J. Soil Plant Interact. 2025; 16(4): 91–107. https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.21791

Journal of Soil and Plant Interactions

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

ISSN: 2783-5014 EISSN: 2783-5286

Research Article

Impact of Organic and Biological Fertilizers on The Growth Indices, and Quantitative and Qualitative Traits of Ajwain (*Trachyspermum copticum*)

Bohloul Abbaszadeh[1*], Parizad Mavandi[2] and Razieh Azimi[1]

1- Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

2- National Center for Genetic Resources (NCGR), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran

* Corresponding author, Email: babaszadeh@rifr-ac.ir

(Received: 29 September 2025; Revised: 17 November 2025; Accepted: 18 November 2025)

Abstract

Background and Objective: Ajwain, a medicinal plant, is widely used in traditional and modern medicine and in the food, livestock, and poultry industries. This study was conducted to investigate the effects of organic and biological fertilizers on the quantitative and qualitative performance of ajwain and the sustainability of its cultivation.

Methods: A field experiment was conducted in a split-factorial arrangement based on randomized complete blocks design with three replications to investigate the effects of biofertilizers on the quantitative and qualitative traits of ajwain. Vermicompost was applied at three levels of 0 (control), 5, and 10 ton ha^{-1} as the main factor. Mycorrhizal fungi were applied at three levels: no application (control), application of *Rhizophagus irregularis* and *Funneliformis mosseae*, and the presence or absence of the growth-promoting bacterium *Azotobacter chroococcum*.

Results: The symbiotic interaction among the mycorrhizal fungi (*Rhizophagus irregularis* and *Funneliformis mosseae*), *Azotobacter chroococcum*, and vermicompost significantly improved growth indices, yield of plant organs, and essential oil (EO) yield, but did not significantly affect the EO percentage and phytochemical compounds. *Funneliformis mosseae* had the greatest impact on aerial parts, including the number and diameter of lateral stems, stem diameter and seed yield, while *Rhizophagus irregularis* played a more effective role in increasing root length, root weight, root development and seed yield. However, the use of organic and biological fertilizers did not significantly affect the major EO compounds. The highest contents of *p*-cymene (15.05%) and γ-terpinene (48.40%) were obtained with vermicompost (5 and 10 ton ha^{-1}, respectively), and thymol (35.74%) with *Rhizophagus irregularis*.

Conclusion: The results highlight the importance of using organic and biological fertilizers to enhance the quantitative yield of ajwain. However, it seems that the quality control of EO is not affected by the treatments used and may depend on genetic factors and other agronomic treatments, including stresses.

Keywords: *Azotobacter chroococcum*, Essential oil, Seed yield, Thymol.

How to Cite: Abbaszadeh, B., Mavandi, P., Azimi, R., 2025. Impact of organic and biological fertilizers on the growth indices, and quantitative and qualitative traits of ajwain (*Trachyspermum copticum*). J. Soil Plant Interact. 16(4), 91–107. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.21791

Copyright © 2025 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 ۱۴۰۴؛ (۴)۱۶: ۱۰۷-۹۱، https://doi.org/10.47176/jspi.16.4.21791

روابط خاک و گیاه

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

شاپا: ۲۷۸۳-۵۰۱۴ شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۵۲۸۶

مقاله پژوهشی

تأثیر کودهای آلی و زیستی بر شاخص‌های رشدی، و صفات کمّی و کیفی زنیان (*Trachyspermum copticum*)

بهلول عباس‌زاده[۱*]، پریزاد ماوندی[۲] و راضیه عظیمی[۱]

۱- موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

۲- مرکز ملی مدیریت منابع ژنتیکی کشاورزی و منابع طبیعی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: babaszadeh@rifr-ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۸/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۸/۲۷)

چکیده

پیشینه پژوهش و هدف: گیاه دارویی زنیان کاربرد وسیعی در طب سنتی و مدرن، صنایع غذایی و دام و طیور دارد. این پژوهش به‌منظور بررسی نقش کودهای آلی و زیستی بر عملکرد کمّی و کیفی زنیان و پایداری توسعه کشت آن اجرا شد.

روش‌ها: آزمایشی مزرعه‌ای به‌صورت اسپلیت-فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار برای بررسی تاثیر کودهای بیولوژیک بر عملکرد کمّی و کیفی زنیان اجرا شد. ورمی‌کمپوست در سه سطح صفر (شاهد)، ۵ و ۱۰ تن در هکتار به‌عنوان عامل اصلی، قارچ میکوریزا در سه سطح بدون کاربرد (شاهد)، کاربرد *Rhizophagus irregularis* و *Funneliformis mosseae*، و بدون کاربرد و کاربرد باکتری محرک رشد *Azotobacter chroococcum* استفاده شد.

نتایج: بر اساس نتایج، برهمکنش همزیستی میان قارچ‌های میکوریزا (*Rhizophagus irregularis* و *Funneliformis mosseae*)، باکتری *Azotobacter chroococcum* و ورمی‌کمپوست، به طور چشم‌گیری موجب بهبود شاخص‌های رشدی، عملکرد دانه و عملکرد اسانس شد اما بر درصد اسانس و ترکیبات فیتوشیمیایی گیاه چندان موثر نبود. قارچ *Funneliformis mosseae* بیشترین تأثیر را بر شاخساره، از جمله تعداد ساقه‌های فرعی، قطر ساقه و عملکرد دانه داشت، در حالی‌که *Rhizophagus irregularis* نقش مؤثرتری در افزایش طول، وزن و توسعه ریشه‌ها و عملکرد دانه ایفا کرد. این در حالی است که استفاده از کودهای آلی و زیستی بر ترکیبات عمده اسانس (پارا-سیمن، گاما-ترپنین و تیمول) اثر معنی‌دار نداشتند و بیشترین درصد پارا-سیمن (۱۵/۰۵ ٪) و گاما-ترپنین (۴۸/۴۰٪) با مصرف ورمی‌کمپوست (به‌ترتیب ۵ و ۱۰ تن در هکتار)، و تیمول با کاربرد گونه *Rhizophagus mosseae* (۳۵/۷۴٪) به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری کلی: یافته‌های این پژوهش اهمیت کاربرد کودهای آلی و زیستی در بهبود عملکرد کمّی گیاه زنیان را به‌خوبی نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد ترکیبات اصلی اسانس تحت تأثیر تیمارهای به‌کاررفته نبوده و ممکن است وابسته به عوامل ژنتیکی و سایر تیمارهای زراعی از جمله تنش‌ها باشد ولی درصد و عملکرد اسانس تفاوت معنی‌داری را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: اسانس، عملکرد بذر، *Azotobacter chroococcum*، تیمول.

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

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

گیاه دارویی زنیان یا نانخواه (Ajowan، Lovagel، Carum) با نام علمی *Trachyspermum copticum* (L.) Link، گیاهی یک‌ساله، معطر و علفی از خانواده Apiaceae بوده که رویشگاه آن کشورهایی مانند مصر، عراق، ایران و هند است (Mhatre et al., 2024). دامنه انتشار آن در ایران، شرق کشور (فلور ایران)، سیستان و بلوچستان، آذربایجان، تبریز، اصفهان، خوزستان، فارس، کرمان و تربت حیدریه است و این گیاه در بلوچستان با نام هندی آن "اجوان" و "اسپرکال" شناخته می‌شود. اسانس میوه این گیاه متمایل به زرد بوده و مقدار آن بین ۲ تا ۴/۴٪ گزارش شده است، فلاونوئیدها، آلکالوئیدها، گلیکوزیدها، استروئیدها، کربوهیدرات‌ها، فنل‌ها، تانن‌ها و ترپن‌ها از عمده ترکیبات مؤثر شناخته‌شده در عصاره زنیان هستند (Bairwa et al., 2012; Dubey and Kashyap, 2015). ریشه‌های این گیاه مدر (ادرارآور) و برگ‌های آن دارای خاصیت ضدنفخ بوده و میوه آن دارای خاصیت آنتی‌اکسیدانی (Singh and Ahmad, 2017)، آنتی‌باکتریال (Manayi et al., 2014) و ضدالتهابی (Aslam et al., 2020) است. تیمول به عنوان یکی از ترکیبات اصلی و فعال اسانس زنیان، در طب سنتی برای درمان اختلالات گوارشی، افزایش اشتها و بهبود بیماری‌های تنفسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر تیمول، پارا–سیمن و گاما–ترپنین از دیگر اجزای عمده ترکیبات اسانس این گیاه هستند (El-Sayed et al., 2025).

در پژوهش Norouzi Esfahani et al. (2023)، استفاده از ورمی‌کمپوست در سطوح ۴ و ۸ تن در هکتار باعث افزایش معنی‌دار در صفات ارتفاع ساقه، وزن خشک شاخساره، طول ریشه و میزان کلروفیل گیاه *Verbascum thapsus* شد. همچنین در شرایط تنش خشکی، کاربرد ورمی‌کمپوست موجب بهبود صفات فیزیولوژیک گیاه گردید. افزایش وزن تازه و خشک، ارتفاع ساقه، درصد و عملکرد اسانس، کلروفیل، ترکیبات فنولی و ظرفیت آنتی‌اکسیدانی در نعناع فلفلی (*Mentha spicata*) در اثر کاربرد ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار ورمی‌کمپوست توسط Latifi et al. (2024) گزارش شد. نتایج پژوهش‌های Mavandi et al. (2021) نشان داد سطح برگ و ماده خشک شاخساره *Lavandula angustifolia* Mill. در تیمارهای مختلف تا ۶۲ درصد با ورمی‌کمپوست نسبت به شاهد افزایش یافت. علاوه بر این، با کاربرد توام ورمی‌کمپوست و کود دامی، بهبود قابل‌توجهی در کیفیت اسانس گیاه، به‌ویژه ترکیبات اکسیژن‌دار از جمله 1,8-Cineole، Borneol و Camphor که از اجزای مهم و با ارزش دارویی در اسانس اسطوخودوس محسوب می‌شوند، گزارش شد (Mavandi et al., 2021). Weisany et al. (2015) افزایش و تغییر ترکیب اسانس در گیاه شوید (*Anethum graveolens* L. 'Dill') را با کلونیزاسیون قارچ میکوریزا گزارش کردند.

آثار مثبت هر یک از این عوامل به‌طور جداگانه در بهبود رشد و عملکرد گیاهان زراعی و دارویی به خوبی شناخته شده است. اما دانسته‌های محدودی در مورد آثار هم‌افزایی و برهمکنشی این سه عامل (ورمی‌کمپوست، میکوریزا و ازتوباکتر) بر صفات رشدی، فیتوشیمی و عملکرد گیاه زنیان وجود دارد. درک چگونگی تأثیر ترکیبی این نهاده‌های زیستی بر صفات عملکردی زنیان، می‌تواند راهکارهای مؤثری برای مدیریت پایدار تغذیه این گیاه و افزایش بهره‌وری آن در سیستم‌های کشاورزی ارائه دهد. هدف نهایی این پژوهش، شناسایی بهینه‌ترین ترکیب از این نهاده‌های زیستی برای بهبود عملکرد کمّی و کیفی همراه با پایداری توسعه کشت زنیان بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال ۱۴۰۱–۱۴۰۰ در مزرعه پژوهشی موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، ایستگاه منابع طبیعی البرز اجرا شد. به‌منظور اندازه‌گیری مقدار عناصر غذایی قابل استفاده گیاه در خاک و بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن، از نقاط مختلف خاک زراعی منطقه مورد آزمایش، نمونه‌هایی از لایه ۳۰–۰ سانتی‌متر برداشت شد. پس از مخلوط‌کردن نمونه‌های خاک، یک نمونه نهایی برای اندازه‌گیری و ارزیابی به همراه کود ورمی‌کمپوست به آزمایشگاه ارسال شد. ویژگی‌های خاک و کود ورمی‌کمپوست مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های خاک (لایه ۳۰-۰ سانتی‌متر) و ورمی‌کمپوست مورد بررسی

Table 1. Characteristics of the studied soil (0–30 cm layer) and vermicompost

خاک (Soil)

بافت Texture	شوری EC (dS m^{-1})	pH	نیتروژن N (%)	فسفر قابل استفاده Available P (mg kg^{-1})	پتاسیم قابل استفاده Available K (mg kg^{-1})	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent (%)	کربن آلی Organic carbon (%)
لوم شنی Sandy loam	2.46	7.70	0.086	8.9	213	12.6	0.88

ورمی‌کمپوست (Vermicompost)

	شوری EC (dS m^{-1})	pH	نیتروژن N (%)	فسفر P (%)	پتاسیم K (%)	نسبت کربن به نیتروژن C:N ratio	ماده آلی Organic matter (%)
				اکسید فسفر P_2O_5 (%)	اکسید پتاسیم K_2O		
	0.84	7.71	1.00	0.65	1.49	0.48	0.52	21.9	38.6

آزمایش به‌صورت اسپلیت-فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. بذرهای *Trachyspermum copticum* مورد استفاده، با مشخصات کد Z03 و منشاء ورامین، از موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع تهیه شد. ورمی‌کمپوست در سه سطح صفر (شاهد)، ۵ و ۱۰ تن در هکتار به‌عنوان عامل اصلی، و قارچ میکوریزا در سه سطح بدون کاربرد (شاهد-M_1)، کاربرد گونه‌های *Funneliformis mosseae*-M_2 و *Rhizophagus irregularis*-M_3 و بدون کاربرد-A_1 و کاربرد باکتری محرک رشد *Azotobacter chroococcum* strain 5-A_2 به‌عنوان عوامل فرعی بودند. عملیات آماده‌سازی زمین شامل شخم، دیسک، ایجاد خطوط کشت پیش از کاشت بذور انجام شد. فاصله‌ی کشت ۲۰×۳۵ سانتی‌متر و هر کرت با ابعاد ۳×۳ متر بود.

پیش از کاشت، مقادیر مختلف ورمی‌کمپوست به زمین افزوده شده و در عمق مناسب کرت‌های مورد نظر با خاک مخلوط شد. کودهای زیستی دارای قارچ میکوریزایی به صورت اندام فعال قارچی (شامل اسپور، هیف و ریشه) بوده و از موسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه گردید. در تیمارهای M_2 و M_3، پیش از کاشت بذر در مزرعه در هر چاله کاشت ۱۰ گرم از کود زیستی که دارای ۴۰۰ تا ۵۰۰ اندام فعال قارچی بود، قرار داده شد (Karegar Hajiabadi et al., 2015). در تیمار با باکتری‌های زیستی، بذرها پیش از کاشت به مدت ۱۰ دقیقه در محلول تلقیح دارای باکتری با غلظت 10^8 CFU mL^{-1} قرار داده شدند (Naghdibadi et al., 2013). وجین علف‌های هرز به‌صورت دستی و با توجه به شرایط رشدی گیاه، در دو نوبت طی دوره آزمایش انجام شد. عملیات آبیاری نیز بر اساس نیاز فیزیولوژیک گیاه و شرایط اقلیمی منطقه، به‌صورت قطره‌ای و در دو نوبت در هفته صورت گرفت. در اواخر مهرماه و هم‌زمان با رسیدگی کامل بذرها، برداشت نهایی انجام شد و صفات مورد نظر برای تجزیه و تحلیل، یادداشت‌برداری گردید. برای اندازه‌گیری تمام صفات موفولوژیک از ۳۰ بوته در هر کرت استفاده شد. ارتفاع بوته و طول ریشه‌های اصلی و فرعی با استفاده از خط‌کش مدرج اندازه‌گیری شدند. قطر گل‌آذین، طول گل‌آذین و قطر ساقه با کمک کولیس اندازه‌گیری شدند. تعداد ساقه جانبی و تعداد گل‌آذین‌ها با شمارش بدست آمدند، برای تعیین وزن برگ، ساقه به همراه بقایای گل‌آذین (به جز دانه) و گل‌آذین‌های دارای بذر

ریز و نارس، دانه و ریشه، پس از خشک‌شدن اندام مورد نظر در سایه و دمای محیط با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت زیاد، اندازه‌گیری شدند. عملکرد شاخساره حاصل جمع عملکرد برگ، ساقه و دانه است. عملکرد بیولوژیک حاصل جمع شاخساره و ریشه است. برای استخراج اسانس، ۵۰ گرم از بذر خشک زنیان با استفاده از دستگاه کلونجر و به روش تقطیر با آب، به مدت ۳ ساعت اسانس‌گیری شد (Telci et al., 2011). پس از اندازه‌گیری وزن اسانس حاصل از هر نمونه، درصد وزنی اسانس نسبت به وزن اولیه بذر محاسبه شد. به‌منظور برآورد عملکرد اسانس در واحد سطح، درصدهای به‌دست‌آمده در مقدار بذر تولیدی در هر هکتار ضرب شده و بدین ترتیب، میزان اسانس تولیدی در هکتار تعیین شد.

درصد ترکیبات تشکیل‌دهنده اسانس به‌وسیله GC تعیین شده و شناسایی آنها با استفاده از کروماتوگرافی گازی–طیف‌سنج جرمی (GC/MS) انجام شد. کروماتوگراف گازی با مدل Agilent 7890A، مجهز به آشکارساز FID و ستون غیرقطبی DB-5 مورد استفاده قرار گرفت. دمای محفظه تزریق و آشکارساز °C ۲۸۰ تنظیم شد. برنامه گرمایی ستون شامل افزایش دما از ۶۰ تا °C ۲۲۰ با سرعت ۳ درجه سلسیوس در دقیقه بوده و سپس افزایش به ۲۶۰ درجه سلسیوس با سرعت ۲۰ درجه سلسیوس در دقیقه و توقف در این دما به مدت ۱۰ دقیقه بود. گاز حامل به‌کار رفته نیتروژن با سرعت جریان ۰/۷ میلی‌لیتر بر دقیقه بود. شناسایی ترکیبات اسانس با استفاده از دستگاه کروماتوگراف گازی Agilent 7890A متصل به طیف‌سنج جرمی Agilent 5975C از نوع چهار قطبی انجام شد. ستون به‌کار رفته از نوع DB-5 بود و برنامه گرمایی ستون مشابه با GC در نظر گرفته شد. دمای محفظه تزریق °C ۲۶۰ و دمای ترانسفرلاین °C ۲۸۰ تنظیم شد. گاز حامل هلیوم با درجه خلوص ۹۹/۹۹۹ بوده که با سرعت ۳۰/۶ سانتی‌متر بر ثانیه در طول ستون حرکت می‌کند (Solouki et al., 2023). اجزای تشکیل‌دهنده اسانس با بررسی طیف‌های جرمی ترکیبات و مقایسه آنها با ترکیب‌های استاندارد و استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه دستگاه طیف‌سنج جرمی (Adams, 2017) و محاسبه شاخص بازداری ترکیبات، مورد شناسایی قرار گرفتند.

نتایج

بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌های مربوط به ورمی‌کمپوست، بیشترین درصد اسانس در تیمار بدون مصرف کود و مصرف ۱۰ تن در هکتار کود ورمی‌کمپوست به‌ترتیب با میانگین ۲/۸۷ و ۲/۲۷ درصد مشاهده شد (جدول ۲). همچنین نتایج نشان داد که هرچند بین تیمارهای مختلف ورمی‌کمپوست در ترکیبات عمده اسانس اختلاف آماری وجود نداشت، اما بیشترین درصد پارا–سیمن با ۱۵/۰۵درصد متعلق به مصرف ۵ تن در هکتار ورمی‌کمپوست بود. بیشترین درصد گاما–ترپنین با ۴۸/۴۰ درصد، از مصرف ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست بدست آمد و بیشترین درصد تیمول مربوط به شرایط بدون استفاده از ورمی‌کمپوست (برابر ۳۵/۴۳ درصد) بود.

اثر برهمکنش ورمی‌کمپوست و ازتوباکتر بر عملکرد دانه نشان داد که تیمارهای V_1A_2 (کاربرد ازتوباکتر) و V_2A_1 (کاربرد ۵ تن ورمی‌کمپوست) بیشترین عملکرد دانه را داشتند. این نتایج بیان‌گر نقش مؤثر ازتوباکتر در شرایط کم‌نهاده و همچنین اثربخشی سطح متوسط ورمی‌کمپوست هستند. در این آزمایش، افزایش سطح ورمی‌کمپوست به‌تنهایی موجب بهبود عملکرد نشد و ترکیب آن با ازتوباکتر در سطوح بالا اثربخشی کمتری داشت (شکل ۱).

بررسی داده‌های حاصل از تیمارهای مختلف نشان داد که تأثیر ترکیب ورمی‌کمپوست، مایکوریزا و ازتوباکتر بر صفات رشدی و عملکرد اسانس گیاه، پرنوسان بود و اثر افزایشی نداشت (جدول ۳). بیشترین قطر گل‌آذین (۵/۵۸ سانتی‌متر) در تیمار V_2M_3 (۵ تن ورمی‌کمپوست و *Funneliformis mosseae*) مشاهده شد. همچنین بیشترین ارتفاع گیاه (حدود ۹۸ سانتی‌متر) مربوط به تیمارهای V_1M_2 و V_1M_3 بود که بدون کاربرد ورمی‌کمپوست و با استفاده از مایکوریزا به دست آمد.

اثر برهمکنش ورمی‌کمپوست در میکوریزا بر عملکرد دانه

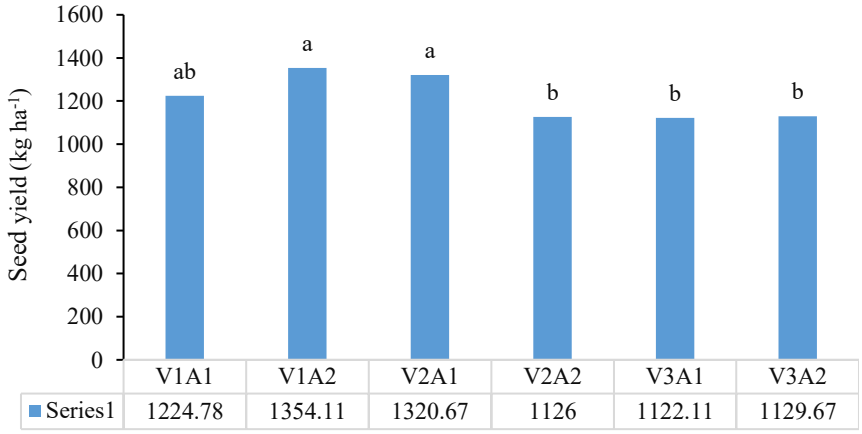
جدول ۲. مقایسه میانگین اثر کود ورمی‌کمپوست بر درصد اسانس و برخی از ترکیبات اسانس گیاه زنیان

Table 2. Means' comparison of the effect of vermicompost on the essential oil percentage and some of essential oil compounds of ajwain

Thymol (%)	γ-Terpinene (%)	*p*-Cymene (%)	شاخص برداشت اسانس Essential oil harvest index	عملکرد اسانس Essential oil yield (kg ha^{-1})	درصد اسانس Essential oil percentage (%)	عملکرد بذر Seed yield (kg ha^{-1})	ورمی‌کمپوست Vermicompost (kg ha^{-1})
35.43^{a}	47.25^{a}	12.44^{ab}	1.30^{a}	28.36^{a}	2.87^{a}	1289.46^{a}	0
35.09^{a}	44.71^{a}	15.05^{a}	0.78^{b}	21.70^{5b}	1.78^{b}	1223.33^{a}	5
34.25^{a}	48.40^{a}	11.89^{b}	0.87^{b}	25.31^{ab}	2.27^{a}	1125.89^{b}	10

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش LSD هستند.

Means within each column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to LSD method.



شکل ۱. مقایسه میانگین تأثیر برهمکنش ورمی‌کمپوست × ازتوباکتر بر عملکرد دانه گیاه زنیان. میانگین‌های دارای حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش LSD هستند. V1، V2 و V3 به‌ترتیب بیان‌گر کاربرد ورمی‌کمپوست به میزان ۰، ۵ و ۱۰ تن در هکتار است؛ A1 و A2 به‌ترتیب نشان‌دهنده شرایط بدون مصرف و مصرف ازتوباکتر است.

Fig. 1. Means' comparison of the interaction effect of vermicompost × azotobacter on seed yield of ajwain. Means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to LSD method. V1, V2 and V3 stand for vermicompost application rates of 0, 5, and 10 t ha^{-1}, respectively; A1 and A2 indicate no application and application of *Azotobacter chroococcum*, respectively.

نشان داد که استفاده از قارچ‌های *Rhizophagus irregularis* (۱۳۲۲/۶۱۷ کیلوگرم در هکتار)، *Funneliformis mosseae* (۱۳۸۴/۶۷ کیلوگرم در هکتار) و ۵ تن در هکتار ورمی‌کمپوست (۱۳۸۳/۱۷ کیلوگرم در هکتار) موجب افزایش عملکرد دانه نسبت به تیمار شاهد و سایر تیمارها شدند (جدول ۳).

بیشترین درصد اسانس در تیمارهای M_1A_1 و M_2A_2 به‌ترتیب ۲/۴۸ و ۲/۴۶ درصد ثبت شد که از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند. همچنین مشاهده شد که بیشترین عملکرد اسانس نیز هنگام استفاده از قارچ‌های *Rhizophagus irregularis* (۳۱/۱۹۹ کیلوگرم در هکتار) و *Funneliformis mosseae* (۲۶/۱۱۶ کیلوگرم در هکتار) و کاربرد ۵ تن در هکتار ورمی‌کمپوست (۲۸/۲۵۴ کیلوگرم در هکتار) و ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست (۲۹/۰۶ کیلوگرم در هکتار) حاصل شد (جدول ۳). در این آزمایش، تیمارهای M_1A_1، M_1A_2 و M_2A_2 بیشترین شاخص برداشت اسانس را داشتند.

نتایج اثر سه‌گانه کودها (جدول ۴) نشان داد با کاربرد سویه

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر برهمکنش کود ورمی‌کمپوست × میکوریزا و میکوریزا × ازتوباکتر بر صفات گیاه زنیان

Table 3. Means' comparison of the interaction effect of vermicompost × mycorrhiza, and mycorrhiza × azotobacter on the traits of ajwain

ازتوباکتر × میکروریزا Mycorrhiza × Azotobacter				میکوریزا × ورمی‌کمپوست Vermicompost × Mycorrhiza				
شاخص برداشت اسانس Essential oil harvest index	عملکرد اسانس Essential oil yield (kg ha^{-1})	درصد اسانس Essential oil percentage (%)	تیمارها Treatments	عملکرد اسانس Essential oil yield (kg ha^{-1})	عملکرد بذر Seed yield (kg ha^{-1})	قطر گل‌آذین Inflorescence diameter (cm)	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	تیمارها Treatments
1.19^{a}	28.834^{a}	2.48^{a}	M_1A_1	27.773^{ab}	1161.5^{bc}	4.25^{d}	78.66^{b}	V_1M_1
1.13^{ab}	27.890^{a}	2.37^{a}	M_1A_2	31.199^{a}	1322.17^{ab}	5.37^{ab}	97.66^{a}	V_1M_2
0.78^{c}	20.290^{b}	1.65^{b}	M_2A_1	26.116^{ab}	1384.67^{a}	4.58^{cd}	98.60^{a}	V_1M_3
1.13^{ab}	29.271^{a}	2.46^{a}	M_2A_2	28.254^{ab}	1383.17^{a}	4.41^{cd}	86.33^{ab}	V_2M_1
0.93^{bc}	24.460^{ab}	2.04^{ab}	M_3A_1	16.618^{c}	1156.33^{bc}	4.16^{d}	76.33^{b}	V_2M_2
0.71^{c}	20.790^{b}	1.62^{b}	M_3A_2	20.365^{bc}	1130.50b^{c}	5.58^{a}	85.16^{ab}	V_2M_3
				29.060^{a}	1094.50^{c}	4.83^{c}	80.83^{b}	V_3M_1
				26.526^{ab}	1133.17^{bc}	4.91^{bc}	84.00^{ab}	V_3M_2
				20.329^{bc}	1150.00^{bc}	4.41^{cd}	77.50^{b}	V_3M_3

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش LSD هستند. V1، V2 و V3 به‌ترتیب بیان‌گر کاربرد ورمی‌کمپوست به میزان ۰، ۵ و ۱۰ تن در هکتار است؛ M1، M2 و M3 به‌ترتیب بیان‌گر بدون کاربرد، و کاربرد قارچ‌های میکوریزا *Rhizophagus irregularis* و *Funneliformis mosseae* است؛ A1 و A2 به‌ترتیب نشان‌دهنده شرایط بدون مصرف و مصرف ازتوباکتر است.

Means within each column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to LSD method. V1, V2 and V3 stand for vermicompost application rates of 0, 5, and 10 t ha^{-1}, respectively; M1, M2 and M3 show no application, and application of mycorrhizal fungi *Rhizophagus irregularis* and *Funneliformis mosseae*), respectively; and A1 and A2 indicate no application and application of *Azotobacter chroococcum*, respectively.

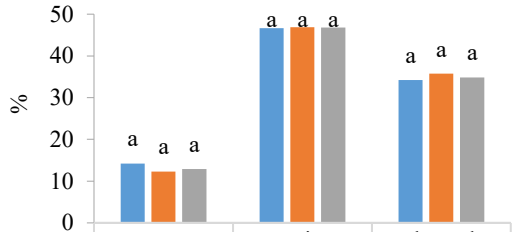
جدول ۴. مقایسه میانگین اثر کودهای ورمی‌کمپوست، مایکوریزا و ازتوباکتر بر صفات مورفولوژیک گیاه زنیان

Table 4. Means' comparison of the effects of vermicompost, mycorrhiza, and azotobacter fertilizers on the morphological characteristics of ajwain

تیمارها Treatments	تعداد ساقه‌های فرعی Number of lateral stems (n/p)	طول گل‌آذین Inflorescence length (cm)	تعداد گل‌آذین Number of inflorescences (n/p)	قطر ساقه Stem diameter (mm)	طول ریشه اصلی Main root length (cm)	طول ریشه فرعی Lateral root length (cm)	عملکردبرگ Leaf yield (kg ha^{-1})	عملکرد ساقه با گل‌آذین Stem yield with inflorescence (kg ha^{-1})	عملکرد سرشاخه (برگ+ساقه) Shoot yield (Leaf + Stem) (kg ha^{-1})	وزن خشک ریشه Root dry weight (kg ha^{-1})	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg ha^{-1})
$V_1M_1A_1$	12.66^{f}	5.33^{fg}	111.66^{de}	1.65^{e-f}	29.00^{bcd}	18.00^{cde}	293.67^{i}	1592.7^{bc}	1886.3^{d}	599.33^{hi}	2485.7^{ij}
$V_1M_1A_2$	17.33^{c}	9.16^{a}	93.33^{gh}	2.00^{b}	29.33^{bcd}	18.00^{cde}	277.33^{i}	1600.7^{bc}	1878^{d}	434^{j}	2312^{j}
$V_1M_2A_1$	17.00^{c}	8.00^{a-d}	163.00^{b}	1.90^{bc}	29.00^{bcd}	16.66^{de}	329.33^{i}	1745^{bc}	2074.3^{cd}	543.33^{i}	267.7^{hij}
$V_1M_2A_2$	16.33^{cd}	8.50^{ab}	94.66^{fgh}	2.81^{a}	34.83^{a}	29.66^{a}	418.67^{h}	2140.3^{ab}	2559b^{cd}	1453^{a}	4012^{a-d}
$V_1M_3A_1$	22.66^{a}	7.00^{cde}	104.00^{ef}	3.00^{a}	32.33^{ab}	27.33^{ab}	414.33^{h}	1715.7^{bc}	2130^{cd}	746.33^{fg}	2876.3^{g-j}
$V_1M_3A_2$	20.33^{b}	8.00^{a-d}	140.33^{c}	1.86^{bcd}	29.33^{bcd}	23.33^{bc}	427.67^{h}	2217.3^{ab}	2645^{bc}	615.33^{hi}	3260.3^{e-h}
$V_2M_1A_1$	14.33^{def}	8.33^{abc}	92.00^{gh}	1.43^{fgh}	27.00^{c-f}	16.00^{e}	500.66^{g}	2708^{a}	3208.7^{ab}	987.68^{cd}	4187.3^{ab}
$V_2M_1A_2$	17.00^{c}	7.50^{bcd}	93.66^{gh}	2.00^{b}	28.33^{bcd}	20.00^{cde}	866.67^{f}	1740.7^{bc}	2627.3^{bc}	808.67^{ef}	3436^{c-g}
$V_2M_2A_1$	13.66^{ef}	7.00^{cde}	92.33^{gh}	1.16^{hij}	30.66^{bc}	19.33^{cde}	1060^{e}	1664.3^{bc}	2724.3^{bc}	888.33^{de}	3612.7^{b-f}
$V_2M_2A_2$	13.66^{ef}	5.33^{fg}	112.33^{de}	1.73^{b-e}	25.00^{def}	16.33^{de}	1097^{e}	1518^{bc}	2615^{bc}	657.67^{gh}	3272.7^{d-h}
$V_2M_3A_1$	12.33^{f}	8.16^{abc}	114.33^{d}	1.23^{e-j}	23.00^{f}	17.00^{de}	1076.67^{e}	1978b^{c}	3054.7^{ab}	601.67^{hi}	3656.3^{b-f}
$V_2M_3A_2$	15.66^{cde}	8.66^{ab}	101.33^{fg}	1.43^{fgh}	25.00^{def}	17.00^{de}	1116d^{e}	1380.3^{c}	2496.3^{bcd}	572.67^{hi}	3069^{f-i}
$V_3M_1A_1$	16.00^{cde}	6.00^{efg}	141.33^{c}	1.06^{j}	28.33^{bcd}	15.00^{e}	1170^{d}	1345.3^{c}	2515.3^{bcd}	559^{hi}	3074.3^{f-i}
$V_3M_1A_2$	15.33^{cde}	4.83^{g}	75.66^{i}	1.13^{ij}	18.66^{g}	16.00^{e}	1275^{c}	1767.3^{bc}	3042.3^{ab}	981.67^{cd}	4024^{abc}
$V_3M_2A_1$	17.33^{c}	7.60^{bcd}	141.66^{c}	1.60^{def}	27.66^{cde}	16.00^{e}	1278.67^{c}	2152.7^{ab}	3431.3^{a}	1009^{c}	4440.3^{a}
$V3M2A_2$	13.66^{ef}	6.66^{def}	202.00^{a}	1.40^{f-i}	23.00^{f}	14.66^{e}	1297^{c}	1312.3^{c}	2609.3^{bc}	1132^{b}	3741.3^{a-e}
$V_3M_3A_1$	13.66^{ef}	5.50^{fg}	142.66^{c}	1.86^{bcd}	23.66^{ef}	21.66^{cd}	137^{b}	1788.7^{bc}	3159.7^{ab}	777^{f}	3936.7^{a-e}
$V_3M_3A_2$	16.33^{cd}	7.33^{b-e}	87.33^{h}	1.46^{efg}	22.66^{f}	15.00^{e}	1566.33^{a}	1567.3^{bc}	3133.7^{ab}	782.33^{f}	3916^{a-e}

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش LSD هستند. V1، V2 و V3 به‌ترتیب بیان‌گر کاربرد ورمی‌کمپوست به میزان ۰، ۵ و ۱۰ تن در هکتار است؛ M1، M2 و M3 به‌ترتیب بیان‌گر بدون کاربرد، و کاربرد قارچ‌های میکوریزا *Rhizophagus irregularis* و *Funneliformis mosseae* است؛ A1 و A2 به‌ترتیب نشان‌دهنده شرایط بدون مصرف و مصرف ازتوباکتر است.

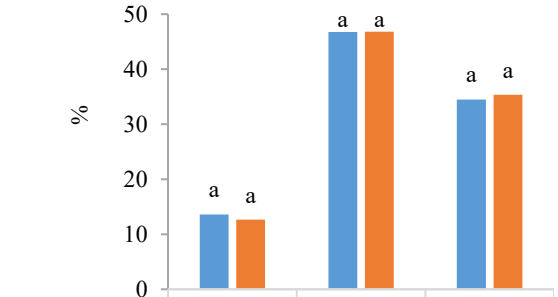
Means within each column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to LSD method. V1, V2 and V3 stand for vermicompost application rates of 0, 5, and 10 t ha^{-1}, respectively; M1, M2 and M3 show no application, and application of mycorrhizal fungi *Rhizophagus irregularis* and *Funneliformis mosseae*), respectively; and A1 and A2 indicate no application and application of *Azotobacter chroococcum*, respectively.



	p-cymene	γ-terpinene	thymol
Control	14.19	46.65	34.23
Funneliformis mosseae	12.3	46.88	35.74
Rhizophagus irregularis	12.89	46.81	34.81

شکل ۲. تأثیر قارچ‌های مختلف میکوریزا بر درصد ترکیبات اصلی اسانس در گیاه زنیان. در هر گروه، میانگین‌های دارای حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش LSD هستند.

Fig. 2. Effect of different mycorrhizal fungi on the percentage of main essential oil compounds in ajwain. In each group, means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to LSD method.



	p-cymene	γ-terpinene	thymol
Control	13.61	46.73	34.49
Azotobacter chroococcum	12.64	46.84	35.35

شکل ۳. تأثیر ازتوباکتر بر درصد ترکیبات اصلی اسانس در گیاه زنیان. در هر گروه، میانگین‌های دارای حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش LSD هستند.

Fig. 3. Effect of *Azotobacter chroococom* on the percentage of main essential oil compounds in ajwain. In each group, means followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to LSD method.

Funneliformis mosseae بیشترین تعداد ساقه فرعی با میانگین ۲۳ عدد در گیاه مشاهده شد. درحالی‌که کاربرد *Azotobacter chroococcum*، گیاهانی با بلندترین گل آذین (با میانگین ۹/۱۶ سانتی‌متر) را تولید کرد. بیشترین تعداد گل‌آذین (میانگین ۲۰۲ عدد) با کاربرد ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست، تلقیح با سویه *Rhizophagus irregularis* و *Azotobacter chroococcum* در گیاه مشاهده شد. با توجه به نتایج بدست‌آمده، بذرهای تلقیح‌شده با *Funneliformis mosseae* گیاهانی با ساقه‌های قطورتری (۳ میلی‌متر) ایجاد کردند که مشابه با کاربرد سویه *Rhizophagus irregularis* به همراه *Azotobacter chroococcum* (۲/۸۱ سانتی‌متر) بود. بیشترین طول ریشه اصلی (۳۴/۸۳ سانتی‌متر)، ریشه‌های فرعی (۲۹/۶۶ سانتی‌متر) و وزن خشک ریشه (۱۴۵۳ کیلوگرم در هکتار) نیز در هنگام کاربرد *Rhizophagus irregularis* به همراه *Azotobacter chroococcum* مشاهده شد (جدول ۴).

کاربرد ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست به همراه *Funneliformis mosseae* و *Azotobacter chroococcum*، در این گیاه بیشترین عملکرد برگ (۱۵۶۶/۳۳ کیلوگرم در هکتار) را داشت. این در حالی بود که بیشترین عملکرد ساقه به همراه گل‌آذین، در تیمار مصرف ۵ تن در هکتار ورمی‌کمپوست با میانگین ۲۷۰۸ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. بیشترین عملکرد سرشاخه (۳۴۳۱/۳ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد بیولوژیک (۴۴۴۰/۳ کیلوگرم در هکتار) در تیمار مصرف ۱۰ تن در هکتار کود ورمی‌کمپوست و *Rhizophagus irregularis* به دست آمد (جدول ۴).

مقایسه میانگین اثر قارچ‌های میکوریزا بر ترکیبات اصلی اسانس (شکل ۲) نشان داد که بیشترین مقادیر پارا–سیمن (۱۴/۱۹ درصد) در تیمار شاهد، گاما–ترپنین (۴۶/۸۸ درصد) و تیمول (۳۵/۷۴ درصد) از کاربرد قارچ *Funneliformis mosseae* به‌دست آمد. مقایسه میانگین به‌کارگیری باکتری و تیمار شاهد (شکل ۳) نشان داد که بیشترین درصد پارا–سیمن (۱۳/۶۱ درصد) مربوط به تیمار شاهد بوده و بیشترین مقادیر گاما–ترپنین (۴۶/۸۴ درصد) و تیمول (۳۵/۳۵ درصد) در هنگام کاربرد باکتری *Azotobacter chroococcum* به‌دست آمد.

مقایسه میانگین اثر برهمکنش تیمارها بر سایر ترکیبات اسانس نیز در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر ورمی‌کمپوست، مایکوریزا و ازتوباکتر بر ترکیبات اسانس (بر حسب درصد) در گیاه زنیان

Table 5. Means' comparison of the effect of vermicompost, mycorrhiza, and azotobacter on the essential oil compounds (%) of ajwain

α-Terpinene	Myrcene	Sabinene	β-Pinene	α-Thujene	تیمارها Treatments
0.24gh	0.30cde	0.27h	0.70ab	0.11i	$V_1M_1A_1$
0.45a-e	0.35a-e	0.62cd	0.46b	0.36gh	$V_1M_1A_2$
0.48a-d	0.33a-e	0.52ef	0.90a	0.33h	$V_1M_2A_1$
0.51abc	0.44a	0.46f	0.15c	0.39fgh	$V_1M_2A_2$
0.36d-g	0.37a-d	0.89a	0.80a	0.41e-h	$V_1M_3A_1$
0.42a-f	0.36a-e	0.75bcd	0.72ab	0.51cde	$V_1M_3A_2$
0.34e-h	0.24e	0.33gh	0.77a	0.44d-g	$V_2M_1A_1$
0.41b-f	0.32a-e	0.52ef	0.69ab	0.52cd	$V_2M_1A_2$
0.44a-e	0.33a-e	0.45fg	0.82a	0.61bc	$V_2M_2A_1$
0.38c-f	0.41abc	0.66cd	0.88a	0.37gh	$V_2M_2A_2$
0.52ab	0.44a	0.74bcd	0.91a	0.44d-g	$V_2M_3A_1$
0.55a	0.31b-e	0.82ab	0.79a	0.38fgh	$V_2M_3A_2$
0.29fgh	0.33a-e	0.78abc	0.68ab	0.48def	$V_3M_1A_1$
0.22h	0.43ab	0.74bcd	0.86a	0.53cd	$V_3M_1A_2$
0.24gh	0.32a-e	0.69bcd	0.88a	0.44d-g	$V_3M_2A_1$
0.54ab	0.30cde	0.68cd	0.64ab	0.72a	$V3M2A_2$
0.38c-f	0.28de	0.75bcd	0.69ab	0.68ab	$V_3M_3A_1$
0.41b-f	0.35a-e	0.70bcd	0.79a	0.66ab	$V_3M_3A_2$

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد به روش LSD هستند. V1، V2 و V3 به‌ترتیب بیان‌گر کاربرد ورمی‌کمپوست به میزان ۰، ۵ و ۱۰ تن در هکتار است؛ M1، M2 و M3 به‌ترتیب بیان‌گر بدون کاربرد، و کاربرد قارچ‌های میکوریزا *Rhizophagus irregularis* و *Funneliformis mosseae* است؛ A1 و A2 به‌ترتیب نشان‌دهنده شرایط بدون مصرف و مصرف ازتوباکتر است.

Means within each column followed by the same letter are not significantly different at the 5% probability level according to LSD method. V1, V2 and V3 stand for vermicompost application rates of 0, 5, and 10 t ha^{-1}, respectively; M1, M2 and M3 show no application, and application of mycorrhizal fungi *Rhizophagus irregularis* and *Funneliformis mosseae*), respectively; and A1 and A2 indicate no application and application of *Azotobacter chroococcum*, respectively.

بررسی همبستگی نشان داد بین ارتفاع گیاه با تعداد ساقه فرعی، قطر ساقه اصلی، طول ریشه اصلی و فرعی، همبستگی مثبت معنی‌دار مشاهده شد. همچنین، بین تعداد ساقه جانبی و طول گل‌آذین، همبستگی منفی معنی‌داری وجود داشت. تعداد ساقه جانبی با قطر ساقه، طول ریشه اصلی و فرعی، همبستگی مثبت معنی‌داری نشان داد. طول گل‌آذین با طول ریشه اصلی، و همچنین تعداد گل‌آذین با طول ریشه اصلی، دارای همبستگی منفی معنی‌دار بودند. قطر ساقه با طول ریشه اصلی و فرعی همبستگی مثبت داشت، اما با عملکرد برگ همبستگی منفی نشان داد. طول ریشه اصلی با طول ریشه فرعی همبستگی مثبت داشت و طول ریشه فرعی با عملکرد برگ همبستگی منفی داشت. عملکرد بذر با عملکرد برگ نیز همبستگی منفی معنی‌داری نشان داد. درصد اسانس با عملکرد بیولوژیک همبستگی منفی داشت (جدول ۶).

همچنین نتایج همبستگی ترکیبات اسانس (جدول ۷) نشان داد که ترکیب اصلی تیمول با پارا-سیمن و گاما-ترپنین همبستگی منفی معنی‌داری دارد.

بحث

افزایش عملکرد بذر با اعمال تیمارهایی همچون مصرف

جدول ۶. نتایج همبستگی بین صفات مورفولوژیک و عملکرد گیاه زنیان

Table 6. Results of correlation between morphological and yield traits of ajwain

صفات Traits	ارتفاع گیاه Plant height	قطر گل‌آذین Inflorescence diameter	تعداد ساقه‌های فرعی Number of lateral stems	طول گل‌آذین Inflorescence length	تعداد گل‌آذین Number of inflorescences	قطر ساقه Stem diameter	طول ریشه اصلی Main root length	طول ریشه فرعی Lateral root length	عملکرد برگ Leaf yield	عملکرد ساقه با گل‌آذین Stem yield with inflorescence	عملکرد بذر Seed yield	عملکرد سرشاخه Shoot yield	وزن خشک ریشه Root dry weight	عملکرد بیولوژیک Biological yield	درصد اسانس Essential oil percentage	عملکرد اسانس Essential oil yield	شاخص برداشت اسانس Essential oil harvest index
	y1	y2	y3	y4	y5	y6	y7	y8	y9	10	11	12	13	14	15	16	17
y1	1																
y2	0.22	1															
y3	0.72**	0.00	1														
y4	-0.20	0.24	-0.43*	1													
y5	-0.11	0.05	-0.28	0.22	1												
y6	0.49*	0.04	0.42*	0.06	-0.11	1											
y7	0.62**	0.00	0.74**	-0.52**	-0.33*	0.40*	1										
y8	0.46*	0.024	0.37*	0.04	-0.21	0.70**	0.41*	1									
y9	-0.32	0.01	-0.20	-0.23	0.09	-0.55**	-0.32	-0.39*	1								
y10	0.11	-0.00	0.09	0.19	-0.11	0.14	0.08	0.22	-0.32	1							
y11	0.13	-0.00	0.12	0.22	-0.13	0.26	0.11	0.30	-0.44*	0.85**	1						
y12	-0.18	0.00	-0.09	-0.03	-0.01	-0.34*	-0.20	-0.13	0.57**	0.59**	0.36*	1					
y13	0.14	0.12	0.00	-0.06	-0.04	0.18	0.10	0.31	0.16	0.28	0.21	0.38*	1				
y14	-0.08	0.05	-0.07	-0.05	-0.03	-0.19	-0.11	0.02	0.51**	0.57**	0.37*	0.93**	0.69**	1			
y15	0.00	0.05	-0.06	-0.02	0.18	0.13	-0.01	0.18	-0.09	-0.27	-0.23	-0.32	0.21	-0.64**	1		
y16	0.09	0.10	0.01	0.08	0.05	0.32	0.06	0.39*	-0.32	0.12	0.25	-0.16	0.35*	0.00	0.86**	1	
y17	0.14	0.05	0.07	0.07	0.04	0.45*	0.18	0.38*	-0.57**	-0.17	0.04	-0.63**	0.04	0.86**	0.80**	0.85**	1

* و ** نشان‌دهنده وجود همبستگی معنی‌دار در سطوح ۵ و ۱ درصد می‌باشند.

* and ** show significant correlations at 5 and 1% probability levels, respectively.

جدول ۷. نتایج همبستگی بین ترکیبات اسانس گیاه زنیان

Table 7. Results of correlation between essential oil compounds of ajwain

	α -Thujene	Sabinene	β -Pinene	Myrcene	α -Terpinen	*p* -Cymene	Limonene	1.8-Cineole	γ -Terpinene	Thymol	Carvacrol
α-Thujene	1										
Sabinene	-0.01^{ns}	1									
β-Pinene	-0.18^{ns}	-0.23^{ns}	1								
Myrcene	0.08^{ns}	0.25^{ns}	0.18^{ns}	1							
α-Terpinen	0.14^{ns}	-0.02^{ns}	0.05^{ns}	0.35**	1						
p-Cymene	-0.17^{ns}	**-0.32	0.25^{ns}	-0.20^{ns}	-0.22^{ns}	1					
Limonene	0.26*	-0.02^{ns}	0.12^{ns}	0.11^{ns}	0.23^{ns}	0.11^{ns}	1				
1.8-Cineole	-0.19^{ns}	0.12^{ns}	0.09^{ns}	0.22^{ns}	-0.01^{ns}	-0.10^{ns}	-0.19^{ns}	1			
γ-Terpinene	-0.02^{ns}	-0.29*	0.01^{ns}	0.06^{ns}	0.06^{ns}	0.24^{ns}	-0.02^{ns}	-0.05^{ns}	1		
Thymol	-0.02^{ns}	0.25^{ns}	-0.19^{ns}	-0.13^{ns}	-0.02^{ns}	-0.35**	-0.02^{ns}	-0.23^{ns}	-0.38**	1	
Carvacrol	0.02^{ns}	-0.11^{ns}	0.22^{ns}	0.04^{ns}	0.03^{ns}	0.02^{ns}	0.01^{ns}	-0.33**	-0.21^{ns}	0.18^{ns}	1

* و ** نشان‌دهنده وجود همبستگی معنی‌دار در سطوح ۵ و ۱ درصد می‌باشند.

* and ** show significant correlations at 5 and 1% probability levels, respectively.

قارچ‌های *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus irregularis* و کاربرد ۵ تن در هکتار ورمی‌کمپوست (جدول ۳) و بدون افزایش آن در تیمارهایی مانند مصرف ۱۰ تن در هکتار از ورمی‌کمپوست، تیمار ازتوباکتر و همچنین استفاده هم‌زمان از تیمارهای یادشده نشان‌دهنده آن است که نقش تیمارهای حل‌کننده فسفات مانند قارچ‌های *Funneliformis mosseae* و *Rhizophagus irregularis* بیشتر از ازتوباکتر بوده است. میزان تولید بذر در تیمار ۵ تن در هکتار ورمی‌کمپوست بیشتر از ۱۰ تن در هکتار بوده است. این نتایج بیان‌گر آن است که در صورت استفاده از کود آلی زیاد و نیز انواع کودهای زیستی تثبیت‌کننده نیتروژن، ممکن است عملکرد کل شاخساره افزایش یابد و همچنین برخی از صفات مورفولوژیک افزایش یابند (جدول ۴). اما در اثر کاربرد این تیمارها عملکرد بذر افزایش نخواهد یافت که می‌تواند ناشی از عواملی مانند دوره رشد کوتاه گیاه زنیان و نبود امکان استفاده از تمامی عناصر موجود در مقادیر زیاد ورمی‌کمپوست و فرصت کم گیاه برای فعال‌شدن ریزجانداران ازتوباکتر و همینطور غیرفعال‌شدن فعالیت ازتوباکتر به‌دلیل در اختیار داشتن نیتروژن کافی باشد. همچنین ممکن است بدون افزایش عملکرد دانه به‌دلیل رشد رویشی بیشتر گیاه به خاطر نیتروژن آزادشده از مصرف ۱۰ تن ورمی‌کمپوست در هکتار و ازتوباکتر باشد.

نتایج جدول ۲ و شکل ۱ نیز مؤید نیاز غذایی کم زنیان برای تولید دانه بوده و نشان می‌دهند که تیمارهای محرک رشد رویشی مانند عملکرد ریشه، برگ و ساقه، تأثیر مثبتی بر عملکرد زایشی از جمله تولید دانه ندارند. یکی از دلایل احتمالی همبستگی منفی بین عملکرد برگ و دانه ممکن است به‌دلیل ریزش زودهنگام برگ‌ها پیش از تکمیل فرآیند پرشدن دانه است؛ چرا که در گیاه زنیان، به‌ویژه برگ‌های پایینی تاج‌پوشش، از زمان آغاز تشکیل میوه، شروع به ریزش می‌کنند. همچنین ممکن است همبستگی منفی بین عملکرد دانه و برگ به دلیل ریزبودن بذرها و پرشدن سریع آنها از راه انتقال مجدد و وجود کلروفیل در همه اندام‌های هوایی گیاه و فتوسنتز آنها باشد. هر چند این موضوع نیاز به پژوهش‌ها و بررسی بیشتری دارد و ممکن است دلایل دیگری هم داشته باشد.

یکی از ویژگی‌های مهم و تأثیرگذار بر عملکرد گیاه زنیان، تعداد گل‌آذین به دلیل نقش آن در تعداد دانه است. این ویژگی، با توجه به زمان ظهور آن در میانه دوره رشد گیاه، فرصت کافی را برای اثربخشی کودهای مصرف‌شده فراهم می‌کند که موجب شد تأثیر کاربرد ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست به همراه قارچ‌های *Funneliformis mosseae* و *Azotobacter chroococcum* به شکلی ملموس‌تر نمایان شود. با توجه به جدول ۴، هم‌افزایی بین قارچ *Rhizophagus irregularis* و تلقیح با *Azotobacter chroococcum* تأثیر چشم‌گیری بر افزایش طول ریشه اصلی و فرعی زنیان داشته است که این مسئله می‌تواند از چند عامل متاثر باشد. مایکوریزا بهبود جذب مواد مغذی، به‌ویژه فسفر، را سبب می‌شود، در حالی‌که ازتوباکتر با تثبیت نیتروژن می‌تواند تأمین عناصر غذایی را افزایش دهد در نتیجه هم‌افزایی بین مریزجانداران موجب رشد بهینه سیستم ریشه‌ای می‌شود (Sharma et al., 2022). وجود همبستگی منفی بین برخی از صفات شاخساره و ریشه می‌تواند به دلیل تخصیص مواد فتوسنتزی به شاخساره و ریشه باشد و در صورت توسعه بیشتر ریشه، از میزان رشد شاخساره کاسته خواهد شد؛ زیرا ریشه یک اندام مصرف‌کننده است. همچنین *Rhizophagus irregularis* با افزایش سطح تماس ریشه با ذرات خاک، جذب آب و مواد مغذی را بهبود می‌بخشد، که در ترکیب با آثار مثبت *Azotobacter chroococcum* می‌تواند منجر به بهبود ساختمان خاک، افزایش فراهمی آب و افزایش رشد ریشه شود. از طرفی این برهمکنش می‌تواند تولید هورمون‌های رشد مانند اکسین‌ها و جیبرلین‌ها را تحریک کند که نقش کلیدی در توسعه ریشه دارند. در مقابل، کاربرد سویه *Funneliformis mosseae* به تنهایی، گرچه تأثیر مثبتی داشت اما نبود *Azotobacter chroococcum* باعث کاهش اثربخشی آن نسبت به ترکیب قارچ و باکتری شده است. از طرفی تأثیر ترکیب ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست با *Azotobacter chroococcum* بر رشد ریشه زنیان می‌تواند به دلیل تأثیر مثبت

ورمی‌کمپوست بر نگهداشت آب خاک و عدم نیاز گیاه به توسعه عمقی ریشه باشد (جدول ۴). این نتایج با یافته‌های Benaffari et al. (2022) در مورد گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa*) همخوانی دارد اما با یافته‌های Valinezhad et al. (2019) درباره گیاه استویا (*Stevia rebaudiana* Bertoni) و نتایج Manandhar et al. (2017) در مورد گیاه برنج تفاوت دارد. از طرفی، اثر کاربرد ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست به همراه *Azotobacter chroococcum* بر توسعه سطحی ریشه بجای رشد عمقی آن نشان‌دهنده فعالیت بیشتر ریشه در منطقه کوددهی‌شده بوده و در نتیجه منجر به کاهش میانگین طول ریشه‌های اصلی شده است. نتایج به‌دست‌آمده از طول ریشه‌ها بیان‌گر این موضوع است که هرچند ترکیب چندین ریزجاندار می‌تواند نتایج بهتری در بهینه‌سازی رشد گیاه ارائه دهد، اما نقش ریزجانداران وابسته به شرایط محیطی و چگونگی برهمکنش آن‌ها با سایر منابع تغذیه‌ای است. بنابراین برای مدیریت زیستی خاک، استفاده هم‌زمان از چندین ریزجاندار و شناخت ریزجانداران مناسب برای گیاه، می‌تواند منجر به افزایش کارایی نهاده‌های زیستی و در نهایت بهره‌وری بهتر گیاه شود.

بر اساس نتایج جداول ۳ و ۴، افزایش سطح ورمی‌کمپوست به‌طور کلی منجر به بهبود عملکرد برگ، عملکرد ساقه، عملکرد شاخه و عملکرد بیولوژیک شد. در پژوهش‌های پیشین افزایش عملکرد گل بابونه، تعداد ساقه اصلی و شاخص برداشت آن (Tasdighi et al., 2015)، عملکرد اسانس، عملکرد سرشاخه و عملکرد ساقه گیاه اسطوخودوس (Abbaszadeh et al., 2016) و ارتفاع بوته، تعداد شاخه جانبی، تعداد برگ در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، میزان اسانس و عملکرد اسانس گیاه ریحان (Mohammadzadeh Toutounchi, 2020) با افزایش سطوح ورمی‌کمپوست گزارش شده است. نقش قارچ میکوریزا در افزایش عملکرد اندام‌های مختلف گیاه پیچیده‌تر بوده و به نظر می‌رسد که وابسته به سویه میکوریزا و همچنین برهمکنش با سایر تیمارها باشد. در این پژوهش، تیمار $V_3M_2A_1$ (ترکیب ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست به همراه *Funneliformis mosseae*) به طور چشم‌گیری بیشترین عملکرد شاخه (۳۴۳۱/۳ کیلوگرم در هکتار) و عملکرد بیولوژیک (۴۴۴۰/۳ کیلوگرم در هکتار) را سبب شد. این نتیجه تأکید می‌کند که سویه *Funneliformis mosseae*، در حضور بالاترین سطح ورمی‌کمپوست و بدون کاربرد ازتوباکتر، بیشترین هم‌افزایی را با گیاه ایجاد کرده است. قارچ‌های میکوریزا با گسترش شبکه هیف‌های خود در خاک، سطح جذب مواد مغذی، به‌ویژه فسفر و برخی عناصر کمیاب را افزایش می‌دهند که می‌تواند به رشد بهتر گیاه منجر شود. تفاوت در اثربخشی سویه‌های مختلف میکوریزا (*Rhizophagus irregularis* و *Funneliformis mosseae*) می‌تواند به تفاوت در توانایی آن‌ها در تشکیل همزیستی موثر با گیاه و یا کارایی آن‌ها در جذب و انتقال مواد مغذی مرتبط باشد. تاثیر *Azotobacter chroococcum* نیز در این پژوهش متغیر بود و به نظر می‌رسد که به ترکیب با ورمی‌کمپوست و میکوریزا بستگی دارد. در حالی که برای عملکرد برگ، ترکیب $V_3M_3A_2$ (حضور *Azotobacter chroococcum*) بیشترین مقدار را داشت (۱۵۶۶/۳۳ کیلوگرم در هکتار)، برای عملکرد شاخه و عملکرد بیولوژیک، تیمار $V_3M_2A_1$ (بدون کاربرد *Azotobacter chroococcum*) نتایج بهتری را نشان داد. در بررسی اثر تیمارهای کودی بر گیاه دارویی حنا بهبود و افزایش ماده موثره و صفات عملکردی این گیاه هنگام کاربرد مخلوط ورمی‌کمپوست و میکوریزا گزارش شد (Vahidi et al., 2018). همچنین بر اساس نتایج Zolfaghari et al. (2022) کاربرد میکوریزا تاثیر مثبتی بر عملکرد، اجزای عملکرد و مقدار اسانس گیاه دارویی گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) داشت.

مهم‌ترین یافته در جدول ۴، مشاهده برهمکنش‌های پیچیده میان ورمی‌کمپوست، میکوریزا و ازتوباکتر است. این برهمکنش‌ها نشان می‌دهند که اثربخشی هر عامل به‌تنهایی کمتر از اثربخشی آن در ترکیب با سایر عوامل است. برای نمونه، در حالی که ورمی‌کمپوست به‌تنهایی موجب بهبود شرایط خاک می‌شود، ترکیب آن با سویه‌های قارچ میکوریزا (مانند *Rhizophagus irregularis* در $V_3M_2A_1$) منجر به افزایش چشم‌گیر عملکرد

گیاه می‌گردد. همچنین، نتایج مربوط به وزن خشک ریشه بیان‌گر تنوع در پاسخ‌های گیاه به تیمارها است. برخی ترکیبات با عملکرد زیاد دارای وزن ریشه زیاد بودند، در حالی که برخی دیگر وزن ریشه متوسطی داشتند. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده راهبردهای متفاوت گیاه در تخصیص زیست‌توده باشد. بر این اساس، انتخاب ترکیب مناسب باید بر پایه هدف خاص (مانند عملکرد برگ یا عملکرد ماده خشک) و برهمکنش‌های مشاهده‌شده صورت گیرد.

با توجه به نتایج جدول ۳، تیمارهای M_1A_1، M_1A_2 و M_2A_2 با درصد اسانس بیشتر از ۲/۳، نشان‌دهنده اثربخشی زیاد ترکیبات میکوریزا و ازتوباکتر در بهینه‌سازی تخصیص منابع گیاه به تولید اسانس هستند. این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد هم‌زمان مایکوریزا و ازتوباکتر می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی شاخص برداشت و کیفیت اسانس را افزایش دهد؛ به‌ویژه زمانی که *Rhizophagus irregularis* با ازتوباکتر ترکیب شود می‌تواند نقش مؤثری در افزایش کیفیت و کمّیت اسانس گیاه ایفا کند. در همین راستا، Ajimaddin et al. (2005)، Vinutha, (2005) و Banchio et al. (2009) گزارش دادند که کودهای بیولوژیک باعث افزایش مقدار اسانس می‌شوند. از آنجا که نیتروژن و فسفر برای بازتولید ATP و NADPH که برای بیوسنتز ترکیبات ترپنوئیدی (مواد تشکیل‌دهنده اسانس) ضروری هستند (Loomis and Corteau, 1972)، همزیستی بین قارچ‌های میکوریزا و گیاهان می‌تواند تجمع چندین متابولیت ثانویه را در گیاهان دارویی بهبود بخشد (Weisany et al., 2016). pH خاک، محتوای مواد مغذی و برهمکنش با سایر ریزجانداران بر الگوی کلونیزاسیون این قارچ تأثیر می‌گذارد (Ouahmane et al., 2006). بنابراین کودهای بیولوژیک می‌توانند اسانس گیاه را افزایش دهند. در پژوهشی گزارش شد که استفاده از ورمی‌کمپوست منجر به افزایش غلظت نیتروژن در برگ‌های *Lavandula angustifolia* شد که نقش کلیدی در سنتز ترکیبات متابولیتی دارد (Mavandi et al., 2021). با توجه به نتایج پژوهش حاضر، ورمی‌کمپوست در سطوح ۵ و ۱۰ تن در هکتار، چه به‌تنهایی و چه در ترکیب با مایکوریزا، تأثیر چشم‌گیری در افزایش عملکرد اسانس داشت، در حالی که مایکوریزا بر بهبود صفات رشدی مانند ارتفاع و قطر گل‌آذین مؤثرتر بوده است. یافته‌های مذکور بیان‌گر آن است که ورمی‌کمپوست نه‌تنها بهبود رشد کمّی را به‌دنبال دارد، بلکه در ارتقاء کیفیت دارویی زنیان نیز نقش بسزایی ایفا می‌کند. همان گونه که بر اساس داده‌های حاصل از آنالیز ترکیبات اسانس، اثر برهمکنش ورمی‌کمپوست، میکوریزا و ازتوباکتر بیشترین تاثیر را بر تولید ترکیبات داشتند.

وجود رابطه منفی بین درصد اسانس و عملکرد بیولوژیک نشان می‌دهد که برای افزایش درصد اسانس، احتمالاً باید از تیمارهای تنش‌زا استفاده شود. شاید یکی از دلایل کم‌اثربودن تیمارهای کودی در افزایش عملکرد اسانس گیاه زنیان نیز به همین موضوع مرتبط باشد. نبود اختلاف معنی‌دار میان تیمارهای مختلف در شکل‌های ۲ و ۳ نیز مؤید همین مسئله است. همبستگی منفی میان تیمول و ترکیبات پیش‌ساز آن، یعنی پارا-سیمن و گاما-ترپنین نشان می‌دهد که با افزایش تیمول از مقدار ترکیبات پیش‌ساز کاسته می‌شود.

نتیجه‌گیری

کاربرد ورمی‌کمپوست در مقادیر ۵ تا ۱۰ تن در هکتار، همراه با تلقیح قارچ *Funneliformis mosseae*، تأثیر قابل‌توجهی در ارتقاء عملکرد زیستی و افزایش عملکرد میوه گیاه زنیان (*Trachyspermum copticum*) نشان داد. با این حال، تیمارهای اعمال‌شده تأثیر معنی‌داری بر افزایش درصد اسانس و میزان ترکیبات اصلی آن نداشتند. بر این اساس، در شرایطی که هدف از تولید، افزایش کمّی گیاه و به‌ویژه توسعه شاخساره باشد، استفاده از ورمی‌کمپوست می‌تواند به عنوان یکی از تیمارهای مؤثر پیشنهاد شود. در مقابل، نتایج حاصل از ارزیابی صفات کیفی گیاه حاکی از آن است که به‌منظور بهبود کیفیت اسانس، از جمله افزایش درصد تیمول، بررسی تیمارهای تنش‌زا مانند شرایط محیطی محدودکننده یا محرک‌های فیزیولوژیک، ضروری به نظر می‌رسد.

تشکر و سپاسگزاری

در انجام این پژوهش، حمایت مالی خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نشده است.

تضاد منافع

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

منابع مورداستفاده

References

1. Abbaszadeh, B., Mavandi, P., Mirza, M., 2016. Dry matter and essential oil yield changes of *Lavandula officinalis* under cowmanure and vermicompost application. J. Med. Plants By-products 1, 97–104.
2. Adams, R., 2017. Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography-Mass Spectroscopy, 4th ed. Allured Publishing Corporation, Carol Stream, Illinois.
3. Ajimaddin, I., Vasundhara, M., Radhakrishna, D., Biradar, S., Rao, G., 2005. Integrated nutrient management studies in sweet basil (*Ocimum basilicum*). Indian Perfum. 49, 95–101.
4. Aslam, A., Nokhala, A., Peerzada, S., Ahmed, S., Khan, T., Siddiqui, M., 2020. Evaluation and comparison of *Trachyspermum ammi* seed extract for its anti-inflammatory effect. J. Pharm. Bioallied Sci. 12, 777. https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_243_19.
5. Bairwa, R., Rajawat, B., Sodha, R., 2012. *Trachyspermum ammi*. Pharmacogn. Rev. 6, 56. https://doi.org/10.4103/0973-7847.95871.
6. Banchio, E., Xie, X., Zhang, H., Paré, P.W., 2009. Soil bacteria elevate essential oil accumulation and emissions in sweet basil. J. Agric. Food Chem. 57, 653–657. https://doi.org/10.1021/jf8020305.
7. Benaffari, W., Boutasknit, A., Anli, M., Ait-El-Mokhtar, M., Ait-Rahou, Y., Ben-Laouane, R., Ben Ahmed, H., Mitsui, T., Baslam, M., Meddich, A., 2022. The native arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost-based organic amendments enhance soil fertility, growth performance, and the drought stress tolerance of quinoa. Plants 11, 393. https://doi.org/10.3390/plants11030393.
8. Dubey, S., Kashyap, P., 2015. *Trachyspermum ammi*: A review on its multidimensional uses in indian Folklore medicines. Res. J. Med. Plant 9, 368–374. https://doi.org/10.3923/rjmp.2015.368.374.
9. El-Sayed, A. A., El-Sherbeny, S. E., El-Sayed, S. A., El-Sayed, M. A., 2025. The changes in growth, yield, and biologically active compounds of essential oil in *Trachyspermum ammi* L. upon rhizobacteria and seaweed applications. Plant Soil Environ. 71(8), 379–388. https://pse.agriculturejournals.cz/pdfs/pse/2025/08/04.pdf
10. Karegar Hajiabadi, E., Abbaszadeh, B., Sefidkon, F., Khavazi, K., 2015. Comparing the effect of seed and transplants inoculation with biofertilizers on *Thymus pubescens* Bioss. Iran. J. Med. Aromat. Plants 31, 81–91. (In Persian with English abstract)
11. Latifi, M., Kheiry, A., Razavi, F., Sanikhani, M., 2024. Influence of vermicompost and nitrogen treatments on the enhancement of morphophysiological traits and essential oil composition of spearmint (*Mentha spicata* L.) for double harvesting seasons. J. Med. Plants By-Products 13, 1016–1025. https://doi.org/10.22034/jmpb.2024.363701.1613.
12. Loomis, W.D., Corteau, R., 1972. Essential oil biosynthesis. In: Runeckles, V.C., Fenwick, R.H. (Eds.), Recent Advances in Phytochemistry. Springer, New York, pp. 147–185.
13. Manandhar, S., Tuladhar, R., Prajapati, K., Singh, A., Varma, A., 2017. Effect of *Azotobacter chroococcum* and *Piriformospora indica* on *Oryza sativa* in presence of vermicompost. In: Varma, A., Prasad, R., Tuteja, N. (Eds.), Mycorrhiza - Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration. Springer International Publishing, Cham, pp. 339. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68867-1_18.
14. Manayi, A., Vazirian, M., Omidpanah, S., Hosseinkhani, F., Hasseli, A., 2014. Chemical composition and antibacterial activity of essential oil of *Trachyspermum ammi*. Planta Med. 80. https://doi.org/10.1055/s-0034-1394937.
15. Mavandi, P., Abbaszadeh, B., Emami Bistgani, Z., Barker, A. V., Hashemi, M., 2021. Biomass, nutrient concentration and the essential oil composition of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) grown with organic fertilizers. J. Plant Nutr. 44, 3061–3071. https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1936037.
16. Mhatre, U., Mishra, A., Narkar, V., Nikam, M., Pandey, V., Uppalwar, D.S., 2024. Seed of ajwain (*Trachyspermum Ammi*): Taxonomy, phytochemistry, pharmacology and medicinal uses. Int. J. Res. Publ. Rev. 5, 2074–2088. https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0424.0951.
17. Mohammadzadeh Toutounchi, P., 2020. Effect of vermicompost and manure on morphological traits, yield and essential oil content of basil (*Ocimum basilicum* L.). Bi-Quarterly J. Plant Prod. 10, 78–91. (In Persian with English abstract)
18. Naghdibadi, H., Lotfizad, M., Ghavami, N., Mehrafarin, A., Khavazi, K., 2013. Quantitative and qualitative yield response of valerian (*Valeriana officinalis* L.) to the biological and chemical fertilizers of phosphorus application. J. Med.

Plants. 46, 25–37. (In Persian with English abstract)
19. Norouzi Esfahani, R., Khaghani, S., Gomarian, M., Azizi, A., Mortazaeinezhad, F., 2023. The effect of using different levels of vermicompost on the growth and morphological and physiological characteristics of medicinal-ornamental plant of mullein (*Verbascum thapsus*) under drought stress conditions. J. Soil Plant Interact. 14. https://doi.org/10.47176/jspi.14.2.20891. (In Persian with English abstract)
20. Ouahmane, L., Hafidi, M., Plenchette, C., Kisa, M., Boumezzough, A., Thioulouse, J., Duponnois, R., 2006. Lavandula species as accompanying plants in Cupressus replanting strategies: Effect on plant growth, mycorrhizal soil infectivity and soil microbial catabolic diversity. Appl. Soil Ecol. 34, 190–199. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.02.002.
21. Sharma, M., Delta, A., Brar, N., Yadav, A., Dhanda, P., Baslam, M., Kaushik, P., 2022. *Rhizophagus irregularis* and *Azotobacter chroococcum* uphold eggplant production and quality under low fertilization. Int. J. Plant Biol. 13, 601–612. https://doi.org/10.3390/ijpb13040048.
22. Singh, A., Ahmad, A., 2017. Antioxidant activity of essential oil extracted by SC-CO_2 from seeds of *Trachyspermum ammi*. Medicines 4, 53. https://doi.org/10.3390/medicines 4030053.
23. Solouki, A., Mehrjerdi, M. Z., Aliniaeifard, S., Azimi, R. 2023. Postharvest light and temperature elicitors improve chemical composition and level of essential oils in basil (*Ocimum basilicum* L.) through boosting antioxidant machinery. Postharvest Biol. Technol. 199, 112279.24. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112279
24. Tasdighi, H., Salehi, A., Movahhedi Dehnavi, M., Behzadi, Y., 2015. Survey of yield, yield components and essential oil of *Matricaria chamomilla* L. With Application of vermicompost and different irrigation levels. J. Saudi Soc. Agric. Sci. 25, 61–78. (In Persian with English abstract)
25. Telci, İ., Kacar, O., Bayram, E., Arabacı, O., Demirtaş, İ., Yılmaz, G., Özcan, İ., Sönmez, Ç., Göksu, E., 2011. The effect of ecological conditions on yield and quality traits of selected peppermint (*Mentha piperita* L.) clones. Ind. Crops Prod. 34, 1193–1197. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.04.010.
26. Vahidi, A., Alizadeh, A., Bagizadeh, A., Ansari, H., 2018. Investigation of the effect of mycorrhiza, vermicompost, and chemical fertilizer on yield and lawsone content of the medicinal plant *Lawsonia inermis* under drought stress conditions. Iran. J. Irrig. Drain. 12(5), 1029–1040. (In Persian with English abstract)
27. Valinezhad, Z., Gholizadeh, A., Naeemi, M., Gholamalalipour Alamdari, E Zarei, M., 2019. Effects of vermicompost and mycorrhizal fungus on quantitative and qualitative traits of medicinal plant *Stevia rebaudiana* Bertoni. Iran. J. Med. Aromat. Plants 35, 485–500. (In Persian with English abstract)
28. Vinutha, T., 2005. Biochemical studies on *Ocimum* sp. University of Agricultural Sciences, Bangalore, India.
29. Weisany, W., Raei, Y., Pertot, I., 2015. Changes in the essential oil yield and composition of dill (*Anethum graveolens* L.) as response to arbuscular mycorrhiza colonization and cropping system. Ind. Crops Prod. 77, 295–306. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.003.
30. Weisany, W., Zehtab-Salmasi, S., Raei, Y., Sohrabi, Y., Ghassemi-Golezani, K., 2016. Can arbuscular mycorrhizal fungi improve competitive ability of dill+common bean intercrops against weeds? Eur. J. Agron. 75, 60–71. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.01.006.
31. Zolfaghari, M., Tavalodeh, S., Sedighi Dehkordi, F., Mahmoudi Soorastani, M., 2022. Evaluation of growth, yield, and essential oil of medicinal plant coriander (*Coriandrum sativum* L.) under treatments of mycorrhiza, vermicompost, and chemical fertilizer. J. Agric. Sci. Sustain. Prod. 32(1), 35–46. https://doi.org/10.22034/saps.2021.42112.2556. (In Persian with English abstract)