Eco-phytochemical
Journal of Medicinal Plants
Print ISSN: 2322-3235
Online ISSN: 2783-4697
Iranian Society of Medical Plants

Evaluation of morpho-physiological responses of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf to the application of chemical and biological fertilizers under salinity stress in Fars and Tehran climates

Mostafa Salehi[1], Fatemeh Nakhaei[2*], SeyedGholamReza Mosavi[3], Reza Baradaran[3]

[1] Department of Horticultural science, Birjand branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran
[2] Department of Horticultural science, Birjand branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran, Email: nakhaei90@yahoo.com
[3] Agricultural, Medicinal Plants and Animal Sciences Research Center, Birjand branch, Islamic Azad University, Birjand, Iran

Article type:
Research article

Article history
Received: 24-08-2022
Revised: 03-11-2022
Accepted: 04-11-2022

Keywords
Biosulfur
Photosynthetic pigments
Leaf yield
Mycorrhizal fungus
Essential oil content
Nitroxin

Abstract

Plant nutrition from different sources of fertilizers is one of the most critical factors for crop improvement under stress conditions. The purpose of this research was to study the morpho-physiological responses of the lemongrass (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf) medicinal plant to the application of different fertilizer sources (control, NPK, nitroxin, mycorrhizal fungi, and biosulfur) under irrigation water salinity stress (0, 100, and 200 mM) in two climates (Fars and Tehran), implemented as a factorial split-plot based on a randomized complete block design in three replications during 2020-2021. Growth and yield attributes and also physiological traits such as photosynthetic pigments, proline content, and qualitative characteristics (essential oil percentage and yield) were measured. Results showed that high salinity concentration (200 mM) negatively affected growth and yield parameters (root dry weight and volume, plant height, number of leaves, and plant yield). The highest plant yield was obtained at 0 and 100 mM salinity with an average of 4183.1 and 4191.9 kg.ha^{-1}, respectively in Fars. Among the fertilizer treatments, there was no difference in terms of plant yield, and all of them led to an increase in yield compared to the control treatment. Using nitroxin biofertilizer under non-stress conditions in Fars region led to the highest total chlorophyll and chlorophyll a, which showed an increase by 51.3% and 47.0%, respectively, compared to the control. Salinity stress (200 mM) and the use of biosulfur in Tehran climate led to an increase in proline content. The use of NPK fertilizer and mycorrhizal fungi under severe salinity stress in Fars led to increases by 2.3 and 2.4 times in essential oil percentage. The lowest average essential oil was also observed in the application of biological and chemical fertilizers in Tehran. The highest essential oil yield was obtained in the application of mycorrhizal fungi under moderate salinity stress in Fars, which was 2.7 times higher compared to the control. All fertilizer treatments at 200 mM level in Fars also had the highest essential oil yield. In general, the lemongrass plant had a good tolerance against the salinity stress of irrigation water and the use of NPK, nitroxin, and mycorrhiza fertilizers while increasing the quantitative and qualitative yield led to the adjustment of the adverse effects caused by the salinity stress.

Cite this article as: Salehi, M., Nakhaei, F., Mosavi, S.Gh.R., Baradaran, R. (2023). Evaluation of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf morpho-physiological responses to the application of chemical and biological fertilizers under salinity stress in Fars and Tehran regions, Iran. *Eco-phytochemical Journal of Medicinal Plants*, 11(1): 79-99.

©The author(s)
Publisher: Islamic Azad University, Gorgan branch
Doi: 10.30495/ejmp.2023.702345
Dor: 20.1001.1.23223235.1402.11.1.6.7

اکوفیتوشیمی گیاهان دارویی
شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۳۲۳۵
شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۶۹۷
انجمن گیاهان دارویی ایران ثبت ۱۸۹۴۳
دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرگان

بررسی پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی گیاه دارویی *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf به کاربرد کودهای شیمیایی و زیستی تحت تنش شوری در اقلیم‌های فارس و تهران

مصطفی صالحی[۱]، فاطمه نخعی[۲*]، سیدغلامرضا موسوی[۳]، رضا برادران[۳]

۱ گروه علوم باغبانی، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران
۲ گروه علوم باغبانی، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران، رایانامه:nakhaei90@yahoo.com
۳ مرکز تحقیقات کشاورزی، گیاهان دارویی و علوم دامی، واحد بیرجند، دانشگاه آزاد اسلامی، بیرجند، ایران

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۲
تاریخ پذیرش: **۱۴۰۱/۰۸/۱۳**

واژه‌های کلیدی:
اسانس
بیوسولفور
رنگیزه‌های فتوسنتزی
عملکرد برگ
قارچ مایکوریزا
نیتروکسین

چکیده

تغذیه گیاه از منابع مختلف کودی یکی از عوامل مهم به‌زراعی در گیاهان تحت تنش محسوب می‌شود. پژوهش حاضر به‌منظور مطالعه پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی گیاه دارویی علف‌لیمو (*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf) به کاربرد منابع مختلف کودی (شاهد، NPK، نیتروکسین، قارچ مایکوریزا و بیوسولفور) تحت تنش شوری آب آبیاری (صفر، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌مولار) در دو اقلیم (فارس و تهران) به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ مورد اجرا قرار گرفت. صفات رشدی، عملکردی و همچنین صفات فیزیولوژیکی از جمله محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و پرولین و صفات کیفی (درصد و عملکرد اسانس) اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که شوری (۲۰۰ میلی‌مولار) اثرات منفی بر پارامترهای رشدی و عملکردی (وزن خشک و حجم ریشه، ارتفاع بوته، تعداد برگ و عملکرد گیاه) داشت. بیشترین عملکرد گیاه در شوری صفر و ۱۰۰ میلی‌مولار به ترتیب با میانگین ۴۱۸۳/۱ و ۴۱۹۱/۹ کیلوگرم در هکتار در منطقه فارس بدست آمد. در بین تیمارهای کودی، از نظر عملکرد گیاه تفاوتی وجود نداشت و همگی منجر به افزایش عملکرد در مقایسه با تیمار شاهد شدند. استفاده از کود زیستی نیتروکسین تحت شرایط بدون تنش در منطقه فارس منجر به ایجاد بیشترین محتوای کلروفیل کل و a شد که در مقایسه با شاهد به‌ترتیب افزایش ۵۱/۳ و ۴۷/۰ درصدی داشتند. تنش شوری (۲۰۰ میلی‌مولار) و استفاده از بیوسولفور در منطقه تهران منجر به بالا رفتن محتوای پرولین شد. استفاده از کود NPK و قارچ مایکوریزا تحت تنش شدید شوری در فارس منجر به افزایش ۲/۳ و ۲/۴ برابری درصد اسانس شدند. کمترین میانگین اسانس نیز در کاربرد کودهای زیستی و شیمیایی در تهران مشاهده شد. بیشترین عملکرد اسانس در کاربرد قارچ مایکوریزا در تنش شوری متوسط در فارس به‌دست آمد که در مقایسه با شاهد افزایش ۲/۷ برابری داشت. تمامی تیمارهای کودی در سطح ۲۰۰ میلی‌مولار در فارس نیز دارای بالاترین عملکرد اسانس بودند. به طور کلی، گیاه علف لیمو از تحمل خوبی در برابر تنش شوری آب آبیاری برخوردار بود و استفاده از کودهای NPK، نیتروکسین و مایکوریزا ضمن افزایش عملکرد کمی و کیفی، منجر به تعدیل اثرات منفی ناشی از تنش شوری نیز گردید.

استناد: صالحی، مصطفی؛ نخعی، فاطمه؛ موسوی، سیدغلامرضا؛ برادران، رضا. (۱۴۰۲). بررسی پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی گیاه دارویی *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf به کاربردکودهای شیمیایی و زیستی تحت تنش شوری در اقلیم‌های فارس و تهران. *فصلنامه اکوفیتوشیمی گیاهان دارویی*، ۱۱ (۱)، ۹۹-۷۹.

Doi: 10.30495/ejmp.2023.702345
Dor: 20.1001.1.23223235.1402.11.1.6.7

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گرگان
© نویسندگان.

مقدمه

علف لیمو با نام علمی *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf گیاهی یک‌ساله و متعلق به خانواده پوآسه و بومی جنوب شرق آسیا (کشورهای سریلانکا و هند) می‌باشد که به‌طور گسترده‌ای در مناطق مختلف دنیا پراکنده است (Mirzaei et al., 2020). این گیاه به‌واسطه دارا بودن اسانس، در صنایع داروسازی، آرایشی، بهداشتی و غذایی و همچنین در آروماتراپی کاربرد فراوانی داشته و سالانه مقادیر متنابهی از آن تولید و در کشورهای مختلف مصرف می‌شود (Idrees et al., 2010). برگ و اسانس تولیدی از برگ، بخش‌های اقتصادی این گیاه بوده که در صنایع مختلف کاربرد دارد (Tesfaye et al., 2017). بزرگ‌ترین تولید کننده این گیاه در جهان کشور هندوستان است و میانگین تولید سالیانه اسانس آن در دنیا حدود ۱۳۰۰ تن می‌باشد (Prins et al., 2013). اسانس علف‌لیمو به‌صورت کاملاً مشخصی از رشد باکتری و قارچ‌ها به‌شدت جلوگیری می‌کند، همچنین فعالیت آنتی‌اکسیدانی این گیاه به اثبات رسیده است. علاوه بر این، در بسیاری از نقاط جهان روغن علف لیمو به‌عنوان ضد باکتری و خواص ضد قارچی برای درمان بیماری‌های مختلفی مثل سرفه، سرماخوردگی، فشارخون، روماتیسم، درد کمر، مشکلات گوارشی، مشکلات مثانه، جذام و به‌عنوان شستشوی دهان برای دندان درد و لثه‌های متورم استفاده می‌شود (Tesfaye et al., 2017). علیرغم سابقه طولانی کشت و کار این گیاه دارویی در دنیا (بیش از ۴۵ سال) ولی در ایران کشت و کار این گیاه رواج چندانی نداشته و اخیراً در چند نقطه از کشور کشت‌هایی با وسعت کم در حال اجراست. لذا، اجرای پژوهش در مورد این گیاه دارویی پراهمیت، به‌دلیل نبود پژوهش‌های کافی لازم و ضروری می‌باشد.

تنش‌های غیرزنده باعث کاهش عملکرد محصولات کشاورزی در حدود ۷۱ درصد در کل کره زمین شده که از این میان تنش شوری کاهشی در حدود ۲۰ درصد را به خود اختصاص می‌دهد (Shahverdi et al., 2019). شوری حدود هفت درصد از زمین‌های دنیا (حدود ۹۳۰ میلیون هکتار) را تحت تأثیر قرار داده و براساس آمار موجود، ایران چهارمین رتبه را از نظر بیشترین درصد اراضی شور بعد چین، هند و پاکستان دارد (Shahverdi et al., 2020). تغذیه گیاهی یکی از راهکارهای مدیریتی در شرایط تنش محیطی از جمله خشکی و شوری است. در طی بروز تنش شوری به علت بالا رفتن غلظت املاح محلول در محیط ریشه و در نتیجه افزایش پتانسیل اسمزی خاک، از جذب عناصر غذایی تا حد زیادی کاسته می‌شود. بنابراین تغذیه مناسب تحت شرایط تنش می‌تواند تا حدی به گیاه در تحمل تنش‌های مختلف کمک کند (Kumar et al., 2020).

در سال‌های اخیر، استفاده از کودهای شیمیایی تا حد معینی باعث افزایش کمیت و کیفیت محصولات زراعی و دارویی شده است. اما نتایج برخی بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده طولانی مدت از کودهای شیمیایی باعث تخریب ساختمان خاک، افزایش هزینه‌ها و کاهش پتانسیل تولید و مشکلات زیست محیطی می‌شود (Ghahfarokhi et al., 2015). کاربرد کودهای آلی در خاک‌های فقیر سبب بهبود وضعیت تغذیه‌ای خاک شده و شرایط کیفی خاک را با بهبود ماده آلی خاک افزایش می‌دهد و می‌تواند جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی محسوب شوند. رویکرد در تولید گیاهان دارویی به سمت استفاده از نظام‌های کشاورزی پایدار می‌باشد. به‌کارگیری کودهای زیستی به‌عنوان یک استراتژی در کشاورزی پایدار می‌تواند علاوه بر افزایش تولید گیاهان دارویی، سبب افزایش میزان ماده مؤثره آن‌ها شود (Asghari et

al., 2016). مواد آلی به علت سودمندی که بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی (بیولوژیکی) و حاصلخیزی خاک دارند، از ارکان مهم باروری خاک به‌شمار می‌آیند (Abu-Dieyeh et al., 2017).

قارچ‌های مایکوریزا می‌توانند از طریق توسعه یک سیستم ریشه‌ای وسیع، افزایش کارایی فتوسنتزی و ظرفیت هدایت آب، افزایش جذب عناصر غذایی، دفع پاتوژن‌های خاکی و در نهایت تخفیف تنش‌های محیطی موجب افزایش قدرت حیات گیاهان طی فرآیند سازگاری شوند (Mahanty et al., 2017). پژوهش‌ها نشان داده است که تلقیح گیاهان با قارچ‌های مایکوریزا در شرایط خشکی و شوری نقش مهمی را در افزایش تحمل گیاه به محدوده وسیعی از تنش‌های محیطی ایفا می‌نماید که این همزیستی می‌تواند از بهبود روابط آبی، کسب مواد غذایی بیشتر و همچنین اصلاح ساختار خاک و تولید هورمون‌های گیاهی، در مقاومت گیاه مؤثر باشد (Yang et al., 2022). باکتری‌های محرک رشد گیاه نیز به طور مستقیم با افزایش حلالیت ترکیبات نامحلول مثل پتاسیم از طریق تولید اسیدهای معدنی و آلی، افزایش سطح تماس ریشه و بهبود همزیستی‌های مفید با گیاه میزبان در مراحل مختلف رشد به رشد بهتر گیاه کمک می‌کنند (Etesami and Alikhani, 2019). با توجه به اهمیت و نقش گیاهان دارویی در صنایع مختلف، نکته حائز اهمیت در تولید و پرورش این گونه‌های ارزشمند، افزایش تولید بدون کاربرد نهاده‌های مضر شیمیایی اعم از کود یا سموم دفع آفات و علف هرز می‌باشد. عقیده بر این است که قارچ‌های مایکوریزی می‌توانند جایگزین مناسبی برای بخشی از کودهای شیمیایی به خصوص کودهای فسفاته در اکوسیستم‌های مختلف باشند.

با توجه به اینکه ایران از اقلیم خشک و نیمه‌خشک برخوردار بوده و خاک‌های آن اغلب با کمبود مواد آلی مواجه هستند و از طرف دیگر، آهکی بودن این خاک‌ها مانع از جذب عناصر غذایی به‌ویژه عناصر کم‌تحرکی مانند فسفر می‌شوند. همچنین، تغذیه گیاهی در شرایط تنش شوری آب یا خاک، از اهمیت دو چندانی برخوردار می‌شود. لذا جایگزین نمودن کودهای شیمیایی با آلی و زیستی و یا کاربرد ترکیبی آنها، ضمن آزادسازی تدریجی عناصر غذایی مطابق با نیاز گیاه و افزایش کارایی نهاده‌ها از طریق توسعه ریشه گیاه، جذب بیشتر آب و عناصر غذایی و بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (Javadi et al., 2020) منجر به افزایش عملکردی منطقی و پایداری منابع تولید کشاورزی در دراز مدت می‌شود. با توجه به تحقیقات بسیار اندک به‌خصوص در داخل کشور در زمینه گیاه دارویی علف‌لیمو و از طرف دیگر اهمیت فوق‌العاده این گیاه دارویی، پژوهش حاضر با هدف مطالعه پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی این گیاه به تنش شوری در شرایط مزرعه‌ای در دو اقلیم متفاوت تحت تیمارهای مختلف کودهای آلی، زیستی و شیمیایی مورد اجرا قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در دو منطقه با اقلیم متفاوت، شهرستان ورامین در جنوب استان تهران (طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۳ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۶ دقیقه شرقی، ارتفاع از سطح دریا ۱۹۰ متر و میانگین بارندگی دراز مدت ۲۲۵ میلی‌متر) و شهرستان فیروزآباد در جنوب استان فارس (طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۸۴ دقیقه شرقی، ارتفاع از سطح دریا ۱۳۸۶ متر و میانگین بارندگی دراز مدت ۲۰۵ میلی‌متر) در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به‌صورت

اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار انجام شد.

اعمال تنش شوری آب آبیاری با استفاده از نمک کلرید سدیم (سه سطح) در کرت‌های اصلی شامل شاهد، ۵±۱۰۰ و ۵±۲۰۰ میلی‌مولار (به‌ترتیب معادل صفر، ۱۰ و ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر) صورت گرفت. کاربرد کودهای آلی، زیستی و شیمیایی در پنج سطح شامل عدم کاربرد کود به‌عنوان شاهد، کود شیمیایی (NPK با مقادیر ۱۰۰، ۱۵۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار)، مایکوریزا آربوسکولار (حاوی سویه‌های *Glomus mosseae*، *Glomus intraradices* و *Glomus etunicatum* با شمارش 10^{7} CFU/gr تا 10^{8}، مایکوروت، شرکت زیست فناور سبز)، نیتروکسین (حاوی 10^{7} CFU/gr تا 10^{8} باکتری‌های *Azotobacter chroecoccum*، *Azotobacter agillis*، *Azospirilium brazilens* و *Azospirilium lipophorum*: ساخت شرکت بیوتکنولوژی مهرآسیا، ایران) و بیوسولفور (حاوی باکتری‌های اکسید کننده گوگرد از جنس *Thionacillus* sp. با شمارش $5/1\times10^{8}$ CFU/gr و *Halothiobacillus neapolitanus* با شمارش $4/3\times10^{8}$ CFU/gr از برند کود بیولوژیک بیوسولفور شرکت کشاورزباشی) در کرت‌های فرعی مورد ارزیابی قرار گرفتند. کودهای زیستی براساس توصیه شرکت مصرف شدند. قبل از کشت آماده‌سازی زمین از قبیل شخم پاییزه، شخم بهاره و کرت‌بندی براساس نقشه طرح صورت گرفت. نمونه‌گیری از خاک محل آزمایش قبل از اجرای طرح از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است. تیمارهای کود آلی در ابتدای کاشت و تیمارهای کود شیمیایی نیز به‌صورت تقسیط در ابتدای کاشت و ۳۵ روز بعد از کاشت براساس توصیه شرکت تولید کننده اعمال شدند. کرت‌بندی با ابعاد ۵ در ۳ متر و کاشت با فواصل ۵۰ سانتی‌متری روی ردیف و بین ردیف با شش خط کاشت انجام شد. کشت (با روش تقسیم بوته) با استفاده از پاجوش‌های علف‌لیمو تهیه شده از شرکت تکنوکشت شیراز در هر منطقه ورامین در اواسط اسفند و در فیروزآباد در اواخر اسفند انجام شد. عملیات زراعی شامل وجین، آبیاری، مبارزه با آفات و بیماری‌ها به‌صورت دوره‌ای صورت گرفت. به‌منظور آبیاری با آب شور از روش پیشنهادی عقیقی‌شاهوردی و همکاران (۲۰۱۸) استفاده گردید. میزان آب مصرفی به‌صورت روزانه برای دوباره پر کردن پروفایل خاک مزرعه تا عمق ۰/۵ متری در حد ظرفیت زراعی، آبیاری گردید. آبیاری با سیستم قطره‌ای با خروجی ۲۰۰ لیتر در ساعت انجام شد.

برای اندازه‌گیری صفات فیزیولوژیکی همانند محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی و پرولین و همچنین پارامترهای رشدی و عملکردی، نمونه‌گیری در اواسط و اواخر تیر ماه (بعد از گذشت تقریباً چهار ماه) به‌صورت تصادفی و با حذف اثر حاشیه‌ای صورت گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری میزان رنگیزه‌های فتوسنتزی، مقدار ۰/۲۵ گرم از برگ تازه را به‌همراه پنج میلی‌لیتر استون ۸۰ درصد در هاون چینی مخلوط گردید. در ادامه نمونه‌ها با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند و میزان جذب نمونه‌ها با استفاده از اسپکتروفتومتر (Jenway-6305 مجهز به میکروسل کوارتز) در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر اندازه‌گیری و سپس با استفاده از فرمول‌های زیر محتوای کلروفیل‌های a، b و کل و همچنین کارتنوئید محاسبه شدند (Lichtenthaler and Buschmann, 2001).

معادله ۱

$$\text{Chlorophyll a} = (19.3 \times A_{663} - 0.86 \times A_{645})\ V/\ 00\ W$$

معادله ۲

$$\text{Chlorophyll b} = (19.3 \times A_{645} - 3.6 \times A_{663})\ V/100\ W$$

معادله ۳

$$\text{Chlorophyll T} = \text{Chl a} \pm \text{Chl b}$$

معادله ۴

$$Carotenoids=20.2(A_{645}) \pm 8.02(A_{663})\times V/1000\ W$$

که در آن V= حجم محلول صاف شده، A= جذب نور در طول موج‌های ۴۷۰، ۶۶۳ و ۶۴۵، W= وزن تر نمونه برحسب گرم استخراج و سنجش پرولین با روش Bates و همکاران انجام شد (Bates et al., 1973). مقدار ۰/۲ گرم از نمونه برگی تر در ۱۰ میلی‌لیتر اسید سولفوسالسیلیک سه درصد به وسیله هاون ساییده در دستگاه سانتریفیوژ با دور ۱۳۰۰۰ دور در دقیقه در دمای چهار درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شد. سپس دو میلی‌لیتر از عصاره‌های صاف شده را به لوله‌های درب‌دار منتقل نموده و به همه لوله‌ها مقدار دو میلی‌لیتر معرف نین هیدرین و دو میلی‌لیتر اسید استیک گلاسیال اضافه گردید. پس از بستن درب لوله‌ها، آنها به مدت یک ساعت در حمام بن ماری و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و بعد از سرد شدن، به هر یک از لوله‌ها مقدار چهار میلی‌لیتر تولوئن اضافه شد. غلظت پرولین با استفاده از دستگاه اسپکتوفتومتر در طول موج ۵۲۰ نانومتر و با توجه به منحنی استاندارد برحسب میلی‌گرم بر گرم بافت تازه براساس معادله ۵ محاسبه گردید.

معادله ۵

$$\text{میکرومول پرولین در گرم وزن تر} = \left(\frac{\mu g\ prolin}{ml}\ \frac{ml\ toloen}{115.5\ (\frac{\mu g}{\mu mol})}\right) / \frac{g\ sample}{5}$$

با انتخاب سه بوته از هر کرت به‌صورت تصادفی، حجم و وزن خشک ریشه (در آون به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد)، ارتفاع بوته، تعداد شاخه و تعداد برگ بلافاصله بعد از برداشت اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری عملکرد گیاه، یک مترمربع از هر کرت برداشت (از ارتفاع ۱۰سانتی‌متری از سطح زمین) و با ترازوی با دقت بالا وزن شد. به‌منظور استخراج و اندازه‌گیری اسانس برگ، نمونه‌گیری در زمان برداشت گیاه انجام و از روش تقطیر با آب با استفاده از کلونجر استفاده شد. همچنین عملکرد اسانس براساس درصد اسانس و عملکرد گیاه محاسبه شد (Azizi et al., 2015).

جدول ۱: برخی ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی خاک (عمق صفر-۳۰ سانتی‌متر) و درجه حرارت (ماکزیمم و مینیمم) آزمایش در دو منطقه ورامین و فیروزآباد

ویژگی‌های فیزیکو-شیمیایی خاک	شهرستان ورامین (استان تهران)	شهرستان فیروزآباد (استان فارس)
شن (٪)	۲۰	۲۹/۳
رس (٪)	۳۸	۲۵/۶
سیلت (٪)	۴۲	۴۴/۳
بافت	لوم رسی سیلتی	لوم
pH	۷/۶۶	۷/۳۷
قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (دسی زیمنس بر متر)	۱/۹۴	۱/۶۳
ماده آلی (٪)	۰/۴	۰/۷۵
نیتروژن نیتراتی (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	۱/۸۳	۱/۹۱
فسفر قابل استخراج با بی‌کربنات سدیم (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	۷/۷۵	۹/۹۴
پتاسیم قابل استخراج با استات آمونیوم (میلی‌گرم در کیلوگرم خاک)	۳۴۸	۳۳۲
دمای حداکثر (^oC)	۳۹	۳۷
دمای حداقل (^oC)	-۲/۵	-۸/۵

بعد از جمع‌آوری داده‌ها و تست نرمال بودن آن، تجزیه واریانس داده‌های دو منطقه به صورت جداگانه با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۲ انجام شد. مقایسه میانگین داده‌های معنی‌دار براساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. همبستگی ساده بین صفات با استفاده نرم‌افزار Minitab نسخه ۱۹ صورت گرفت.

نتایج

تجزیه واریانس صفات: براساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، اثر شوری و کودهای شیمیایی و زیستی بر وزن خشک ریشه، حجم ریشه، ارتفاع بوته، تعداد شاخه، تعداد برگ، عملکرد گیاه، کلروفیل کل، a و b، کارتنوئید، پرولین و درصد اسانس در هر دو منطقه مورد اجرا معنی‌دار بودند. علاوه بر این اثر متقابل تنش شوری و تیمارهای کودی بر ارتفاع بوته، تعداد شاخه، تعداد برگ، کلروفیل کل، کلروفیل a، کلروفیل b، درصد و عملکرد اسانس در منطقه فارس و ارتفاع بوته، تعداد شاخه، تعداد برگ، کلروفیل b، کارتنوئید و پرولین در منطقه تهران معنی‌دار به‌دست آمد (جدول ۲ و ۳).

وزن خشک و حجم ریشه: نتایج مقایسه میانگین اثر تنش شوری آب آبیاری نشان داد که تنش شوری ۲۰۰ میلی‌مولار در فارس و تهران منجر به کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه (به‌ترتیب ۱۶/۲۷ و ۳۲/۵ درصد) و حجم ریشه (به‌ترتیب ۱۲/۳۷ و ۱۵/۰۶ درصد) در مقایسه با تیمار شاهد شد. ولی در بین سطوح صفر و ۱۰۰ میلی‌مولار تنش شوری از نظر وزن خشک ریشه و حجم ریشه تفاوت معنی‌داری در هر دو منطقه وجود نداشت (جدول ۴ و ۵). در بین ترکیبات کودی استفاده از کود شیمیایی، مایکوریزا آربوسکولار و همچنین نیتروکسین در منطقه فارس منجر به ایجاد بیشترین میانگین وزن خشک ریشه (به‌ترتیب ۲۹/۷۱، ۲۶/۳ و ۲۸/۵۵ گرم در بوته) و حجم ریشه (به‌ترتیب ۸۱/۱، ۷۴/۹ و ۸۰/۲۶ سانتی‌متر مکعب) شدند. در حالی که در منطقه تهران، استفاده از کود شیمیایی و نیتروکسین بیشترین وزن خشک ریشه (به‌ترتیب ۳۱/۸۵ و ۳۰/۳ گرم در بوته) و حجم ریشه (به‌ترتیب ۷۱/۱ و ۶۸/۵ سانتی‌متر مکعب) نشان داد کمترین میانگین این دو صفت در عدم کاربرد کود (شاهد) مشاهده شد (جدول ۴ و ۵).

ارتفاع بوته: در مقایسه میانگین اثر متقابل تنش شوری و تیمارهای کودی، بلندترین ارتفاع بوته علف‌لیمو مربوط به استفاده از بیوسولفور تحت شرایط بدون تنش شوری در منطقه فارس (۷۶/۴ سانتی‌متر) که در مقایسه با شاهد افزایش ۷/۵ درصد افزایش داشت ولی در منطقه تهران مربوط به استفاده از قارچ مایکوریزا تحت تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار در منطقه تهران (۸۲/۰۸ سانتی‌متر) بود که در مقایسه با تیمار شاهد افزایش ۱۵/۶ درصدی داشت. البته کاربرد کود شیمیایی NPK در هر سه سطح شوری در منطقه فارس نیز دارای بیشترین میانگین ارتفاع بوته بود. کمترین ارتفاع بوته علف‌لیمو در بالاترین سطح تنش شوری (۲۰۰ میلی‌مولار) و عدم مصرف کود در منطقه فارس و تهران (به‌ترتیب با میانگین ۴۱/۶۳ و ۳۵/۸۸ سانتی‌متر) مشاهده شد (جدول ۶ و ۷).

تعداد شاخه در بوته: براساس نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل تنش شوری و تیمارهای کودی، بیشترین تعداد شاخه در منطقه فارس و تهران (به‌ترتیب ۲۷ و ۲۰/۳ در بوته)، مربوط به استفاده از کود شیمیایی NPK در سطح بدون تنش شوری بود که در مقایسه با شاهد ۸۷/۶ و ۶۷/۱ درصد افزایش نشان دادند. در

حالی که در منطقه فارس و تهران کمترین تعداد شاخه (۴ و ۲/۶۷ در بوته) در تیمار عدم مصرف کود در بالاترین سطح تنش شوری بدست آمد (جدول ۶ و ۷).

تعداد برگ: در نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل، استفاده از کود شیمیایی NPK و قارچ مایکوریزا در سطح بدون تنش شوری، و استفاده از کود شیمیایی NPK در سطح ۲۰۰ میلی‌مولار هر دو در منطقه فیروزآباد و استفاده از کود شیمیایی NPK در سطوح صفر و ۱۰۰ میلی‌مولار شوری ، دارای بیشترین میانگین تعداد برگ در بوته بودند. کمترین تعداد برگ در بالاترین سطح تنش شوری و تیمار عدم کاربرد کود در منطقه فارس و تهران با میانگین (به‌ترتیب با ۱۷ و ۹/۰۹ عدد در بوته) مشاهده شد (جدول ۶ و ۷).

عملکرد گیاه: در گیاه علف‌لیمو کل اندام هوایی برداشت و مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌همین دلیل اندام هوایی به‌عنوان عملکرد گیاه محسوب می‌شود. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین عملکرد گیاه در منطقه فارس مربوط به سطوح شوری صفر و ۱۰۰ میلی‌مولار به‌ترتیب با میانگین ۴۱۸۳/۱ و ۴۱۹۱/۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). در منطقه تهران، بیشترین عملکرد مربوط به سطح شوری صفر میلی‌مولار با میانگین ۴۳۳۱/۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۵). کمترین میانگین عملکرد در بالاترین سطح شوری (۲۰۰ میلی‌مولار) با میانگین ۳۶۵۷/۰ و ۳۶۶۶/۳ کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب در منطقه فارس و تهران مشاهده شد (جدول ۵). در بین تیمارهای کودی، از نظر عملکرد گیاه تفاوتی وجود نداشت و همگی ترکیبات مورد استفاده منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد در مقایسه با تیمار بدون کاربرد کود (شاهد) شدند (جدول ۴ و ۵).

رنگیزه‌های فتوسنتزی: نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پایین‌ترین میانگین کلروفیل کل و a در استان تهران تحت تنش شدید شوری (۲۰۰ میلی‌مولار) به‌ترتیب با میانگین ۲۵/۳ و ۱۳/۱ میکروگرم بر گرم وزن تر به‌دست آمد (جدول ۵). استفاده از کود شیمیایی، نیتروکسین و بیوسولفور منجر به افزایش محتوای کلروفیل کل و a در استان تهران در مقایسه با تیمار عدم کاربرد کود گردید (جدول ۵). مقدار بیشترین محتوای کلروفیل کل، a و b (به‌ترتیب با میانگین ۳۷/۱۵، ۲۴/۸۴ و ۱۲/۳۳ میکروگرم بر گرم وزن تر) در استفاده از کود زیستی نیتروکسین و استفاده از مایکوریزا (به‌ترتیب با میانگین ۳۳/۸، ۲۱/۳ و ۱۲/۵ میکروگرم بر گرم وزن تر) تحت شرایط بدون تنش شوری و در منطقه فارس مشاهده شد (جدول ۶). در منطقه تهران، کاربرد نیتروکسین، کود شیمیایی و عدم مصرف تحت شرایط بدون تنش شوری دارای بیشترین میانگین کلروفیل b بودند (جدول ۷). تحت شرایط تنش شدید شوری (۲۰۰ میلی‌مولار) در منطقه فارس تحت همگی سطوح تیمارهای کودی منجر به ایجاد کمترین میانگین کلروفیل کل، a و b شد (جدول ۶). در حالی که در منطقه تهران، عدم کاربرد کود تحت شرایط تنش شدید شوری کمترین میانگین کلروفیل b (۹/۹۱ میکروگرم بر گرم وزن تر) را نشان داد (جدول ۷).

شوری منجر به کاهش معنی‌دار میانگین کارتنوئید شد. به طوری که کمترین میانگین کارتنوئید (۲/۱۵ میکروگرم بر گرم وزن تر) در سطح شوری ۲۰۰ میلی‌مولار در منطقه فارس به‌دست آمد در حالی بین سطوح صفر و ۱۰۰ میلی‌مولار تفاوت معنی‌داری از نظر کارتنوئید وجود نداشت (جدول ۴). عدم کاربرد کود کمترین و کاربرد شیمیایی، نیتروکسین و

بیوسولفور بیشترین محتوای کارتنوئید را در منطقه فارس نشان دادند (جدول ۴). در مقایسه میانگین اثر متقابل، بیشترین محتوای کارتنوئید در استفاده از کودهای بیوسولفور و مایکوریزا در منطقه تهران به‌ترتیب با میانگین (۲/۷۷ و ۲/۳۶ میکروگرم بر گرم وزن تر) مشاهده شد. کمترین میانگین نیز در عدم استفاده از کود و استفاده از کود شیمیایی در منطقه تهران به‌ترتیب با میانگین ۰/۷۸ و ۱/۴۳ میکروگرم بر گرم وزن تر به‌دست آمد (جدول ۷).

پرولین: تنش شوری منجر به افزایش معنی‌دار محتوای پرولین شد به طوری که در منطقه فارس در سطح شوری ۲۰۰ میلی‌مولار بالاترین میانگین پرولین با میانگین ۴/۰۶ میکرومول بر گرم وزن تر به‌دست آمد (جدول ۴). در منطقه فارس نیز، کاربرد تمامی کودهای زیستی و شیمیایی، دارای بالاترین میانگین پرولین در برگ گیاه علف‌لیمو بودند. کمترین پرولین برگ در عدم مصرف کود با میانگین ۲/۵۴ میکرومول بر گرم وزن تر به‌دست آمد (جدول ۴). در مقایسه میانگین اثر متقابل، بیشترین محتوای پرولین مربوط به‌بالاترین سطح تنش شوری (۲۰۰ میلی‌مولار) و استفاده از بیوسولفور و نیتروکسین در منطقه تهران به‌ترتیب با میانگین ۴/۶۳ و ۴/۱۴ میکرومول بر گرم وزن تر بودند (جدول ۷).

درصد و عملکرد اسانس: در مقایسه میانگین اثر متقابل در منطقه فارس (جدول ۶)، بیشترین درصد اسانس مربوط به استفاده از کود شیمیایی NPK و قارچ مایکوریزا تحت تنش شدید شوری (۲۰۰ میلی‌مولار) به‌ترتیب با میانگین ۵/۶۸ و ۶ درصد بود. علاوه بر این، در سطح شوری شدید (۲۰۰ میلی‌مولار) تمامی تیمارهای کودی منجر به ایجاد بالاترین عملکرد اسانس شدند (جدول ۶). علاوه بر این، بیشترین عملکرد اسانس در کاربرد قارچ مایکوریزا تحت شرایط تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار در منطقه فارس با میانگین ۲۳۳/۰۸ گرم در هکتار به‌دست آمد که در مقایسه با شاهد افزایش ۲/۷ برابری داشت. کمترین عملکرد اسانس مربوط به کاربرد کودهای زیستی مایکوریزا، نیتروکسین و بیوسولفور تحت شرایط بدون تنش و در منطقه تهران و عدم کاربرد کود و کاربرد کودهای شیمیایی، نیتروکسین و بیوسولفور در منطقه فارس تحت شرایط بدون تنش بود (جدول ۶).

همبستگی بین صفات: نتایج همبستگی ساده بین صفات رشدی، عملکردی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی علف‌لیمو تحت تأثیر تیمارهای کودی و تنش شوری در دو منطقه در جدول ۸ ارائه شده که نشان از وجود همبستگی معنی‌دار مابین صفات دارد. عملکرد گیاه علف‌لیمو با صفات وزن خشک ریشه، حجم ریشه، ارتفاع بوته، تعداد شاخه، تعداد برگ، کلروفیل کل، کلروفیل a و کارتنوئید همبستگی مثبت و معنی‌دار و با صفت محتوای پرولین برگ و همچنین درصد اسانس به‌ترتیب همبستگی منفی معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد داشت. همچنین درصد اسانس برگ با صفات رشدی و مورفولوژیکی همبستگی منفی ولی با محتوای پرولین و عملکرد اسانس همبستگی مثبت نشان داد.

جدول ۲: اثر کودهای شیمیایی و زیستی بر پارامترهای رشدی، عملکردی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی علف‌لیمو تحت تنش شوری در شرایط اقلیمی استان فارس

منابع تغییرات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)											
		وزن خشک ریشه	حجم ریشه	ارتفاع بوته	تعداد شاخه	تعداد برگ	عملکرد گیاه	کلروفیل کل	کلروفیل a	کلروفیل b	کارتنوئید	پرولین	درصد اسانس	عملکرد اسانس
بلوک	۲	۵۲/۹ ns	۳۷/۷ ns	۳۸۰/٦ ns	۳۰/٤ **	۱٦۱/۱ ns	٦۸۷٤۳/۷ ns	۸/۰٦ ns	۷/۸۷ ns	۰/۱۲ ns	۰/۹۹ ns	۰/۱۷ ns	۰/۱٦**	۳۳۳/٤ ns
شوری (S)	۲	۱۸۰/۳*	۵۳۱/٦*	۳۵۳/۱*	۵۳/٦*	۵۰٤/٦**	۱٤۰۷۲۷۷/٦**	۹۷٦/۱**	٤۱۷/۳**	۱۱۸/۷**	۵/۹۹**	۵/٦۸*	٤٤/۲**	۵۵۷٦۸/٤**
خطای ۱	٤	۳۱/۸	٦٤/٤	٤۱/۹	۷/۸۵	۱۲/۲	۷۹۳۷۳/۱	۷/۱۸	۰/۹۱	۳/۰۹	۱/۰۸	۰/۳۳	۰/۹۵	۱۹۲۹/۷
کود (F)	٤	۷۸/۸**	۲۹۲/۲**	۱۵۳/۰**	۱٤۳/۵**	۱۸۳۹/۸**	۷٤۲۲۱۷/۲*	۱۳۳/۲ **	۵٦/۷**	۲۰/۲۳**	۲/۷۹ ns	۲/۷۸**	۱/۲۹ **	٤۱۲۲/۰**
S × F	۸	۱۰/۰ ns	٤۱/۱ ns	۲٤۸/۵**	۹٤/۲**	٦٤۲/۷**	۳۸۷۹۷۹/۰ ns	۵۲/۲**	۱۹/۰۱*	۱۲/۵**	۱/۵٤ns	۰/۲۲ns	۰/۷۱ **	۲۵۷۵/۹**
خطای کل	۲٤	۱۸/۳	۵۰/۸	۲۵/۳	۲/۲٦	۵۲/۱	۲۵۲۲۷۲/۰	۹/۲۲	٦/۱۳	۲/٦۵	٤/۱٤	۰/۲۸	۰/۲۰	٦٤۵/۲
ضریب تغییرات (٪)	–	۱٦/۲۷	۹/٤٤	۷/۵٦	۱٦/۹۱	۱٦/۵۲	۱۲/۵۲	۱٤/۷۱	۱٦/۵۳	۲۸/۷۲	۲۷/۳۰	۱۵/۵۹	۱۱/۳٦	۱٦/۰۵

ns غیر معنی‌دار و * و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

جدول ۳: اثر کودهای شیمیایی و زیستی بر پارامترهای رشدی، عملکردی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی علف‌لیمو تحت تنش شوری در شرایط اقلیمی استان تهران

منابع تغییرات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)										
		وزن خشک ریشه	حجم ریشه	ارتفاع بوته	تعداد شاخه	تعداد برگ	عملکرد گیاه	کلروفیل کل	کلروفیل a	کلروفیل b	کارتنوئید	پرولین	درصد اساسی	عملکرد اساسی
بلوک	۲	۹/۷۸ ns	۸/۴۲ ns	۶۸/۳۸ ns	۶۰/۹۵۰۰	۶۹۹ ns	۲۲۱۸۱۳۶ ns	۴/۴۷ ns	۰/۵۲ ns	۲/۰۲ ns	۰/۰۳ ns	۰/۰۸ ns	۰/۱۴ ns	۱۱۸/۳ ns
شوری (S)	۲	۶۸۸/۶۰	۷۹۱/۲۰	۱۴۶۳/۷۰	۸۱/۴۸۰۰	۱۴۰۳/۷۰۰	۱۶۶۷۲۴۲/۳۰۰	۴۳/۱۵۰۰	۷/۶۳۰	۲۶/۰۲۰۰	۲/۰۷۰	۴۰/۱۰۰	۲۵/۵۰۰	۲۶۲۱۰۹۰۰
خطای ۱	۴	۸۵/۵	۸۳/۱	۱۲۲/۷	۱/۰۸	۲۶/۲۴	۴۲۵۱۲/۴	۱/۶۰	۰/۶۰	۰/۳۷	۰/۱۵۵	۰/۱۷	۰/۰۷	۱۲۶/۷
کرد (F)	۴	۵۳۲/۲۰۰	۴۶۹/۴۰۰	۲۴۵/۷۰	۳۸/۷۴۰۰	۴۴۶/۰۰۰	۱۱۱۹۱۳۷/۱۰۰	۲۰/۲۷۰	۳/۶۶۰۰	۹/۱۷۰	۰/۶۳۰	۱/۴۲۰۰	۰/۹۲۰	۴۲۲/۳ ns
S × F	۸	۴۴/۳۸ ns	۳۱/۱۴ ns	۳۱۵/۲۰۰	۱۱۱/۴۰۰	۶۱۳/۵۰۰	۲۷۰۴۰۴/۵ ns	۹/۴۱ ns	۰/۸۹ ns	۹/۶۳۰	۰/۷۸۰۰	۰/۳۳۰۰	۰/۱۴ ns	۳۳۸/۷ ns
خطای کل	۲۴	۷۴/۱۴	۷۳/۳۱	۷۶/۸۸	۲/۱۲	۲۰/۲۵	۱۷۷۱۶۵/۸	۵/۰۳	۰/۶۵	۳/۰۹	۰/۲۲	۰/۰۸	۰/۲۸	۶۶۹/۱
ضریب تغییرات(٪)	-	۲۶/۶۰	۱۳/۵۹	۱۴/۱۴	۱۳/۶۴	۱۶/۵۶	۱۰/۴۹	۸/۲۴	۶/۰	۱۲/۸۳	۲۱/۹۶	۱۳/۴۳	۱۹/۲۱	۲۴/۱۵

ns غیر معنی‌دار و * و ** به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد.

جدول ٤: مقایسه میانگین اثر تنش شوری و ترکیبات کودی بر برخی صفات رشدی و فیزیولوژیک در گیاه دارویی علف‌لیمو در شرایط اقلیمی استان فارس

نام فاکتور/ سطوح فاکتور	وزن خشک ریشه (g/plant)	حجم ریشه (cm^3)	عملکرد گیاه (kg/ha)	کارتنوئید (µg/g FW)	پرولین (µmol/g FW)
تنش شوری (میلی‌مولار)					
شاهد	۲۷/۳٤±۵/۰۵ ab	۷۸/۳۲±۵/۸۷ a	٤۱۸۳/۱٤±٤۸۱/۵۵ a	۳/۳۷±۱/۳ a	۲/۸۳±۰/۷۸ c
۱۰۰±۵	۲۸/۷۵±٤/۹۳ a	۷۹/٤۸±۸/٦۳ a	٤۱۹۱/۹۷±٦۲۱/۲۲ a	۳/۰۷±۱/٤۱ a	۳/٤۷±۰/۷ b
۲۰۰±۵	۲۲/۸۹±۵/۱٦ b	٦۸/٦۳±۱۰/٤٤ b	۳٦۵۷/۰۹±۵۲۹/۲۱ b	۲/۱۵±۰/۳٦ b	٤/۰٦±۰/٦۷ a
LSD (α=۰/۰۵)	۵/۷۲	۸/۱۳	۲۸۰/۱۷	۰/۳۰	۰/۵۸
ترکیبات کودی					
C شاهد (بدون مصرف کود)	۲۲/۲۷±٦/۱۳ c	٦٦/۹۲±۱۱/۱٤ b	۳۵۱۵/۹۱±٤۰۸/۱ b	۲/۲±۰/٦۵ c	۲/۵٤±۰/۷٦ c
CH کود شیمیایی	۲۹/۷۱±۳/۲۸ a	۸۱/۱۱±۹/۲۳ a	٤۱۹۳/۰۵±٤٦۵/٦۷ a	۳/۱۱±۱/۰٤ abc	۳/۵۳±۰/۸ ab
AMF مایکوریزا آربوسکولار	۲٦/۳±۵/٤۸ abc	۷٤/۹±٦/۰٤ a	٤۱٤٤/۰۲±۷۹۳/٤۸ a	۲/۳٤±۰/۵۲ bc	۳/٤۲±۱/۰۳ a
NI نیتروکسین	۲۸/۵۵±٦/۱۱ ab	۸۰/۲٦±٦/۳٤ a	٤۱۹۵/۱±۵۸٤/۳۱ a	۳/۲۷±۱/۳٤ ab	۳/۹۹±۰/۵۲ a
BIO بیوسولفور	۲٤/۸۲±۳/٦۹ bc	۷٤/۱۸±۹/۰۷ a	٤۰۰۵/۵۹±٤٤٤/۵ a	۳/٤۱±۱/۷۹ a	۳/۷٦±۰/٤۳ab
LSD (α=۰/۰۵)	٤/۱٦	٦/۹۳	٤۸۸/٦	۱/۰۳	۰/۵۲

میانگین‌های (±SD) دارای حروف مشابه در هر ستون، از نظر آزمون مقایسه میانگین LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

جدول ۵: مقایسه میانگین اثر تنش شوری و ترکیبات کودی بر برخی صفات رشدی و فیزیولوژیک در گیاه دارویی علف‌لیمو در شرایط اقلیمی استان تهران

نام فاکتور/ سطوح فاکتور	وزن خشک ریشه (g/plant)	حجم ریشه (cm^3)	عملکرد گیاه (kg/ha)	کروفیل کل (µg/g FW)	کلروفیل a (µg/g FW)	درصد اسانس	عملکرد اسانس (گرم در هکتار)
تنش شوری (میلی‌مولار)							
شاهد	۲٤/۳۱±۱۱/٤۹ ab	٦٤/۷٤±۱۱/۳٥ a	٤۳۳۱/۹۳±٥٦٦/۰۹ a	۲۸/٦±۳/٥۸ a	۱٤/۳۲±۱/٤٦ a	۱/۷۷±۰/۳ c	۷٦/۲±۱٥/۷٥ c
۱۰۰±٥	۲۹/۸۷±۱۱/٥۸ a	٦۹/۱۹±۱۰/۷٤ a	٤۰۳۳/۱±٤۹۷/٦۸ b	۲۷/٦±۱/۳۹ a	۱۳/۰۳±۰/٦۸ b	۲/۲٥±۰/٤ b	۹۰/۳±۱۸/٦٤ b
۲۰۰±٥	۱٦/۳۹±۸/۰۳ b	٥٤/۹۹±۷/٦٤ b	۳٦٦٦/۳۱±٥۰۳/٦٦ c	۲٥/۳±۲/٤۷ b	۱۳/۱٦±۰/٥۷ b	٤/۲٤±۰/۷ a	۱٥٤/٦±۳۰/۳ a
LSD (α=۰/۰٥)	۹/۳۷	۹/۲٤	۲۰۹/۰	۱/۲۸	۰/۷۸	۰/۲۸	۱۱/٤۱
ترکیبات کودی							
C شاهد (بدون مصرف کود)	۱۳/۳۲±٦/۰۳ d	٥۳/۱٦±٦/٦٥ d	۳٤٥۲/۸۱±٤۸٤/۱۲ b	۲٥/۳±۲/۹ b	۱۲/٤±۰/٥۳b	۳/۳۱±۱/۳۸ a	۱۱۰/۹±۳۸/٦ a
CH کود شیمیایی	۳۱/۸٥±۱۱/۰۲ a	۷۱/۱۹±۱۰/۳٤ a	٤۳٤۷/۰٤±٦۰۰/٦٤ a	۲۸/۸٤±۲/٦ a	۱۳/۸±۱/۳ a	۲/٥٦±۱/۰۹ b	۱۰۸/۲±۳۹/۳ a
AMF مایکوریزا آربوسکولار	۲۲/۷۹±۱۰/۰٦ bc	٦۲/٦۲±۱۱/۰٥ bc	۳۹۹٦/٤±۳٥۸/۳۳ a	۲٦/۳۳±۱/٥ b	۱۳/٦±۰/۸۷ a	۲/٥٦±۱/۰۲ b	۱۰۳/۰±٤٥/۱a
NI نیتروکسین	۳۰/۳±۱۱/٤٥ ab	٦۸/٥۷±۱۱/۳٥ ab	٤۲۷۸/٥۱±۳۲۲/٥۱ a	۲۸/٥۷±۳/۸ a	۱٤/۱±۱/۲ a	۲/۷۳±۱/۳۳ b	۱۱٥/۳±٥۲/۱a
BIO بیوسولفور	۱۹/۳۷±۹/۷ cd	٥۹/۳۲±۹/٥۲ cd	۳۹۷۷/٤٦±٦۸٤/۰۱ a	۲٦/۹۸±۱/۹ ab	۱۳/٥±۰/۹۳a	۲/٦۱±۱/۲٤ b	۹۷/۷±۳٤/٥a
LSD (α=۰/۰٥)	۸/۳۷	۸/۳۳	٤۰۹/٥	۲/۱۸	۰/۷۸	۰/٥۱	۲٥/۱٦

میانگین‌های (±SD) دارای حروف مشابه در هر ستون، از نظر آزمون مقایسه میانگین LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

جدول ٦: مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه تنش شوری و ترکیبات کودی بر پارامترهای رشدی، عملکردی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی علف‌لیمو در شرایط اقلیمی استان فارس

شوری	تیمار کودی	ارتفاع بوته (cm)	تعداد شاخه در بوته	تعداد برگ در بوته	کلروفیل کل (µg/g FW)	کلروفیل a (µg/g FW)	کلروفیل b (µg/g FW)	درصد اسانس	عملکرد اسانس (گرم در هکتار)
صفر	شاهد	۷۰/٦+۱۳/۱٦ a-d	۳/۳۳+۲/۵۲ g	۱۸/۳۳+۷/۰۲ f	۱۸/۰۷+۰/۷۹ ef	۱۳/۱۵+۰/٤٦ de	٤/۹۳+۱/۲٤ cde	۲/٤۱+۱/۳۷ ef	۸۵/۰۵+٤٤/٦۷ cd
	کودشیمیایی	۷۳/۱+۳/۹۵ abc	۲۷+۲/٦۵ a	۷۱+٤/۵۸ a	۲٦/۲+۲/۲۵ cd	۲۰/۵۲+۰/۷۱ bc	۵/٦۸+۱/۵۵ cd	۱/۹۵+۰/٤۳ f	۸۳/٤۳+۱۲/۸ d
	مایکوریزا	٦٦+۹/۷۹ cde	۹/٦۷+۲/۵۲ cd	٦۵/٦۷+٦/۰۳ a	۳۳/۸۹+۲/۳۹ ab	۲۱/۳۸+۰/٦۷ ab	۱۲/۵۲+۱/۹۷ a	۲/۸۲+۰/۳۲ e	۱۲۷/۳+۲۳/۰٦ c
	نیتروکسین	٦۸/۳+۹/۳٦ a-d	۱۲+۱ bc	٤۸/۳۳+۸/۵ cd	۳۷/۱۵+٤/۷۹ a	۲٤/۸٤+۱/۵۸ a	۱۲/۳۳+۳/۳۱ a	۱/۷۳+۰/٤٤ f	۷۰/۷۹+۱٦/۲۳ d
	بیوسولفور	۷٦/٤۳+۵/۹ a	۳/۳۳+۱/۵۳ g	٤٤/۳۳+۹/۰۲ cd	۳۱/۰۸+۳/٤۳ bc	۲۲/٦۱+۳/۰۷ ab	۸/٤۸+۰/٦٤ b	۱/۸۱+۰/٤۵ f	۷٦/۳۳+۱۷/٤۷ d
۱۰۰ میلی‌مولار	شاهد	۵۷/۹۷+۷/٦ e	۷+۱ ef	۳٦/٦۷+٦/۵۱ de	۱٤/۹٦+۲/۰۸ fgh	۱۱/٦۲+۲/۳۲ e	۳/۳٤+۰/٦۱ de	۳/۱+۰/۱۵ e	۱۰۲/۱۷+۳/۷۲ cd
	کودشیمیایی	۷۱/۵+٦/۸۵ a-d	۸/٦۷+۲/۰۸ de	٤۳/۳۳+۵/۷۷ cd	۱۷/۷۲+۲/۹٦ efg	۱۲/۸۱+۲/۲۱ de	٤/۹۲+۰/۸٤ cde	٤/۷۹+۰/۰٦ cd	۲۱٤/۳۲+۱۸/٦۲ ab
	مایکوریزا	٦۵/۸۲+۷/٦۱ cde	۸+۲/٦۵ def	۳٦/۳۳+۵/۵۱ de	۱۵/۹۸+۳/۳٤ fgh	۱۱/۸۱+۲/۳٦ e	٤/۱۸+۱/۳۹ de	٤/۹۸+۰/۱ bc	۲۳۳/۰۸+۱۳/۰۷ a
	نیتروکسین	٦۷/۵۳+۵/۳۱ bcd	۵/٦۷+۲/۰۸ fg	۳۷/٦۷+٦/٦٦ de	۲۱/٤۳+٤/٦۷ de	۱٦/۵۳+٤/۷۸ cd	٤/۹۱+۰/٦ cde	٤/۲۲+۰/۵۸ d	۱۹۲/۷+۱۰/۷۹ ab
	بیوسولفور	۷٤/۹۳+٦/۸٤ ab	۱۰/۳۳+۳/۰٦ bcd	٦٤/۳۳+٤/۵۱ ab	۲٦/٦۲+۳/۰۲ c	۱۹/٤+۳/۷۷ bc	۷/۲۲+۳/٦۲ bc	٤/۵۸+۰/۰۹ cd	۱۷۸/۰۵+۱۳/۱٤ b
۲۰۰ میلی‌مولار	شاهد	٤۱/٦۳+۵/٤۳ f	٤+۳/٦۱ g	۱۷+۷/۵۵ f	۱۱/۷۷+۱/۱۵ h	۹/۰۷+۰/۸٦ e	۲/۷+۰/۳۵ e	۵/٦۸+۰/۸۲ ab	۱۹۹/۲٦+۲۲/۸٤ ab
	کودشیمیایی	۷٤/۹۷+۳/۰۱ ab	۱۰+۲ bcd	٦۸+۷ a	۱۲/۷۵+۲/٤۲ gh	۹/۸۵+۱/۷۹ e	۲/۹+۰/٦٤ e	۵/٦۸+۰/۲۹ ab	۲۱٤/٦۸+۲۳/۷٦ ab
	مایکوریزا	٦۷/۸۳+۷/٦۸ bcd	٤+۱ g	۲۳+۷ f	۱٤/۱۸+۰/۳۸ fgh	۱۰/٤۷+۰/۵۵ e	۳/۷۱+۰/۳۷ de	٦+۰/۸۷ a	۱۹٦/۵۷+۵۳/٤۱ ab
	نیتروکسین	٦٤/۲+۲/۳۹ de	۱۲/۳۳+۱/۵۳ b	۲۸/٦۷+۹/۰۲ ef	۱٤/۵۱+۳/٤۳ fgh	۱۰/۷۸+۲/٦۱ e	۳/۷۳+۰/۸٤ de	۵/۰۹+۰/۳۲ bc	۱۹٦/۸۷+٤۸/۷۸ ab
	بیوسولفور	۵۸+٤/٦۱ e	۸+۲ def	۵۳+۱۲ bc	۱۳/۳۲+۳/۵۵ fgh	۹/۷۹+۲/۵ e	۳/۵٤+۱/۰۵ de	۵/۲۱+۰/۰۸ bc	۲۰۲/۷۱+۳۹/۲۲ ab
LSD = ۰/۰۵		۸/٤۹	۲/۵۳	۱۲/۱٦	۵/۱۱	٤/۱۷	۲/٤۷	۰/۷٦	٤۲/۸

میانگین‌های (±SD) دارای حروف مشابه در هر ستون، از نظر آزمون مقایسه میانگین LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند. C: شاهد (بدون مصرف کود)، CH: کود شیمیایی NPK، AMF: قارچ مایکوریزا آربوسکولار، NI: نیتروکسین، BIO: بیوسولفور

جدول ۷: مقایسه میانگین اثر متقابل تنش شوری و ترکیبات کودی بر پارامترهای رشدی، عملکردی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی علف‌لیمو در شرایط اقلیمی استان تهران

شوری	تیمار کودی	ارتفاع بوته (cm)	تعداد شاخه در بوته	تعداد برگ در بوته	کلروفیل b (µg/g FW)	کارتنوئید (µg/g FW)	پرولین (µmol/g FW)
صفر	شاهد	۶۹/۲۲+۱۸/۳ a-d	۶/۶۷+۲/۰۸ fg	۳۹/۲۲+۴/۹ b	۱۴/۱+۰/۸۲ a-e	۰/۹۹+۰/۰۵ cde	۰/۱۶+۰/۰۲ h
	کودشیمیایی	۶۴/۸۸+۴/۴۱ b-e	۲۰/۳۳+۲/۵۲ a	۵۴/۵۴+۲/۴۳ a	۱۶/۲+۱/۵۱ ab	۱/۷۵+۰/۱۷ bc	۰/۳۵+۰/۱۸ h
	مایکوریزا	۵۷/۷۵+۱۱/۵۷ de	۱۲/۳۳+۲/۵۲ bc	۳۴/۱۱+۲/۹۱ b	۱۲/۷۲+۱/۷۹ c-f	۲/۳۶+۰/۵۷ ab	۰/۹۲+۰/۱۲ g
	نیتروکسین	۵۱/۴۵+۴/۰۴ ef	۹+۲/۶۵ def	۲۲/۵۴+۴/۶۶ c	۱۶/۸۷+۲/۹۱ a	۱/۶۶+۰/۴۸ bcd	۰/۴+۰/۱۱ h
	بیوسولفور	۷۴/۸۵+۹/۶۱ abc	۱۲/۳۳+۱/۵۳ bc	۴۰/۲۲+۱/۷۸ b	۱۱/۸۷+۰/۶۷ def	۲/۷۷+۰/۵۲ a	۰/۶+۰/۰۵ gh
۱۰۰میلی- مولار	شاهد	۶۰/۹۵+۹/۸۱ cde	۴/۳۳+۲/۰۸ gh	۱۲/۳۶+۹/۱۵ f	۱۴/۶۲+۰/۳۲ a-e	۱/۵+۰/۰۴ cde	۱/۷۳+۰/۱۴ f
	کودشیمیایی	۷۸/۳۲+۵/۸۱ ab	۱۸/۳۳+۲/۰۸ a	۵۴/۳۷+۵/۷۹ a	۱۵/۱۲+۰/۹۲ abc	۰/۹+۰/۰۸ de	۲/۴۹+۰/۲۵ e
	مایکوریزا	۸۲/۰۸+۴/۸۶ a	۱۸+۱ a	۲۱/۹۴+۲/۲ cd	۱۳/۰۶+۰/۶۶ cde	۱/۷۵+۰/۴۸ bc	۲/۷۵+۰/۰۹ e
	نیتروکسین	۶۵/۰۸+۹/۳۱ b-e	۱۱/۳۳+۲/۰۸ cd	۱۴/۲۲+۲/۰۲ ef	۱۴/۸+۰/۸۸ a-d	۱/۱۹+۰/۰۲ cde	۲/۶۵+۰/۲۱ e
	بیوسولفور	۶۸/۴۵+۳/۵۵ a-d	۷/۶۷+۲/۰۸ ef	۱۴/۹۲+۴/۸۱ def	۱۵/۳+۰/۶۵ abc	۱/۵۷+۰/۰۱ de	۲/۵۹+۰/۲۶ e
۲۰۰میلی- مولار	شاهد	۳۵/۸۸+۴/۹۳ g	۲/۶۷+۱/۱۵ h	۱۱/۶۹+۲/۴۷ f	۹/۹۱+۳/۷۸ f	۱/۴۷+۰/۸۴ cde	۲/۹۶+۰/۳۳ de
	کودشیمیایی	۵۹/۴۲+۱۰/۲۱ de	۱۴/۶۷+۳/۲۱ b	۹/۰۹+۴/۳ f	۱۳/۸+۰/۶۵ b-e	۰/۷۸+۰/۱۷ e	۳/۲۵+۰/۳۳ cd
	مایکوریزا	۶۰/۱۸+۸/۶ cde	۴/۶۷+۳/۰۶ gh	۲۱/۰۴+۵/۸۱ cde	۱۲/۴۲+۰/۴۷ c-f	۱/۴۳+۰/۲۷ cde	۳/۶۸+۰/۲۵ bc
	نیتروکسین	۵۸/۷۲+۵/۲۸ de	۱۰+۴/۳۶ cde	۳۶/۳۶+۲/۶۴ b	۱۱/۷۳+۱/۹۷ ef	۱/۶۳+۰/۹۳ bcd	۴/۱۴+۰/۹۵ ab
	بیوسولفور	۴۲/۸۲+۱۲/۵ fg	۸+۲ ef	۲۰/۹۱+۴/۹۸ cde	۱۳/۱۱+۱/۸۷ cde	۱/۰۵+۰/۴۹ cde	۴/۶۳+۰/۲۳ a
	LSD = ۰/۰۵	۱۴/۷۷	۲/۴۵	V/۵۸	۲/۹۶	۰/۷۹	۰/۵

میانگین‌های (±SD) دارای حروف مشابه در هر ستون، از نظر آزمون مقایسه میانگین LSD در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند. C: شاهد (بدون مصرف کود)، CH: کود شیمیایی NPK، AMF: قارچ مایکوریزا آربوسکولار، NI: نیتروکسین، BIO: بیوسولفور

جدول ۸: همبستگی ساده بین صفات رشدی، عملکردی و فیزیولوژیکی گیاه دارویی علف لیمو تحت تاثیر تیمارهای کودی و تنش شوری در دو اقلیم فارس و تهران

نام صفات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳
۱ وزن ریشه	۱												
۲ حجم ریشه	۰/۸۴**	۱											
۳ ارتفاع بوته	۰/۵۱**	۰/۵۴**	۱										
۴ تعداد شاخه	۰/۴۲**	۰/۲۶*	۰/۱۹ns	۱									
۵ تعداد برگ	۰/۴۶**	۰/۵۸**	۰/۳۹*	۰/۴۷**	۱								
۶ عملکرد گیاه	۰/۶۲**	۰/۵۷**	۰/۴۷**	۰/۳۶*	۰/۴۵**	۱							
۷ کلروفیل کل	۰/۲۰ns	۰/۰۳ns	۰/۱۴ns	۰/۲۸*	۰/۰۹ns	۰/۳۹*	۱						
۸ کلروفیل a	۰/۲۹*	۰/۴۳**	۰/۳۰*	۰/۲۴ns	۰/۴۵**	۰/۴۰**	۰/۷۴**	۱					
۹ کلروفیل b	۰/۰۵ns	-۰/۳۰*	-۰/۰۴ns	۰/۲۰ns	-۰/۲۲ns	۰/۲۳ns	۰/۸۴**	۰/۲۵*	۱				
۱۰ کارتنوئید	۰/۲۴ns	۰/۵۸**	۰/۳۵*	۰/۱۷ns	۰/۵۸**	۰/۲۶*	۰/۰۲ns	۰/۶۴**	-۰/۴۸**	۱			
۱۱ پرولین	-۰/۰۴ns	۰/۱۵ns	-۰/۱۰ns	-۰/۱۹ns	۰/۰۴ns	-۰/۲۷*	-۰/۴۴**	-۰/۰۸ns	-۰/۵۶**	۰/۲۱ns	۱		
۱۲ درصد اسانس	-۰/۳۰*	-۰/۱۲ns	-۰/۳۲*	-۰/۳۵*	-۰/۰۷ns	-۰/۴۲**	-۰/۷۶**	-۰/۵۲**	-۰/۶۸**	-۰/۰۴ns	۰/۷۲**	۱	
۱۳ عملکرد اسانس	-۰/۱۲ns	۰/۰۶ns	-۰/۱۹ns	-۰/۳۰*	۰/۰۶ns	-۰/۱۴ns	-۰/۷۱**	-۰/۴۴**	-۰/۶۶**	۰/۰۳ns	۰/۷۱**	۰/۹۵**	۱

بحث

پژوهش حاضر به‌منظور بررسی پاسخ‌های مورفو-فیزیولوژیکی گیاه دارویی علف‌لیمو به کاربرد کودهای مختلف شیمیایی و زیستی تحت تنش شوری آب آبیاری در دو اقلیم متفاوت (استان فارس و تهران) مورد اجرا قرار گرفت. نتایج نشان داد که تنش شوری شدید (۲۰۰ میلی‌مولار) منجر به کاهش معنی دار میانگین صفات رشدی و عملکردی گیاه از جمله وزن خشک ریشه، حجم ریشه، ارتفاع بوته، تعداد شاخه در بوته، تعداد برگ و عملکرد کل گیاه شد ولی در اکثر صفات، شوری آب آبیاری متوسط (۱۰۰ میلی‌مولار) منجر به کاهش معنادار میانگین صفات ذکر شده نگردید (جداول ۵ و ۶). به بیان دیگر نتایج این پژوهش نشان داد که گیاه علف‌لیمو از نظر تحمل به تنش شوری از قابلیت خوبی برخوردار بوده و در شرایط شوری آب آبیاری عملکرد قابل قبولی دارد. در این راستا، نتایج مشابهی مبنی بر اثر کاهندگی تنش شوری آب آبیاری بر صفات رشدی و عملکردی در گیاهان مختلف از جمله استویا (Shahverdi et al., 2019 and 2020)، نوروزک (Akhondi et al., 2021) و آویشن (Fabriki Ourang and Davoodnia, 2018) گزارش شده است. کاهش وزن خشک ریشه و حجم ریشه در شرایط تنش شوری اتفاق افتاد. ریشه یک اندام ضروری گیاهی است که بر جذب و تبدیل منابع خاک تأثیر می‌گذارد و بنابراین تا حد زیادی رشد گیاه را تعیین می کند. بنابراین، تغییرات در ساختار ریشه به دلیل تنش شوری می‌تواند بر فرآیند فیزیولوژیکی از جمله جذب آب و جذب مواد مغذی در ریشه تأثیر بگذارد (Shahverdi et al., 2020). کاهش صفات عملکردی ناشی از تنش شوری احتمالاً به دلیل سمیت یونی، اختلالات غذایی و تعادل آب (تغییر در محتوای رطوبت نسبی) است. بنابراین کاهش سطح فتوسنتزی (کاهش تعداد و سطح برگ) منجر به افت معنادار میانگین صفات عملکردی شود (Acharya et al., 2020).

کاهش زیست‌توده تولیدی، کم شدن کارایی فتوسنتز و تغییر در میزان آماس برگ از اثرات اولیه شوری در گیاهان است. همچنین در طی تنش، همه فرآیندهای اصلی گیاه از قبیل تولید انرژی، متابولیسم چربی‌ها و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی تحت تأثیر قرار می‌گیرند (Shahverdi et al., 2019). تنش اسمزی از اثرات ثانویه حاصل از شوری است که باعث ایجاد تنش اکسیداتیو و در نتیجه تولید گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. گیاهان برای کاهش اثرات مخرب و پاکسازی رادیکال‌های آزاد اکسیژن در سلول‌های گیاهی از سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی آنزیمی و غیر آنزیمی (همچون پرولین، رنگیزه‌ها، قند محلول و غیره) برخوردارند (Shahverdi et al., 2019; Acharya et al., 2020). پرولین از طریق تنظیم اسمزی، جلوگیری از تخریب آنزیم، و مهار رادیکال هیدروکسیل، تحمل گیاه را به تنش بهبود می‌بخشد. در پژوهش حاضر نتایج نشان داد که تنش شوری آب آبیاری افزایش محتوای اسید آمینه پرولین را در برگ گیاه علف‌لیمو در پی داشت (جدول ۷).

آثار شوری بر گیاهان شامل ممانعت از رشد و تولید، کاهش فتوسنتز، تنفس و سنتز پروتئین‌ها و در نهایت، در سطوح بالاتر تنش شوری مرگ است (Pan et al., 2021). در پژوهش حاضر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت شرایط تنش شدید خشکی اتفاق افتاد. در این راستا پژوهشگران بیان داشتند که کاهش کلروفیل در شرایط تنش شوری ممکن است نتیجه توقف مسیر بیوسنتز، تحریک مکانیسم تخریبی آن و یا هر دو حالت باشد (Shahverdi et al., 2019). کاهش رنگیزه‌های فتوسنتزی تحت تنش شوری در گیاهان مختلف از جمله استویا (Shahverdi et al., 2019) و نعناع فلفلی (Alavi et al., 2020) مشاهده

شده است. کلروفیل یکی از اجزای کلروپلاست است که برای فتوسنتز مهم بوده و محتوی نسبی کلروفیل، رابطه‌ای مثبت با نرخ فتوسنتز دارد. غلظت‌های پایین رنگدانه‌های فتوسنتزی به طور مستقیم می‌تواند پتانسیل فتوسنتز و بنابراین تولید اولیه را محدود کند (Pan et al., 2021).

کارتنوئیدها به عنوان آنتی‌اکسیدان‌های بیولوژیکی نقش بسیار مهمی در حفاظت از بافت گیاهی ایفا می‌نمایند. عدم حضور کارتنوئیدها ممکن است باعث آسیب فتواکسیداتیو شدید در بافت گیاهی گردد. افزایش غلظت کارتنوئیدها تحت شرایط تنش متوسط شوری احتمالاً بخشی از سازوکارهای دفاعی گیاه در مقابله با تنش می‌باشد. این نکته که گیاهان مقاوم به شوری کارتنوئید بالاتری را دارا می‌باشند، توسط محققان مختلف گزارش شده است (Shahverdi et al., 2019).

مصرف بهینه کود در گیاهان ضمن افزایش عملکرد موجب افزایش تحمل در مقابل تنش‌های محیطی از قبیل خشکی و شوری می‌گردد. عناصر غذایی مختلفی جهت رشد و نمو گیاهان شناخته شده‌اند که در فرآیندهای متابولیک و فیزیولوژیک گیاه نقش‌های مختلفی دارند. پژوهشگران گزارش کرد که کود شیمیایی به علت در اختیار قرار دادن نیتروژن بیشتر در افزایش عملکرد اسانس در بابونه تأثیر زیادی دارد. تأثیر نیتروژن بر عملکرد اسانس مربوط به نقش فعالی است که نیتروژن در توسعه و تقسیم سلول‌های جدید حاوی اسانس دارد. همچنین احتمالاً به دلیل اینکه نیتروژن باعث افزایش نسبت کربوهیدرات‌ها به جیبرلین و اکسین می‌شود، عملکرد اسانس بهبود می‌یابد (Hariadi et al., 2016).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از قارچ مایکوریزا منجر به افزایش پارامترهای رشدی و عملکرد و تغییر صفات فیزیولوژیکی شد. در این راستا، اثر قارچ مایکوریزا آربوسکولار بر مقاومت تنش شوری بررسی و گزارش شد که همزیستی مایکوریزا به‌طور قابل ملاحظه‌ای باعث توسعه سیستم ریشه‌ای، افزایش ارتفاع گیاه، محتوای کلروفیل برگ‌ها، شدت فتوسنتز و هدایت روزنه‌ای در گیاهان برنج آپلند (Tisarum et al., 2020) و سنبل‌الطیب (Amanifar and Toghranegar, 2020) گردید. هیف‌های توسعه یافته قارچ‌های مایکوریزا قادر به رشد در منافذ خاک بوده که ریشه‌های مویین و تارهای کشنده قادر به نفوذ در آنها نیستند، در نتیجه دسترسی گیاه به عناصر غیر متحرک مانند فسفر افزایش می یابد. بنابراین شبکه هیف قارچ‌های میکوریزی قادرند راحت‌تر از ریشه گیاهان در خاک‌های متراکم نفوذ و باعث افزایش سیستم ریشه گیاهان گردند (Ghaderi et al., 2020).

یافته‌های پژوهش‌های پیشین نشان داد که اثر افزایش دهندگی کودهای شیمیایی در گیاهان دارویی در مقایسه با کاربرد کودهای آلی و زیستی کمی بالاتر است. از طرف دیگر در تولید متابولیت‌های دارویی از گیاهان، عدم استفاده از ترکیبات شیمیایی بسیار حائز اهمیت می‌باشد (Javan Gholiloo et al., 2020)، در پژوهش حاضر کاربرد قارچ مایکوریزا در قیاس با کود شیمیایی NPK در محتوای اسانس از کارایی بالایی برخوردار بود (جدول ۶).

در پژوهش حاضر کود زیستی نیتروکسین نیز از اثرات مثبتی در هر دو منطقه مورد آزمایش از نظر افزایش صفات رشدی و عملکردی برخوردار بود (جداول ۶ و ۷). در همین راستا، در پژوهش‌های مختلف گزارش شد که کاربرد کود نیتروکسین (حاوی 10^8 CFU/ml ازتوباکتر و آزوسپیلیوم) منجر به افزایش پارامترهای رشدی، عملکردی و محتوای اسانس در گیاهان دارویی شد (Mahdavi Khorami

et al., 2020; Heydari-Rahni et al., 2022). به نظر می‌رسد که ریزوباکتری‌های موجود در کود نیتروکسین علاوه بر تثبیت نیتروژن مولکولی، منجر به تولید هورمون اکسین می‌شود و از این طریق افزایش پارامترهای مرتبط به ریشه شده و جذب عناصر و آب را از خاک افزایش می‌دهد (Heydari-Rahni et al., 2022). این پژوهشگران همچنین بیان داشتند که کود زیستی نیتروکسین از توانایی سنتز هورمون‌های گیاهی و تنظیم کننده‌های رشدی از جمله جیبرلین، اکسین، ویتامین‌های و همچنین اسیدهای آمینه برخوردار هستند که در افزایش پارامترهای مورفولوژیک و عملکردی و همچنین تنظیم صفات فیزیولوژیک بسیار مؤثر می‌باشند.

در پژوهش حاضر تنش شوری منجر به افزایش معنی‌دار درصد اسانس شد و عملکرد اسانس نیز در سطح شوری متوسط (۱۰۰ میلی‌مولار) از میانگین بالاتری برخوردار بود (جدول ۶). حیدری-رهنی و همکاران (۲۰۲۲) بیان داشتند که اسانس‌های گیاهی ترکیبات ترپنوئیدی بوده و NADPH و ATP برای سنتز این ترکیبات ضروری می‌باشد که برای سنتز این دو ترکیب وجود عناصر فسفر و نیتروژن ضروری است، به‌همین دلیل افزایش درصد اسانس در اثر استفاده از کودهای زیستی و همچنین NPK اتفاق می‌افتد که نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر نیز این موضوع را اثبات می‌کند.

در مجموع صفات مورد مطالعه، کشت گیاه علف-لیمو در منطقه فارس (فیروزآباد) در مقایسه با تهران (ورامین) از کارایی بالایی برخوردار بود. یکی از دلایل برتری شهرستان فیروزآباد به‌نظر می‌رسد مساعد بودن دما و میزان تغییرات آن در طول فصل رشد و همچنین میزان رطوبت محیط باشد. در راستای یافته‌های این پژوهش، سایر پژوهشگران نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. به‌طور مثال برای گیاه دارویی استویا بیان داشتند که کشت در منطقه فیروزآباد استان فارس در مقایسه با کشت در منطقه انزلی استان گیلان از مطلوبیت بالایی در تولید عملکرد برگ و تولید متابولیت ثانویه برخوردار است. پژوهشگران دلیل برتری این منطقه را مطلوب بودن میزان دما و رطوبت محیط بیان داشتند (Shahverdi et al., 2019).

نتیجه‌گیری نهایی

به‌طور کلی یافته‌های پژوهش نشان داد که کشت گیاه دارویی علف‌لیمو در دو منطقه فیروزآباد (استان فارس) و ورامین (استان تهران) تحت شرایط تنش شوری امکان‌پذیر بوده و عملکرد کمی و کیفی مطلوبی نیز تولید می‌نماید. علاوه بر این تحت شرایط کشت مزرعه‌ای از آستانه تحمل خوبی در برابر تنش شوری آب آبیاری برخوردار است. نتایج نشان داد که تنش شوری ۱۰۰ میلی‌مولار در مقایسه با شرایط بدون تنش کاهش معنی‌دار میانگین صفات رشدی و عملکردی را در پی نداشت. از طرف دیگر، کاربرد کودهای مختلف آلی، شیمیایی و زیستی نیز با افزایش پارامترهای رشدی و عملکردی منجر به تعدیل اثرات منفی ناشی از تنش شوری شد. در بین ترکیبات کودی، استفاده از کود شیمیایی NPK، نیتروکسین و قارچ مایکوریزا تحت شرایط تنش شوری در کشت گیاه دارویی علف‌لیمو با توجه به هزینه کم این کودهای زیستی و همچنین پایین خسارات زیست-محیطی آنها، قابل توصیه می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد بنابه نبود تحقیقات کافی در مورد اثر تنش شوری بر گیاه دارویی علف‌لیمو، آستانه تحمل به تنش شوری در این گیاه در پژوهش‌های پیش‌رو ارزیابی و گزارش گردد.

References

Abu-Dieyeh, M.H., Diab, M., and Al-Ghouti, M.A. 2017. Ecological and agriculture impacts of bakery yeast wastewater use on weed communities and crops in an arid environment. Environmental Science and Pollution Research, 24: 14957-14969.

Acharya, P., Jayaprakasha, G.K., Crosby, K.M., Jifon, J.L. and Patil, B.S. 2020. Nanoparticle-mediated seed priming improves germination, growth, yield, and quality of watermelons (*Citrullus lanatus*) at multi-locations in texas. Scientific Reports, 10: 1-16.

Aghighi Shahverdi, M., Omidi, H. and Tabatabaei, S.J. 2018. Plant growth and steviol glycosides as affected by foliar application of selenium, boron, and iron under NaCl stress in *Stevia rebaudiana* Bertoni. Industrial Crops and Products, 125: 408-415.

Akhondi, M., Dashti, M., Niakan, M. and Mahmodzadeh Akharat, H. 2021. Nano-ZnO effect on yield, quantity and quality of *Salvia leriifolia* benth. essential oils under salinity stress conditions. Eco-Phytochemical Journal of Medicinal Plants, 9: 91-105.

Alavi, S.A., Ghehsareh, A.M., Soleymani, A., Panahpour, E. and Mozafari, M. 2020. Pepermint (*Mentha piperita* L.) growth and biochemical properties affected by magnetized saline water. Ecotoxicology and Environmental Safety, 201: 110775.

Amanifar, S. and Toghranegar, Z. 2020. The efficiency of arbuscular *Mycorrhiza* for improving tolerance of *Valeriana officinalis* L. and enhancing valerenic acid accumulation under salinity stress. Industrial Crops and Products, 147: 112234.

Asghari, M., Yousefirad, M., and Masumi, A. 2016. Effects of organic fertilizers of compost and vermicompost on qualitative and quantitative triats of *Lemon verbena*. Journal of Medicinal Plants, 15: 63-71.

Azizi, M., Mirmostafaee, S., Bahreini, M., Arouee, H. and Oroojalian, F. 2015. Evaluation of the effect of organic manure and compost application on growth, development, essential oil content, and microbial load in valerian (*Valeriana officinalis* L.). Journal of Plant Productions (Agronomy, Breeding and Horticulture), 38: 1-14.

Bates, L.S., Waldren, R.P. and Teare, I. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. Plant and Soil, 39: 205-207.

Etesami, H. and Alikhani, H.A. 2019. 'Halotolerant plant growth-promoting fungi and bacteria as an alternative strategy for improving nutrient availability to salinity-stressed crop plants. in, *Saline Soil-Based Agriculture By Halotolerant Microorganisms* (Springer).

Fabriki Ourang, S. and Davoodnia, B. 2018. Changes in growth characteristics and secondary metabolites in *Thymus vulgaris* L. under moderate salinity and drought shocks. Eco-Phytochemical Journal of Medicinal Plants, 6: 27-39.

Ghaderi, A., Noee, A., Ahmadi, K. and Saborifard, H. 2020. Evaluation the effects of *Thiobacillus* biological and chemical fertilizers on morphological and phytochemical characteristics of *Satureja hortensis* L. Eco-Phytochemical Journal of Medicinal Plants, 8: 13-29.

Ghahfarokhi, Y., Abdali Mashhadi, A., Bakhshandeh, A. and Lotfi Jalal Abadi, A. 2015. Evaluation of effect attract moisture substances and organic fertilizers on quality and quantity yield of purslane (*Portulaca oleracea* L.) in Ahwaz region. Journal of Plant Process and Function, 4: 87-96.

Hariadi, YC., Nurhayati, AY. and Hariyani, P. 2016. Biophysical monitoring on the effect on different composition of goat and cow manure on the growth response of maize to support sustainability. Agriculture and Agricultural Science Procedia, 9: 118-127.

Heydari-Rahni, M., Nasri, M., filizadeh, Y., Kasraei, P. and Azadi, P. 2022. Evaluation of growth, yield, and physiological responses of *Valeriana officinalis* L. to the application of urea, nitroxin, and phosphate Barvar-2 fertilizers. Eco-Phytochemical Journal of Medicinal Plants, 9: 73-92.

Idrees, M., Khan, MMA., Aftab, T., Naeem, M. and Hashmi, N. 2010. Salicylic acid-induced physiological and biochemical changes in lemongrass varieties under water stress. Journal of Plant Interactions, 5: 293-303.

Javadi, H., Rezvani Moghaddam, P., Rashed Mohasel, M.H. and Seghatoleslami, M.J. 2020. Evaluation of biomass yield and nitrogen and phosphorus efficiency indicators of portulaca (*Portulaca oleracea* L.) affected by organic, chemical and biological fertilizers. Iranian Journal of Field Crops Research, 18: 309-322.

Javan Gholiloo, M., Yarnia, M., Hassanzadeh Ghorttapeh, A., Farahvash, F. and Daneshian, A. 2020. The reaction of valerian to the application of bio-fertilizers under drought stress. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 30: 59-72.

Khorasaninejad, S., Mousavi, A., Soltanloo, H., Hemmati, K. and Khalighi, A. 2010. The effect of salinity stress on growth parameters, essential oil yield and constituent of peppermint (*Mentha piperita* L.). World Applied Sciences Journal, 11: 1403-1407.

Kumar, A., Singh, S., Gaurav, A.K., Srivastava, S. and Verma, J.P. 2020. Plant growth-promoting bacteria: biological tools for the mitigation of salinity stress in plants. Frontiers in Microbiology, 11: 1216.

Lichtenthaler, H.K. and Buschmann, C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV- VIS spectroscopy. Current Protocols in Food Analytical Chemistry, 1: F4. 3.1-F4. 3.8.

Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A. and Tribedi, P. 2017. Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. Environmental Science and Pollution Research, 24: 3315-3335.

Mahdavi Khorami, A., Masoud Sinaki, J., Amini Dehaghi, M., Rezvan, S. and Damavandi, A. 2020. Sesame (*Sesame indicum* L.) biochemical and physiological responses as affected by applying chemical, biological, and nano-fertilizers in field water stress conditions. Journal of Plant Nutrition, 43: 456-475.

Mirzaei, M., Ladan Moghadam, A., Hakimi, L. and Danaee, E. 2020. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) improve plant growth, antioxidant capacity, and essential oil properties of lemongrass (*Cymbopogon citratus*) under water stress. Iranian Journal of Plant Physiology, 10: 3155-3166.

Pan, T., Liu, M., Kreslavski, V.D., Zharmukhamedov, SK., Nie, C., Yu, M., Kuznetsov, V.V., Allakhverdiev, SI. and Shabala, S. 2021. Non-stomatal limitation of photosynthesis by soil salinity. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 51: 791-825.

Prins, C.L., Freitas, S.d.P., Gomes, M.d.M.d.A., Vieira, I.J.C. and Gravina, G.d.A. 2013. Citral accumulation in *Cymbopogon citratus* plant as influenced by N6-benzylaminopurine and light intensity. Theoretical and Experimental Plant Physiology, 25: 159-165.

Shahverdi, M.A., Omidi, H. and Damalas, C.A. 2020. Foliar fertilization with micronutrients improves *Stevia rebaudiana* tolerance to salinity stress by improving root characteristics. Brazilian Journal of Botany, 43: 55-65.

Shahverdi, M.A., Omidi, H. and Tabatabaei, S.J. 2019. Stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) responses to NaCl stress: Growth, photosynthetic pigments, diterpene glycosides and ion content in root and shoot. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 18: 355-360.

Tesfaye, H., Meskelu, E. and Mohammed, M. 2017. Determination of optimal soil moisture depletion level for Lemongrass (*Cymbopogon citratus* L.). Irrigat Drainage Sys Eng, 6: 2-8.

Tisarum, R., Theerawitaya, C., Samphumphuang, T., Polispitak, K., Thongpoem, P., Singh, H.P. and Cha-Um, S. 2020. Alleviation of salt stress in upland rice (*Oryza sativa* L. ssp. indica cv. Leum Pua) using arbuscular mycorrhizal fungi inoculation. Frontiers in Plant Science, 11: 348.

Yang, R., Qin, Z., Wang, J., Zhang, X., Xu, S., Zhao, W. and Huang, Z. 2022. The interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and trichoderma longibrachiatum enhance maize growth and modulate root metabolome under increasing soil salinity. Microorganisms, 10: 1042.