

Investigation of the effects of glycine betaine on essential oil content and composition of basil under drought stress conditions

Pages
23-35

M. R. Zare-Bavani^{1*} and M. Ardashiri²

1 & 2) Department of Horticultural Science, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Khuzestan, Iran.

*Corresponding author : mzarebavani@asnruk.ac.ir

Received date: 2025.07.09

Accepted date: 2025.10.18

Abstract

Considering the limitations of water resources and the increasing impacts of climate change, managing drought stress in agriculture has gained significant importance. Drought stress can substantially reduce both the quantity and quality of plant yields, including essential oils such as basil. This study examined the effects of drought stress and foliar application of glycine betaine on the efficiency of essential oil and its components in basil grown under greenhouse conditions. The experiment was a factorial design based on a completely randomized layout, with different levels of drought stress (0%, 25%, 50%, and 100% of the field capacity) and various concentrations of glycine betaine foliar spray (0, 50, 100, and 200 mM). Results indicated that drought stress increased essential oil yield but had mixed effects on its components. Foliar application of glycine betaine enhanced essential oil yield and improved most of its constituent compounds. The findings suggest that the use of resilience-promoting additives like glycine betaine could be an effective strategy to mitigate the negative effects of drought on both the quantity and composition of basil essential oil.

Keywords: Water stress, Geraniol, Cineole, Linalool and Essential oil yield.

بررسی تأثیر گلیسین بتائین بر درصد اسانس و ترکیبات اسانس ریحان در شرایط تنش خشکی

شماره صفحات

۲۳-۳۵

محمد رضا زارع بوانی^{۱*} و مریم اردشیری^۲

۱ و ۲) گروه علوم و مهندسی باغبانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران.

* نویسنده مسئول: mzarebavani@asnruk.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۸

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب و افزایش تأثیرات تغییرات اقلیمی، مدیریت تنش‌های خشکی در کشاورزی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. تنش خشکی می‌تواند به طور قابل توجهی میزان و کیفیت تولیدات گیاهی، از جمله اسانس‌های گیاهی مانند ریحان، را کاهش دهد. در این مطالعه، تأثیر تنش خشکی و محلول‌پاشی با گلیسین بتائین بر کارایی اسانس و ترکیبات اسانس ریحان در شرایط گلخانه‌ای بررسی شد. آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سطوح مختلف تنش خشکی (صفر، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و غلظت‌های متنوع محلول‌پاشی (۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار) گلیسین بتائین انجام شد. نتایج نشان دادند که تنش خشکی موجب افزایش کارایی اسانس شد اما بر ترکیبات اسانس اثرات کاهشی یا افزایشی نشان داد. محلول‌پاشی با گلیسین بتائین، افزایش کارایی اسانس و بهبود اکثر ترکیبات اسانس را موجب شد. این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از افزودنی‌های مقاومتی مانند گلیسین بتائین می‌تواند راهکار موثری برای کاهش اثرات منفی خشکی بر میزان تولید و ترکیبات اسانس ریحان باشد.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، ژرانیول، سینئول، لینالول و کارایی اسانس.

مقدمه

ریحان (*Ocimum basilicum* L.) یک گیاه معطر مهم جهانی متعلق به خانواده نعنائیان است که به دلیل خواص آشپزی، دارویی و معطر بودنش مورد توجه است. مشخصات غنی فیتوشیمیایی آن، به ویژه اسانسش، آن را به یک محصول ارزشمند در زمینه‌های تجاری و سنتی تبدیل می‌کند. اسانس ریحان به دلیل ترکیبات زیست فعال متنوع خود، از جمله اوژنول، متیل چاویکول (استراگول)، لینالول و ۱،۸-سینئول، که خواص ضد میکروبی، آنتی‌اکسیدانی و ضد التهابی دارند، شناخته شده است (Agami *et al.*, 2016; Mulugeta & Radácsi, 2022). ترکیب و عملکرد اسانس تحت تأثیر عوامل مختلف ژنتیکی، محیطی و کشت قرار می‌گیرد و در این میان، دسترسی به آب نقش مهمی ایفا می‌کند (Agami *et al.*, 2016). کاربردهای دارویی ریحان عمدتاً از متابولیت‌های ثانویه آن مشتق شده‌اند. این ترکیبات به اثرات تقویت‌کننده سلامت و ارزش صنعتی آن، به ویژه در فرمولاسیون داروهای طبیعی و لوازم آرایشی، کمک می‌کنند (Al-Huqail *et al.*, 2020). با این حال، کیفیت و کمیت اسانس به تنش‌های محیطی، از جمله خشکی، دمای شدید و شرایط خاک، بسیار حساس هستند (Abd-Elghany *et al.*, 2021). رشد و مشخصات فیتوشیمیایی گیاهان می‌تواند در شرایط کمبود آب به طور قابل توجهی تغییر کند و اغلب منجر به کاهش عملکرد و کیفیت شود (Ragab *et al.*, 2015). تنش خشکی یک عامل غیرزیستی است که با محدود کردن دسترسی به آب، رشد و نمو گیاه را مختل می‌کند و در نتیجه باعث ایجاد تغییرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی با هدف بقا می‌شود (Ali *et al.*, 2012). این امر منجر به کاهش فتوسنتز، جذب مواد مغذی و تجمع زیست توده می‌شود و گیاهان اغلب تنش اکسیداتیو ناشی از تولید بیش از حد گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) را تجربه می‌کنند (Farouk & Omar, 2020). این استرس اکسیداتیو می‌تواند به ساختارهای سلولی، از جمله لیپیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای نوکلئیک آسیب برساند و منجر به کاهش سلامت و بهره‌وری گیاه شود (Kordi *et al.*, 2013). علاوه بر این، تنش خشکی بر مسیرهای متابولیکی ثانویه تأثیر می‌گذارد و اغلب منجر به تغییر سطح متابولیت‌های ثانویه مانند فنول‌ها، فلاونوئیدها و روغن‌های ضروری می‌شود. این ترکیبات با جمع‌آوری ROS و تثبیت غشاهای سلولی نقش مهمی در افزایش تحمل به تنش گیاه دارند (Hafez *et al.*, 2021). در ریحان، خشکسالی می‌تواند بسته به شدت و مدت کمبود آب، و همچنین ژنوتیپ گیاه و شرایط محیطی، اجزای خاصی از روغن ضروری را افزایش یا کاهش دهد (Mulugeta & Radácsi, 2022). برای مثال، برخی مطالعات افزایش مونوترپن‌های خاص، مانند اوژنول و لینالول، را در شرایط خشکسالی گزارش می‌دهند که احتمالاً به عنوان یک واکنش دفاعی است (ŠERBO *et al.*, 2024). برعکس، عملکرد کلی اسانس معمولاً تحت تنش طولانی مدت آب کاهش می‌یابد و بر بازده اقتصادی و کیفیت محصول تأثیر می‌گذارد (Shemi *et al.*, 2021). در میان این چالش‌ها، درک چگونگی دستکاری بیوسنتز متابولیت‌های ثانویه تحت تنش خشکی حیاتی می‌شود. روش‌های مختلف زراعی، از جمله استفاده از محرک‌های زیستی و محافظ‌های اسمزی، برای این منظور بررسی شده‌اند و نتایج امیدوارکننده‌ای داشته‌اند (Consentino *et al.*, 2023). با توجه به اثرات مضر خشکسالی،

دانشمندان رویکردهای مختلفی را برای تقویت تاب‌آوری گیاهان بررسی کرده‌اند. استفاده از محافظت‌کننده‌های اسمزی - ترکیبات آلی انباشته شده یا به صورت برون‌زا - به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود تحمل گیاه در برابر شرایط کمبود آب ظهور کرده است. این مولکول‌ها، که شامل پرولین، ترهالوز، گلیسین بتائین (GB) و سایر موارد هستند، با تثبیت ساختارهای سلولی، حفظ تعادل اسمزی و حذف رادیکال‌های آزاد عمل می‌کنند (Hussain *et al.*, 2008; Ashraf & Foolad, 2007). گلیسین بتائین، یک ترکیب آمونیوم چهارتایی طبیعی، به دلیل نقش خود در محافظت اسمزی و تحمل تنش، به ویژه برجسته است. این ماده آنزیم‌ها و سیستم‌های غشایی را تثبیت می‌کند، از دناتوراسیون پروتئین‌ها در شرایط تنش اسمزی جلوگیری می‌کند و سطح ROS را کاهش می‌دهد، بنابراین از یکپارچگی سلولی محافظت می‌کند (Hussain *et al.*, 2013). پژوهشها نشان داده شده است که کاربرد خارجی آن باعث بهبود رشد، فعالیت فتوسنتزی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در محصولات مختلف، از جمله گندم، گوجه‌فرنگی، برنج و تنباکو در شرایط خشکسالی می‌شود (Ahmed *et al.*, 2019; Ahmed *et al.*, 2021; Xing & Rajashekar, 1999; Ibrahim *et al.*, 2023). نکته مهم این است که گلیسین بتائین همچنین در اصلاح تولید متابولیت‌های ثانویه نقش دارد. به عنوان مثال، در گندم و ذرت، کاربرد گلیسین بتائین باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و بهبود عملکرد در شرایط تنش خشکی شد (Shemi *et al.*, 2021; Shafiq *et al.*, 2021). اثرات مشابهی در گیاهان معطر مانند ریحان پیش‌بینی می‌شود، جایی که گلیسین بتائین ممکن است بر مسیرهای بیوسنتز روغن‌های ضروری تأثیر بگذارد و به طور بالقوه محتوای روغن و ترکیب آن را در طول کمبود آب حفظ یا افزایش دهد. حساسیت ریحان به تنش خشکی، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، چالشی برای کشت پایدار ایجاد می‌کند. استراتژی‌های مرسوم کاهش تنش، مانند مدیریت آبیاری و مالچ‌پاشی، به دلیل محدودیت منابع و اثرات زیست‌محیطی، محدودیت‌هایی دارند. بنابراین، بررسی رویکردهای مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط زیست، مانند استفاده از محافظ‌های اسمزی مانند گلیسین بتائین، جایگزین‌های امیدوارکننده‌ای را ارائه می‌دهد. مطالعات قبلی روی سایر محصولات نشان داده است که گلیسین بتائین می‌تواند راندمان مصرف آب را بهبود بخشد، از سیستم فتوسنتزی محافظت کند و سنتز متابولیت‌های ثانویه را در شرایط تنش خشکی تعدیل کند (Gupta & Thind, 2015; Shaalan *et al.*, 2012). با این حال، اطلاعات محدودی در مورد تأثیر خاص آن بر عملکرد و ترکیب اسانس ریحان در طول تنش کمبود آب وجود دارد. پرداختن به این شکاف برای توسعه پروتکل‌های کشت بهینه که هم عملکرد و هم کیفیت فیتوشیمیایی را در شرایط خشکسالی حفظ می‌کنند، حیاتی است. هدف از این تحقیق، روشن کردن اثرات گلیسین بتائین خارجی بر ریحان رشد یافته تحت تنش خشکی، با توجه ویژه به میزان و ترکیب اسانس است. این یافته‌ها می‌تواند به شیوه‌های کشت پایدار، به ویژه در مناطقی که به طور فزاینده‌ای در معرض تهدید کمبود آب هستند، کمک کند و درک نقش‌های محافظت‌کننده‌های اسمزی را در تعدیل متابولیسم ثانویه در گیاهان معطر گسترش دهد.

مواد و روش ها

مواد گیاهی و اعمال تیمارها

این آزمایش با استفاده از بذرهاى ریحان (*Ocimum basilicum* L.) رقم سبز ایرانی که از شرکت فردین کشت تهیه شده بود، انجام شد. بذرها به مدت ۵ دقیقه با محلول هیپوکلریت سدیم ۰/۵٪ ضدعفونی سطحی شدند، سپس با آب مقطر کاملاً شسته شدند و سپس در گلدان‌هایی که با مخلوط همگنی از خاک لومی، ماسه و کمپوست کود دامی (۱:۲:۷ v/v) پر شده بودند، کاشته شدند (جدول ۱ و ۲). گلدان‌ها، هر کدام با حجم ۱۰ لیتر، در گلخانه پژوهشی گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در شرایط کنترل‌شده با میانگین دمای روز ۲۵ درجه و شب ۱۷ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۶۵ درصد (Agami *et al.*, 2016; Mulugeta & Radácsi, 2022) و دوره نوری ۱۲ ساعت نور در روز قرار گرفتند. کمبود ساعات روشنایی با نور تکمیلی با استفاده از لامپ‌های سدیمی فشار قوی ۴۰۰ وات در متر مربع جبران گردید. در ابتدا خاک تا حد ظرفیت مزرعه آبیاری شد تا شرایط رطوبتی یکنواخت در شروع آزمایش تضمین شود.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این تحقیق

Table 1- Physicochemical properties of the soil used in this study

| پتاسیم (ppm) | فسفر (ppm) | نیترژن کل (%) | هدایت الکتریکی (dS/m) | اسیدیته | کربن آلی (%) | کلاس بافت |
|-----------------|------------------|--------------------|--------------------------------|---------|--------------------|------------------------|
| Potassium (ppm) | Phosphorus (ppm) | Total nitrogen (%) | Electrical conductivity (dS/m) | Acidity | Organic carbon (%) | Texture class |
| 250 | 10 | 0.05 | 2.1 | 7.5 | 0.45 | خاک لومی Loamy soil |

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی کمپوست مورد استفاده در این تحقیق

Table 2- Physicochemical properties of the compost used in this study

| پتاسیم (ppm) | فسفر (ppm) | نیترژن کل (%) | هدایت الکتریکی (dS/m) | اسیدیته | کربن آلی (%) | کمپوست |
|-----------------|------------------|--------------------|--------------------------------|---------|--------------------|-------------------|
| Potassium (ppm) | Phosphorus (ppm) | Total nitrogen (%) | Electrical conductivity (dS/m) | Acidity | Organic carbon (%) | Compost |
| 0.9 | 0.3 | 0.5 | 5.8 | 7.2 | 11.5 | کمپوست Compost |

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه تکرار در هر تیمار انجام شد. عوامل شامل سطح تنش خشکی: چهار سطح بر اساس ظرفیت زراعی خاک (FC) اعمال شد: ۱۰۰٪ FC (شاهد)، ۷۵٪ FC، ۵۰٪ FC و ۲۵٪ FC. به ترتیب مربوط به شرایط آبیاری مناسب و کم‌آبی (Abd-Elghany *et al.*, 2021; Kordi *et al.*, 2013). در ۱۵ آبان ماه سال ۱۴۰۳ بذر گیاهان کشت شدند و نهایتاً در ۱۵ دیماه همان سال جهت اندازه‌گیری برداشت صورت گرفت. غلظت‌های گلیسین بتائین (Merck, Germany, CAS No.; 107-43-7, 98%) در چهار سطح محلول‌پاشی برگی استفاده شد: صفر میلی‌مولار (شاهد)، ۵۰ میلی‌مولار، ۱۰۰ میلی‌مولار و ۲۰۰ میلی‌مولار محلول‌های گلیسین بتائین (Ahmed *et al.*, 2019; Shahbaz *et al.*, 2012; Safwat & Salam, 2022). در ابتدا یک محلول پایه از حل کردن گلیسین بتائین در آب دوبار

تقطیر تهیه و سپس غلظت‌های مورد نظر از این محلول تهیه گردید. سورفکتانت Tween 20 به میزان ۰/۱٪ (حجمی/حجمی) برای توزیع یکنواخت محلول و پوشش بهتر برگ اضافه شد (Ahmed *et al.*, 2019). محلول پاشی برگ به طور یکنواخت در آغاز دوره خشکی انجام شد و پس از دو هفته برای اطمینان از جذب یکنواخت تکرار شد (Alirezaei *et al.*, 2012; Korkmaz *et al.*, 2015). گیاهان شاهد، محلول پاشی برگ را با آب مقطر حاوی سورفکتانت به تنهایی دریافت کردند. هر تیمار به طور تصادفی به نه گلدان اختصاص داده شد. تیمارهای خشکی زمانی آغاز شدند که گیاهان ریحان به مرحله ۴ برگ رسیده، تقریباً چهار هفته پس از کاشت. میزان رطوبت خاک به صورت وزنی اندازه‌گیری و با تنظیم حجم آبیاری در سطوح تعیین شده حفظ شد. FC اولیه با اشباع خاک و سپس اجازه دادن به زهکشی آزاد آن به مدت ۲۴ ساعت تعیین شد و پس از آن رطوبت خاک اندازه‌گیری شد. رطوبت خاک با وزن کردن گلدان‌ها دو بار در روز و آبیاری مجدد در صورت لزوم برای حفظ درصدهای خاص ظرفیت مزرعه، ثابت نگه داشته شد (Agami *et al.*, 2016; Abd-Elghany *et al.*, 2021).

برداشت و آماده‌سازی نمونه

در پایان دوره آزمایش، قسمت‌های هوایی گیاهان ریحان در اوایل صبح برداشت شدند. نمونه‌ها برای تجزیه و تحلیل بعدی به آزمایشگاه فیزیولوژی گروه علوم و مهندسی باغبانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان منتقل و جهت اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در دمای ۴ درجه سلسیوس نگهداری شدند. نمونه‌های گیاهی از هر تکرار در دمای ۴۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک شدند. از این نمونه‌های خشک برای اندازه‌گیری اسانس استفاده شد.

استخراج و اندازه‌گیری درصد اسانس

اسانس‌ها از طریق تقطیر با آب با استفاده از دستگاه کلونجر، طبق روش شرح داده شده توسط Abd-Elghani و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از دستگاه Clevenger به مدت ۳ ساعت، مورد استخراج قرار گرفتند. عملکرد اسانس به صورت درصد بر اساس وزن خشک محاسبه شد. روغن اسانسی به دست آمده روی سولفات سدیم بی‌آب خشک شد و به صورت درصدی از وزن تازه اندازه‌گیری شد:

$$\text{رابطه ۱:} \quad \text{درصد روغن اسانسی} = \frac{\text{حجم اسانس استخراجی (میلی لیتر)}}{\text{وزن خشک ماده گیاهی (گرم)}} \times 100$$

آنالیز ترکیبات روغن اسانسی

مشخصات شیمیایی روغن‌های اسانسی با استفاده از کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) تعیین شد. دستگاه با ترکیبات استاندارد کالیبره شد و شناسایی اجزای منفرد با مقایسه طیف‌های جرمی با طیف‌های موجود در کتابخانه دستگاه، همراه با شاخص‌های بازداری انجام شد (Adams, 2001). غلظت‌های نسبی ترکیبات بر اساس مساحت پیک محاسبه شدند.

تجزیه و تحلیل آماری

داده های حاصل از این پژوهش مورد آنالیز واریانس (ANOVA) با استفاده از نرم افزار SAS(V: 9.1) قرار گرفتند. آزمون

کمترین اختلاف معنی دار برای تعیین اینکه آیا تفاوت بین میانگین ها در $P < 0.05$ معنی دار است یا خیر انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که در تمامی صفات مورد بررسی، اثرات ساده گلیسین بتائین بر کارایی اسانس و ترکیبات آن به طور معنی دار در سطح احتمال خطای ۱ یا ۵٪ معنی دار بود (جدول ۳). همچنین اثرات ساده تنش خشکی بجز بر کامفن، میرسن، کامفور، ترپینن-۴-اول، بورنیل استات و متیل اوژنول بر بقیه صفات اندازه گیری شده تاثیرات آماری معنی داری داشت (جدول ۳). اثرات متقابل تنش آبی × گلیسین بتائین بر هیچکدام از صفات اندازه گیری شده در سطح احتمال خطای ۵٪ تاثیر معنی داری نداشت.

جدول ۳- تجزیه واریانس کارایی و ترکیبات مختلف اسانس ریحان تحت تیمار غلظت های مختلف گلیسین بتائین در سطوح مختلف تیمار آبی

| Table 3 - Analysis of variance of the yield and various constituents of basil essential oil under treatment with different concentrations of glycine betaine at various irrigation levels | | | | | |
|---|--------------|--|----------------------------------|----------------------------|--|
| Sources of variation منابع تغییرات | | | | | |
| ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%) | خطا Error | تنش خشکی × گلیسین بتائین Drought stress × Glycine betaine | گلیسین بتائین Glycine betaine | تنش خشکی Drought stress | درجه آزادی Degrees of freedom |
| | 32 | 9 | 3 | 3 | |
| 8.08989 | 0.00023 | 0.00033 ^{ns} | 0.00261** | 0.02346 ** | Essential Oil efficiency α-pinene camphene sabinene β-pinene myrcene α-Phellandrene limonene β-Phellandrene 1,8-cineole β-Ocimene γ-terpinene Fenchone linalool camphor borneol Terpinene-4-ol α-terpineol geraniol Bornyl acetate Eugenol α-Copaene β-Cubebene α- Elemene β-Elemene Methyl eugenol Spathulenol caryophyllene oxide α- Cadinol Murol-5-en-4- α-ol |
| 4.17566 | 0.00024 | 0.00044 ^{ns} | 0.00557** | 0.02016** | |
| 5.78069 | 0.00009 | 0.00009 ^{ns} | 0.00009 ^{ns} | 0.00039* | |
| 6.89588 | 0.00029 | 0.00039 ^{ns} | 0.00150** | 0.00212** | |
| 6.35833 | 0.00183 | 0.00239 ^{ns} | 0.01054** | 0.07759** | |
| 7.18925 | 0.00058 | 0.00052 ^{ns} | 0.00060 ^{ns} | 0.00176* | |
| 4.88404 | 0.00061 | 0.00081 ^{ns} | 0.00291** | 0.04224** | |
| 4.65240 | 0.00004 | 0.00005 ^{ns} | 0.00035** | 0.00131** | |
| 3.73750 | 0.00004 | 0.00006 ^{ns} | 0.00083** | 0.00165** | |
| 3.41924 | 0.04399 | 0.09515 ^{ns} | 0.43966** | 44.71460** | |
| 3.69096 | 0.02840 | 0.02079 ^{ns} | 0.51935** | 2.82779** | |
| 4.04489 | 0.00004 | 0.00006 ^{ns} | 0.00028** | 0.00309** | |
| 2.49053 | 0.00023 | 0.00049 ^{ns} | 0.00101* | 0.03338** | |
| 3.43556 | 2.64721 | 3.28802 ^{ns} | 16.39030** | 216.75300** | |
| 4.48330 | 0.00140 | 0.00083 ^{ns} | 0.00185 ^{ns} | 0.05780** | |
| 4.38228 | 0.00443 | 0.00419 ^{ns} | 0.01457* | 0.46701** | |
| 3.69598 | 0.00003 | 0.00005 ^{ns} | 0.00008 ^{ns} | 0.00208** | |
| 7.38029 | 0.06194 | 0.07701 ^{ns} | 0.52795** | 13.39900** | |
| 4.39820 | 0.06436 | 0.01905 ^{ns} | 1.65853** | 4.74584** | |
| 4.62567 | 0.00648 | 0.00454 ^{ns} | 0.01416 ^{ns} | 0.05555** | |
| 4.72424 | 0.04032 | 0.02880 ^{ns} | 0.12696* | 23.49840** | |
| 3.39279 | 0.00016 | 0.00026 ^{ns} | 0.00137** | 0.00606** | |
| 5.91733 | 0.00033 | 0.00057 ^{ns} | 0.00542** | 0.01504** | |
| 4.02471 | 0.00118 | 0.00104 ^{ns} | 0.01067** | 0.05266** | |
| 4.17021 | 0.00089 | 0.00030 ^{ns} | 0.00304* | 0.09046** | |
| 5.82469 | 0.00146 | 0.00042 ^{ns} | 0.00341 ^{ns} | 0.03071** | |
| 3.76788 | 0.00064 | 0.00105 ^{ns} | 0.00201* | 0.03835** | |
| 3.91604 | 0.00074 | 0.00103 ^{ns} | 0.01097** | 0.05805** | |
| 4.10419 | 0.03586 | 0.07133 ^{ns} | 1.08222** | 3.67085** | |
| 3.66296 | 0.01743 | 0.01304 ^{ns} | 0.32211** | 1.75828** | |

** و * به ترتیب معنی داری در سطح ۱ و ۵ درصد و ^{ns} عدم وجود تفاوت معنی داری را نشان می دهد.

** and * represent significance at the 1% and 5% levels, respectively, and ^{ns} indicates no significant difference.

اثرات تنش خشکی

با کاهش میزان آب و به عبارتی افزایش تنش خشکی کارایی اسانس (%) افزایش معنی داری نشان داد (جدول ۴). تحلیل میانگین اثرات ساده تنش آبی نشان داد که به ترتیب بیشترین و کمترین کارایی اسانس، در تیمار تنش آبی ۲۵٪ (به میزان ۰/۲۰۴٪) و ۱۰۰٪ ظرفیت زراعی (به میزان ۰/۱۷۰٪) بدست آمد. مقایسات میانگین اثرات ساده تنش آبی بر ترکیبات اسانس اندازه گیری شده نشان داد که بجز میزان ساینین که با افزایش تنش خشکی کاهش نشان دارد میزان ترکیبات آلفا-پینن، ساینین، بتا-پینن، آلفا-فلاندرن، لیمونن، بتا-فلاندرن، ۸، ۱-سینئول، بتا-اوسیمین، گاما-ترپینن، فنکون، لینالول، بورنئول، آلفا-ترپینول، ژرانئول، اوگنول، آلفا-کوپائین، بتا-کوبیبین، آلفا-ایمین، بتا-ایمین، اسپاتولنول، کاریوفیلین اکسید، آلفا-کادینول و مورول-۵-ان-۴-آلفا-اول اندازه گیری شده با افزایش تنش خشکی افزایش یافت (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمار آبی بر کارایی و ترکیبات مختلف اسانس ریحان

Table 4 - Comparison of simple effect means of irrigation treatment on the yield and various constituents of basil essential oil

| تیمار آبی (درصد ظرفیت زراعی) | | | | متغیر |
|---|---------|---------|---------|------------------------------|
| Irrigation treatment (percentage of field capacity) | | | | |
| 25 | 50 | 75 | 100 | |
| 0.205a | 0.189b | 0.178bc | 0.170c | Essential Oil efficiency |
| 0.384a | 0.382a | 0.383b | 0.341b | α -pinene |
| 0.237c | 0.245a | 0.261ab | 0.254ab | sabinene |
| 0.687a | 0.685a | 0.687b | 0.627b | β -pinene |
| 0.524a | 0.506b | 0.501b | 0.487b | α -Phellandrene |
| 0.131a | 0.128a | 0.131b | 0.121b | limonene |
| 0.182a | 0.175b | 0.172c | 0.163c | β -Phellandrene |
| 6.282a | 6.187a | 6.215b | 5.853b | 1,8-cineole |
| 4.798a | 4.625b | 4.540c | 4.299c | β -Ocimene |
| 0.162a | 0.160a | 0.162b | 0.152b | γ -terpinene |
| 0.621a | 0.619a | 0.611b | 0.600b | Fenchone |
| 48.141a | 48.064a | 47.583b | 45.645b | linalool |
| 1.544a | 1.508a | 1.551b | 1.476b | borneol |
| 3.622a | 3.455c | 3.263c | 3.147c | α -terpineol |
| 6.089a | 5.800b | 5.944c | 5.239c | geraniol |
| 4.389a | 4.229a | 4.244b | 4.14b | Eugenol |
| 0.389a | 0.381b | 0.378c | 0.364c | α -Copaene |
| 0.324a | 0.319a | 0.313b | 0.278b | β -Cubebene |
| 0.885a | 0.867b | 0.851c | 0.813c | α -Elemene |
| 0.726a | 0.727a | 0.711b | 0.693b | β -Elemene |
| 0.677a | 0.678a | 0.683b | 0.653b | Spathulenol |
| 0.726a | 0.702b | 0.690c | 0.651c | caryophyllene oxide |
| 4.982a | 4.700c | 4.498d | 4.277d | α -Cadinol |
| 3.788a | 3.651b | 3.584c | 3.394c | Muurool-5-en-4- α -ol |

میانگین های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی دار در سطح احتمال ۵٪ آزمون LSD هستند.

Means with same letters are not significantly different at the 5% probability level according to the LSD test.

اثرات تیمار گلایسین بتائین

کاربرد گلایسین بتائین به طور معنی داری باعث افزایش میزان کارایی اسانس (%) در ریحان شد (جدول ۵). به ترتیب بیشترین میزان کارایی اسانس در تیمار ۲۰۰ میلی مولار گلایسین بتائین (به میزان ۰/۲۴۱٪) و کمترین در تیمار بدون محلول پاشی گلایسین بتائین (۰/۱۴۰٪) ثبت شد. میزان ترکیبات آلفا-پینن، کامفن، بتا-پینن، میرسن، لیمونن، بتا-فلاندرن، بتا-اوسیمین، گاما-ترپینن، فنکون، لینالول، کامفور، بورنئول، ترپینن-۴-اول، آلفا-ترپینول، بورنیل استات، آلفا-کوپائین، آلفا-

الیمین، آلفا- کادینول و مورول-۵-ان-۴-آلفا-اول با افزایش غلظت گلیسین بتائین نشان دادند اما میزان آلفا- فلاندرن، ۱،۸- سینئول، اوگنول و متیل اوژنول بیشترین مقادیر را در تیمارهای بدون محلول پاشی گلیسین بتائین نشان دادند (جدول ۵). بیشترین میزان سابنتین در تیمارهای ۱۰۰ میلی مولار محلول پاشی گلیسین بتائین (به میزان ۰/۶۹۸٪) ثبت شد که با تیمارهای بدون محلول پاشی (به میزان ۰/۶۹۶٪) اختلاف آماری معنی داری نداشت (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات ساده غلظت‌های مختلف گلیسین بتائین بر کارایی و ترکیبات مختلف اسانس ریحان
Table 5 - Comparison of simple effect means of different glycine betaine concentrations on the yield and various constituents of basil essential oil

| گلیسین بتائین (میلی مولار) Glycine Betaine (millimolar) | | | | متغیر (/) (/) Variable |
|--|--------|---------|---------|------------------------------|
| 200 | 100 | 50 | 0 | |
| 0.241a | 0.199b | 0.162c | 0.140d | Essential Oil efficiency Oil |
| 0.415a | 0.393b | 0.358c | 0.323d | α -pinene |
| 0.167a | 0.170a | 0.171a | 0.158b | camphene |
| 0.24b | 0.245b | 0.243b | 0.269a | sabinene |
| 0.740a | 0.716a | 0.673b | 0.557c | β -pinene |
| 0.352a | 0.327b | 0.327b | 0.328b | myrcene |
| 0.472c | 0.498b | 0.460c | 0.590a | α -Phellandrene |
| 0.142a | 0.131b | 0.118c | 0.121c | limonene |
| 0.191a | 0.175b | 0.162c | 0.165c | β -Phellandrene |
| 4.249d | 4.881c | 6.952b | 8.454a | 1,8-cineole |
| 5.149a | 4.716b | 4.389c | 4.008d | β -Ocimene |
| 0.18a | 0.163b | 0.152c | 0.142d | γ -terpinene |
| 0.684a | 0.618b | 0.588c | 0.562d | Fenchone |
| 45.543a | 52.56b | 48.673c | 42.658d | linalool |
| 0.923a | 0.85b | 0.797c | 0.763d | camphor |
| 1.742a | 1.625b | 1.40c | 1.313d | borneol |
| 0.169a | 0.153b | 0.145c | 0.140d | Terpinene-4-ol |
| 4.454a | 3.855b | 3.187c | 1.991d | α -terpineol |
| 5.031d | 6.498a | 6.007b | 5.536c | geraniol |
| 1.833a | 1.675b | 1.709b | 1.738b | Bornyl acetate |
| 2.877d | 3.323c | 4.91b | 5.891a | Eugenol |
| 0.404a | 0.388b | 0.365c | 0.356c | α -Copaene |
| 0.264c | 0.296b | 0.337a | 0.338a | β -Cubebene |
| 0.912a | 0.911a | 0.793b | 0.801b | α -Elemene |
| 0.716b | 0.837a | 0.653c | 0.653c | β -Elemene |
| 0.594c | 0.698a | 0.633b | 0.696a | Methyl eugenol |
| 0.623b | 0.722a | 0.721a | 0.625b | Spathulenol |
| 0.614d | 0.661c | 0.774a | 0.719b | caryophyllene oxide |
| 5.416a | 4.544b | 4.264c | 4.232c | α -Cadinol |
| 4.065a | 3.724b | 3.465c | 3.164d | Muurool-5-en-4- α -ol |

میانگین‌های دارای حروف مشترک فاقد اختلاف آماری معنی دار در سطح احتمال ۵٪ آزمون LSD هستند.

Means with same letters are not significantly different at the 5% probability level according to the LSD test.

بحث

نتایج نشان داد که تنش خشکی موجب افزایش کارایی اسانس شد. اثرات تنش خشکی بر ترکیبات مختلف اسانس متفاوت بود اما در مورد اکثر ترکیبات اندازه گیری شده موجب افزایش گردید. گلیسین بتائین نیز بر اکثر ترکیبات اثرات افزایشی نشان داد. تنش خشکی به عنوان یک عامل نامطلوب بر فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاهان شناخته شده است و به طور قابل توجهی بر کمیت و کیفیت اسانس ها تأثیر می‌گذارد (Mulugeta & Radácsi, 2022). در ریحان (*Ocimum basilicum*)، شرایط خشکسالی می‌تواند به دلیل اختلالات متابولیسی منجر به کاهش قابل توجه عملکرد اسانس شود (Sirousmehr et al., 2014). ترکیبات موجود در اسانس ریحان به در دسترس بودن آب حساس هستند و منجر به تغییر

ترکیبات در شرایط تنش می‌شوند (Rahimi *et al.*, 2023) که مطابق با یافته‌های تحقیق حاضر می‌باشد. استفاده از گلیسین بتائین (GB) به عنوان یک استراتژی مؤثر برای کاهش اثرات مضر تنش خشکی در گونه‌های مختلف گیاهی ظهور کرده است (Hussain *et al.*, 2008). گلیسین بتائین به عنوان یک محافظ اسمزی عمل می‌کند و با تثبیت ساختارهای سلولی و کمک به تعادل اسمزی، تحمل گیاه را در برابر کمبود آب افزایش می‌دهد (Ashraf & Foolad, 2007). مطالعات قبلی نشان داد که کاربرد خارجی GB می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد اسانس و غلظت برخی ترکیبات معطر کلیدی در ریحان را در شرایط غیر تنش بهبود بخشد (Aminifard *et al.*, 2024). تنش خشکی معمولاً راندمان فتوسنتز را کاهش می‌دهد و منجر به کاهش در دسترس بودن انرژی برای بیوسنتز اسانس می‌شود (Ahmed *et al.*, 2019). با این حال، هنگامی که GB اعمال می‌شود، از کاهش فتوسنتز جلوگیری کرده و با حفظ عملکردهای متابولیکی گیاه، امکان بهبود تولید اسانس را فراهم می‌کند (Al-Huqail *et al.*, 2020). این اثر هم‌افزایی بسیار مهم است، زیرا کاربرد GB نه تنها باعث حفظ آب می‌شود، بلکه رشد و سنتز اسانس را در شرایطی که در غیر این صورت مضر خواهد بود، تحریک می‌کند (Agami *et al.*, 2016). تحقیقات قبلی نشان داده است که برخی گیاهان معطر هنگام تیمار با GB در شرایط تنش خشکی، بهبود قابل توجهی در پروفایل‌های اسانس نشان داده‌اند. برای مثال، مطالعات روی آویشن و رزماری نشان داده است که کاربرد GB با افزایش جذب مواد مغذی و شادابی کلی گیاه، عملکرد و کیفیت اسانس را افزایش داد (Burbulis *et al.*, 2022; Tisarum *et al.*, 2019). ورود GB به مسیرهای متابولیکی گیاه با افزایش سطح متابولیت‌های ثانویه، که شامل اجزای اسانس هستند، مرتبط دانسته شده است (Shafiq *et al.*, 2021). زمان و روش کاربرد GB از عوامل حیاتی مؤثر بر نتایج هستند. کاربرد برگ‌ی GB اغلب در افزایش تحمل به تنش و تولید اسانس نسبت به کاربرد ریشه‌ای (احتمالاً به دلیل جذب مستقیم توسط بافت‌های برگ) مؤثرتر است (Kockmaz *et al.*, 2015). این روش امکان افزایش سریع عملکردهای سلولی را فراهم می‌کند و می‌تواند منجر به بهبود قابل توجه در عملکرد و کیفیت اسانس در گیاهانی شده است که تحت تنش خشکی قرار داشتند (Hafez *et al.*, 2021).

نتیجه گیری

به طور خلاصه، هم تنش خشکی و هم کاهش اثرات آن از طریق تیمار گلیسین بتائین نقش مهمی در تعیین تولید اسانس در ریحان دارند. در حالی که تنش خشکی معمولاً منجر به کاهش عملکرد اسانس و تغییر ترکیب آن می‌شود، استفاده از گلیسین بتائین می‌تواند انعطاف‌پذیری را افزایش داده و سنتز ترکیبات ارزشمند اسانس را ارتقا دهد. این یافته‌ها یک رویکرد عملی برای بهبود عملکرد اسانس در مواجهه با تغییرات آب و هوایی را پیشنهاد می‌کند و اهمیت ادغام محرک‌های زیستی مانند گلیسین بتائین را در شیوه‌های کشاورزی برای محصولات معطر تقویت می‌کند.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان که حمایت مالی و اجرایی این تحقیق را طی طرح شماره

۱۴۰۳/۰۵ به عهده داشته است سپاسگزاری می‌نمایند.

منابع

Abd-Elghany, S. E., Moustafa, A. A., Gomaa, N. H., & Hamed, B. E. A. (2021). Mycorrhizal impact on *Ocimum basilicum* grown under drought stress. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 10, 1-13.

Adams, R.P. (2001). Identification of essential oil components by gas chromatography/quadrupole mass spectroscopy. *Allured Publishing Corporation*. P.456.

Agami, R. A., Medani, R. A., Abd El-Mola, I. A., & Taha, R. S. (2016). Exogenous application with plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) or proline induces stress tolerance in basil plants (*Ocimum basilicum* L.) exposed to water stress. *Int J Environ Agri Res*, 2(5), 78.

Ahmed, N., Zhang, Y., Li, K., Zhou, Y., Zhang, M., & Li, Z. (2019). Exogenous application of glycine betaine improved water use efficiency in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) via modulating photosynthetic efficiency and antioxidative capacity under conventional and limited irrigation conditions. *The Crop Journal*, 7(5), 635-650.

Ahmed, N., Zhu, M., Li, Q., Wang, X., Wan, J., & Zhang, Y. (2021). Glycine betaine-mediated root priming improves water stress tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agriculture*, 11(11), 1127.

Al-Huqail, A., El-Dakak, R. M., Sanad, M. N., Badr, R. H., Ibrahim, M. M., Soliman, D., & Khan, F. (2020). Effects of climate temperature and water stress on plant growth and accumulation of antioxidant compounds in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) leafy vegetable. *Scientifica*, 2020(1), 3808909.

Ali Rezaei, M., Jokar, I., Ghorbanli, M., Kaviani, B., & Kharabian-Masouleh, A. (2012). Morpho-physiological improving effects of exogenous glycine betaine on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cv. PS under drought stress conditions. *Plant Omics*, 5(2), 79-86.

Aminifard, M. H., Jorkesh, A., Fatemi, H., & Mohammadi, S. (2024). Influence of an exogenous application of glycine betaine and methionine on biochemical and morphological traits of basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Horticulture and Postharvest Research*, 263-276.

Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and experimental botany*, 59(2), 206-216.

Burbulis, N., Blinstrubienė, A., Baltušnikienė, A., & Deveikytė, J. (2022). Foliar spraying with potassium bicarbonate reduces the negative impact of drought stress on sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Plants*, 11(13), 1716.

Consentino, B. B., Vultaggio, L., Sabatino, L., Ntatsi, G., Roupael, Y., Bondi, C. & Mauro, R. P. (2023). Combined effects of biostimulants, N level and drought stress on yield, quality and physiology of greenhouse-grown basil. *Plant Stress*, 10, 100268.

Farouk, S., & Omar, M. M. (2020). Sweet basil growth, physiological and ultrastructural modification, and oxidative defense system under water deficit and silicon forms treatment. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39, 1307-1331.

Gupta, N., & Thind, S. (2015). Improving photosynthetic performance of bread wheat under field drought stress by foliar applied glycine betaine. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(1), 75-86.

Hafez, E. M., Gowayed, S. M., Nehela, Y., Sakran, R. M., Rady, A. M., Awadalla, A., & Alowaiesh, B. F. (2021). Incorporated biochar-based soil amendment and exogenous glycine betaine foliar application ameliorate rice (*Oryza sativa* L.) tolerance and resilience to osmotic stress. *Plants*, 10(9), 1930.

- Hussain Wani, S., Brajendra Singh, N., Haribhushan, A., & Iqbal Mir, J. (2013).** Compatible solute engineering in plants for abiotic stress tolerance-role of glycine betaine. *Current Genomics*, 14(3), 157-165.
- Hussain, M., Malik, M. A., Farooq, M., Ashraf, M. Y., & Cheema, M. A. (2008).** Improving drought tolerance by exogenous application of glycinebetaine and salicylic acid in sunflower. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 194(3), 193-199.
- Ibrahim, E. A., Ebrahim, N. E., & Mohamed, G. Z. (2023).** Effect of water stress and foliar application of chitosan and glycine betaine on lettuce. *Scientific Reports*, 13(1), 17274.
- Kordi, S., Saidi, M., & Ghanbari, F. (2013).** Induction of drought tolerance in sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) by salicylic acid. *International Journal of Agricultural and Food Research*, 2(2), 18-26.
- Korkmaz, A., Değer, Ö., & Kocaçınar, F. (2015).** Alleviation of water stress effects on pepper seedlings by foliar application of glycinebetaine. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 43(1), 18-31.
- Mulugeta, S. M., & Radácsi, P. (2022).** Influence of drought stress on growth and essential oil yield of *Ocimum* species. *Horticulturae*, 8(2), 175.
- Ragab, M. E., Helal, N. A., Sawan, O. M., Fawzy, Z. F., & El-Sawy, S. M. (2015).** Foliar application of glycine betaine for alleviating water stress of tomato plants grown under sandy soil conditions. *Int. J. ChemTech Res*, 8(12), 52-67.
- Rahimi, M., Mortazavi, M., Mianabadi, A., & Debnath, S. (2023).** Evaluation of basil (*Ocimum basilicum*) accessions under different drought conditions based on yield and physio-biochemical traits. *BMC Plant Biology*, 23(1), 523.
- Reynolds, S.G., (1970).** The gravimetric method of soil moisture determination Part I A study of equipment, and methodological problems. *Journal of Hydrology*, 11 (3), 258–273.
- Safwat, G., & Abdel Salam, H. S. (2022).** The effect of exogenous proline and glycine betaine on phyto-biochemical responses of salt-stressed basil plants. *Egyptian Journal of Botany*, 62(2), 537-547.
- Šerbo, A., Avdić, J., Pustahija, F., Murtić, M. S., & Murtić, S. (2024).** Physiological response of basil plants (*Ocimum basilicum* L.) to drought. *Agriculture & Forestry/Poljoprivreda i šumarstv*, 70(3).
- Shafiq, S., Akram, N. A., Ashraf, M., García-Caparrós, P., Ali, O. M., & Latef, A. A. H. A. (2021).** Influence of glycine betaine (natural and synthetic) on growth, metabolism and yield production of drought-stressed maize (*Zea mays* L.) plants. *Plants*, 10(11), 2540.
- Shahbaz, M., Masood, Y., Perveen, S., & Ashraf, M. (2012).** Is foliar-applied glycinebetaine effective in mitigating the adverse effects of drought stress on wheat (*Triticum aestivum* L.)?. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 84(2), 192.
- Sirousmehr, A., Arbabi, J., & Asgharipour, M. R. (2014).** Effect of drought stress levels and organic manures on yield, essential oil content and some morphological characteristics of sweet basil (*Ocimum basilicum*). *Advances in Environmental Biology*, 8(4), 880-885.
- Tisarum, R., Theerawitaya, C., Samphumphung, T., Takabe, T., & Cha-Um, S. (2019).** Exogenous foliar application of glycine betaine to alleviate water deficit tolerance in two Indica rice genotypes under greenhouse conditions. *Agronomy*, 9(3), 138.
- Xing, W., & Rajashekar, C. B. (1999).** Alleviation of water stress in beans by exogenous glycine betaine. *Plant Science*, 148(2), 185-192.