدهای نمونه‌ها با استفاده از منحنی کالیبراسیون رسم شده کوئرستین درنهایت اندازه‌گیری شدند.

فعالیت مهار رادیکال DPPH

تعیین فعالیت مهار رادیکال آزاد ۲،۲-دی فنیل-۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) عصاره‌های هیدروالکلی با استفاده از روش Morshedloo و همکاران (۲۲). در این سنجش آنتی‌اکسیدانی، عصاره‌ها با محلول متانولی ۰/۳ میلی مولار DPPH به مدت ۳۰ دقیقه در یک اتاق تاریک مخلوط شدند. جذب نمونه‌های موردبررسی در طول‌موج ۵۱۷ نانومتر خوانده شد. مقادیر تجربی برحسب درصد مهار رادیکال‌های DPPH محاسبه شد.

محتوای اسانس

قسمت‌های هوایی گل‌دار هر گیاه تحت فرآیند استخراج اسانس قرار گرفت. بدین منظور ۵۰ گرم از مخلوط خشک‌شده گل و برگ با استفاده از دستگاه کلونجر به مدت ۳ ساعت با آب تقطیر شد. آب اضافی از نمونه‌های اسانس با استفاده از سولفات سدیم بی‌آب حذف شد. آنالیز GC-MS با استفاده از کروماتوگرافی گازی همراه با طیف‌سنج جرمی مطابق روش‌های پیشین انجام شد (۲۳). کروماتوگراف گازی با یک ستون مویین HP-5 MS درصد فنیل متیل پلی سیلوکسان، ۳۰ متر طول، ۰/۲۵ میلی‌متر قطر داخلی و ۰/۱ میکرومتر ضخامت (flm) مجهز شد. دمای آون به

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

صورت زیر برنامه‌ریزی شد: ۵ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، متعاقباً دما با نرخ ۳ درجه سانتی‌گراد در دقیقه تا ۱۸۰ درجه سانتی گراد افزایش پیدا کرد و سپس به مدت ۲ دقیقه در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد توقف داشت. همچنین دمای انژکتور و خط انتقال به ترتیب ۲۳۰ و ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. هلیوم به‌عنوان گاز حامل با نرخ ۱ میلی‌لیتر در دقیقه استفاده شد. طیف‌ها در محدوده جذب جرمی ۴۰-۴۰۰ m/z اسکن شد. کمّی کردن ترکیب اسانس با استفاده از نرمال‌سازی سطح پیک و بدون استفاده از ضرایب اصالح انجام شد (۲۴).

آنالیز داده‌ها

ابتدا آزمون کلموگروف- اسمیرنوف برای بررسی نرمال بودن داده‌ها مورداستفاده قرار گرفت. پس از تائید همگنی واریانس داده‌ها، آنالیز واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) در SPSS انجام شد. همچنین به‌منظور رسته‌بندی داده‌ها، طول گرادیان به روش DCA کمتر از ۳ به دست آمد، لذا تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های رسته‌بندی برای خلاصه‌سازی ارتباطات خصوصیات مورد ارزیابی تحت تیمارهای GABA و NaCl انجام شد.

نتایج

ارزیابی خصوصیات فیزیولوژی گونه نعناع تحت تأثیر کاربر سطوح GABA و تنش شوری نشان داد که تقریباً تمام فاکتورهای مورد ارزیابی تغییرات معناداری را داشته‌اند. در اغلب موارد اثر شوری (سطوح مختلف شوری و سطح GABA۰) بیشتر از اثرات GABA خصوصیات مورد ارزیابی از جمله محتوای کلروفیل a و b را به شکل معناداری دچار تغییر نموده است ($P<0.05$). اثرات ترکیبی سطوح تیمارهای مورداستفاده بر برخی خصوصیات ازجمله کاروتنوئیدها و نسبت Fv/Fm علی‌رغم تفاوت اما معنادار نبود. در جدول ۱، با در نظر گرفتن سطوح صفر تیمارهای مورد استفاده، و نیز اثرات سطوح مختلف (غیر صفر) ترکیبی GABA و تنش شوری، تغییرات ویژگی‌های مورد ارزیابی نشان داد شده است.

جدول ۱: تجزیه واریانس (میانگین مربعات و آماره F) صفات موردبررسی با کاربرد گاما آمینو بوتیریک اسید تحت سطوح تنش شوری

منبع تغیر	NaCl		GABA		GABA*NaCl	
	Mean squares	F	Mean squares	F	Mean squares	F
محتوای کل فلاونوئیدها (mg GAE g^{-1} DW)	۳۴۶/۴۳۵	۱۱/۲۸**	۱۴۳/۳۴۲	۹/۲۸**	۳۳/۴۱۴	۶/۴*
محتوای کل فنل‌ها (mg QE g^{-1} DW)	۱۴۵۸/۱۲۵	۸/۲۴**	۱۳۷۴/۵۷۲	۷/۱۲**	۷۵۲/۴۲۵	۶/۱*
فعالیت مهار رادیکال DPPH (%)	۵۸۵/۲۱۳	۸/۶۸**	۴۸۸/۴۳۲	۸/۴۵**	۳۶۶/۷۳۴	۷.۲*
محتوای پرولین (mg g^{-1} FW)	۱۹/۴۰۴	۵/۱۰*	۱۶/۳۲۶	۴/۲۰*	۳/۱۰۲	۱/۴ns
محتوای مالون‌دی‌آلدئید (MDA) (mg g^{-1} FW)	۱۳۸/۲۰۵	۷/۱۱**	۱۳۲/۴۱۱	۶/۷۵**	۷۸/۸۱۴	۵/۱۵*
کاروتنوئیدها (mg g^{-1} FW)	۰/۲۲۴	۵/۷۴*	۰/۰۲۱	۱/۱ns	۰/۱۲۲	۰/۷۸ns
محتوای کلروفیل a (mg g^{-1} FW)	۱۶/۱۱۱	**۱۲/۱۲	۹/۲۷۱	۶/۴۴*	۶/۲۲۴	۵/۱۳*
محتوای کلروفیل b (mg g^{-1} FW)	۱۱/۱۲۲	**۱۰/۴۴	۸/۳۴۲	۵/۸۸*	۵/۰۳۱	۵/۱۲*
نسبتFv/Fm	۰/۵۳۶	۵/۲۱*	۰/۱۱۱	۰/۸۲ns	۰/۲۳۳	۰/۴۸ns
محتوای اسانس (%)	۰/۷۵۴	**۱۱/۰۲	۰/۳۴۴**	**۸/۸۵	۰/۲۲۲	۴/۳۲*
محتوای اکسید پیپریتنون (%)	۱۵۵/۴۳۲	۵/۳۰*	۷۷/۳۵۲**	**۷/۷۶	۴۱/۳۴۲	۴/۴۵*
محتوای نسبی آب برگ (RWC) (%)	۱۸۵۱/۱۳۲	۵/۱۲*	۸۵۲/۳۵۲*	۵/۴۲*	۱۴۳/۲۲۱	۱/۱۱ns
وزن خشک اندام هوایی (g)	۴۲۵/۱۴۵	**۱۸/۴۱	۲۸۵/۴۴۵**	**۱۶/۲۴	۳۰۱/۱۳۴	۸/۴۲**
وزن خشک اندام ریشه (g)	۲۸۵/۴۳۵	**۱۷/۴۲	۱۴۵/۲۳۴**	**۱۳/۷۴	۱۰۵/۴۲۲	۹/۱۲**

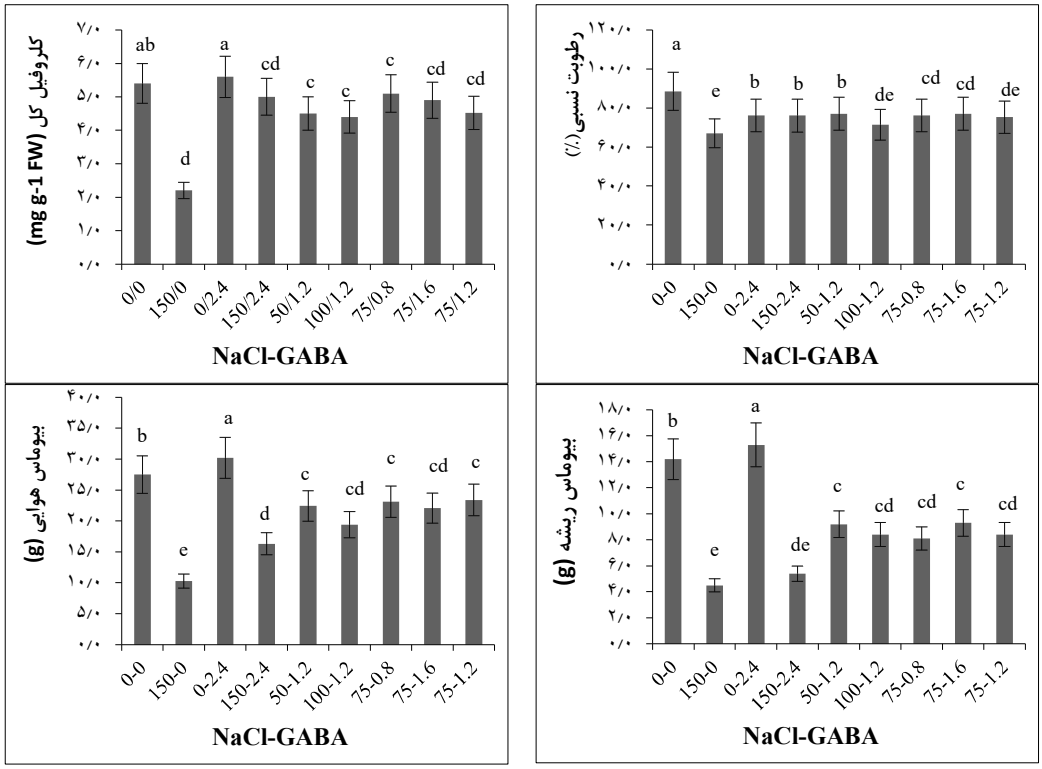
**: وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۱٪، *: وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪، ns: عدم معنی‌داری

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

محتوای کلروفیل، رطوبت نسبی و زی‌توده

سطوح تنش شوری به‌شدت موجب تغییر و کاهش میزان کلروفیل (a و b) در گیاه نعناع شد. این تغییرات در حدود ۶۰ درصد ارزیابی شد. از طرفی اثر GABA بر گیاه تحت تنش تا حدودی موجب بهبود عملکرد و افزایش کلروفیل برگ‌ها شده است. از سویی نتایج مقایسه میانگین نشان داد که محتوای نسبی آب اندام‌های هوایی گیاه تحت تنش شوری کاهش یافت. که روند تغییر این صفات را تحت تنش شوری همراه با کاربرد GABA نشان می‌دهد. به‌طورکلی اثرات کاربرد GABA بر محتوای نسبی آب گیاه ناچیز ارزیابی شد. همچنین میانگین وزن خشک اندام هوایی و ریشه نیز نشان می‌دهد که اثر GABA و تنش شوری در سطح ۱ درصد برای وزن خشک اندام هوایی معنی‌دار بود، درحالی‌که تنها تنش شوری به‌طور معنی‌داری (P<۰/۰۱) بر زی‌توده گیاه تأثیر گذاشت. تنش شوری در سطح ۱۵۰ میلی‌مولار وزن اندام هوایی و خشک ریشه را به ترتیب ۱۷۰ و ۲۲۰ درصد در مقایسه با شاهد کاهش شدیدی داد. مطابق نتایج، بیش‌ترین وزن خشک اندام هوایی (۱/۵۶ ± ۳۰/۳۳ گرم) و ریشه (۲/۶۰ ± ۱۵/۴۵ گرم) تحت غلظت ۲/۴ میلی‌مولار GABA بدون کاربرد نمک طعام به دست آمد (شکل ۱).



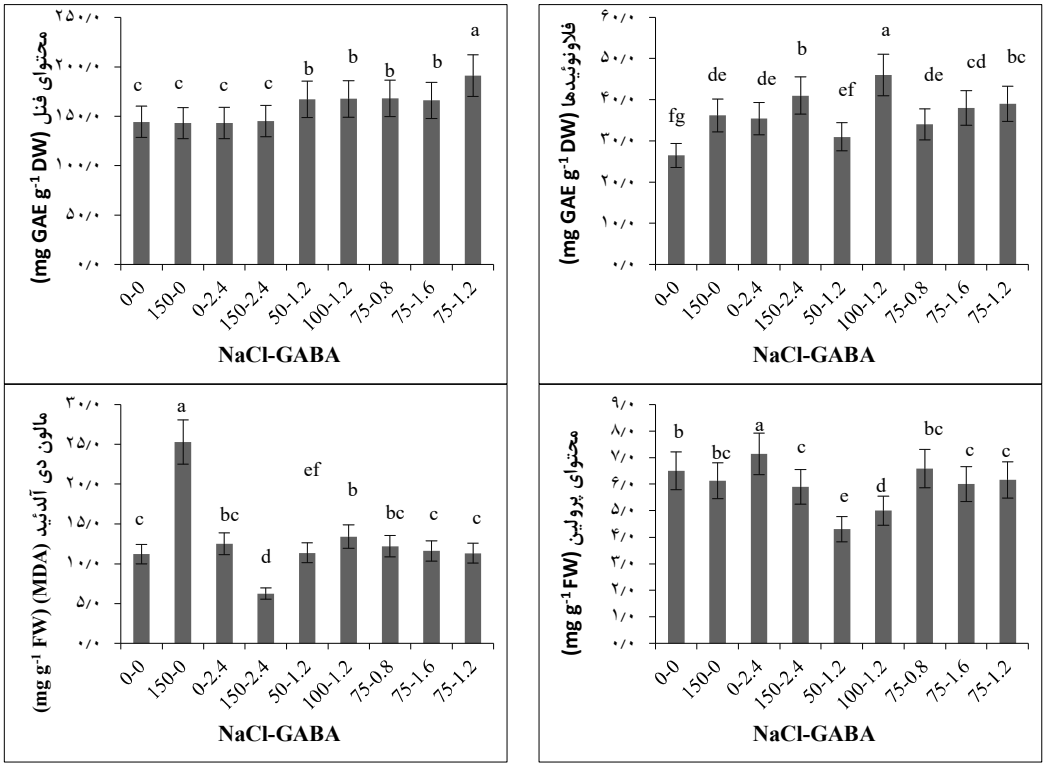
شکل ۱: تغییر زی‌توده، محتوای کلروفیل و رطوبت نسبی اندام گیاه با کاربرد گاما آمینو بوتیریک اسید تحت سطوح تنش شوری

محتوای فنل‌ها و فلاونوئیدها، مالون‌دی‌آلدئید و پرولین

مقادیر به‌دست‌آمده برای محتوای پلی‌فنل کل، محتوای فلاونوئید کل، مالون‌دی‌آلدئید و پرولین تحت تأثیر کاربرد GABA و تنش شوری هر دو اثر ساده در سطح ۱ درصد خطا معنی‌دار بودند. محتوای پرولین با افزایش غلظت شوری کاهش‌یافته است (P<۰/۰۱). در مقایسه با شاهد، تنش ۱۵۰ میلی‌مولار به‌طور قابل‌توجهی محتوای فنل‌ها و فلاونوئیدها، مالون‌دی‌آلدئید و پرولین ۷۶، ۱۴، ۱۱۵ و ۲۳ درصد تغییر نموده است. محتوای MDA تحت یک تیمار ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl به بالاترین مقدار (۲۵/۳۷) در

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]
[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

مقایسه با شاهد (۱۱/۲۷) رسید. در شرایط عادی، محلول‌پاشی GABA در ۲/۴ میلی‌مولار تأثیر معنی‌داری بر محتوای MDA نداشت. کاربرد GABA کمترین مقدار MDA را در بالاترین مقدار خود (۲/۴ میلی‌مولار) تحت شدیدترین سطح تنش شوری (۱۵۰ میلی‌مولار) نشان داد.



شکل ۲: تغییرات محتوای فلاونوئیدها، فنل، پرولین و مالون‌دی‌آلدئید با کاربرد گاما آمینو بوتیریک اسید تحت سطوح تنش شوری

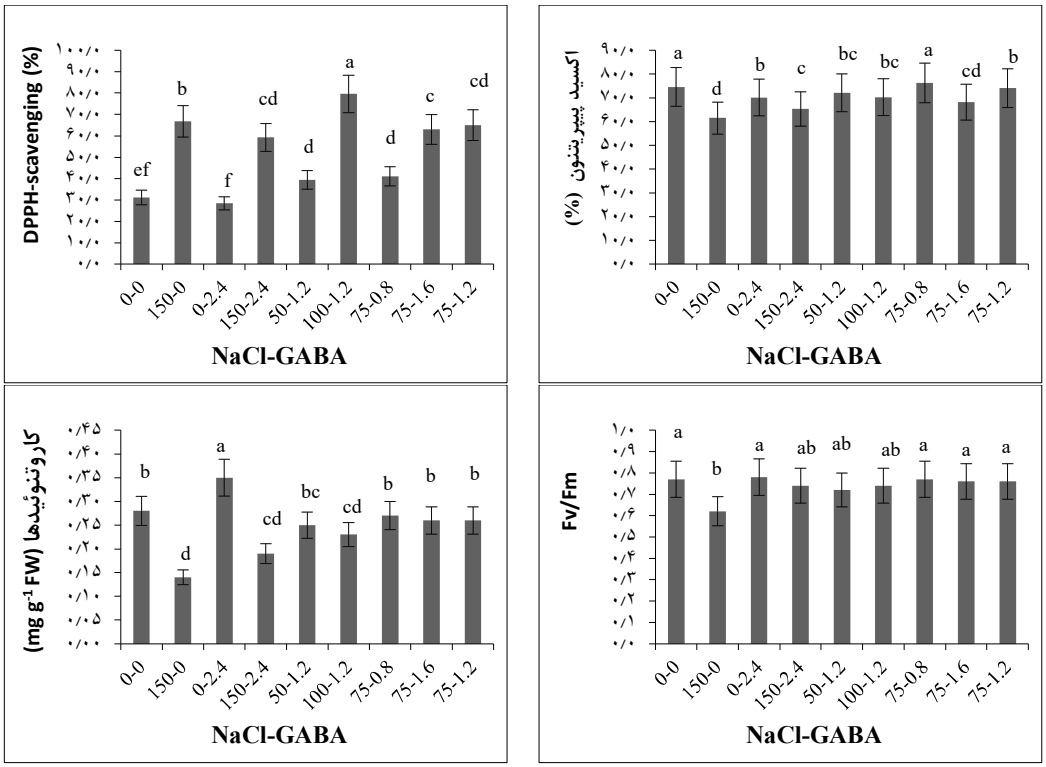
محتوای پیپریتنون، کاروتنوئیدها، فعالیت مهار رادیکال DPPH، Fv/Fm

بر اساس نتایج NaCl و GABA به‌طور قابل‌توجهی بر متغیر اکسید پیپریتنون (P<۰/۰۱) تأثیر گذاشت (شکل ۳). بر اساس نتایج محتوای اکسید پیپریتنون تحت تنش‌های شدید شوری (تحت غلظت‌های بیش از ۱۲۰ میلی‌مولار NaCl) به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که اعمال GABA (تا ۰/۸ میلی‌مولار) تحت تنش‌های شوری متوسط (۶۰ تا ۹۰ میلی‌مولار) می‌تواند محتوای اکسید پیپریتنون بالایی داشته باشد. تحت تنش ۱۵۰ میلی‌مولار NaCl مقدار اسانس (۰/۱۸) سه برابر بیشتر از شاهد (۰/۰۶) بود. در تنش شدید شوری (۱۵۰ میلی‌مولار) کمترین محتوای پیپریتنون یعنی ۲۰ درصد کاهش (۳/۷ ± ۶۱/۱۷ درصد) را در مقایسه با شاهد به همراه داشت. محلول‌پاشی GABA باعث تولید اسانس و جزء اصلی آن (یعنی اکسید پیپریتنون) شد. تحت تنش ۷۵ میلی‌مولار NaCl، کاربرد GABA در ۰/۸ میلی‌مولار بالاترین مقدار اکسید اسانس و پیپریتنون را به همراه داشت.

داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری محتوای کاروتنوئیدها و حداکثر بازده کوانتومی PSII (نسبت Fv/Fm) اثرات معنادار تنش شوری و تأثیر کاربرد GABA را نشان داد. شدیدترین تنش شوری (۱۵۰ میلی‌مولار) مقدار کلروفیل a، کلروفیل b، کاروتنوئیدها و حداکثر بازده

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]
[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

کوانتومی PSII را به ترتیب حدود ۶۴، ۵۰، ۵۷ و ۲۰ درصد کاهش داد. بدون در نظر گرفتن تیمار شاهد، بیش‌ترین مقادیر این صفات با اعمال ۲/۴ میلی‌مولار GABA در شرایط بدون تنش به دست آمد (شکل ۳).

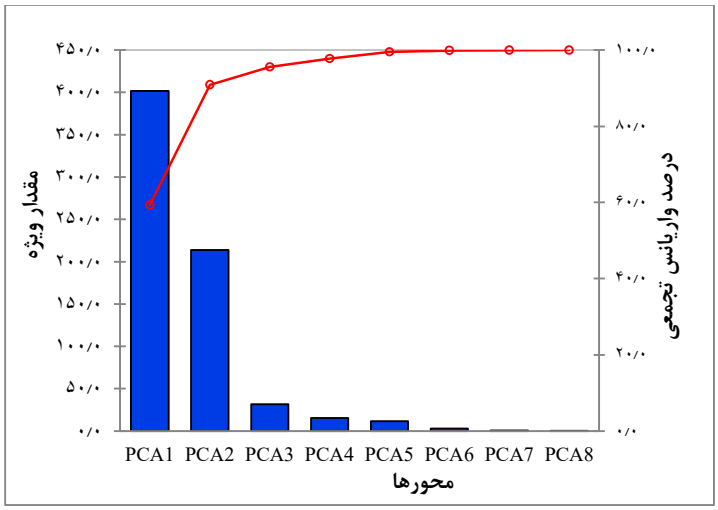


شکل ۳: تغییرات محتوای اکسید پیپریتنون، مهار DPPH، کاروتنوئیدها و نسبت Fv/Fm با کاربرد گاما آمینو بوتیریک اسید تحت سطوح تنش شوری

ارزیابی و مدل‌سازی پارامترهای فیزیولوژیکی و متابولیت‌های ثانویه گیاه تحت تأثیر تنش شوری و با کاربرد سطوح مختلف نشان داد که تغییرات اتفاق افتاده دارای ارتباط ویژه با تیمارها بوده به طوریکه بیش‌ترین مقدار واریانس تجمعی (بیش از ۹۰ درصد تغییرت را توجیه می‌کند) مربوط به محور اول و دوم حاصل از آنالیز PCA مشاهده شد (شکل ۴). خصوصیات قرارگرفته در دو محور اول به همراه طول گرادیان مربوطه در جدول ۲ در ادامه ارائه‌شده است.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]



شکل ۴: مقادیر ویژه و درصد واریانس تجمعی برای محورهای اصل از آنالیز PCA در رابطه با فاکتورهای مورد ارزیابی

جدول زیر مقادیر ویژه صفات موردبررسی تحت شرایط سطوح تنش شوری و گاما آمینو بوتیریک اسید در آنالیز PCA در محورهای مربوطه نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن مقدار ویژه ۰/۶ به‌عنوان مبنا، خصوصیاتی از قبیل کل فلاونوئیدها، کل فنل‌ها، فعالیت DPPH، محتوای کلروفیل b، محتوای کل کلروفیل، محتوای اسانس و محتوای رطوبت برگ به ترتیب با ضریب ۰/۷۶۲، ۰/۶۴۵، ۰/۹۴۱، ۰/۶۱۲، ۰/۶۱۳ ، ۰/۸۵۰ و ۰/۶۴۲ دارای بیش‌ترین گرادیان در محور ۱ هستند. همچنین تنش شوری ۰ – GABA ۰ و نیز شوری ۰–GABA ۲/۴ با ضرایب ۰/۷۵۴ و ۰/۷۶۵ بالاترین گرادیان در محور اول را دارند. به همین ترتیب برخی خصوصیات و تیمارها در محور دوم گرادیان بالاتری را نشان دادند (جدول ۲).

جدول ۲: مقادیر ویژه صفات موردبررسی تحت شرایط سطوح تنش شوری و گاما آمینو بوتیریک اسید در آنالیز PCA

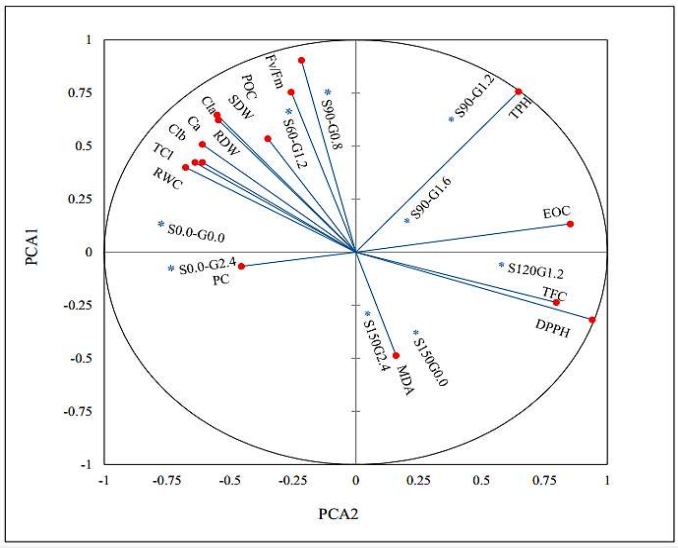
متغیر	اختصار	PCA1	PCA2	PCA3	متغیر	اختصار	PCA1	PCA2	PCA3
کل فلاونوئیدها	TFC	۰/۷۶۲	-۰/۲۳۴	-۰/۳۵۲	اکسید پیپریتنون	POC	-۰/۲۱۱	۰/۹۰۱۱	-۰/۱۳۱
کل فنل‌ها	TPh	۰/۶۴۵	۰/۷۵۷	۰/۰۷۹	آب نسبی برگ	RWC	-۰/۶۴۲	۰/۴۲۵	-۰/۴۰۱
فعالیت DPPH	DPPH	۰/۹۴۱	-۰/۳۱۸	۰/۹۳۱	وزن خشک ساقه	ShDW	-۰/۵۵۲	۰/۶۷۱	-۰/۳۷۱
محتوای پرولین	PC	-۰/۴۵۵	-۰/۱۶۷	-۰/۰۸۶	شوری ۰- GABA ۰	S0 G0	-۰/۷۵۴	۰/۱۳۲	-۰/۲۳۵
مالون‌دی‌آلدئید	MDA	۰/۱۹۵	-۰/۴۸۱	۰/۷۴۲	شوری ۰- GABA ۰	S150 G0	۰/۲۴۱	-۰/۲۴۵	۰/۳۵۲
کاروتنوئیدها	Ca	-۰/۴۱۲	۰/۵۲۱	-۰/۴۱۲	شوری ۰- GABA ۲/۴	S0 G2.4	-۰/۷۶۵	-۰/۰۷۵	۰/۲۱۴
محتوای کلروفیل a	Cla	-۰/۴۱۲	۰/۵۳۴	-۰/۷۳۴	شوری ۱۵۰- GABA ۲/۴	S150 G2.4	۰/۰۱۵	-۰/۲۶۱	۰/۴۵۱
محتوای کلروفیل b	Clb	-۰/۶۱۲	۰/۴۲۱	-۰/۶۴۵	شوری ۶۰- GABA ۱/۲	S60 G1.2	-۰/۲۶۱	۰/۶۴۲	۰/۳۱۲
محتوای کل کلروفیل	TCl	-۰/۶۱۳	۰/۵۰۲	-۰/۴۰۵	شوری ۱۲۰- GABA ۱/۲	S120 G1.2	۰/۵۵۱	-۰/۰۲۴	۰/۴۱۲
نسبتFv/Fm	Fv/Fm	-۰/۲۵۴	۰/۷۳۲	-۰/۵۶۳۶	شوری ۹۰- GABA ۰/۸	S90 G0.8	-۰/۴۸۱	۰/۶۳۱	-۰/۱۲۴
وزن خشک ریشه	RDW	-۰/۴۸۴	۰/۶۰۳	-۰/۲۹۱	شوری ۹۰- GABA ۱/۶	S90 G1.6	۰/۲۳۱	۰/۲۲۱	۰/۲۴۵
محتوای اسانس	EOC	۰/۸۵۰	۰/۱۳۲	-۰/۳۹۲	شوری ۹۰- GABA ۱/۲	S90 G1.2	۰/۲۸۱	۰/۶۶۲	۰/۳۵۶

شکل (۴) نمودار دوبعدی PCA فاکتورهای مورد ارزیابی و متابولیت‌های ثانویه گیاه نعناع آناناسی را در ارتباط با سطوح مورداستفاده GABA و تنش شوری نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تغییر برخی از فاکتورهای مورد

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

ارزیابی با تیمارهای مورداستفاده دارای ارتباط بوده به طوریکه برای مثال طول گرادیان و مختصات فضایی کل محتوای فنل (TPh) با شوری ۹۰ میلی‌مولار GABA-۱/۲ (S90 G1.6) در یک گروه قرار می‌گیرند.

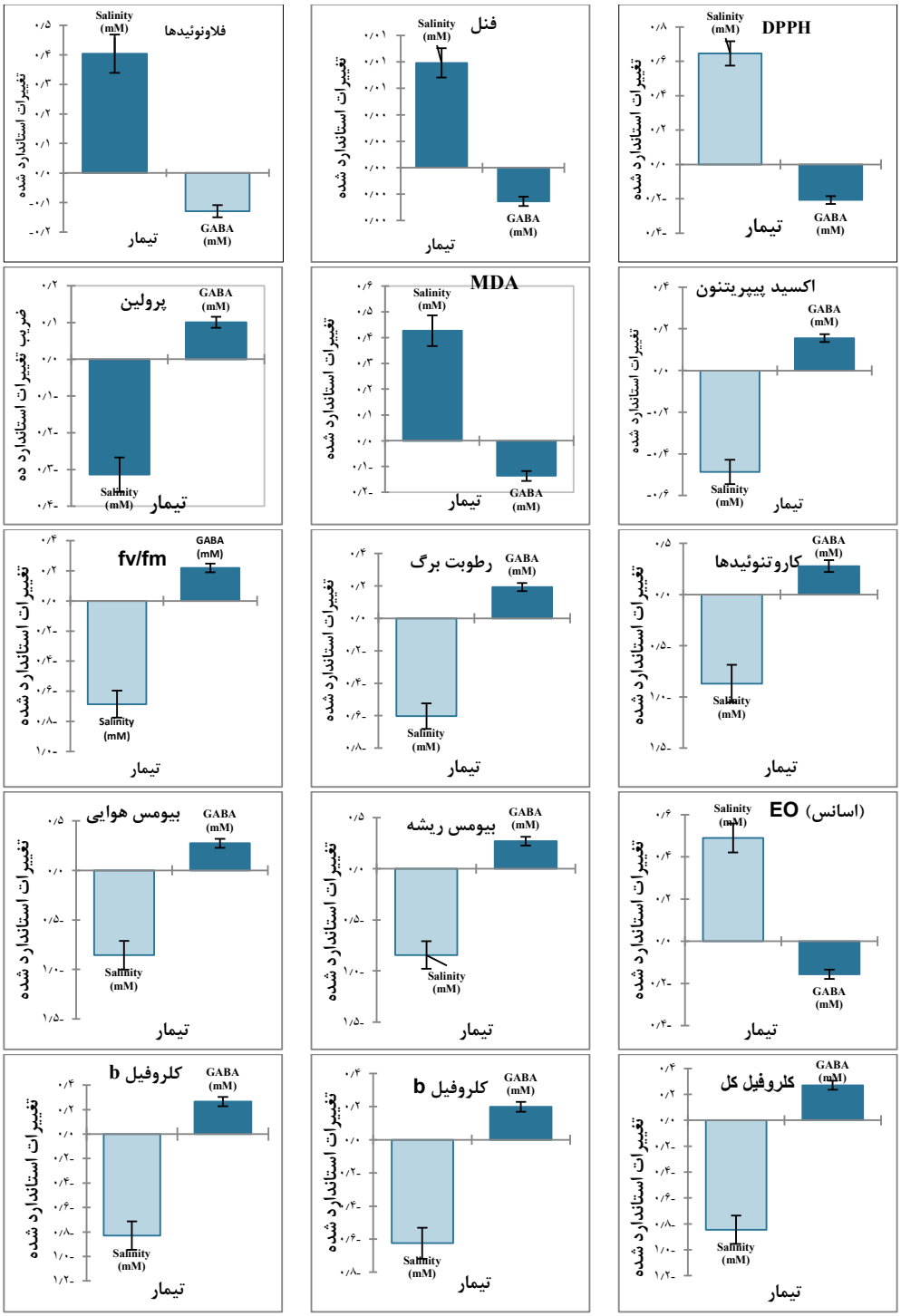


شکل ۴: توزیع فضایی فاکتورهای فیزیولوژیکی گیاه در ارتباط با سطوح مورداستفاده گاما آمینو بوتیریک اسید و تنش شوری

TFC= Total flavonoids content, TPH= Total phenols content, DPPH= DPPH-scavenging, P= Proline, RWC= Relative water)
MDA, Cla= Chlorophyll a content, Clb= Chlorophyll b content, Ca= Carotenoids, Fv/Fm ratio, SDW= Shoot dry weight, content, RDW= Root dry weight, EOC= Essential oils content, POC= Piperitenone oxide content, TCl= Total Chlorophyll).

شکل زیر بیشینه اثر مثبت یا منفی سطوح مورداستفاده GABA و تنش شوری را بر عامل‌های فیزیولوژیکی و متابولیت‌های ثانویه گیاه نشان می‌دهد. تنش شوری با ضرایب ۰/۰۰۸ و ۰/۸۳- به ترتیب حداقل و حداکثر تأثیر را بر محتوای فنل و زی‌توده ریشه داشته‌اند. کاربرد GABA نیز به ترتیب با ضرایب ۰/۰۰۳ و ۰/۲۷۴ حداقل و حداکثر تأثیر را بر محتوای فنل و زی‌توده هوایی داشته‌اند. به‌طورکلی تأثیرات گاما آمینو بوتیریک اسید و تنش شوری کاملاً معکوس یکدیگر بوده است (شکل ۵).

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]
[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]



شکل ۵: میزان تغییرات خصوصیات مورد ارزیابی در ارتباط با سطوح مورداستفاده گاما آمینو بوتیریک اسید و تنش شوری

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

بحث و نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج و کاهش شدید عملکرد زی‌توده هوایی و ریشه، تنش بسیار شدید شوری (یعنی بیش از ۹۰ میلی‌مولار) فراتر از آستانه تحمل شوری نعناع بود. بااین‌حال، در شرایط شوری متوسط (یعنی ۳۰ تا ۹۰ میلی‌مولار)، اکثر شاخص‌های مرتبط با تنش (کل پلی‌فنل‌ها، کل فلاونوئید، مهار رادیکال DPPH، محتوای نسبی آب، محتوای پرولین، محتوای رنگ‌دانه‌ها و حداکثر بازده کوانتومی PSII) به مقدار قابل‌توجهی تغییر نمودند. همچنین اثرات تنش شوری با استفاده هم‌زمان از سطوح میانی GABA (یعنی ۰/۸-۱/۶ میلی‌مولار) کاهش یافت. تجزیه‌وتحلیل بهینه‌سازی پیش‌بینی کرد که در زیر ۱۲۰ میلی‌مولار یا سطوح پایین‌تر تنش NaCl، استفاده از محلول رقیق GABA (یعنی ۰/۱-۰/۲ میلی‌مولار) تأثیر مثبتی بر وزن خشک شاخه، محتوای اسانس و مقدار اکسید پیپریتنون برای به دست آوردن بالاترین مقدار دارد.

پرولین تحت تنش تغییرات معنی‌داری را نشان داد. پرولین یک ایمینواسید سازگار است و به عنوان یک مخزن نیتروژن در سلول‌های گیاهی تحت تنش‌های محیطی عمل می‌کند (۲۵). درواقع پرولین انباشته‌شده تحت شوری به بازیابی آسیب‌های اکسیداتیو ناشی از استرس از طریق خاموش کردن کارآمد ROS و تنظیم ردوکس کمک می‌کند (۲۵، ۲۶). این تغییر پرولین در مطالعات پیشین نیز گزارش‌شده است (۱۴).

کلروفیل یک پیش‌نیاز برای فرایندهای فتوسنتزی است و کاهش تولید رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و کاهش ظرفیت آن‌ها یک عامل تعیین‌کننده برای کاهش رشد گیاه در هنگام قرار گرفتن در معرض تنش‌های محیطی است (۲۷). محتوای کلروفیل بیشتر گیاهان را قادر می‌سازد تا تحت منبع محدود نور ظرفیت فتوسنتزی را بهبود بخشند (۱۱). بنابراین کاربرد GABA می‌تواند کاهش سطح کلروفیل را تحت تنش NaCl به تأخیر بیندازد. در مقابل، تحقیقات دیگری نشان داد که تحت شرایط نرمال بدون تنش، کاربرد GABA تغییر شکل از کلروفیل a به کلروفیل b را محدود می‌کند که این امر منجر به تغییر در نسبت محتوای این دو کلروفیل شده و نهایتاً فتوسنتز را متحول می‌کند (۹).

از سویی محتوای کلروفیل به‌شدت تحت تنش شوری-قلیایی کاهش می‌یابد، درحالی‌که پیش تیمار GABA این روند را معکوس کرد و الگوهای بیان ژن مرتبط را کاهش می‌دهد و تجمع بیش‌ازحد کلروفیل و پیش سازهای آن تحت تنش شوری ممکن است باعث آسیب اکسیداسیون نوری شود که درنهایت می‌تواند باعث آسیب غشاء شود (۹). تحت تنش شوری، پروتئین‌های فتوسیستم دناتوره می‌شوند، زنجیره انتقال الکترون مختل می‌شود و بنابراین عدم تعادل ردوکس را می‌توان به وفور یافت (۲۸). چنین می‌توان استنباط کرد که با افزایش ارزش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی Fv/Fm، مقدار بیشتری از زی‌توده تولید می‌شود. این یافته‌ها با نتایج گزارش‌شده پیشین مطابقت کامل دارد چنانچه سلامت سیستم‌های فتوسنتزی، به‌ویژه واحدهای دریافت‌کننده نور PSII، برای تولید زیست‌توده بالاتر بسیار مهم است (۲۹).

تغییر مسیر متابولیک همراه با افزایش مقادیر محصولات مرتبط با استرس (به‌عنوان‌مثال ترکیبات اسانس و پلی فنل‌ها) ممکن است به سازوکار افزایش تحمل گیاه کمک کند (۵). در تأیید از یافته‌های این تحقیق ما، GABA بیان ژن و مسیر بیوسنتزی فلاونوئیدها را در گیاه چای را دچار تغییر نموده است (۳۰)، و این امر می‌تواند به‌شدت از تأثیرات منفی گیاهان در برابر تنش NaCl محافظت کند (۱۱). به‌هرحال مقاومت گیاه در برابر شوری به شبکه ژنی تنظیمی پیچیده، عوامل رونویسی، آنزیم‌ها و فیزیولوژی گیاه بستگی دارد (۶). تغییرات متابولیت‌های ثانویه این مطالعه نشان داد که این تغییر به دلیل نیاز گیاه به مولکول‌های دفاع‌کننده برای کمک به بقای آن‌ها در شرایط نامطلوب است. از طرفی آسیب‌های اسمزی و شوک‌های اکسیداتیو ناشی از NaCl متابولیسم طبیعی سلول‌های گیاهی را مختل می‌کند و رشد گیاه و عملکرد زی‌توده را محدود می‌کند (۱۵). در واقع شوری شدید می‌تواند باعث تحریک فرایندهای اکسیداسیون و باعث تشدید آسیب‌های فتوسنتزی و کاهش فعالیت فتوسنتز شود که GABA این اثرات را تا حدودی خنثی می‌کند (۳۱).

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

به‌طور مشابه محتوای افزایش‌یافته پرولین و فلاونوئید و اسیدهای فنولیک تحت شوری در گونه *Thymus vulgaris* گزارش‌شده است (۷). در مطالعه قبلی نیز روند افزایشی فلاونوئیدها تحت تنش اسمزی به‌دست آمده است به‌طوری‌که استفاده از انواع اسیدآمینه مانند سیترولین در ۲ میلی‌مولار و در شرایط کمبود شدید آب می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی فعالیت مهار DPPH را افزایش دهد که به‌عنوان یک املاح سازگار و پاک‌کننده رادیکال‌های آزاد با تسکین تنش کم‌آبی عمل می‌کنند (۲۲). در بیشتر تحقیقات انجام‌شده، افزایش مقادیر پلی فنل‌ها و فلاونوئیدها تحت کاربرد GABA یا سایر اسیدهای آمینه عمدتاً به افزایش بیان ژن و فعالیت آنزیم‌های فنیل آلانین آمینولیاز (PAL) و همچنین به کاهش بیان و فعالیت پلی‌فنل‌اکسیداز (PPO) نسبت داده می‌شود (۳۲، ۱۹).

علاوه بر این، پرولین، فنل، و فعالیت مهار رادیکال DPPH بر خلاف وزن خشک ریشه/ساقه، محتوای رنگ‌دانه، Fv/Fm، محتوای پرولین و غلظت MDA تغییر داشتند که مشابه تغییرات مرتبط با آنتی‌اکسیدان و محتوای اسانس بود. مطالعات اخیر نیز تأیید نموده که تنش‌های محیطی به‌طور اجتناب‌ناپذیری می‌توانند از سطح راندمان سنتزی گرم (Fv/Fm ratio) پایین بیایند (۸، ۲۷). بنابراین کاربرد GABA می‌تواند از کاهش پارامترهای فتوسنتزی و محتوای رنگ‌دانه‌ها جلوگیری کند، چه به‌تنهایی یا همراه با شوری و استرس اسمزی استفاده شود (۳۳).

همچنین محتوای MDA با افزایش تدریجی غلظت NaCl افزایش یافت و کاربرد GABA موجب تحلیل اثرات منفی تنش شوری شد. محتوای MDA به‌عنوان یک شاخص مهم از شدت آسیب اکسیداتیو به غشاهای بیولوژیکی در نظر گرفته می‌شود (۲۵). کاربرد GABA می‌تواند آزادسازی گونه‌های فعال اکسیژن را مهار کند و سطوح MDA را کاهش دهد، بنابراین یکپارچگی غشای سلولی را تحت تنش اسمزی ناشی از شوری افزایش می‌دهد. مشابه با این یافته‌های کاربرد GABA تحت تنش شوری- قلیایی، محتوای MDA را از طریق تعدیل فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی و تعادل ردوکس در گونه *Zoysia japonica* کاهش داده است (۱۵). درواقع تجمع اسیدهای آمینه مانند GABA در برگ‌ها ممکن است باعث ایجاد آب با پیوند هیدروژنی قوی در اطراف پروتئین‌ها شود و درنتیجه از آرایش ذاتی پلیمرهای پروتئین‌زای غشاها محافظت کند تا مقدار MDA را کاهش دهد (۱۱). یک ناقل در میتوکندری، GABA را از سیتوزول به داخل میتوکندری می‌برد تا واکنش تبدیل آن به نیمه آلدئید سوکسینیک را از طریق آنزیم دیگری به نام GABA ترانس آمیناز کاتالیز کند. متعاقباً، نیمه آلدئید سوکسینیک به سوکسینات تبدیل می‌شود، که می‌تواند وارد چرخه TCA شود و الکترون را به زنجیره انتقال الکترون میتوکندریایی برای پشتیبانی از تولید کافی ATP و کاهش تجمع ROS هدایت کند (۳۱).

به‌طورکلی نتایج رسته‌بندی خصوصیات مورد ارزیابی تحت تیمارهای شوری به شکل معناداری متابولیت‌های اولیه و ثانویه گیاه نعناع آناناسی را تحت تأثیر قرارداد. کاربرد GABA موجب تقلیل تأثیر تنش شوری و بهبود عملکرد گیاه شد. با توجه به تنش‌های محیطی و اهمیت تولیدات گیاهان دارویی گیاه نعناع آناناسی مخصوصاً تحت تنش شوری می‌توان به کمک اصلاحگرهای بر پایه آمینواسید مانند GABA موجب حفظ و یا بهبود عملکرد این گونه ارزشمند شد. بنابراین، استفاده ایمن از GABA نه‌تنها اقتصادی به نظر می‌رسد، بلکه می‌تواند امکان تولید نعناع آناناسی را به‌عنوان یک گیاه دارویی اسانس دار در خاک‌های شور نیز فراهم کند.

سپاسگذاری: این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی و بین‌المللی (CISSC) وزارت علوم، تحقیقات و فناوری انجام شده است.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

References

1. Benabdallah, A., M. Boumendjel, O. Aissi, C. Rahmoune, M. Boussaid & C. Messaoud, 2018. Chemical composition, antioxidant activity and acetylcholinesterase inhibitory of wild Mentha species from northeastern Algeria. South African Journal of Botany, 116:131–9.
2. Baek, J.P., K.W. Park, L.E. Craker & H.M. Kang, 2016. Changes in growth and quality of three mint cultivars at different harvesting periods. Hortic Environ Biotechnol, 57:207–12.
3. De Souza, A.V.V., U.S. Dos Santos, J. R. de Sá Carvalho, B.D.R. Barbosa, K.M. Canuto & T.H.S. Rodrigues, 2018. Chemical composition of essential oil of leaves from Lippia schaueriana Mart. collected in the Caatinga area. Molecules, 23(10): 2480.
4. Kasrati, A., C.A. Jamali, K. Bekkouche, H. Wohlmuth, D. Leach & A. Abbad, 2014. Plant growth, mineral nutrition and volatile oil composition of Mentha suaveolens subsp. timija (Briq.) Harley cultivated under salt-stress conditions. Industrial Crops and Products, 59: 80-84.
5. Selmar, D. & M. Kleinwächter, 2013. Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants. Industrial Crops and Products, 42: 558-566.
6. Li, Y., D. Kong, Y. Fu, M.R. Sussman & H. Wu, 2020. The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. Plant Physiology and Biochemistry, 148: 80-89.
7. Bistgani, Z.E., M. Hashemi, M. DaCosta, L. Craker, F. Maggi & M.R Morshedloo, 2019. Effect of salinity stress on the physiological characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of Thymus vulgaris L. and Thymus daenensis Celak. Industrial Crops and Products, 135: 311-320.
8. Morshedloo, M.R., L.E. Craker, A. Salami, V. Nazeri, H. Sang & F. Maggi, 2017. Effect of prolonged water stress on essential oil content, compositions and gene expression patterns of mono-and sesquiterpene synthesis in two oregano (*Origanum vulgare* L.) subspecies. Plant Physiology and Biochemistry, 111: 119-128.
9. Jin, X., T. Liu, J. Xu, Z. Gao & X. Hu, 2019. Exogenous GABA enhances muskmelon tolerance to salinity-alkalinity stress by regulating redox balance and chlorophyll biosynthesis. BMC plant biology, 19(1):1-15.
10. Kiumarzi, F., M.R. Morshedloo, S.M. Zahedi, H. Mumivand, F. Behtash, C. Hano & J. M. Lorenzo, 2022. Selenium nanoparticles (Se-NPs) alleviates salinity damages and improves phytochemical characteristics of pineapple mint (Mentha suaveolens Ehrh.). Plants, 11(10): 1384.
11. Wu, X., Q. Jia, S. Ji, B. Gong, J. Li, G. Lü & H. Gao, 2020. Gamma-aminobutyric acid (GABA) alleviates salt damage in Tomato by modulating Na+ uptake, the GAD gene, amino acid synthesis and reactive oxygen species metabolism. BMC Plant Biology, 20: 1-21.
12. Zarei, A., G.Z. Chiu, G. Yu, C.P. Trobacher & B.J. Shelp, 2017. Salinity-regulated expression of genes involved in GABA metabolism and signaling. Botany, 95(6): 621-627.
13. Routray, W & K. Rayaguru, 2018. 2-Acetyl-1-pyrroline: A key aroma component of aromatic rice and other food products. Food Reviews International, 34(6): 539-565.
14. Xie, W., U. Ashraf, D. Zhong, R. Lin, P. Xian, T. Zhao & Z. Mo, 2019. Application of γ-aminobutyric acid (GABA) and nitrogen regulates aroma biochemistry in fragrant rice. Food Science & Nutrition, 7(11): 3784-3796.
15. Li, S., H. Jin & Q. Zhang, 2016. The effect of exogenous spermidine concentration on polyamine metabolism and salt tolerance in Zoysiagrass (*Zoysia japonica* Steud) subjected to short-term salinity stress. Frontiers in Plant Science, 7:1221.
16. Aghdam, M.S. & J.R. Fard, 2017. Melatonin treatment attenuates postharvest decay and maintains nutritional quality of strawberry fruits (Fragaria× anannasa cv. Selva) by enhancing GABA shunt activity. Food Chemistry, 221: 1650-1657.
17. Hoagland, D.R. & D.I. Arnon, 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California agricultural experiment station, 347(2nd edit).
18. Bates, L.S., R.A. Waldren & I.D. Teare, 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and soil, 39: 205-207.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]

19. Heath, R.L. & L. Packer, 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Archives of Biochemistry and Biophysics, 125(1): 189-198.
20. Porra, R.J. 2002. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. Photosynthesis Research, 73: 149-156.
21. Ahmadi, H., M.R. Morshedloo, R. Emrahi, A. Javanmard, F. Rasouli, F. Maggi & J.M. Lorenzo, 2022. Introducing three new fruit-scented mints to farmlands: Insights on drug yield, oil essential quality, and antioxidant properties. Antioxidants, 11(5): 866.
22. Morshedloo, M.R., S. Fereydouni, H. Ahmadi, M.B. Hassanpouraghdam, A. Aghaee, L.V. Mehrabani & F. Maggi, 2022. Natural diversity in fatty acids profiles and antioxidant properties of sumac fruits (Rhus coriaria L.): Selection of preferable populations for food industries. Food Chemistry, 374: 131757.
23. Saadatfar, A., S. Hossein Jafari & I. Tavassolian, 2020. Effect of edaphic conditions on phytochemical latex yield of bitter asafetida (*Ferula assa-foetida* L.) medicinal plant in two natural habitats in Kerman province. Eco-phytochemical Journal of Medicinal Plants, 8(1): 1-15.
24. Adams, R.P. 2017. Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectrometry. 5 online ed. Gruver, TX USA: Texensis Publishing.
25. Ahmadi, H., M. Babalar, M.A.A. Sarcheshmeh, M.R. Morshedloo & M. Shokrpour, 2020. Effects of exogenous application of citrulline on prolonged water stress damages in hyssop (*Hyssopus officinalis* L.): Antioxidant activity, biochemical indices, and essential oils profile. Food Chemistry, 333: 127433.
26. Mohammadi, H., M. Ghorbanpour & M. Brestic, 2018. Exogenous putrescine changes redox regulations and essential oil constituents in field-grown Thymus vulgaris L. under well-watered and drought stress conditions. Ind Crops Production, 122:119–32.
27. Emrahi, R., M.R. Morshedloo, H. Ahmadi, A. Javanmard & F. Maggi, 2021. Intraspecific divergence in phytochemical characteristics and drought tolerance of two carvacrol-rich Origanum vulgare subspecies: Subsp. hirtum and subsp. gracile. Industrial Crops and Products, 168: 113557.
28. Kalamartzis, I., G. Menexes, P. Georgiou & C. Dordas, 2020. Efect of water stress on the physiological characteristics of fve basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivars. Agronomy, 10(7):1029.
29. Baghbani-Arani, A., S.A.M. Modarres-Sanavy, M. Mashhadi-Akbar-Boojar & A. Mokhtassi-Bidgoli, 2017. Towards improving the agronomic performance, chlorophyll fuorescence parameters and pigments in fenugreek using zeolite and vermicompost under defcit water stress. Ind Crops Production, 109:346–57.
30. Liao, J., Q. Shen, R. Li, Y. Cao, Y. Li, Z. Zou, T. Ren, F. Li, W. Fang & X. Zhu, 2021. GABA shunt contribution to flavonoid biosynthesis and metabolism in tea plants (*Camellia sinensis*). Plant Physiol Biochem, 166:849–56.
31. Aghdam, M.S., R. Naderi, A. Jannatizadeh, M. Babalar, M.A.A. Sarcheshmeh & MZ. Faradonbe, 2016. Impact of exogenous GABA treatments on endogenous GABA metabolism in anthurium cut flowers in response to postharvest chilling temperature. Plant Physiol Biochem, 106:11–5.
32. Shekari, A., R.N. Hassani & M.S. Aghdam, 2021. Exogenous application of GABA retards cap browning in Agaricus bisporus and its possible mechanism. Postharvest Biology and Technology, 174: 111434.
33. Sheteiwy, M.S., H. Shao, W. Qi, Y.A. Hamoud, H. Shaghaleh, N.U. Khan & B. Tang, 2019. GABA-alleviated oxidative injury induced by salinity, osmotic stress and their combination by regulating cellular and molecular signals in rice. International journal of molecular sciences, 20(22):5709.

[Downloaded from rangelandsrm.ir on 2026-08-26]

[DOR: 20.1001.1.20080891.1402.17.4.8.3]