19th Iranian Soil Science Congress
16-18 September, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۲۵ تا ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

تاثیر کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون بر ویژگی‌های رشدی رزماری در سطوح مختلف شوری خاک

ساره حمادی[۱]، اسماعیل کریمی*[۲]، سیروس صادقی[۳]، سید بهمن موسوی[۴]

۴،۳،۲،۱- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، ایران؛ * پست الکترونیکی نویسنده مسئول مقاله sm_ka80@yahoo.com

چکیده

شوری خاک به‌عنوان عاملی محدودکننده در کشاورزی پایدار، از طریق اختلال در جذب آب، ایجاد تنش اکسیداتیو و سمیت یونی می‌تواند رشد گیاهان دارویی ارزشمندی مانند رزماری (***Rosmarinus officinalis*** **L.**) را به‌طور جدی محدود نماید. کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون یک نوآوری مبتنی بر اکسیداسیون پیشرفته با کاتالیزور Fe^{2+}/H_2O_2 می‌باشد که موجب افزایش محتوای اسید هیومیک در کمپوست می‌شود. این پژوهش با هدف ارزیابی کارایی این فنآوری در تهیه کمپوست، بر شاخص‌های رشدی رزماری، به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. تیمارها شامل سه سطح شوری شامل: صفر (بدون شوری)، ۴ (شوری متوسط) و ۸ (شوری زیاد) دسی‌زیمنس بر متر و چهار تیمار کودی (شاهد بدون کمپوست، کمپوست معمولی، کمپوست مخلوط خاک‌اره، کمپوست فنتونی) بودند که کمپوست‌ها به میزان ۴٪ وزنی به خاک لوم رسی افزوده شدند. نتایج در شوری زیاد نشان داد که تیمار کمپوست فنتونی به‌طور معنی‌دار (**$p<0.01$**) موجب افزایش ۲۱۵ درصدی وزن خشک برگ (۱۲/۹ گرم در مقابل ۴/۱ گرم شاهد)، رشد ۲۱۴ درصدی زیست‌توده کل (۴۹/۷ گرم در مقابل ۱۵/۸ گرم)، افزایش ۲۵۰ درصدی تعداد شاخه‌های جانبی (۱۴ شاخه در مقابل ۴ شاخه)، بهبود ۱۱۶ درصدی ارتفاع گیاه (۵۴ سانتیمتر در مقابل ۲۵ سانتیمتر) نسبت به شاهد (بدون کاربرد کمپوست) گردید. این الگو با اعدادی متفاوت در کاربرد کمپوست در سایر سطوح شوری نیز مشاهده گردید. یافته‌ها گواه پتانسیل بالای این فناوری در توسعه کشت پایدار رزماری به‌ویژه در اراضی شور است.

واژگان کلیدی: تعداد شاخه‌های جانبی، تنش شوری، کمپوست اصلاح‌شده، رزماری.

مقدمه

شوری خاک به‌عنوان چالشی جهانی، بیش از ۲۰ درصد اراضی زراعی جهان را تحت تأثیر قرار داده و با ایجاد تنش اسمزی و سمیت یونی، رشد گیاهان دارویی ارزشمندی مانند رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) را به‌طور جدی مختل می‌کند (Machado & Serralheiro, 2017). این گیاه با دارا بودن ترکیبات فنولی فعال نظیر رزمارینیک اسید، جایگاه ویژه‌ای در صنایع داروسازی، غذایی و آرایشی دارد. اما مطالعات نشان می‌دهد شوری ایجاد شده با نمک کلرید سدیم در غلظت ۱۵۰ میلی‌مولار می‌تواند زیست‌توده آن را تا ۷۰ درصد کاهش دهد و خسارات اقتصادی قابل‌توجهی وارد نماید (Langroudi & Sedaghathoor, 2012) اگرچه استفاده از کمپوست‌های متعارف به‌عنوان راهکاری برای بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و افزایش تحمل به شوری توصیه شده‌است.(Tejada et al., 2006) اما محدودیت‌هایی مانند رهایش آهسته مواد مؤثر، محتوای پایین ترکیبات هیومیک فعال و اثربخشی ناکافی در سطوح بالای شوری، کارایی این مواد را کاهش می‌دهد (Canellas et al., 2024). ازاین‌رو پژوهش حاضر با معرفی کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون - یک نوآوری مبتنی بر اکسیداسیون پیشرفته که طی آن ساختار هیومیک‌اسیدها با استفاده از کاتالیزور Fe^{2+}/H_2O_2 بهینه‌سازی می‌شود - درصدد بررسی تأثیر این ماده بر شاخص‌های کلیدی رشد رزماری است. فرآیند فنتون با تجزیه ترکیبات لیگنوسلولزی پیچیده، منجر به تولید هیومیک‌اسیدهای با وزن مولکولی پایین‌تر و زیست‌دسترسی بالاتر می‌شود که می‌توانند به طور موثرتری در کاهش تنش‌های اکسیداتیو ناشی از شوری و بهبود جذب عناصر غذایی در گیاهان نقش آفرینی کنند. مشخص شده که کمپوست تهیه شده با واکنش فنتون به طور قابل توجهی منجر به افزایش فعالیت آنزیم لاکاز (۳۵/۹۲ واحد در گرم در مقایسه با ۲۹/۵۶ واحد در گرم در گروه شاهد) و همچنین افزایش محتوای مواد هیومیک (۱۵۱/۹۱ در برابر ۱۳۱/۷۳ گرم بر کیلوگرم) شد (Niu et al., 2021). تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی دو بعدی تأیید کرده است که واکنش فنتون-مانند تشکیل مواد هیومیک را از طریق افزایش ترکیبات کلیدی مانند آمیدها، کینون‌ها، ترکیبات آلیفاتیک و آروماتیک تسهیل می‌کند (Niu et al., 2021). از جنبه میکروبی، واکنش شبه فنتونی ساختار جامعه میکروبی را تغییر داد و فراوانی باکتری‌های متعلق به شاخه پروتئوباکتریا و سرده‌های سودوموناس و اسفینگوموناس را که نقش کلیدی در فرآیندهای هوموسیفیکاسیون دارند، افزایش داد. تجزیه و تحلیل ریداندانسی (RDA) یک همبستگی قوی مثبت بین سه فاکتور کلیدی یعنی واکنش شبه فنتونی، فعالیت لاکاز و تشکیل مواد هیومیک نشان داد (Niu et al., 2021). همچنین مشخص شده که استفاده از فرآیند شبه-فنتون اصلاح‌شده با سدیم پرکربنات، در کمپوست سازی از زایدات درختان جنگلی نه تنها با افزایش ۴۹/۸ درصدی تجزیه لیگنین، مؤثرترین روش برای شکستن ساختار مقاوم لیگنوسلولز بود، بلکه با تقویت جامعه باکتری‌های تجزیه‌کننده، مکانیسم تخریب را به طور کامل تقویت کرد (Xiao& Zhang, 2024). بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از واکنش شبه‌فنتونی، یک راهکار مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد کمپوست‌سازی با بهبود فعالیت آنزیمی، تسریع فرآیند هوموسیفیکاسیون و افزایش میزان مواد هیومیک در آن که یکی از موثرترین مواد شیمیایی در جهت توانمندی گیاهان در برابر شوری است، در تولید کمپوستی با کیفیت برتر باشد. این تحقیق به بررسی پارامترهای رویشی (وزن خشک برگ، ارتفاع، تعداد شاخه‌ها) و تولید زیست‌توده رزماری در سطوح مختلف شوری می‌پردازد. هدف نهایی، ارائه راهکاری عملی برای کشت پایدار این گیاه در مناطق شور است و استفاده از چنین اصلاح‌کننده‌های پیشرفته‌ای می‌تواند راهگشا باشد (Acosta-Motos et al., 2017).

مواد و روش‌ها

این پژوهش در قالب آزمایش فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح شوری (صفر، چهار و هشت دسی‌زیمنس بر متر) و چهار نوع کمپوست (شاهد بدون اصلاح، کمپوست معمولی متشکل از کود گوسفندی، کمپوست مخلوط حاوی ۷۵ درصد کود گوسفندی و ۲۵ درصد خاک‌اره، و کمپوست فنتونی شامل

۷۲ درصد کود گوسفندی و ۲۵ درصد خاک‌اره اصلاح‌شده با فرآیند فنتون) بودند. برای تهیه کمپوست فنتونی، خاک‌اره ابتدا با محلول فروس سولفات ۰/۱ مولار و پراکسید هیدروژن ۳۰ درصد به نسبت وزنی یک به پنج تیمار شده و پس از ۲۴ ساعت انکوباسیون در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، با کود گوسفندی مخلوط و طی فرآیند کمپوست‌سازی به مدت ۶۰ روز آماده گردید. گلدان‌های پلاستیکی پنج کیلوگرمی با خاک لوم رسی (هدایت الکتریکی ۰/۸۵ دسی‌زیمنس بر متر، اسیدیته۷/۸) پر شده و کمپوست‌ها به میزان چهار درصد وزنی خاک افزوده شدند. سطوح شوری به‌صورت تدریجی از طریق آب آبیاری اعمال گردید و پس از دوره رشد ۶۰ روزه، پارامترهای رویشی شامل وزن خشک برگ، ارتفاع، تعداد شاخه‌ها و زیست‌توده کل خشک اندازه‌گیری شدند. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTAT-C تحلیل و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت.

نتایج و بحث

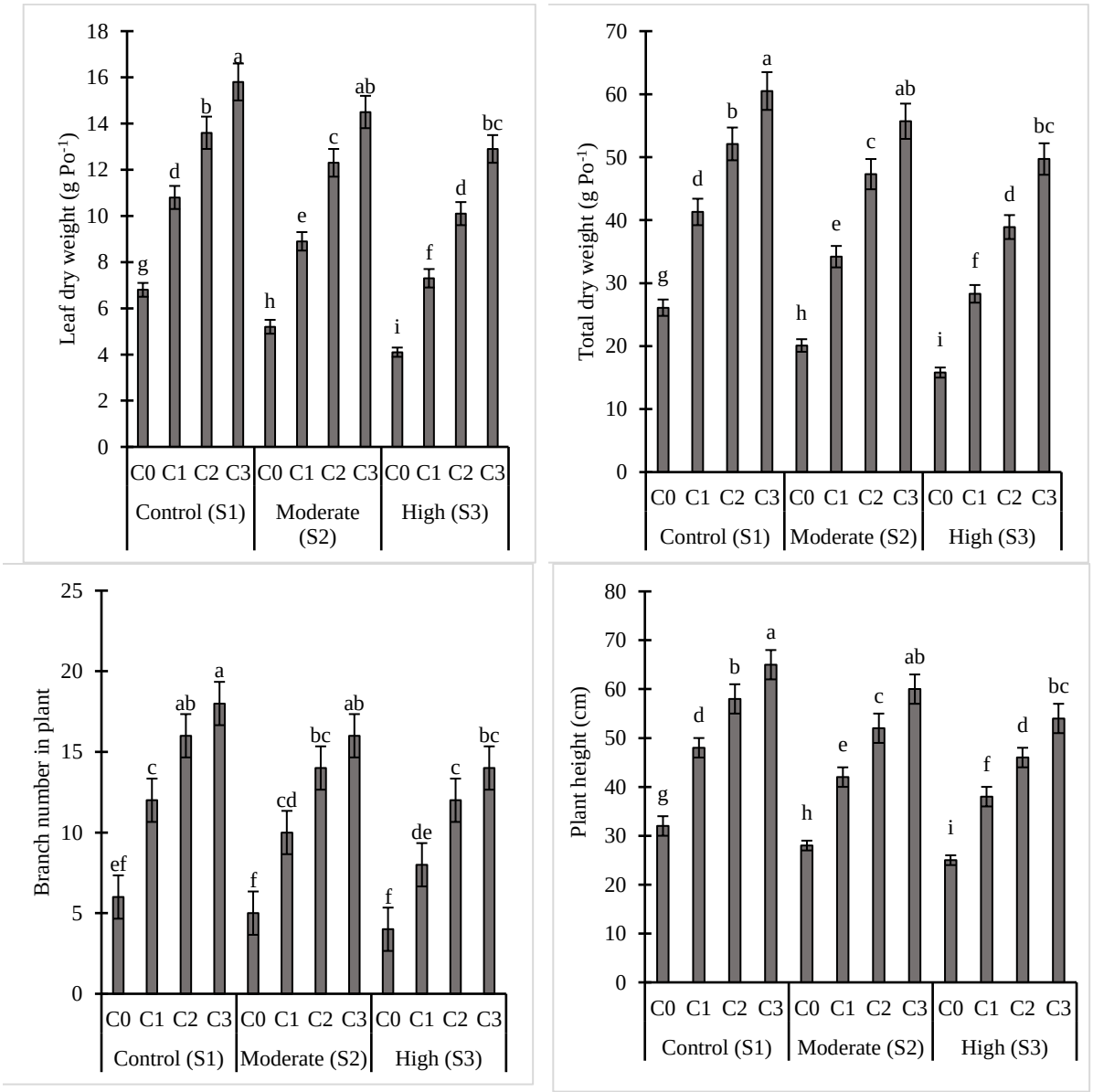
نتایج تجزیه واریانس داده های حاصل از خصوصیات رشد تحت تاثیر تیمارهای مختلف نشان داد که اثرات اصلی شوری و کمپوست و همچنین اثرات متقابل آنها بر چهار خصوصیت رشدی مورد بررسی معنی‌دار است (جدول ۱).

جدول ۲: تحلیل واریانس (ANOVA) صفات رشدی رزماری تحت تأثیر سطوح شوری و تیمارهای کمپوست

ضریب تغییرات	درجه آزادی	MS			
		وزن خشک برگ	وزن خشک کل	تعداد شاخه های جانبی	ارتفاع گیاه
شوری (S)	2	62.4**	312.5**	48.3**	364.8**
کمپوست (C)	3	35.1**	198.2**	32.6**	245.3**
S×C	6	4.8*	25.9*	5.2*	42.7*
خطا	24	0.7	3.6	0.9	7.2
ضریب تغییرات(%)		9.2	8.5	11.4	6.8

Significance codes: ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$ and, ns not significant ($p \geq 0.05$)

بررسی مقایسات میانگین داده‌ها نشان داد که تنش شوری در تمامی سطوح مورد بررسی باعث کاهش رزماری شد به‌طوری‌که در تیمار شاهد (C0) وزن خشک برگ از ۶/۸ به ۵/۲ و ۴/۱ گرم، زیست‌توده کل از ۲۶/۱ به ۲۰/۱ و ۱۵/۸ گرم، تعداد شاخه‌ها از ۶ به ۵ و ۴ عدد و ارتفاع از ۳۲ به ۲۸ و ۲۵ سانتیمتر به ترتیب در سطوح شوری ۴ و ۸ دسی‌زیمنس کاهش یافت (شکل ۱). کاربرد تمامی انواع کمپوست علاوه بر اینکه در شرایط غیرشور موجب افزایش عملکرد رزماری شد، توانست باعث کاهش اثرات مخرب شوری در گیاه رزماری در هر سطح از تنش شوری در مقایسه با شاهد آن سطح شود (شکل ۱). در بین انواع کمپوست کمپوست فنتونی (C3) به‌طور معنی‌دار این شاخص‌ها را در مقایسه با شاهد و سایر کمپوست‌ها ارتقا داد به طوریکه در شوری ۸ دسی‌زیمنس بر متر، موجب افزایش وزن خشک برگ به ۱۲/۹ گرم (۲۱۵ درصد افزایش)، رشد زیست‌توده کل به ۴۹/۷ گرم (۲۱۴ درصد رشد)، افزایش تعداد شاخه‌ها به ۱۴ عدد (۲۵۰ درصد افزایش) و رسیدن ارتفاع به ۵۴ سانتیمتر (۱۱۶ درصد بهبود) در مقایسه با تیمار شاهد بدون کاربرد کمپوست شد (شکل ۱).



شکل ۱- مقادیر میانگین پارامترهای رشد گیاه رزماری (*Rosmarinus officinalis* L.) تحت تأثیر سطوح شوری و فرمولاسیون‌های مختلف کمپوست. حروف کوچک متفاوت بیانگر اختلاف معنادار آماری بین تیمارها بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد.

افزودن کمپوست به ویژه در خاکهایی که با کمبود مواد آلی مانند خاک بستر کشت این مطالعه (۰/۵۹ درصد کربن آلی) مواجهند در شرایط غیرشور و شور موجب افزایش رشد گیاه می‌شود، زیرا افزودن ماده آلی از طریق مکانیسم‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی متعددی ساختار خاک را بهبود می‌بخشد که این امر منجر به تهویه بهتر، نفوذپذیری بیشتر آب و توسعه آسان‌تر سیستم ریشه می‌شود، همچنین، کمپوست به عنوان یک کود آهسته‌رهش عمل کرده و طیف وسیعی از مواد مغذی اصلی و ریز مغذی‌ها را به تدریج و در طول زمان در اختیار گیاه قرار می‌دهد و از آبشویی سریع مواد جلوگیری می‌کند (آینه بند و همکاران، ۱۴۰۰). در شرایط شوری، کمپوست به مقابله با این تنش کمک می‌کند. زیرا از یک طرف، با بهبود ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) خاک، به کاهش غلظت یون‌های سدیم مضر کمک می‌کند. از طرف دیگر، با افزایش قابلیت نگهداری آب در خاک، اثرات منفی خشکی ناشی از پتانسیل اسمزی پایین در خاک‌های شور را کاهش داده و دسترسی گیاه به آب را آسان‌تر می‌کند (Lakhdar et al.,

2009). حضور مواد هیومیک به عنوان یکی از فاکتورهای کیفیت کمپوست مطرح شده است و یافته های علمی نشان می‌دهند که افزودن خاک اره در نسبت‌های خاص می‌تواند محتوای این مواد را در کمپوست افزایش دهد (Huang et al., 2006). استفاده از فرآیند فنتون در تهیه کمپوست حاوی خاک اره چوب به عنوان مواد اولیه می‌تواند باعث افزایش بیشتر میزان مواد هیومیک در آنها شود (Niu et al., 2021). با عنایت به نقش مواد هیومیک در توانمندسازی گیاهان در مواجهه با انواع تنش‌های محیطی از جمله شوری مشخص شده که این مواد به عنوان بیواستیمولانت‌های گیاهی نقش محوری در کمک به سازگاری گیاهان و کاهش آسیب‌پذیری آنها ایفا می‌کنند. این مواد با فعال‌سازی مکانیسم‌های سیگنال‌دهی، القای پاسخ‌های ژنی و تجمع ترکیبات محافظتی، تحمل گیاهان در برابر تنش‌های محیطی مانند شوری را افزایش می‌دهند (Canellas et al., 2024). بنابراین شاید بتوان این بهبود چشمگیر در اثر استفاده از کمپوست C3 را می‌توان به دو مکانیسم کلیدی در این زمینه نسبت داد: نخست بهینه‌سازی ساختار و افزایش میزان هیومیک‌اسیدها در فرآیند فنتون که منجر به افزایش زیست‌فراهمی آن‌ها شده و جذب انتخابی عناصر غذایی حیاتی مانند پتاسیم و کلسیم را در شرایط شوری تسهیل می‌کند، چرا که این یون‌ها در مقابله با سمیت سدیم نقش کلیدی دارند. گروه‌های عاملی کربوکسیلیک و فنلی موجود در هیومیک اسید می‌توانند با یون‌های سدیم (Na+) پیوند تشکیل داده و با جایگزینی آن‌ها با کاتیون‌های مفید مانند کلسیم و منیزیم، به شسته شدن سدیم از ناحیه ریشه و کاهش هدایت الکتریکی (شاخص بیان شوری در خاک) خاک کمک کنند (Ouni et al., 2014). دوم تحریک توسعه سیستم ریشه‌ای از طریق القای بیان ژن‌های کلیدی مانند LBD16 که نفوذ ریشه در اعماق خاک را تا ۴۰درصد افزایش داده و دسترسی به منابع آبی زیرسطحی را ممکن می‌سازد (Nardi et al., 2017). برتری C3 نسبت به کمپوست معمولی (C1) و کمپوست مخلوط (C2) که به‌ترتیب ۴۳ درصد و ۲۴ درصد افزایش در تعداد شاخه‌ها را نشان می‌داد، مؤید نقش انحصاری فرآیند اکسیداسیون پیشرفته در فعال‌سازی ترکیبات هیومیک و افزایش کارایی آنها در شرایط تنش است، به‌گونه‌ای که در شوری بالا، کمپوست فنتونی با بهبود ساختار فیزیکی خاک و افزایش تخلخل به میزان ۳۰ درصد، شرایط مطلوب‌تری برای توسعه ریشه و جذب آب ایجاد می‌کند (Hasini et al., 2020).

نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که استفاده از خاک اره در ترکیب تهیه کمپوست به ویژه کمپوست اصلاح‌شده با فرآیند فنتون (C3) با بهبود شاخص‌های رشدی رزماری (افزایش ۲۱۴-۲۵۰ درصدی زیست‌توده و شاخه‌زایی تحت شوری زیاد می‌تواند به‌عنوان راهکاری نوین و اقتصادی در مدیریت کشت این گیاه در اراضی شور ایران به‌کار رود. بهبود همزمان پارامترهای رویشی گواه ظرفیت بالای این فناوری در ایجاد مقاومت یکپارچه به شوری از طریق مکانیسم‌های چندگانه است.

فهرست منابع

آینه بند, ا., گرویی, آ., فاتح, ا. و کاکا دزفولی, ف. (۱۴۰۰). مقایسه تولید کود کمپوست از بقایای گیاهان مختلف زراعی و اثر آن بر عملکرد دانه و برخی خصوصیات زراعی گندم. دانش کشاورزی وتولید پایدار, ۳۱(۲), ۲۹-۴۲. doi: 10.22034/saps.2021.13088

Acosta-Motos, J. R., Ortuño, M. F., Bernal-Vicente, A., Diaz-Vivancos, P., Sanchez-Blanco, M. J., & Hernandez, J. A. (2017). Plant responses to salt stress: Adaptive mechanisms. Agronomy, 7(1), 18. https://doi.org/10.3390/agronomy7010018

Canellas, L. P., da Silva, R. M., Busato, J. G., & Olivares, F. L. (2024). Humic substances and plant abiotic stress adaptation. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 11(1), 1-18.

Hasini, S. E., 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. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture, 9(1), 21-31.

Huang, G. F., Wu, Q. T., Wong, J. W. C., & Nagar, B. B. (2006). Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. Bioresource technology, 97(15), 1834-1842.

Lakhdar, A., Rabhi, M., Ghnaya, T., Montemurro, F., Jedidi, N., & Abdelly, C. (2009). Effectiveness of compost use in salt-affected soil. Journal of hazardous materials, 171(1-3), 29-37.

Machado, R. M. A., & Serralheiro, R. P. (2017). Soil salinity: Effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization. Horticulturae, 3(2), 30. https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030

Nardi, S., Ertani, A., & Francioso, O. (2017). Soil–root cross-talking: The role of humic substances. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 180(1), 5-13.

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. Bioresource Technology, 341, 125906.

Ouni, Y., Ghnaya, T., Montemurro, F., Abdelly, C., & Lakhdar, A. (2014). The role of humic substances in mitigating the harmful effects of soil salinity and improve plant productivity. International Journal of Plant Production, 8(3), 353-374.

Tejada, M., Garcia, C., Gonzalez, J. L., & Hernandez, M. T. (2006). Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil. Soil Biology and Biochemistry, 38(6), 1413–1421. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.017

Xiao, W., & Zhang, L. (2024). Optimizing green waste composting with iron-based Fenton-like process. Bioresource Technology, 413, 131506.

The effect of fenton-modified compost on the growth characteristics of rosemary at different soil salinity levels

Sara Hemmati[1], Esmaeil Karimi*[2], Siros Sadeghi[3], Seyed Bahman Mousavi[4]

[1],[2],[3],[4] - Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran.
Corresponding author email: sm_ka80@yahoo.com*

Abstract

Soil salinity severely restricts growth of valuable medicinal plants like rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) by disrupting water uptake, inducing oxidative stress, and causing ion toxicity. This study evaluated Fenton-modified compost – an advanced oxidation innovation using Fe^{2+}/H_2O_2 catalyst to enhance humic acid content – on rosemary growth through a factorial experiment in a completely randomized design with three replications under greenhouse conditions. Treatments comprised three salinity levels [0 (non-saline), 4 (moderate), 8 dS m^{-1} (high)] and four fertilizer treatments [control (no compost), conventional compost, sawdust-mixed compost, Fenton compost], applied at 4% w/w to clay loam soil. Under high salinity (8 dS m^{-1}), Fenton compost significantly ($p<0.01$) increased leaf dry weight by 215% (12.9 g vs. 4.1 g in control), total biomass by 214% (49.7 g vs. 15.8 g), lateral branch number by 250% (14 vs. 4 branches), and plant height by 116% (54 cm vs. 25 cm) compared to control. Similar improvement patterns occurred at other salinity levels. These enhancements are attributed to optimized humic acid structure enhancing selective K^+ and Ca^{2+} uptake, and stimulation of root development genes (e.g., LBD16) increasing root depth by 40% and subsoil water accessibility. Findings demonstrate high potential of this technology for sustainable rosemary cultivation in saline soils.

Keywords: Branch number, Salinity stress, Modified compost, Rosemary.