J. Soil Plant Interact. 2026; 17(3): 17–31. https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.20533

Journal of Soil and Plant Interactions

Journal homepage: https://jspi.iut.ac.ir/

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Effect of Different Composts on Physiological and Biochemical Responses of Rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.), a Medicinal Plant, Under Salt Stress

Esmaeil Karimi*, Sareh Hemmadi, Sirous Sadeghi and Seyed Bahman Mousavi

Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran
* Corresponding author, Email: ekarimi@maragheh.ac.ir, sm_ka80@yahoo.com

(Received: 21 February 2026; Revised: 19 May 2026; Accepted: 8 June 2026)

Abstract

Background and Objective: Soil salinity disrupts plant growth by causing osmotic and oxidative stresses. This study aimed to investigate the effect of compost modified by the Fenton process—an advanced oxidation method that enhances organic matter bioavailability—on the defense mechanisms of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) against oxidative stress.

Methods: The experiment was conducted as a factorial in a completely randomized design with three replications. Salinity levels were 0, 4, and 8 dS m^{-1}. Four compost treatments were used: control (no compost), ordinary compost (100% sheep manure), mixed compost (75% sheep manure + 25% raw sawdust), and Fenton-modified compost (75% sheep manure + 25% sawdust treated by the Fenton process). At the end of the experiment, various physiological and biochemical traits were measured – including antioxidant enzyme activities, hydrogen peroxide concentration, malondialdehyde concentration, proline content, electrolyte leakage, leaf relative water content, as well as fresh and dry weights of rosemary.

Results: Although all compost types improved rosemary performance under saline conditions, Fenton compost was the most effective treatment in all salinity levels, especially at 8 dS m^{-1}. Compared to the no-compost treatment, Fenton compost increased the activity of antioxidant enzymes: catalase (3.7-fold), ascorbate peroxidase (2.28-fold), guaiacol peroxidase (3.8-fold), and peroxidase (4.11-fold). Proline accumulation increased by 44.5%, which led to a 16.4% increase in leaf relative water content. Fenton compost also reduced hydrogen peroxide, electrolyte leakage, and malondialdehyde by 31, 36, and 35%, respectively. Dry yield of rosemary under Fenton compost was 3.14 times higher than the no-compost treatment and 1.75 times higher than ordinary compost.

Conclusion: It appears that Fenton-modified compost, by activating the plant's antioxidant defense system, can reduce the negative effects of salinity on rosemary under the conditions of this study. However, further field studies are needed to confirm its broader application.

Keywords: Antioxidant enzymes, Proline, Fenton process, Osmotic adjustment, Electrolyte leakage.

How to Cite: Karimi, E., Hemmadi, S., Sadeghi, S., Mousavi, S.B. 2026. Effect of different composts on physiological and biochemical responses of rosemary (*Rosmarinus officinalis* l.) under salt stress. J. Soil Plant Interact. 17(3), 17–31 (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.20533

Copyright © 2026 Isfahan University of Technology, Published by IUT Press. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

روابط خاک و گیاه ۱۴۰۵؛ ۱۷(۳): ۳۱-۱۷، https://doi.org/10.47176/jspi.17.3.20533

روابط خاک و گیاه

صفحه خانگی فصلنامه: https://jspi.iut.ac.ir/

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

تاثیر انواع کمپوست بر پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه دارویی اکلیل کوهی (*Rosmarinus officinalis* L.) تحت تنش شوری

اسماعیل کریمی*، ساره حمادی، سیروس صادقی و سید بهمن موسوی

گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: ekarimi@maragheh.ac.ir و sm_ka80@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۱۸)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: شوری خاک از راه ایجاد تنش‌های اسمزی و اکسیداتیو، رشد گیاهان را مختل می‌کند. این پژوهش با هدف بررسی تاثیر کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون، که یک روش اکسیداسیون پیشرفته برای بهبود زیست‌فراهمی مواد آلی محسوب می‌شود، بر سازوکارهای دفاعی موثر در برابر تنش اکسیداتیو در اکلیل کوهی (*Rosmarinus officinalis* L.) انجام شد.

روش‌ها: این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار با سه سطح شوری شامل صفر (تیمار شاهد)، ۴ و ۸ dS m^{-1} و چهار تیمار کمپوست شامل شاهد (بدون کمپوست)، کمپوست معمولی (۱۰۰ درصد فضولات گوسفندی)، کمپوست مخلوط (۷۵ درصد فضولات گوسفندی + ۲۵ درصد خاک اره خام) و کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون (۷۵ درصد کود گوسفندی + ۲۵ خاک اره تیمارشده با فرآیند فنتون) در سه تکرار و روی گیاه اکلیل کوهی انجام شد. در انتهای آزمایش شاخص‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه مانند برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی، غلظت پراکسید هیدروژن، غلظت مالوندی‌آلدهید، غلظت پرولین، نشت الکترولیت، محتوای نسبی آب برگ و همچنین وزن خشک و وزن تازه اندازه‌گیری شدند.

نتایج: اگرچه همه کمپوست‌های مورد استفاده عملکرد اکلیل کوهی را در شرایط شور بهبود بخشیدند، اما کمپوست فنتونی در تمام سطوح شوری، به‌ویژه شوری ۸ dS m^{-1} مؤثرترین تیمار بود. در تیمار کمپوست فنتونی، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان کاتالاز (۷/۳ برابر)، آسکوربات پراکسیداز (۲/۲۸ برابر)، گایاکول پراکسیداز (۳/۸ برابر) و پراکسیداز (۴/۱۱ برابر) نسبت به تیمار بدون کمپوست افزایش یافتند. این تیمار باعث افزایش تجمع پرولین به میزان ۴۴/۵ درصد شد که به افزایش ۱۶/۴ درصدی محتوای نسبی آب برگ انجامید. همچنین کمپوست فنتونی غلظت پراکسید هیدروژن، نشت الکترولیت، و مالوندی‌آلدهید را به‌ترتیب ۳۱، ۳۶، و ۳۵ درصد کاهش داد. عملکرد خشک اکلیل کوهی در این تیمار نسبت به شرایط بدون کمپوست ۳/۱۴ برابر و نسبت به کمپوست معمولی ۱/۷۵ برابر افزایش یافت.

نتیجه‌گیری کلی: به‌نظر می‌رسد کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون، با فعال‌سازی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، در شرایط مشابه این پژوهش توانایی کاهش پیامدهای شوری بر اکلیل کوهی را داشته باشد، هرچند اثبات کاربرد گسترده آن نیازمند پژوهش‌های مزرعه‌ای بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، پرولین، فرآیند فنتون، تنظیم اسمزی، نشت الکترولیت.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۵ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است:

Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

مقدمه

شوری خاک یکی از مهم‌ترین موانع دستیابی به کشاورزی پایدار در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌شمار می‌رود. بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد این پدیده بیش از ۲۰ درصد از زمین‌های آبی جهان (معادل ۲۲۷ میلیون هکتار) و بخش قابل توجهی از زمین‌های ایران را تحت تأثیر قرار داده است (FAO, 2021). آثار مخرب شوری بر گیاهان در چند سطح بروز می‌یابد. نخست، ایجاد تنش اسمزی با کاهش پتانسیل آب خاک که قابلیت جذب آب توسط ریشه را محدود کرده و منجر به آشفتگی‌های فیزیولوژیک مشابه خشکی می‌شود. دوم، بروز سمّیت یونی ناشی از تجمع یون‌های سدیم و کلرید در بافت‌های گیاهی که اختلال در جذب، انتقال و هومئوستازی عناصر ضروری مانند پتاسیم و کلسیم را به دنبال دارد. سوم، القای تنش اکسیداتیو ثانویه که با تولید انبوه گونه‌های فعال اکسیژن مانند پراکسید هیدروژن (H_2O_2) و رادیکال سوپراکسید ($O_2^{\bullet-}$) که در نهایت به تخریب ساختارهای حیاتی سلول از جمله پراکسیداسیون لیپیدهای غشایی، دناتوره شدن پروتئین‌ها و آسیب به اسیدهای نوکلئیک می‌انجامد (Van Zelm et al., 2020).

کشت گیاهان متحمل به شوری با ارزش اقتصادی زیاد و استفاده از فناوری‌های تعدیل‌کننده آثار شوری، به‌عنوان راهبردهای سازگار و پایدار برای بهره‌وری از خاک‌های شور و یا استفاده از آب‌های شور مورد توجه می‌باشند. اکلیل کوهی (*Rosmarinus officinalis* L.)، گیاهی چندساله و معطر از تیره نعناعیان، با دارا بودن ترکیبات فنولی ارزشمندی چون اسید رزمارینیک و اسید کارنوسیک، از جایگاه ویژه‌ای در صنایع دارویی، غذایی و آرایشی-بهداشتی برخوردار است (Mocan et al., 2021). اگرچه این گیاه به شوری نسبتاً مقاوم است (آستانه تحمل شوری حدود ۴ تا ۶ $dS\ m^{-1}$)، اما سطوح شوری بالاتر از ۸ $dS\ m^{-1}$، رشد آن را کاهش می‌دهند (Abdelkader et al., 2019; Kiarostami et al., 2010). برای نمونه، Abdelkader et al. (2019) دریافتند که سطوح شوری ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (حدود ۴ تا ۸ $dS\ m^{-1}$) به‌طور معنی‌داری موجب کاهش صفات رشدی، محتوای کلروفیل و درصد اسانس در گیاه اکلیل کوهی می‌شود. این کاهش عملکرد، لزوم توسعه راهکارهای مدیریتی برای کاهش خسارت ناشی از شوری در کشت این گیاه دارویی ارزشمند را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

یکی از راهکارهای امیدبخش، ارزان‌قیمت و پایدار برای کاهش آثار منفی شوری، کاربرد اصلاح‌کننده‌های آلی خاک مانند کمپوست است (Hasini et al., 2020). کمپوست با بهبود ساختار فیزیکی خاک، افزایش گنجایش تبادل کاتیونی و نگهداری آب، و همچنین تأثیر مستقیم بر فیزیولوژی گیاه از راه تحریک سیستم دفاعی و فراهمی تدریجی عناصر غذایی، مقاومت گیاه را در برابر تنش‌های محیطی افزایش می‌دهد (Ait-El-Mokhtar et al., 2022). با این وجود، اثربخشی کمپوست‌های سنتی اغلب محدود است، زیرا دارای مقادیر قابل توجهی از ترکیبات آلی با وزن مولکولی زیاد و پلیمری مانند لیگنوسلولز و هومین‌ها هستند که زیست‌فراهمی کمی برای گیاه دارند (Sayara et al., 2020 و Azim et al., 2018). به همین دلیل، استفاده از فناوری‌های نوین برای اصلاح کمپوست ضروری به نظر می‌رسد.

اخیراً، فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته مانند فرآیند فنتون در تولید کمپوست به‌کار گرفته شده‌اند، تا با تجزیه هدف‌مند و کنترل‌شده لیگنوسلولز و سایر پلیمرهای آلی پیچیده، کیفیت و کارایی کمپوست را متحول سازند. این فرآیند با تولید رادیکال‌های هیدروکسیل ($OH^{\bullet}$) بسیار قوی، قادر است ساختارهای آلی مقاوم را به مولکول‌های کوچک‌تر و ساده‌تر شکسته و در نتیجه، زیست‌فراهمی آن‌ها را برای گیاه افزایش دهد (Chen et al., 2022). Niu et al. (2021) نشان دادند که اعمال فرآیند شبه-فنتون در طی کمپوست‌سازی بازده استخراج اسیدهای هیومیک را تا ۳۸ درصد افزایش داده و ساختار آن‌ها را به‌سمت مولکول‌های کوچک‌تر با تراکم بیشتر گروه‌های عامل کربوکسیل و فنولیک سوق می‌دهد. این تغییرات ساختاری بسیار مهم هستند، چرا که اسیدهای هیومیک با وزن مولکولی کمتر و گروه‌های عامل بیشتر، فعالیت بیولوژیک قوی‌تری داشته و در القای مقاومت به تنش در گیاهان نقش مؤثرتری ایفا می‌کنند

(Nardi et al., 2016). علاوه بر این، این فرآیند می‌تواند جامعه میکروبی کمپوست را با افزایش جمعیت باکتری‌های کلیدی تجزیه‌کننده مانند *سودوموناس*[1] و *اسفینگوموناس*[2] غنی‌سازی نماید که این خود بر کیفیت نهایی کمپوست می‌افزاید (Niu et al., 2021).

با توجه به مطالب فوق، به نظر می‌رسد کمپوست فنتونی به‌دلیل دارا بودن اسیدهای هیومیک با فعالیت بیولوژیک بیشتر و ساختار میکروبی مطلوب، قادر است سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه را در شرایط شور بهبود بخشد. با این وجود، علیرغم پتانسیل زیاد این فناوری، کاربرد عملی کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون در سیستم‌های کشت گیاهان دارویی تحت تنش شوری، مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین، این پژوهش با هدف بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه دارویی اکلیل کوهی به کاربرد کمپوست اصلاح‌شده توسط فرآیند فنتون در مقایسه با کمپوست‌های رایج، تحت سطوح مختلف شوری انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به‌صورت آزمایش گلدانی در شرایط کنترل‌شده گلخانه پژوهشی دانشگاه مراغه به مدت ۶۰ روز (از ۱۵ اردیبهشت تا ۱۵ تیرماه سال ۱۴۰۴) انجام شد. شرایط محیطی گلخانه شامل دمای ۲ ± ۲۵ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۵± ۵۰ درصد و نور محیطی بود. نهال‌های اکلیل کوهی (*Rosmarinus officinalis* L.) با ویژگی‌های رشد همگن از نهالستان معتبر در شهر ارومیه تهیه شدند. پیش از اعمال تیمارها، گیاهان به مدت یک هفته در محیط گلخانه نگهداری شدند، تا با شرایط جدید سازگار شوند. این آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارهای این پژوهش عبارت بودند از: سه سطح شوری، صفر، ۴ و ۸ $dS\ m^{-1}$ چهار سطح اصلاح‌کننده آلی به‌ترتیب شامل شاهد (بدون کمپوست)، کمپوست معمولی (۱۰۰ درصد فضولات گوسفندی)، کمپوست مخلوط (۷۵ درصد فضولات گوسفندی + ۲۵ درصد خاک اره خام و کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون (۷۵ درصد کود گوسفندی + ۲۵ خاک اره تیمارشده با فرآیند فنتون) بودند.

برای تهیه کمپوست فنتونی، ابتدا خاک اره چوب خشک (درختان تبریزی و درخت بید) از نجاری‌های محلی تهیه شده و پس از الک‌کردن با الک با اندازه چشمه ۲ میلی‌متر، با آب شستشو داده شد. پس از خروج آب اضافی از آن، مرحله اصلاح فنتونی با استفاده از محلول ۰/۱ مولار سولفات آهن ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) و پراکسید هیدروژن (H_2O_2) ۳۰ درصد با نسبت وزنی ۱:۵ (خاک اره به محلول) انجام شد. واکنش در شرایط کاملاً کنترل‌شده و در بشکه پلاستیکی تیره به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سلسیوس تحت همزدن مداوم با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه انجام پذیرفت. پس از اتمام واکنش، نمونه‌ها سه بار با آب دیونیزه شستشو داده شدند. ماده اصلاح‌شده نهایی با نسبت ۲۵ درصد وزنی با کود گوسفندی مخلوط شد. فرآیند کمپوست‌سازی به مدت ۶۰ روز در شرایط هوازی ادامه یافت. در انتهای این بازه زمانی، رنگ کمپوست‌ها به رنگ قهوه‌ای نسبتاً تیره درآمده و بوی علف تازه می‌دادند که از نشانه‌های بلوغ کمپوست محسوب می‌شود.

کمپوست‌ها به میزان ۴ درصد وزنی به خاک با ویژگی‌های مندرج در جدول (۱) افزوده شده و برای توزیع یکنواخت، کمپوست چندین بار به‌هم زده شدند. سپس گلدان‌هایی با ظرفیت ۷ لیتر از این خاک پر شده و نشاهای اکلیل کوهی با رعایت احتیاط به این گلدان‌ها منتقل شدند. پس از گذشت دو هفته از انتقال نشاها به گلدان و استقرار این نشاها، با رابطه (۱) میزان نمک مورد نیاز برای ایجاد سطوح شوری محاسبه شده و در طی سه مرحله آبیاری به میزان مورد نظر در خاک رسانده شد. در طی آزمایش از ایجاد زه‌آب جلوگیری و رطوبت گلدان‌ها با روش وزنی در حد رطوبت گنجایش مزرعه‌ای نگه‌داشته شد.

پس از ۶۰ روز از اعمال تیمارها، نمونه‌برداری از برگ‌ها در مرحله رویشی گیاه انجام شد. فعالیت آنزیم کاتالاز بر اساس کاهش جذب نوری H_2O_2 در طول موج ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری

1- *Pseudomonas*

2- *Sphingomonas*

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در پژوهش

Table 1. Physical and chemical characteristics of the soil used in this study

شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	کربن آلی Organic carbon (OC)	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent (CCE)	گنجایش مزرعه‌ای Field capacity (FC)	پتاسیم K	فسفر P	pH	رسانایی الکتریکی Electrical conductivity (EC_e)
%						$mg\ kg^{-1}$	$mg\ kg^{-1}$		$dS\ m^{-1}$
65	10	25	0.7	11	23	180	8.6	7.6	0.876

گردید (Aebi, 1984). فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز با سنجش کاهش جذب آسکوربات در طول موج ۲۹۰ نانومتر (Habig et al., 1974) و فعالیت گایاکول پراکسیداز با اندازه‌گیری افزایش جذب در طول موج ۴۷۰ نانومتر تعیین شد (Tang and Newton, 2005). فعالیت پراکسیداز نیز با روش Mehlhorn et al. (1996) اندازه گرفته شد. محتوای پرولین آزاد با روش Ábrahám et al. (2010) و با استفاده از اسید نین‌هیدرین در طول موج ۵۲۰ نانومتر سنجیده شد. میزان مالون‌دی‌آلدهید به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدها با روش Heath and Packer (2022) و بر اساس واکنش با اسید تیوباربیتوریک اندازه‌گیری گردید. غلظت پراکسید هیدروژن (H_2O_2) بر مبنای روش Yu et al. (2003)، نشت الکترولیت‌ها با روش غوطه‌وری دیسک‌های برگ در آب مقطر و سنجش رسانایی الکتریکی با استفاده از کنداکتیومتر دیجیتال تعیین شد (Sairam et al., 2002). محتوای نسبی آب برگ با توزین نمونه‌های برگ در حالت‌های تازه، اشباع و خشک محاسبه گردید (Ritchie and Nguyen, 1990). در پایان دوره آزمایش، وزن تازه گیاه بلافاصله پس از برداشت و وزن خشک گیاه با خشک‌کردن نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت و توزین با ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم اندازه‌گیری شد.

داده‌های به‌دست‌آمده از این پژوهش پس از حصول اطمینان از نرمال‌بودن آن‌ها، با استفاده از نرم‌افزار MSTAT –C تجزیه آماری شدند و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

صفات فیزیولوژیک گیاه اکلیل کوهی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که آثار اصلی تنش شوری و کاربرد کمپوست بر کلیه صفات فیزیولوژیک و بیوشیمیایی مورد بررسی در اکلیل کوهی معنی‌دار (در سطح احتمال یک درصد) شد (جدول ۱). همچنین آثار برهمکنش شوری × کمپوست بر صفات نشت الکترولیت و غلظت پراکسید هیدروژن در سطح احتمال ۵ درصد و بر سایر صفات در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

در شرایط بدون شوری، کاربرد کمپوست‌ها شاخص‌های فیزیولوژیک اکلیل کوهی را بهبود بخشید. با توجه به شکل ۱، بیشترین افزایش در محتوای نسبی آب برگ (۹ درصد)، تجمع پرولین (۱۰۳/۳ درصد)، و بیشترین کاهش در غلظت H_2O_2 (۳۴/۴ درصد)، نشت الکترولیت (۴۱/۴ درصد) و مالون‌دی‌آلدهید (۴۱/۲ درصد) در تیمار کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون نسبت به تیمار شاهد (بدون کمپوست) مشاهده شد. در شوری متوسط (۴ $dS\ m^{-1}$) در مقایسه با تیمار شاهد بدون کمپوست، کمپوست فنتونی محتوای نسبی آب برگ را ۱۱/۲ درصد، پرولین را ۵۹/۶ درصد افزایش داد و غلظت H_2O_2، نشت الکترولیت و مالون‌دی‌آلدهید را به‌ترتیب ۳۳/۹، ۳۹/۸ و ۴۰/۴ درصد کاهش داد. در مقابل، کمپوست معمولی به‌ترتیب با افزایش ۳/۶ درصدی محتوای نسبی آب برگ و ۲۲/۷ درصدی پرولین و کاهش ۱۲/۵، ۱۷/۵ و ۱۹/۱ درصدی در شاخص‌های آسیب اکسیداتیو نشت الکترولیت‌ها، غلظت H_2O_2 و مالون‌دی‌آلدهید کمترین تأثیر را در مقایسه با تیمار بدون کمپوست نشان داد. در شوری زیاد

جدول ۲. تجزیه واریانس آثار اصلی شوری و کاربرد کمپوست، و اثر برهمکنش آن‌ها بر صفات فیزیولوژیک اکلیل کوهی

Table 2. Analysis of variance of main effects of salinity and compost application, and their interaction effect on physiological traits of rosmary

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean squares)				
		نشت الکترولیت Electrolyte leakage	پرولین Proline	مالون‌دی‌آلدهید Malondialdehyde	محتوای نسبی آب برگ Leaf relative water content	غلظت پراکسید هیدروژن H_2O_2 Concentration
شوری Salinity	2	900**	600000**	225**	425*	1400**
کمپوست Compost	3	317**	250000**	77**	140**	500**
کمپوست × شوری Compost × Salinity	6	67*	50000**	15**	30**	100*
خطا Error	24	14.2	6667	2.7	5.4	16.3
ضریب تغییرات CV (%)		12.4	9.8	14.2	6.5	11.7

* و ** به‌ترتیب اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد را نشان می‌دهند.

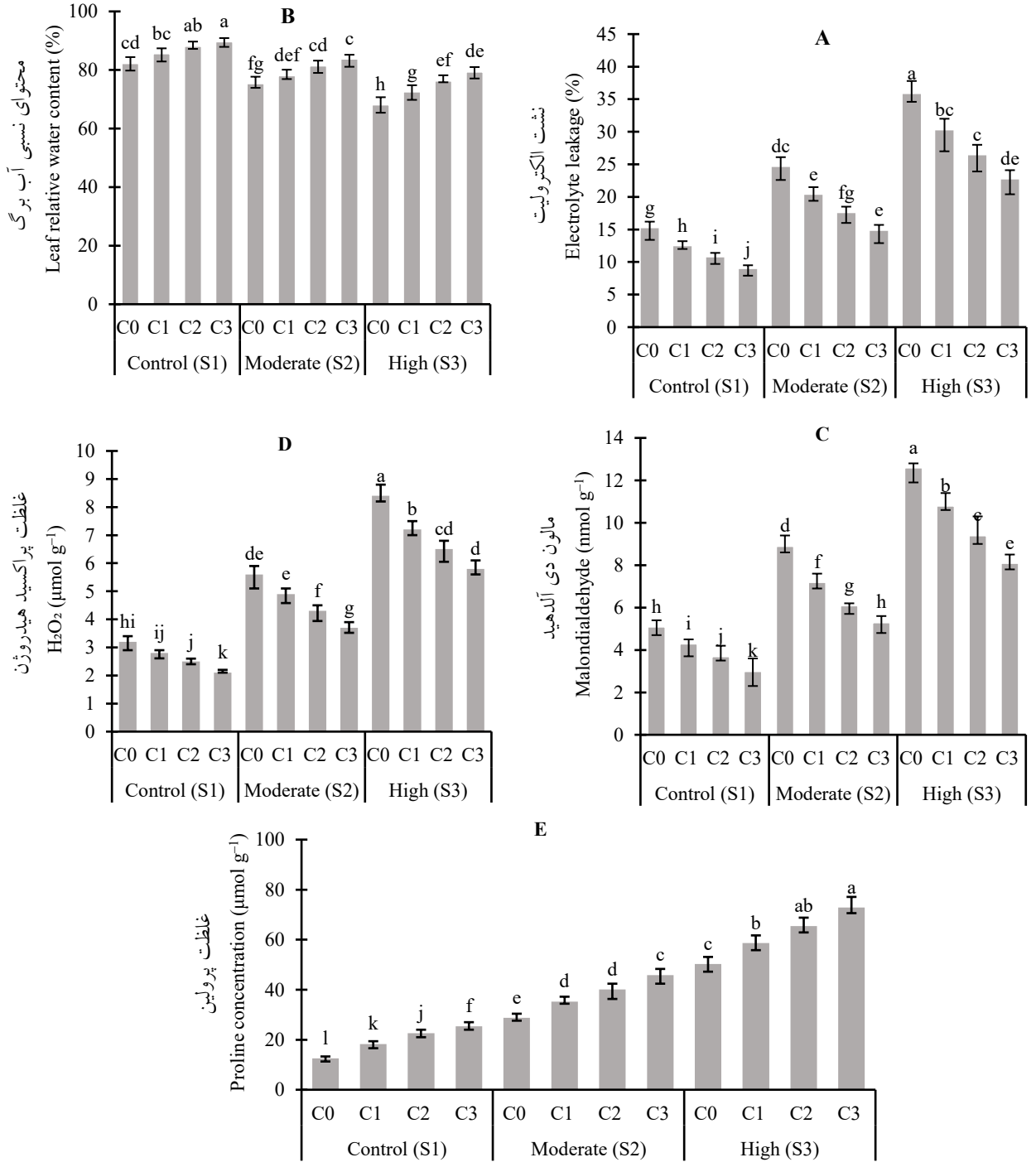
* and ** indicate significant effects at 1 and 5 percent probability levels, respectively.

($8\ dS\ m^{-1}$) بیشترین بهبود در تیمار کمپوست فنتونی حاصل شد به‌طوری‌که محتوای نسبی آب برگ ۱۶/۵ درصد و پرولین ۴۴/۹ درصد افزایش یافت و غلظت H_2O_2، نشت الکترولیت و مالون‌دی‌آلدهید به‌ترتیب ۳۱، ۳۶/۶ و ۳۵/۷ درصد کاهش یافتند (شکل ۱). این در حالی است که کمپوست معمولی تنها با افزایش ۴/۶ درصدی محتوای نسبی آب برگ و کاهش ۱۴/۳ درصدی H_2O_2، در بین کمپوست‌ها کمترین اثر بهبودی را در مقایسه با تیمار بدون کمپوست به همراه داشت.

فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی اکلیل کوهی

نتایج تجزیه واریانس فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (جدول ۳) نشان داد که آثار اصلی تنش شوری و کاربرد کمپوست بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، گایاکول پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز در برگ‌های گیاه اکلیل کوهی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد. همچنین آثار برهمکنش شوری × کمپوست بر فعالیت گایاکول پراکسیداز در سطح احتمال ۵ درصد ولی بر سایر آنزیم‌ها در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

در شرایط بدون شوری و بدون کمپوست، کمترین میزان فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مشاهده شد (شکل ۲). در مقابل، کاربرد کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، گایاکول پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز و پراکسیداز را به‌ترتیب ۱۸۱، ۲۴۲، ۱۵۹ و ۱۹۵ درصد نسبت به تیمار شاهد بدون کمپوست افزایش داد. در شوری متوسط ($4\ dS\ m^{-1}$) و تیمار شاهد (بدون کمپوست)، فعالیت آنزیم‌ها نسبت به شرایط بدون شور افزایش یافت. با کاربرد کمپوست فنتونی، فعالیت کاتالاز، گایاکول پراکسیداز، آسکوربات پراکسیداز، و پراکسیداز به‌ترتیب ۱۰۴، ۲۷، ۱۰۶، و ۱۳۱ درصد نسبت به شاهد در همان سطح شوری افزایش یافت که بیشترین میزان در بین تیمارها بود (شکل ۲). این نتایج نشان می‌دهد که کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون، با فعال‌سازی قوی سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی، توانسته است تولید گونه‌های فعال اکسیژن را مهار کرده و گیاه را از آسیب‌های اکسیداتیو محافظت نماید. به‌طور کلی، در هر سه سطح شوری، اگرچه همه کمپوست‌ها اثر مثبت بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی داشته‌اند، اما شدت این تاثیر در کمپوست



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر برهمکنش تیمارهای شوری (S1: بدون شوری، S2: ۴ dS m^{-1}، و S3: ۸ dS m^{-1}) و کمپوست (C0: بدون کمپوست، C1: کمپوست معمولی، C2: کمپوست مخلوط، و C3: کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون) بر صفات بیوشیمیایی گیاه اکلیل کوهی. حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌دار بین تیمارها بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 1. Mean comparisons of interactive effect of salinity (S1: no salinity, S2: 4 dS m^{-1}, and S3: 8 dS m^{-1}) and compost (C0: no compost, C1: ordinary compost, C2: mixed compost, and C3: Fenton-modified compost) treatments on biochemical traits of rosemary plants. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments based on Duncan's test at the 5% probability level.

جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تیمارها بر فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی اکلیل کوهی

Table 3. Analysis of variance of the effect of treatments on the activity of antioxidant enzymes in rosemary

منابع تغییر Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean squares)			
		کاتالاز Catalase	گایاکول پراکسیداز Guaiacol peroxidase	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	پراکسیداز General peroxidase
شوری Salinity	2	125.4**	83.2**	157.8**	102.3**
کمپوست Compost	3	68.7**	51.4**	94.6**	75.2**
کمپوست × شوری Compost × Salinity	6	21.3*	18.4*	32.1**	24.5*
خطا Error	24	4.2	3.1	6.3	5
ضریب تغییرات CV (%)		8.3	9.6	7.9	10.2

* و ** به‌ترتیب اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد را نشان می‌دهند.

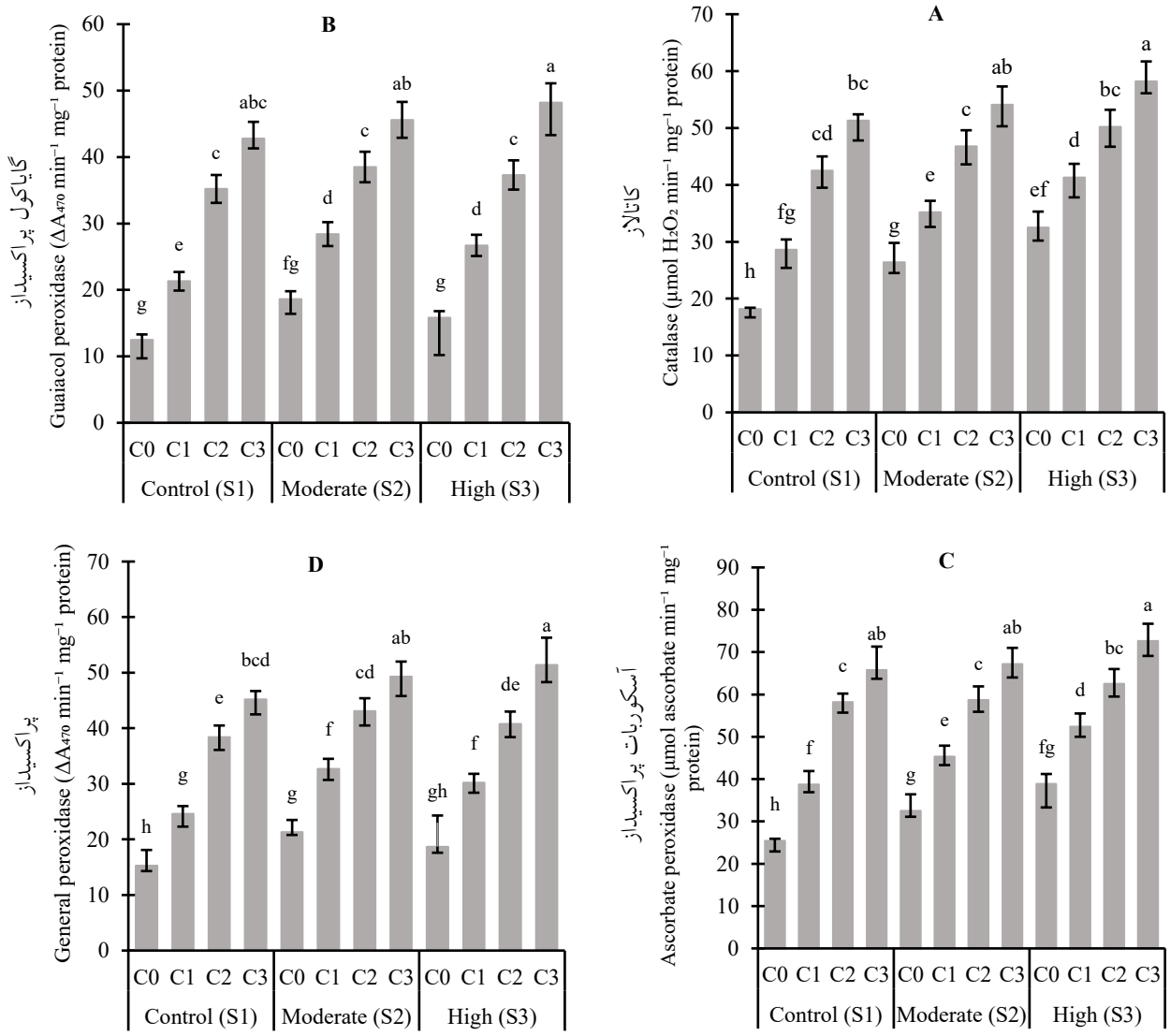
* and ** indicate significant effects at 1 and 5 percent probability levels, respectively.

فنتونی به مراتب بیشتر بوده است. این کمپوست با افزایش چندبرابری فعالیت آنزیم‌های کلیدی، نقش مهمی در تقویت دفاع آنزیمی و افزایش تحمل اکلیل کوهی به تنش شوری ایفا کرده است.

وزن خشک و تازه اکلیل کوهی در تیمارهای مختلف

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، آثار شوری و کمپوست در سطح احتمال یک درصد و اثر برهمکنش آنها در سطح احتمال ۵ درصد بر وزن خشک و تازه گیاه اکلیل کوهی معنی‌دار شد (جدول ۴).

تنش شوری باعث کاهش معنی‌دار عملکرد ماده خشک و تازه گیاه شد؛ به طوری که در شرایط شوری متوسط و زیاد، وزن خشک گیاه به‌ترتیب ۲۲/۹ و ۳۹/۵ درصد و وزن تازه به‌ترتیب ۱۵/۲ و ۳۰/۴ درصد نسبت به شرایط بدون شوری کاهش یافت (شکل‌های ۳ و ۴). در شرایط بدون شوری، تیمار شاهد (بدون کمپوست) کمترین عملکرد را داشت (وزن خشک ۲۶/۱ گرم در گلدان و وزن تازه ۱۱۲ گرم در گلدان). در مقابل، کاربرد کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون باعث افزایش ۱۳۲ درصدی وزن خشک و ۱۱۰ درصدی وزن تازه نسبت به تیمار شاهد شد (شکل‌های ۳ و ۴). با افزایش شوری به سطح متوسط، عملکرد شاهد بدون کمپوست کاهش یافت (وزن خشک ۲۰/۱ گرم در گلدان و وزن تازه ۹۵ گرم در گلدان). در این شرایط، کمپوست فنتونی وزن خشک و تازه را به‌ترتیب ۱۷۷ و ۱۵۰ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. ولی کمپوست معمولی کمترین تأثیر را در افزایش عملکرد داشت (به‌ترتیب ۹۸ و ۸۵ درصد افزایش) (شکل‌های ۳ و ۴). در شوری زیاد، بیشترین کاهش عملکرد در تیمار شاهد مشاهده شد (وزن خشک ۱۵/۸ گرم در گلدان و وزن تازه ۷۸ گرم در گلدان). کمپوست فنتونی با افزایش ۲۱۴ درصدی وزن خشک و ۱۸۰ درصدی وزن تازه نسبت به شاهد، بهترین عملکرد را نشان داد، در حالی که کمپوست معمولی افزایش کمتری (۱۳۰ و ۱۱۰ درصد) به همراه داشت (شکل‌های ۳ و ۴). به‌طور کلی، داده‌های عملکرد ماده خشک و تازه نشان می‌دهد که کمپوست‌ها در هر سه سطح شوری اثر مثبت بر رشد گیاه داشته‌اند، اما شدت این آثار در کمپوست فنتونی بسیار بیشتر بوده است. این کمپوست با افزایش چندبرابری وزن خشک و تازه، نه تنها کاهش عملکرد ناشی از شوری را جبران کرده بلکه رشد پایه‌ای گیاه را نیز ارتقاء داده است.



شکل ۲. مقایسه میانگین میزان فعالیت آنزیم‌های کاتالاز (A)، گایاکول پراکسیداز (B)، آسکوربات پراکسیدا (C) و پراکسیداز (D) در برگ‌های گیاه اکلیل کوهی تحت تأثیر برهمکنش تیمارهای شوری (S1: بدون شوری، S2: ۴ dS m^{-1}، و S3: ۸ dS m^{-1}) و کمپوست (C0: بدون کمپوست، C1: کمپوست معمولی، C2: کمپوست مخلوط، و C3: کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون). حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌دار بین تیمارها بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 2. Mean comparisons of catalase (A), guaiacol peroxidase (B), ascorbate peroxidase (C), and peroxidase (D) enzyme activities in rosemary leaves as affected by the interaction of salinity (S1: no salinity, S2: 4 dS m^{-1}, and S3: 8 dS m^{-1}) and compost (C0: no compost, C1: ordinary compost, C2: mixed compost, and C3: Fenton-modified compost) treatments. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments based on Duncan's test at the 5% probability level.

بحث

شرایط شور به‌دلیل ایجاد آشفتگی‌های فیزیولوژیک منجر به کاهش عملکرد گیاه می‌شود. در شرایط این پژوهش و در تیمار شاهد با شوری ۸ dS m^{-1}، کاهش ۱۷/۱ درصدی محتوای نسبی آب برگ، افزایش ۱۳۵/۵ درصدی نشت الکترولیت‌ها و ۱۴۷/۱درصدی مالون‌دی‌آلدهید، نشان‌دهنده ناتوانی گیاه در حفظ تعادل آبی و آسیب جدی به غشاهای سلولی است (شکل ۱). این یافته‌ها با گزارش Hejazi-Mehrizi et al. (2025) که کاهش

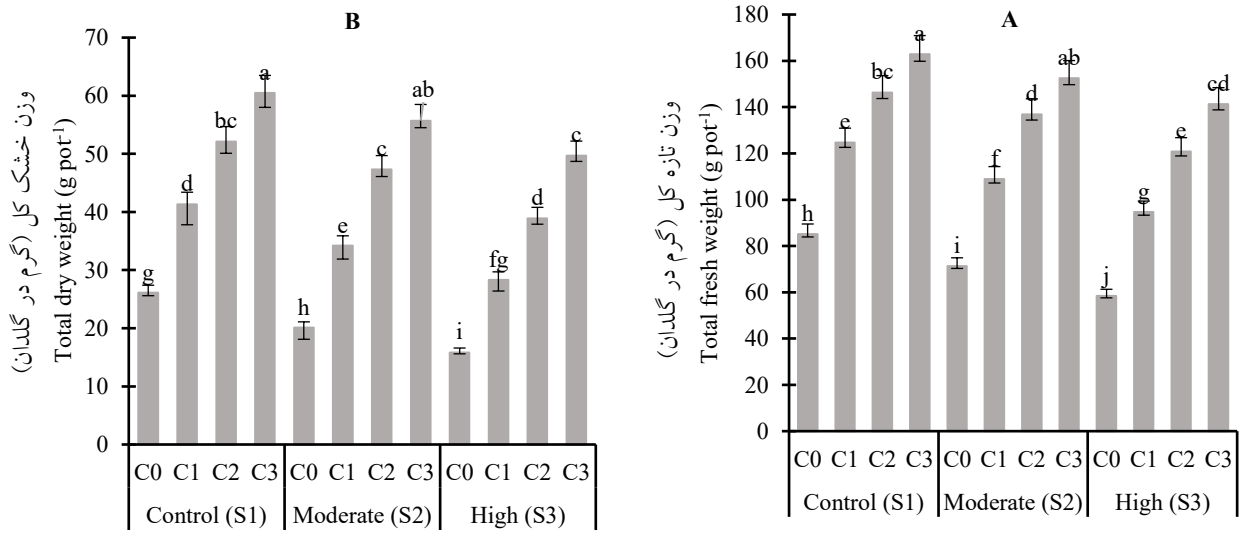
جدول ۴. تجزیه واریانس اثر تیمارها بر وزن تازه و خشک اکلیل کوهی

Table 4. Analysis of variance of the effect of treatments on fresh and dry weights of rosemary

منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات (Mean squares)	
		وزن تازه کل Total fresh weight	وزن خشک کل Total dry weight
شوری Salinity	2	843**	312**
کمپوست Compost	3	522**	198**
کمپوست × شوری Compost × Salinity	6	68.3*	26*
خطا Error	24	9.5	3.6
ضریب تغییرات CV (%)		7.9	8.5

* و ** به‌ترتیب اثر معنی‌دار در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد را نشان می‌دهند.

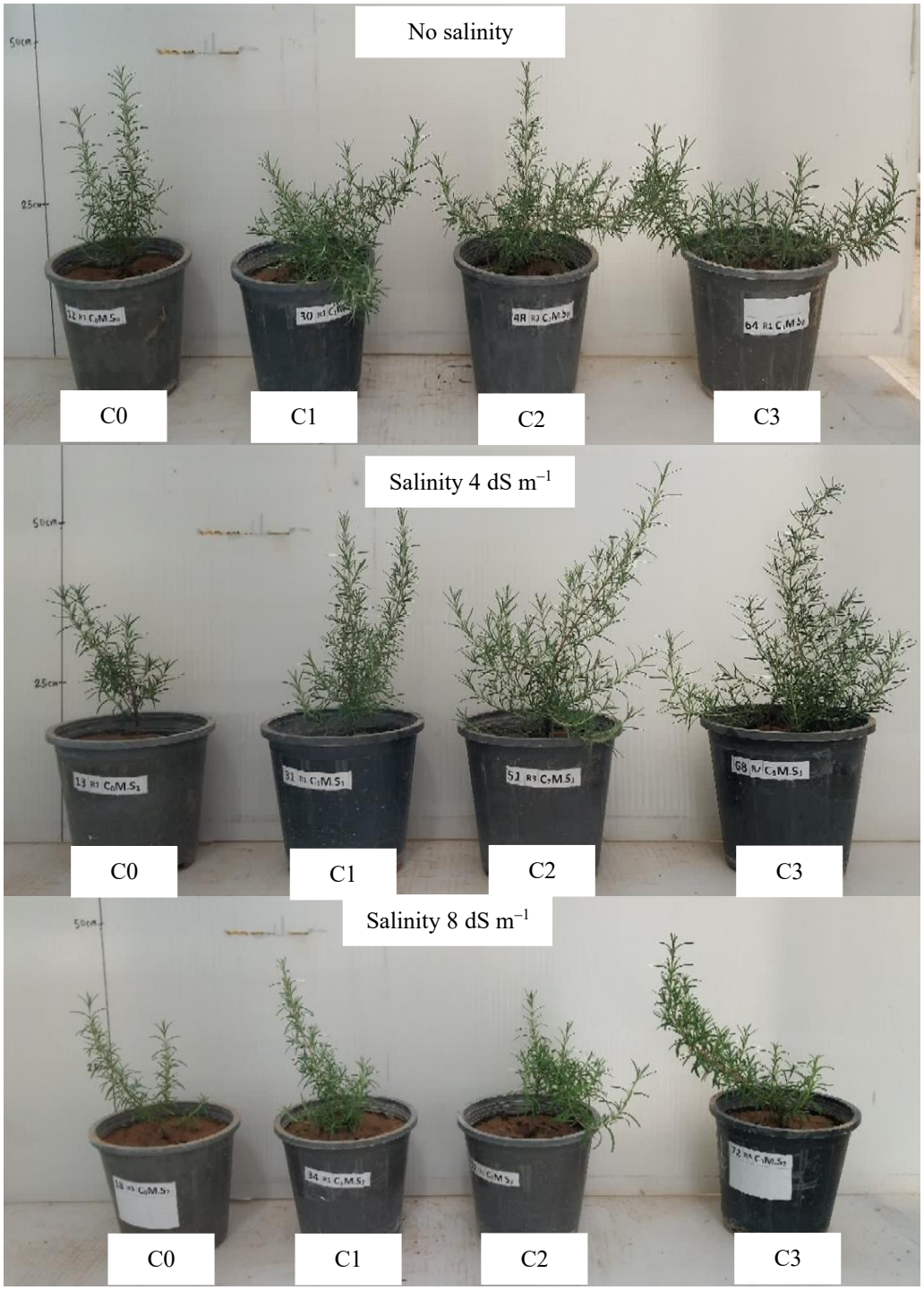
* and ** indicate significant effects at 1 and 5 percent probability levels, respectively.



شکل ۳. مقایسه میانگین وزن تازه (A) و وزن خشک (B) گیاه اکلیل کوهی تحت تاثیر برهمکنش تیمارهای شوری (S1: بدون شوری، S2: ۴ dS m^{-1}، و S3: ۸ dS m^{-1}) و کمپوست (C0: بدون کمپوست، C1: کمپوست معمولی، C2: کمپوست مخلوط، و C3: کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون). حروف کوچک متفاوت نشان‌دهنده تفاوت‌های معنی‌دار بین تیمارها بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد است.

Fig. 3. Mean comparisons of fresh weight (A) and dry weight (B) of rosemary plants as affected by the interaction of salinity (S1: no salinity, S2: 4 dS m^{-1}, and S3: 8 dS m^{-1}) and compost (C0: no compost, C1: ordinary compost, C2: mixed compost, and C3: Fenton-modified compost). Different lowercase letters indicate significant differences between treatments based on Duncan's test at the 5% probability level.

معنی‌دار پتانسیل آب و محتوای نسبی آب برگ را در اکلیل کوهی تحت تنش شوری مشاهده کردند، همخوانی دارد. Hassanpouraghdam et al. (2020) نیز نشان دادند که تنش شوری در اکلیل کوهی منجر به افزایش معنی‌دار مالون‌دی‌آلدهید



شکل ۴. اثر برهمکنش تیمارهای شوری (S1: بدون شوری، S2: ۴ dS m^{-1}، و S3: ۸ dS m^{-1}) و کمپوست (C0: بدون کمپوست، C1: کمپوست معمولی، C2: کمپوست مخلوط، و C3: کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون) بر رشد گیاه اکلیل کوهی: (A) شرایط شاهد (S0)، (B) شوری متوسط (S1)، و (C) شوری زیاد (S2).

Fig. 4. Effect of the interaction of salinity (S1: no salinity, S2: 4 dS m^{-1}, and S3: 8 dS m^{-1}) and compost (C0: no compost, C1: ordinary compost, C2: mixed compost, and C3: Fenton-modified compost) treatments on the growth of rosemary plants: (A) control conditions (S0), (B) moderate salinity (S1), and (C) high salinity (S2).

به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون لیپیدها می‌شود. گیاه اکلیل کوهی در مواجهه با تنش شوری، سیستم‌های دفاعی متعددی را برای مقابله با شرایط نامساعد فعال می‌کند (El-Boraie et al., 2006). در این پژوهش، افزایش ۳۰۲/۴ درصدی پرولین (شکل ۱) بیانگر تلاش مؤثر گیاه برای تنظیم فشار اسمزی است. این یافته با گزارش Kiarostami et al. (2010) همسو است که پرولین را به‌عنوان یک سازگارگر اسمزی کلیدی در گیاهان تحت تنش شوری معرفی کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند تجمع پرولین نه تنها در تنظیم اسمزی نقش دارد، بلکه در تثبیت ساختار ماکرومولکول‌ها و خنثی‌سازی رادیکال‌های آزاد نیز مؤثر است. همزمان، افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی شامل کاتالاز (۷۳/۳ درصد)، آسکوربات پراکسیداز (۳۳/۵ درصد) و گایاکول پراکسیداز (۲۸/۲ درصد) نشان می‌دهد که گیاه سعی در خنثی‌سازی گونه‌های فعال اکسیژن دارد (شکل ۲). این نتایج با یافته‌های Mittler (2002) همخوانی دارد که نشان داد سیستم آنتی‌اکسیدانی آنزیمی اولین خط دفاعی گیاه در برابر تنش اکسیداتیو است. به‌طور خاص، افزایش فعالیت کاتالاز مشاهده‌شده در پژوهش حاضر، با یافته‌های Valifard et al. (2021) که افزایش معنی‌دار فعالیت این آنزیم را در گیاهان تحت تنش شوری گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. با این‌حال، داده‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد که این پاسخ‌های دفاعی در شوری شدید ناکافی هستند و علی‌رغم افزایش معنی‌دار در تجمع پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان، آسیب‌های اکسیداتیو قابل توجهی مشاهده شد. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که در سطوح بالای شوری، تولید گونه‌های فعال اکسیژن از ظرفیت خنثی‌سازی سیستم دفاعی گیاه فراتر می‌رود. این مشاهده با گزارش Hernandez et al. (2000) همسو است که نشان دادند در سطوح شدید تنش شوری، سیستم آنتی‌اکسیدانی گیاه توان کافی برای مقابله با تنش اکسیداتیو را ندارد. کاربرد مواد آلی مانند کمپوست به‌عنوان یک راهکار مؤثر در تعدیل آثار تنش شوری شناخته شده است (Tejada, 2006). Piri et al. (2017) نشان دادند که استفاده از کود دامی به میزان ۳۰ تا ۴۵ تن در هکتار می تواند باعث افزایش چشم‌گیر عملکرد اکلیل کوهی در سطح شوری $4\ dS\ m^{-1}$ شود. پژوهش‌های Lakhdar et al. (2009) نشان داد که کمپوست گوسفندی با افزایش گنجایش تبادل کاتیونی خاک، به جذب انتخابی عناصر مفید کمک کرده و از جذب یون‌های سمی می‌کاهد. در پژوهشی روی گیاه ذرت مشاهده شد که کاربرد کمپوست موجب کاهش ۴۰ درصدی غلظت سدیم در بافت‌های گیاهی می‌شود (Ho et al., 2022).

در مقابل، کمپوست مخلوط (C2) با افزودن خاک‌اره، گامی فراتر گذاشته و با بهبود ساختار فیزیکی و افزایش تخلخل، به افزایش تهویه و نگهداری آب خاک کمک می‌کند. پژوهش‌های انجام‌شده توسط Lentz et al., 2019 نشان می‌دهد که وجود خاک‌اره در ترکیب کمپوست می‌تواند گنجایش نگهداری آب خاک را تا ۱۱۶ درصد افزایش دهد که این امر در شرایط تنش شوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین با تنظیم نسبت C/N، شرایط بهتری برای فعالیت ریزجانداران مفید فراهم می‌شود. اما مشکل اصلی، وجود لیگنوسلولز با پیوندهای سخت در خاک‌اره است که در فرآیند کمپوست‌سازی معمولی به‌طور کامل تجزیه نمی‌شود (Xu et al., 2023). پژوهشگران بر این باورند که مواد هیومیک موجود در ماده آلی می‌توانند اثربخشی کودهای آلی را در شرایط شوری افزایش دهند. همچنین Hosseini et al. (2022) گزارش کردند که اسیدهای هیومیک استخراجی از کود کمپوست فرآوری‌شده از فضولات گاوی و گوسفندی در مقایسه با انواع تجاری کارآیی مطلوب‌تری دارد. در این زمینه، کمپوست فنتونی (C3) با مهندسی ساختار مولکولی، راهکاری نوین ارائه می‌دهد. فرآیند فنتون به‌دلیل تولید رادیکال‌های هیدروکسیل، می‌تواند با آسیب به پیوندهای سخت پلیمری تبدیل آن‌ها به مولکول‌های کوچک‌تر توسط فرآیندهای میکروبی را تسهیل کند (Niu et al., 2021). این تغییر کیفی منجر به تولید اسیدهای هیومیک با وزن مولکولی کمتر و تراکم بیشتر گروه‌های عامل شده و توانایی کلاته‌کردن یون‌های سمی را افزایش می‌دهند (Khaled and Fawy , 2011). پژوهش Zhang et al. (2023) بر روی گیاه کاهو نشان داد که کاربرد کمپوست

فنتونی نه تنها موجب بهبود شاخص‌های رشد می‌شود، بلکه بر کیفیت مواد مؤثره گیاه نیز تأثیر مثبت دارد. این پژوهشگران افزایش ۲۵ درصدی تولید متابولیت‌های ثانویه گیاهان در تیمار کمپوست فنتونی را گزارش کردند. این یافته‌ها اهمیت استفاده از کمپوست‌های اصلاح‌شده را در کشاورزی پایدار به‌ویژه در مناطق شور نشان می‌دهد. بنابراین برتری کمپوست فنتونی در افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان (۳/۷ برابر برای کاتالاز) را شاید بتوان به القای مسیرهای انتقال پیام‌های سلولی نیز نسبت داد. این نتیجه با یافته‌های Nardi et al. (2016) همخوانی دارد که نشان دادند ترکیبات هیومیک با وزن مولکولی کم می‌توانند بیان ژن‌های مربوط به آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان را تنظیم کنند. همزمان، بهبود در محتوای نسبی آب برگ (۱۶/۴ درصد) و کاهش نشت الکترولیت (۳۶ درصد) نشان می‌دهد که این کمپوست همزمان بر تنش‌های اسمزی و اکسیداتیو اثر می‌گذارد. یافته‌های این پژوهش با نتایج Ait-El-Mokhtar et al. (2022) در مورد نقش کمپوست در بهبود تحمل به شوری همسو است، اما نوآوری پژوهش حاضر در بیان برتری کمپوست مهندسی‌شده نسبت به انواع رایج آن است که توانست در مقایسه با سایر انواع کمپوست‌ها افزایش عملکرد ماده خشک و تازه گیاه اکلیل کوهی را در پی داشته باشد. پژوهش‌های Zhang et al. (2023) نیز بر این موضوع تأکید دارند که مهندسی ساختار مولکولی مواد آلی می‌تواند کارایی آن‌ها را در کاهش آثار تنش شوری به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

نتیجه‌گیری کلی

کمپوست فنتونی با ارتقای کیفی ماده آلی و فعال‌سازی هماهنگ سازوکارهای دفاعی گیاه (تنظیم اسمزی، تقویت سیستم آنتی‌اکسیدانی و حفاظت از غشاها) تحمل به شوری را در اکلیل کوهی به‌شکل چشم‌گیری افزایش می‌دهد. این فناوری ضمن تبدیل مانده‌های چوبی (که اغلب سوزانده می‌شوند) به محصولی با ارزش افزوده زیاد، راهکاری مؤثر، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست برای کشاورزی پایدار در زمین‌های شور و احیای زمین‌های تخریب‌شده ارائه می‌دهد که با اصول اقتصاد چرخشی نیز هماهنگ است. پژوهش‌های آینده باید با تمرکز بر ارزیابی مزرعه‌ای آثار درازمدت این فناوری، تعیین میزان کاربرد بهینه برای گیاهان مختلف، و واکاوی سازوکارهای مولکولی القای تحمل به تنش، مسیر تجاری‌سازی و توسعه کاربرد آن را هموار سازند.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از معاونت پژوهشی دانشگاه مراغه، و آزمایشگاه‌های شیمی و حاصلخیزی و بیولوژی خاک دانشگاه مراغه به‌خاطر حمایت‌های مادی و معنوی نهایت تشکر را دارند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ‌گونه تضاد منافعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند.

منابع مورد استفاده

References

1. Abdelkader, M., Hassan, H., Elboraie, E., 2019. Using proline treatments to promote growth and productivity of *Rosmarinus officinalis* L. plant grown under soil salinity conditions. Middle East J. Appl. Sci. 9, 700–710.
2. Ábrahám, E., Hourton-Cabassa, C., Erdei, L., Szabados, L., 2010. Methods for determination of proline in plants. In: Sunkar, R. (Ed.), Plant Stress Tolerance: Methods in Molecular Biology, Vol. 639. Humana Press, Totowa, NJ, pp. 317–331. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-702-0_20.
3. Aebi, H., 1984. Catalase in vitro. Methods Enzymol. 105, 121–126. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3.
4. Ait-El-Mokhtar, M., Fakhech, A., Ben-Laouane, R., Anli, M., Boutasknit, A., Ait-Rahou, Y., Wahbi, S., Meddich, A., 2022. Compost as an eco-friendly alternative to mitigate salt-induced effects on growth, nutritional, physiological and biochemical responses of date palm. Int. J. Recycl. Org. Waste Agric. 11, 85–100. https://doi.org/10.30486/ijrowa.2021.1927528.1233.
5. Azim, K., Soudi, B., Boukhari, S., Perissol, C., Roussos, S., Thami Alami, I., 2018. Composting parameters and compost quality: A literature review. Org. Agric. 8, 141–158. https://doi.org/10.1007/s13165-017-0180-z.
6. Chen, Y., Luo, X., Li, Y., Liu, Y., Chen, L., Jiang, H., Chen, Y., Qin, X., Tang, P., Yan, H., 2022. Effects of CaO_2

based Fenton-like reaction on heavy metals and microbial community during co-composting of straw and sediment. Chemosphere 301, 134563. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134563.
7. El-Boraie, E., El-Hindi, K., Foudaa, R., 2006. Structural and physiological responses of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) plants under salinity conditions. J. Plant Prod. 31, 5881–5898. https://doi.org/10.21608/jpp.2006.236173.
8. FAO, 2021. Global Map of Salt-Affected Soils (GSASmap) Version 1.0. FAO, Rome.
9. Habig, W., Pabst, M., Jakoby, W., 1974. Glutathione S-transferases: The first enzymatic step in mercapturic acid formation. J. Biol. Chem. 249, 7130–7139. https://doi.org/10.1016/S0021-9258 (19)42083-8.
10. Hasini, S., De Nobili, M., El Azzouzi, M., Azim, K., Douaik, A., Laghrour, M., Zouahri, A., 2020. The influence of compost humic acid quality and its ability to alleviate soil salinity stress. Int. J. Recycl. Org. Waste Agric. 9, 21–31. https://doi.org/10.30486/ijrowa.2020.671213.
11. Hassanpouraghdam, M., Mehrabani, L., Tzortzakis, N., 2020. Foliar application of nano-zinc and iron affects physiological attributes of *Rosmarinus officinalis* and quietens NaCl salinity depression. J. Soil Sci. Plant Nutr. 20, 335–345. https://doi.org/10.1007/s42729-019-00111-1.
12. Heath, R., Packer, L., 2022. Photoperoxidation in isolated chloroplasts, I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. Arch. Biochem. Biophys. 726, 109248. https://doi.org/10.1016/j.abb.2022.109248.
13. Hejazi-Mehrizi, M., Shariatmadari, H., Khoshgoftarmanesh, A., Dehghani, F., 2012. Copper effects on growth, lipid peroxidation, and total phenolic content of rosemary leaves under salinity stress. J. Agric. Sci. Technol. 14, 205–212. https://doi.org/20.1001.1.16807073.2012.14.1.5.5.
14. Hernández, J., Jiménez, A., Mullineaux, P., Sevilla, F., 2000. Tolerance of pea (*Pisum sativum* L.) to long-term salt stress is associated with induction of antioxidant defences. Plant Cell Environ. 23, 853–862. https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00602.x.
15. Hosseini, S., Hejazi-Mehrizi, M., Sarcheshmehpour, M., Fekri, M., 2022. Comparison of the characteristics and effects of commercial humic acid extracted from cattle and sheep manures on soybean growth. Iranian Journal of Soil Research 36, 289–304. https://doi.org/10.22092/IJSR.2022.358279.658. (In Persian with English abstract)
16. Ho, T. T. K., V. T. Tra, T. H. Le, N. K. Q. Nguyen, C. S. Tran, P. T. Nguyen, T. D. H. Vo, V. N. Thai, and X. T. Bui., 2022. Compost to improve sustainable soil cultivation and crop productivity. Case Stud Chem Environ Eng 6: 100211. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100211.
17. Khaled, H., Fawy, H., 2011. Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity. Soil Water Res. 6, 21–29. https://doi.org/10.17221/4/2010-SWR
18. Kiarostami, K., Mohseni, R., Saboora, A., 2010. Biochemical changes of *Rosmarinus officinalis* under salt stress. J. Stress Physiol. Biochem. 6, 114–122.
19. Lakhdar, A., Rabhi, M., Ghnaya, T., Montemurro, F., Jedidi, N., Abdelly, C., 2009. Effectiveness of compost use in salt-affected soil. J. Hazard. Mater. 171, 29–37. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.132.
20. Lentz, R., Ippolito, J., Lehrsch, G., 2019. Biochar, manure, and sawdust alter long-term water retention dynamics in degraded soil. Soil Sci. Soc. Am. J. 83, 1491–1501. https://doi.org/10.2136/sssaj2019.04.0115.
21. Mehlhorn, H., Lelandais, M., Korth, H., Foyer, C., 1996. Ascorbate is the natural substrate for plant peroxidases. FEBS Lett. 378, 203–206. https://doi.org/10.1016/0014-5793(95)01448-9.
22. Mittler, R., 2002. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. Trends Plant Sci. 7, 405–410. https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9.
23. Mocan, A., Zengin, G., Simirgiotis, M., Schafberg, M., Mollica, A., Vodnar, D., Crișan, G., Locatelli, M., 2021. *Rosmarinus officinalis* L.: A review of its phytochemistry, anti-inflammatory activity, and mechanisms of action involved. Molecules 26, 2670. https://doi.org/10.3390/molecules26092670.
24. Nardi, S., Pizzeghello, D., Schiavon, M., Ertani, A., 2016. Plant biostimulants: physiological responses induced by protein hydrolyzed-based products and humic substances in plant metabolism. Sci. Agric. 73, 18–23. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0006.
25. Niu, Q., Meng, Q., Yang, H., Wang, Y., Li, X., Li, G., Li, Q., 2021. Humification process and mechanisms investigated by Fenton-like reaction and laccase functional expression during composting. Bioresour. Technol. 341, 125906. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125906.
26. Piri, I., Harati, A., Tavassoli, A., Babaeian, M., 2017. Effect of using different levels manure on quality and quantity of rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) under salt stress condition. Journal of Crop Ecophysiology 10, 959–974. (In Persian with English abstract)
27. Ritchie, S., Nguyen, H., 1990. Leaf water content and gas-exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. Crop Sci. 30, 105–111. https://doi.org/10.2135/cropsci1990.0011183X003000010025x.
28. Sairam, R., Rao, K., Srivastava, G., 2002. Differential response of wheat genotypes to long term salinity stress in relation to oxidative stress, antioxidant activity and osmolyte concentration. Plant Sci. 163, 1037–1046. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00278-9.
29. Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F., Sánchez, A., 2020. Recycling of organic wastes through composting:

process performance and compost application in agriculture. Agronomy 10, 1838. https://doi.org/10.3390/agronomy10111838.
30. Tang, W., Newton, R., 2005. Polyamines reduce salt-induced oxidative damage by increasing the activities of antioxidant enzymes and decreasing lipid peroxidation in Virginia pine. Plant Growth Regul. 46, 31–43. https://doi.org/10.1007/s10725-005-6395-0.
31. Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J., Hernandez, M., 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. Soil Biol. Biochem. 38, 1413–1421. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.017.
32. Valifard, M., Mohsenzadeh, S., Kholdebarin, B., Rowshan, V., 2021. Effects of salt stress on volatile compounds, total phenolic content and antioxidant activities of *Salvia mirzayanii*. S. Afr. J. Bot. 11, 3671–3682. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2014.04.002.
33. Xu, D., Yu, X., Chen, J., Li, X., Chen, J., Li, J., 2023. Effects of compost as a soil amendment on bacterial community diversity in saline–alkali soil. Front. Microbiol. 14, 1253415. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1253415.
34. Yu, C., Murphy, T., Lin, C., 2003. Hydrogen peroxide-induced chilling tolerance in mung beans mediated through ABA-independent glutathione accumulation. Funct. Plant Biol. 30, 955–963. https://doi.org/10.1071/FP03091.
35. Zhang, L., Wang, J., Liu, G., 2023. Enhanced secondary metabolite production in medicinal plants through Fenton-modified compost application under salt stress. J. Agric. Food Res. 184, 45–55. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100702.