

Investigating the effect of using zeolite and Nano fertilizer on the performance and antioxidant properties of peppermint essential oil under different dehydration regimes

Elnaz Farajzadeh Memari Tabrizi*

Department of Agronomy, Male.C, Islamic Azad University, Malekan, Iran. farajzadeh_e@malekaniiau.ac.ir

«Research Article»

Received: May 18, 2025, and Accepted: September 22, 2025

Abstract

In this study, the effect of water deficit stress and the use of zeolite enriched with nano fertilizer on various characteristics of the medicinal plant peppermint, including essential oil percentage, essential oil yield, and antioxidant properties, was investigated. The treatments studied included irrigation levels (irrigation after 70, 100, 130, and 160 mm of evaporation from the pan) in the main plots and zeolite and nano fertilizer treatments in the subplots. Zeolites were treated with complete nano fertilizer before planting and after air drying, they were mixed with the soil of the experimental site to a depth of 30 cm at a rate of 400 kg/ha. The experiment was conducted in a split plot for two years. The results showed that moderate water deficit stress (irrigation after 100 mm of evaporation from the pan) significantly increased the percentage of essential oil, while severe water deficit (irrigation after 160 mm of evaporation) had a negative effect on essential oil yield. The highest percentage of essential oil (24.2%) was observed in the combined treatment of zeolite + nano fertilizer, which was 46% higher than the control. In addition, the application of zeolite and nano fertilizer, especially in combination, significantly increased the yield of essential oil. The highest yield of essential oil (22.25 ml/m²) was recorded in the treatment of irrigation after 100 mm of evaporation + zeolite + nano fertilizer, which was 26.6% higher than the control. Also, water deficit stress increased antioxidant compounds such as ascorbate peroxidase and glutathione peroxidase, especially in combination with zeolite and nano fertilizer treatments. The combination of zeolite and nano fertilizer under water stress conditions not only increased phenolic and flavonoid compounds, but also significantly improved the antioxidant properties of the essential oil. In particular, under severe water stress conditions, the combination of zeolite and nano fertilizer reduced the amount of malondialdehyde, which was a sign of reduced cell damage. Therefore, the use of zeolite and nano fertilizer along with appropriate irrigation management can effectively increase the production of essential oil and improve the antioxidant properties of peppermint, especially under water stress conditions.

Keywords: stress, medicinal plant, essential oil, nano, adsorbent.

* - Corresponding author's email: farajzadeh_e@malekaniiau.ac.ir

Cite this article: Farajzadeh Memari Tabrizi, E., 2025. Investigating the effect of using zeolite and Nano fertilizer on the performance and antioxidant properties of peppermint essential oil under different dehydration regimes. Journal of Soil Research, 39 (2), pp.221-.234.



بررسی تأثیر کاربرد زئولیت و کود نانو بر عملکرد و خصوصیات آنتی اکسیدانی اسانس نعناع فلفلی تحت رژیم های مختلف کم آبی

الناز فرج زاده معماری تبریزی^{*id}

گروه زراعت، واحد ملکان، دانشگاه آزاد اسلامی، ملکان، ایران. farajzadeh_e@malekaniau.ac.ir

«مقاله پژوهشی»

دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۸ و پذیرش: ۱۴۰۴/۶/۳۱

چکیده

در این تحقیق، تأثیر تنش کم آبی و استفاده از زئولیت غنی شده با کود نانو بر ویژگی‌های مختلف گیاه دارویی نعناع فلفلی، از جمله درصد اسانس، عملکرد اسانس، و خواص آنتی‌اکسیدانی بررسی شد. تیمارهای مورد مطالعه شامل سطوح آبیاری (آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک) که در کرت های اصلی و تیمار زئولیت و کود نانو بود که در کرت های فرعی قرار داده شد. زئولیت ها قبل از کاشت با کود نانو کامل تیمار شدند و پس از هوا خشک نمودن به مقدار ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار با خاک محل آزمایش تا عمق ۳۰ سانتی متر مخلوط شدند. آزمایش در دو سال به صورت اسپلیت پلات در دو سال اجرا شد. نتایج نشان داد که تنش کم آبی با شدت متوسط (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک) موجب افزایش معنی دار درصد اسانس شد، در حالی که کم آبی شدید (آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر) تأثیر منفی بر عملکرد اسانس داشت. بیشترین درصد اسانس (۲/۲۴ درصد) در تیمار ترکیبی زئولیت + کود نانو مشاهده شد که ۴۶ درصد بیشتر از شاهد بود. علاوه بر این، کاربرد زئولیت و کود نانو به ویژه به صورت توأم، عملکرد اسانس را به طور چشمگیری افزایش داد. بیشترین عملکرد اسانس (۲۵/۲۲ میلی لیتر در مترمربع) در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر + زئولیت + کود نانو ثبت شد که ۲۶/۶ درصد بیشتر از شاهد بود. همچنین، تنش کم آبی باعث افزایش ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون پراکسیداز شد، به ویژه در ترکیب با تیمارهای با زئولیت و کود نانو. ترکیب زئولیت و کود نانو در شرایط کم آبی نه تنها باعث افزایش ترکیبات فنلی و فلاونوئیدی شد، بلکه ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی اسانس را نیز به طور قابل توجهی بهبود بخشید. به ویژه، در شرایط کم آبی شدید، ترکیب زئولیت و کود نانو موجب کاهش میزان مالون دی آلدهید، که نشانه‌ای از کاهش آسیب‌های سلولی بود، گردید. لذا استفاده از زئولیت و کود نانو در کنار مدیریت مناسب آبیاری می‌تواند به طور مؤثری موجب افزایش تولید اسانس و بهبود ویژگی‌های آنتی‌اکسیدانی گیاه نعناع فلفلی، به ویژه در شرایط تنش کم آبی، گردد.

واژه های کلیدی: تنش، گیاه دارویی، اسانس، نانو، جاذب

*-آدرس ایمیل نویسنده مسئول: farajzadeh_e@malekaniau.ac.ir

استناد: فرج زاده معماری تبریزی ا.، ۱۴۰۴. بررسی تأثیر کاربرد زئولیت و کود نانو بر عملکرد و خصوصیات آنتی اکسیدانی اسانس نعناع فلفلی تحت رژیم های مختلف کم آبی. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش های خاک، (۲) ۳۹، ص ۲۲۱-۲۳۴.

مقدمه

کم آبی یکی از مشکلات جهانی است که هر ساله خسارت های زیادی را در کشاورزی باعث می شود و روز به روز بر شدت آن افزوده می شود. با این وجود روش هایی موثر برای مقابله با اثرهای کم آبی ارایه شده است. ژئولیت ها گروهی از آلومینوسیلیکات های بلوری طبیعی و سنتزی هستند که دارای ساختاری از تتراهدرال های TO_4 پیوسته (که T می تواند سیلیسیم، آلومینیوم یا عناصر دیگر باشد) هستند. هر هدرا از چهار اتم O که یک کاتیون را احاطه کرده اند، تشکیل شده است. شبکه های سه بعدی که شامل حفره ها و کانال ها هستند، به این مواد معدنی سطح وسیع و تخلخل زیادی می بخشد که باعث ظرفیت بالای تبادل یونی نیز می شود. در حال حاضر کشاورزی یکی از بخش های اصلی استفاده از ژئولیت های طبیعی است. این ترکیبات می توانند اثرات مثبتی بر خاک های زراعی داشته باشند (کلاک و همکاران، ۲۰۲۱). چندین مطالعه نشان داده اند که استفاده از ژئولیت در کشت محصولات مزایای مثبتی دارد (جاروسز و همکاران، ۲۰۲۱). ژئولیت می تواند برای بهبود خاک های آلوده به فلزات سنگین و همچنین به عنوان یک کود با با توانایی رهاسازی آهسته استفاده شود (پاپادوپولوس و همکاران، ۲۰۲۱). ژئولیت قدرت نفوذ ریشه ای را بهبود می بخشد و می تواند ساختار خاک را بهبود دهند این مسئله اجازه نفوذ بهتر آب و نگهداری آن را می دهد به طوری که توسط ناحلی و همکاران (نخلی و همکاران، ۲۰۱۷) به این مطلب اشاره نموده اند و اخیراً توسط چندین محقق دیگر نیز مورد تأکید قرار گرفته است (بلویسو و همکاران، ۲۰۲۲؛ کاسترونوو و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال پیاده سازی عملی ژئولیت در کشاورزی مستلزم درک عمیق از تعامل آن با خواص هیدروفیزیکی خاک، بافت خاک و مدیریت آبیاری است. اعمال روش های صرفه جویی در آب در زراعت آبی ضروری است زیرا بخش کشاورزی مقدار زیادی آب مصرف می کند (دفرايتور و همکاران، ۲۰۱۷؛ لولوی و همکاران، ۲۰۱۹). با این وجود بسته به نوع سیستم های کشاورزی و سطح نوآوری هایی که

در مدیریت آبیاری به کار برده می شود آب آبیاری می تواند کاهش یابد (لولوی و همکاران، ۲۰۱۹). آزادسازی آهسته آب آبیاری با کاربرد ژئولیت می تواند به عنوان یک رویکرد نوآورانه در زمان بندی آبیاری در نظر گرفته شود این روش شامل کاهش آب در طول آبیاری و یا دفعات آن است بدون اینکه به کاهش محصول منجر شود و در عین حال کارایی استفاده از آب را تا ۹۰ درصد در محصولات را افزایش می دهد (میراس آوالوس و همکاران، ۲۰۱۶). چندین محقق کاهش مصرف آب بین ۴۳ درصد تا ۶۵ درصد را تحت تأثیر کاربرد ژئولیت و افزایش تولید محصول و با کیفیت بالاتر را نشان داده اند (دولا و همکاران، ۲۰۱۹). بررسی ها نشان داده است که علاوه بر آب، ژئولیت ها می توانند مواد غذایی را نیز جذب نموده و به طور موثری در اختیار گیاهان قرار دهند (بلویسو و همکاران، ۲۰۲۲). صلاح ورزی و همکاران (۲۰۲۰) در گیاه فستوکا تأثیر کاربرد ژئولیت را در شرایط کم آبی بررسی نمودند. نتایج بررسی این محققین نشان داد که کاربرد ژئولیت به ویژه در سطح ۲۰ درصد ویژگی هایی مانند وزن خشک ریشه و اندام هوایی، سطح برگ، ارتفاع بوته و محتوای کاروتنویید را در شرایط کم آبی افزایش می دهد. کاربرد ژئولیت محتوای رطوبت نسبی را نیز در این گیاه به میزان ۲۱/۹ درصد افزایش داد. با این وجود محتوای کاروتنویید در فستوکا در شرایط ۲۵ درصد ظرفیت مزرعه ای به میزان ۱۵۷ درصد افزایش یافت در بررسی دیگری کاتالدو و همکاران (۲۰۲۳) مشاهده نمودند که کاربرد ژئولیت مقاومت به خشکی را در انگور افزایش می دهد بر اساس نتایج بررسی این محققین محتوای ترکیبات قندی و ترکیبات فنلیکی انگور در شرایط کم آبی با کاربرد ژئولیت به ترتیب به میزان ۱۸ و ۵۴ درصد افزایش یافت.

کودهای نانو بیولوژیکی به عنوان گزینه ای نویدبخش برای کشاورزی پایدار در نظر گرفته می شوند و علاوه بر اینکه به عنوان کودهای مغذی عمل می کنند مشابه کودهای سنتی هستند و خطرات زیست محیطی پایینی دارند این کودها به طور کامل یا جزئی از ترکیبات

نانوساختاری هستند که می‌توانند به گیاه منتقل شوند. این ترکیب هاجذب مؤثر یا رهاسازی آهسته مواد فعال را امکان‌پذیر می‌کنند (السادونی و همکاران، ۲۰۲۱؛ الرمادی و همکاران، ۲۰۲۳). هدف از کاربرد کودهای نانو افزایش دسترسی گیاه به مواد مغذی همراه با بهبود کارایی استفاده از آن‌هاست. این کودها همچنین به کاهش مقدار کود کمک می‌کنند که این امر به کاهش هزینه‌های کشت و حذف آلودگی محیط زیست به ویژه خاک و منابع آب زیرزمینی منجر می‌شود. در نانو تکنولوژی مواد دارای قطر فیزیکی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر در حداقل یک بعد هستند (شلابی و همکاران، ۲۰۲۲). خصوصیات قابل توجه نانو ذرات مانند نسبت سطح به حجم بالا و خواص بهبود یافته اپتو الکترونیکی و فیزیکوشیمیایی به عنوان راهی برای تقویت رشد و تولید گیاهان بسیار مفید هستند (پربانکا و همکاران، ۲۰۲۲). نانو ذرات یا از اجزای گیاهی مختلف به روش‌های شیمیایی، فیزیکی، مکانیکی یا بیولوژیکی با استفاده از نانو تکنولوژی جمع‌آوری می‌شوند یا نسخه‌های سنتزی یا تغییر یافته از مواد اولیه مورد استفاده به عنوان کودهای معدنی هستند. به دلیل ویژگی‌های خاصشان نانوذرات^۱ ممکن است تأثیر متفاوتی بر فرایندهای متابولیکی گیاه نسبت به مواد سنتی داشته باشند. این ترکیبات ممکن است بتوانند مواد مغذی طبیعی غیر متحرک مانند فسفر را در ریزوسفر متحرک کنند و بیشتر در دسترس گیاهان قرار دهند (السادونی و همکاران، ۲۰۲۱). نسبت به کودهای معدنی، کودهای نانو بسیار مؤثر تر عمل می‌کنند و می‌توانند با افزایش پارامترهای رشد مانند ارتفاع گیاه، تعداد برگ‌ها، مساحت برگ، تولید ماده خشک و رنگدانه‌های فتوسنتزی، به بهبود عملکرد کمک کنند (زائو و همکاران، ۲۰۲۳). نانوذرات ممکن است برای امنیت غذایی حیاتی باشند و به عنوان اجزای بنیادی برای رشد عملکرد کشاورزی در نظر گرفته شوند زمانی که این کودهای نانو NPK^۱ برای تأمین مواد مغذی مورد نیاز گیاهان استفاده

می‌شوند رشد و عملکرد گیاهان به طور مؤثری بهبود می‌یابد (نوفال و همکاران، ۲۰۲۴).

با استفاده از اسپری برگ نانو ریزمغذی‌ها می‌توانند به طور مؤثری استفاده شوند. تحقیقات نشان داده است که عملکرد اقتصادی و تولید بیوماس انواع محصولات مختلف با نانو ریزمغذی‌ها افزایش می‌یابد (جانمحمادی و صباغ نیا، ۲۰۲۳؛ محمد و الفلاحی، ۲۰۲۳). اسپری‌های ترکیبی نانو با نانوذرات ریزمغذی‌هایی مانند روی، آهن، مس، منگنز، بور، مولیبدن، منیزیم، گوگرد و روی پایدارتر بوده و برای گیاهان کارایی بهتری دارند. سنتز کلروفیل و برخی کربوهیدرات‌ها، همچنین تبدیل نشاسته به قندها به نانو روی وابسته است. حضور آن در بافت گیاهی همچنین به گیاهان کمک می‌کند تا در برابر دماهای سرد مقاومت کنند. از سوی دیگر نانو آهن برای حفظ ساختار و عملکرد کلروپلاست ضروری است و در تولید کلروفیل نقش دارد (سینگ و همکاران، ۲۰۲۳). تحت استرس خشکی اسپری نانو آهن بر روی گیاهان گلرنگ بیوماس، تعداد گل تولید شده در هر گیاه و سایر اجزای تولید بذر را افزایش داد (قیاسی و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این محمد و الفلاحی (۲۰۲۳) دریافتند که برای تمام شاخص‌های رشد رویشی از جمله ارتفاع گیاه، مساحت برگ، وزن خشک و کلروفیل اسپری کود نانو NPK و نانو ریزمغذی‌ها بر روی ذرت بسیار مؤثر بود. دارمانینگتیاس و همکاران (۲۰۲۳) در برنج مشاهده نمودند که کاربرد نانو کود آهن میزان آسیب به غشای سلول‌های برنج را تحت شرایط کم آبی به میزان ۱۷ درصد کاهش می‌دهد این محققین افزایش فعالیت‌های آنتی اکسیدانی را از مهمترین دلایل این بهبود عنوان نمودند. در بررسی دیگری مباشر و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر کاربرد کود نانو را بر رشد و خصوصیات بیوشیمیایی گوجه فرنگی در شرایط خشکی بررسی نمودند نتایج بررسی این محققین نشان داد که کاربرد این کود طول بوته، وزن خشک اندام هوایی، تعداد برگ، محتوای کلروفیل برگ، محتوای کاروتنویید و محتوای ترکیبات فنولیکی را بهبود بخشید.

¹ NPK (NPK-NPs)

مواد و روش ها

این آزمایش در دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ در مزرعه دانشکده کشاورزی شهرستان ملکان استان آذربایجان شرقی اجرا شد. محل مورد آزمایش در پنج کیلومتری شمال غربی شهر تبریز در ارتفاع ۱۴۰۲ متری از سطح دریای آزاد قرار دارد. این منطقه از نظر تقسیمات آب و هوایی کشور دارای رژیم دمایی فریک با متوسط دمای سالیانه خاک بین ۵ الی ۱۵ درجه سانتیگراد و رژیم رطوبتی زیریک (نیمه خشک) و خاک محل آزمایش دارای بافت سیلتی-لوم بود. نمونه برداری از خاک جهت تجزیه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک انجام شد نتایج تجزیه خاک در جدول یک آمده است.

همچنین کاربرد کود نانو محتوای رطوبت نسبی برگ، ترکیبات قندی محلول برگ و محتوای فلاونوئید برگ را افزایش داد. با توجه به گفته های فوق هدف از این مطالعه بررسی تأثیر کاربرد ژئولیت و کود نانو بر عملکرد و خصوصیات آنتی اکسیدانی اسانس نعناع فلفلی تحت رژیم های مختلف کم آبی بود تا تأثیر ژئولیت بر کارایی مصرف کود های نانو که از تکنولوژی های مدرن به شمار می رود بررسی شود. لازم به ذکر است که ژئولیت با جذب کود ها این ترکیبات را در طول دوره رشد در اختیار گیاه قرار می دهد. به این دلیل کاربرد توام ژئولیت و کود نانو بررسی شد.

جدول ۱- تجزیه خاک محل مورد بررسی

Clay رس	Silt سیلت	Sand شن	SP (%)	OC (%) کربن آلی	CCE (%)	EC (dS.m ⁻¹)	T.N.V (%)	N (%)	P (mg kg ⁻¹)	K (mg kg ⁻¹)
			ظرفیت اشباع خاک		درصد کربنات کلسیم	هدایت الکتریکی	درصد مواد خنثی شونده	نیتروژن	فسفر	پتاسیم
41	33	36	52	1.02	2.11	0.97	49	0.02	10.3	166

سطوح آبیاری: آبیاری پس از ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک. اعمال تیمار های کم آبی پس از استقرار کامل بوته های نعناع فلفلی و سه هفته پس از کاشت اعمال شد بر اساس دبی ورودی در هر دور آبیاری برای هر کرت ۲ متر مکعب در اختیار گیاه قرار داده شد که قدرت نفوذ تا عمق ۴۵ سانتی متری خاک را داشت. ۱۳ دور آبیاری برای تیمار آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک، ۱۰ دور آبیاری برای تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک، ۸ دور آبیاری برای تیمار آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک و ۵ دور آبیاری برای تیمار آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک انجام شد. تشتک تبخیر در وسط مزرعه تعبیه گردید تا منعکس کننده نیاز آبی مزرعه باشد.

تیمار ژئولیت و کود نانو: شاهد، کاربرد ژئولیت، کاربرد کود نانو و کاربرد ژئولیت و کود نانو. ژئولیت ها قبل از کاشت با کود نانو کامل تیمار شدند و پس از هوا خشک نمودن به مقدار ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار با خاک

بذرهای نعناع فلفلی رقم صبا از مرکز تحقیقات کشاورزی آذرشهر تهیه شد. کاشت در سال اول در اواسط اردیبهشت ماه انجام شد به منظور انجام طرح پس از شخم، دیسک و مسطح کردن خاک در اواخر اسفند ماه اقدام به کرت بندی زمین شد. اندازه هر کرت آزمایشی ۶ متر مربع و شامل پانزده خط کاشت بود. فاصله بین ردیف ها ۲۰ سانتی متر در نظر گرفته شد و فاصله بوته ها روی ردیف از یکدیگر ده سانتی متر در نظر گرفته شد پس از کاشت بلافاصله آبیاری انجام شد لازم به ذکر است که در این تحقیق از مواد شیمیایی جهت کنترل علف های هرز و آفات استفاده نشد. هر سال در شروع فصل رشد جدید برای سله شکنی از کج بیل و چهار شاخ فلزی با عمق کم استفاده شد تا جوانه ها با سهولت بیشتری از خاک بیرون آمده و رشد مطلوبی داشته باشند اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت در اواسط اردیبهشت ماه انجام شد. آبیاری دوم یک هفته بعد انجام شد در این بررسی تیمارهای مورد مطالعه به قرار زیر بود.

محل آزمایش تا عمق ۳۰ سانتی متر مخلوط شدند. زئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت تهیه شده از معادن میانه بود. کود نانو مورد استفاده کود نانو مایع ده ایکس شوک آمریکا بود که حاوی عناصر میکرو و ماکرو و اسید هیومیک و فولویک بود. در پایان فصل زراعی نمونه خاک از عمق صفر تا سی سانتیمتری ریزوسفر گیاه یعنی در اوایل خردادماه دو سال مورد مطالعه در مزارع که سالها به کشت یونجه اختصاص داشتند و سابقه هیچگونه مصرف کود را نداشتند برداشت شد. بر اساس تجزیه خاک، خاک محل مورد مطالعه قلیایی بوده و فاقد هر گونه شوری قابل ملاحظه است. نمونه های برگي در اوایل مهر ماه از برگ های سبز نمونه گیری شد. جهت اندازه گیری مقادیر کلروفیل کل از روش آرنون استفاده شد (بانوی بختیاری و همکاران، ۱۳۹۵). نمونه برداری و برداشت در هر دو سال از اوایل مرداد ماه انجام و تا اواسط شهریور ماه ادامه داشت. جهت تعیین فعالیت آنتی اکسیدانی کل گلبزرگ نعنای فلفلی از روش اندازه گیری کاهش ظرفیت رادیکالی و با کمک ۲،۲ دی فنیل ۱-پیکریل هیدرازیل (DPPH) استفاده گردید (صادقی و کامکار، ۱۳۹۷). اسانس نعنای فلفلی از چهل گرم بخش های هوایی خشک نعنای فلفلی استخراج شد که با ۴۰۰ میلی لیتر آب مخلوط و به مدت سه ساعت با استفاده از دستگاه کلونجر^۲ تقطیر شد پس از استخراج اسانس نمونه ها با افزودن سولفات سدیم خشک شدند و در دمای چهار درجه سانتی گراد برای آنالیز شیمیایی نگهداری شدند (حجتی و برزگر، ۲۰۱۷). بازده اسانس نعنای فلفلی بر اساس معادله زیر محاسبه شد:

درصد اسانس = (اسانس استخراج شده توسط تقطیر با

آب / ۴۰ گرم اندام هوایی نعنای فلفلی) × ۱۰۰

برای تعیین غلظت مالون دی الدیئید و محتوای پرولین با استفاده از روش اسپکتروفتومتری (امنان و همکاران، ۲۰۲۱) اندازه گیری سوپراکسید دیسموتاز با توجه به دیندسا و همکاران (۱۹۸۱) اندازه گیری آسکوربات پراکسیداز با کمک روش ارابه شده توسط چن و

همکاران (۱۹۹۲) فعالیت گلاکسول پراکسیداز توسط روش ارابه شده توسط مااهلی و چانس (۱۹۵۴) اندازه گیری ترکیبات فنولیکی توسط روش فولین-سیوکالتنو و اندازه گیری فلاونوئید ها با استفاده از روش کلریمتریک اندازه گیری شد (فهمیده و همکاران، ۲۰۱۹). آزمون مهار رادیکال آزاد یکی از مهمترین آزمون ها جهت سنجش فعالیت عصاره گیاهی می باشد. از این روش برای تعیین خاصیت آنتی اکسیدانی اسانس استفاده شد. از روش DPPH به این منظور استفاده شد (فهمیده و همکاران، ۲۰۱۹).

نمونه برداری از چهار خط میانی انجام شد. اندازه گیری شاخص ها و صفات در مرحله قبل از گلدهی انجام شد. تجزیه واریانس مرکب صفات با استفاده از نرم افزار SPSS انجام شد. از آزمون دانکن در سطح پنج درصد برای مقایسه میانگین داده ها استفاده شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس صفات (جدول ۲) اثر اصلی تنش کم آبی و تیمار زئولیت غنی شده با کود های نانو اثر معنی داری بر درصد اسانس نعنای فلفلی داشت (جدول ۳). مطالعه مقایسه میانگین های درصد اسانس تحت تاثیر سطوح آبیاری نشان داد که کم آبی افزایش معنی داری را در درصد اسانس باعث شد بین دو تیمار آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک و آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک از نظر درصد اسانس اختلاف معنی داری وجود نداشت ولی در آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک درصد اسانس بیشتری در مقایسه با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک به دست آمد. در آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک درصد اسانس در مقایسه با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک به میزان ۱۷ درصد بیشتر بود با این وجود تشدید کم آبی نه تنها تاثیر مثبتی بر درصد اسانس گیاه نعنای فلفلی نداشت بلکه به شدت از تولید اسانس گیاه دارویی نعنای فلفلی کاست (جدول ۳). نتایج بررسی حاضر نشان می دهد

که کم آبی متوسط (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشک) بر درصد اسانس نعنای فلفلی می افزاید چرا که مطالعات نشان داده است که افزایش فعالیت مسیر تولید ترکیبات ثانوی یکی از مکانیسم های مقابله با کم آبی است چرا که ترکیباتی که توسط مسیرهای تولید ترکیب های ثانویه تولید می شوند در مقاومت به خشکی نقش دارند (موتوسامی و لی، ۲۰۲۴). با این وجود مطالعات نشان

داده است که کم آبی شدید حتی مسیرهای تولید ترکیب های ثانویه را مختل می کند و از این طریق باعث کاهش تولید ترکیب های ثانویه می شود (راما کریشنا و راواشینکار، ۲۰۱۱).

جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در نعنای فلفلی

s.o.v منابع تغییر	Df درجه آزادی	Essential oil % درصد اسانس	Essential oil yield عملکرد اسانس	Total antioxidant properties خصوصیت آنتی اکسیدانی	APX اسکوربات پراکسیداز	GPX گلوتاتیون پراکسیداز	SOD سوپر اکسید دیسموتاز
Year سال	1	0.001	5.8	1	28.6*	0.16	19.35*
Rep (year) تکرار در سال	4	18.2	8.38*	0.76	4.6	5.2	9*
Irrigation regimes رژیم آبیاری	3	300.11**	236.88**	153.74**	600.21**	869.94	587.44**
Year* Irrigation regimes سال*رژیم آبیاری	3	3.06	6.94*	0.96	7.57	23.62	10.81*
Main error خطای اصلی	12	11.56	1.9	1.74	4.38	4.37	2.21
Nano-zeolite نانو-ژئولیت	3	206.96**	155.77**	17.81**	18.63	16.47	20.83
Year*Nano-zeolite سال* نانو ژئولیت	3	4.36	3.08	4.43	8.81	3.4	6.76
Irrigation regimes*Nano-Zeolite رژیم آبیاری*نانو ژئولیت	9	18.38	17.9*	11.07**	19.25*	32.88	22.34
Year*irrigation regimes*Nano zeolite سال*رژیم آبیاری* نانو ژئولیت	9	1.97	7.18	2.41	6.93	4.79	17.07
Error خطا	48	9.37	8.54	1.60	8.66	8.88	12.81
c.v % ضریب تغییرات		16.4	16.14	6.53	17.38	16.78	21.19

**و* به ترتیب نشان دهنده معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد هستند.

ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی در نعنای فلفلی

s.o.v منابع تغییر	Df درجه آزادی	MDA مالون دی آلدهید	Proline محتوای پروزین	Total phenolic content کل محتوای فنولیکی	Total flavonoid content کل محتوای فلاونویدی	E.O antioxidant properties خصوصیات آنتی اکسیدانی
Year سال	1	10.27	1.08	5.85	5.8	0.03
Rep (year) تکرار در سال	4	4.39	6.75	8.13	14.76	9.62
Irrigation regimes رژیم آبیاری	3	333.42**	638.96**	612.21**	844.36**	852.64**
Year* Irrigation regimes سال*رژیم آبیاری	3	1	12.91	8.41	7.41	3.84
Main error خطای اصلی	12	11.63	5.9	3.49	6.47	4.35
Nano-zeolite نانو-زئولیت	3	46.14*	25.79*	122.68**	38*	29.6*
Year*Nano-zeolite سال* نانو زئولیت	3	5.89	3.05	12.26	18.5	4.26
Irrigation regimes*Nano- Zeolite رژیم آبیاری*نانو زئولیت	9	25.17**	25.05**	18.89	23.2*	14.89
Year*irrigation regimes*Nano zeolite سال*رژیم آبیاری* نانو زئولیت	9	4.69	9.26	14.39	13.17	13.76
Error خطا	48	12.09	8.5	10.33	10.77	7.7
c.v % ضریب تغییرات		18.2	17.02	17.21	17.04	6.3

**و* به ترتیب نشان‌دهنده معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد هستند.

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های صفات مورد بررسی تحت تاثیر سطوح آبیاری

Irrigation regimes (mm evaporation from evaporation pan) رژیم آبیاری (میلی متر تبخیر از تشتک)	E.O % درصد اسانس	SOD سوپراکسید دیسموتاز	Total phenolic content (µg of GA mg-1 of dry extract) کل محتوای ترکیبات فنولیکی	E.O antioxidant properties (µ/ml) خصوصیت آنتی اکسیدانی اسانس
70	22.02 a	22.14 a	13.48 d	38.05 d
100	20.09 ab	20.05 b	15.26 c	40.01 c
130	18.80 b	13.22 c	22.38 b	47.52 b
160	13.75 c	12.15 d	23.59 a	50.55 a

های درگیر در تولید اسانس دخالت دارند (ویرداک، ۲۰۱۳). محققین گزارش نمودند که در گیاه دارویی کاربرد کودهای میکرو میزان تولید اسانس را افزایش می دهد (کومار و همکاران، ۲۰۲۲). از سوی دیگر با توجه به این حقایق حفظ عناصر غذایی به مدت طولانی تر در ناحیه توسعه ریشه ها نیز می تواند مهم باشد چرا که مطالعات نشان داده است که زئولیت ها با جذب عناصر غذایی در ساختار خود از شستشوی عناصر غذایی جلوگیری نموده و مواد غذایی را به مدت بیشتری در اختیار گیاه قرار می دهند (فریرا و

در این مطالعه کاربرد زئولیت و کود نانو به ویژه به صورت توأم درصد اسانس گیاه دارویی نعنای فلفلی را افزایش می دهد. بیشترین درصد اسانس نعنای فلفلی با ۲۴/۲ درصد در تیمار کاربرد کود زئولیت+ کود نانو به دست آمد که در مقایسه با شاهد به میزان ۴۶ درصد بیشتر بود. کاربرد انفرادی زئولیت و کود نانو نیز درصد اسانس را با شدت کمتری افزایش داد (جدول ۴). گیاهان برای تولید اسانس به تعدادی از عناصر غذایی نیاز دارند که از آن جمله می توان به آهن و روی اشاره داشت که در ساختار آنزیم

همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به این مطلب کاربرد توأم ژئولیت و کود نانو می تواند تأثیر کودهای نانو را به طور موثری افزایش دهد

جدول ۴- مقایسه میانگین های صفات مورد بررسی تحت تأثیر نانو-ژئولیت

Nano-zeolite نانو ژئولیت	E.O % درصد اسانس	Total phenolic content (µg of GA mg-1 of dry extract) کل محتوای ترکیبات فنولیکی	E.O antioxidant properties (µg/ml) خصوصیت آنتی اکسیدانی اسانس
Control شاهد	15.34 c	16.66 c	42.41 b
Zeolite ژئولیت	18.81 b	17.18 c	44.38 a
Nano نانو	18.05 b	19.24 b	44.42 a
nano-zeolite نانو ژئولیت	22.46 a	21.63 a	44.92 a

می توان بدون کاهش معنی داری در عملکرد اسانس با آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک کشت نمود ولی مطلوبتر آن خواهد بود که بوته های نعناع فلفلی با سطح آبیاری آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک کشت شود و به ویژه همراه با کاربرد کود ژئولیت+کود نانو.

امامی و همکاران(۲۰۲۴) نیز طی مطالعه ای نشان داد که کم آبی متوسط باعث افزایش عملکرد اسانس ۲۰ گیاه دارویی می شود ولی تشدید کم آبی باعث کاهش عملکرد اسانس می شود. در بررسی حاضر در آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک تیمارهای کاربرد ژئولیت، کاربرد کود نانو و کاربرد کود ژئولیت+کود نانو تأثیری بر عملکرد اسانس نداشت ولی در سطوح کم آبی کاربرد ژئولیت و کاربرد کود نانو و به ویژه به صورت توأم تأثیر مثبتی بر عملکرد اسانس گیاه دارویی نعناع فلفلی می گذارد.

محمد و گاتس(۲۰۱۶) تأثیر کاربرد ژئولیت و کود شیمیایی را در گیاه دارویی *Viola odorata* L مطالعه نموده و مشاهده نمودند که کاربرد توأم دو نهاده باعث افزایش عملکرد اسانس این گیاه دارویی می شود.

در بررسی حاضر عملکرد اسانس گیاه دارویی نعناع فلفلی به طور معنی داری تحت تأثیر بر هم کنش سطوح آبیاری و ژئولیت و کود نانو قرار گرفت(جدول۲). با توجه به نتایج حاصل از این بررسی بیشترین عملکرد اسانس نعناع فلفلی با ۲۵/۲۲ میلی لیتر در متر مربع در تیمار آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد کود ژئولیت+کود نانو به دست آمد که در مقایسه با شاهد به میزان ۲۶/۶ درصد بیشتر بود(جدول ۵). این نتایج نشان می دهد که کم آبی ضعیف (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک) به همراه کاربرد کود ژئولیت غنی شده با کودهای نانو مطلوبترین تیمار جهت افزایش عملکرد اسانس نعناع فلفلی به شمار می رود. در کم آبی شدیدتر نتایج متفاوتی به دست آمد. در تمامی سطوح کود نانو و ژئولیت از نظر عملکرد اسانس بین آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک و آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک وجود نداشت ولی در آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک عملکرد اسانس کمتری در مقایسه با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک به دست آمد لذا با توجه به نتایج تشدید کم آبی و ایجاد کم آبی شدید عملکرد اسانس نعناع فلفلی را کاهش می دهد با این وجود نعناع فلفلی را

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های صفات مورد بررسی تحت تاثیر سطوح آبیاری و تیمار زئولیت و نانو

Irrigation regimes (mm evaporation from evaporation pan)	Nano-zeolite	E.O yield (gr/ha)	Total antioxidant properties	APX ($\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ protein)	GPX ($\mu\text{mol}/\text{min}/\text{mg}$ protein)	Total flavonoid content (μg of RU mg ⁻¹ of dry extract)	MDA ($\mu\text{mol}/\text{g}$ - 1FW)	Prolin ($\mu\text{mol}/\text{g}$ fr wt)
رژیم آبیاری (میلی متر تبخیر از تشتک)	نانو زئولیت	عملکرد اسانس	خصوصیت آنتی اکسیدانی	آسکوربات پراکسیداز	گلوتاتیون پراکسیداز	کل محتوای ترکیبات فلاونویدی	مالون دی آلدید	محتوای پرولین
70	Control	19.90 bc	16.20 f	13.15 e	12.80 e	12.08 g	12.43 g	12.28 c
70	شاهد	18.02 c	15.95 f	13.02 e	12.92 e	12.30 fg	15.47 e-g	12.78 c
70	Zeolite	19.37 bc	16.87 ef	10.43 e	10.50 e	13.80 fg	17.80 d-f	10.52 c
70	زئولیت	22.93 ab	17.47 ef	12.23 e	12.55 e	14.57 fg	19.87 c-e	13.13 c
100	Control	18.55 c	17.27 ef	16.62 d	16.68 d	14.62 fg	14.97 fg	18.33 b
100	شاهد	19.00 c	16.92 ef	12.52 e	12.62 e	14.00 fg	14.77 fg	12.58 c
100	Zeolite	19.38 bc	18.37 de	12.93 e	12.62 e	15.70 fg	16.08 e-g	12.50 c
100	زئولیت	25.22 a	19.10 cd	10.50 e	10.45 e	16.48 ef	19.93 c-e	10.50 c
130	Nano	14.20 d	19.90 cd	21.37 a-c	21.92 bc	19.65 de	21.28 b-d	19.55 ab
130	نانو	20.03 bc	20.72 c	22.12 ab	21.52 bc	25.25 a-c	18.17 d-f	22.28 a
130	nano-zeolite	18.60 c	20.70 c	19.32 b-d	21.25 bc	22.10 cd	19.18 d-f	20.32 ab
130	نانو زئولیت	19.98 bc	24.78 a	18.27 cd	21.93 bc	28.20 a	18.58 d-f	17.45 b
160	Control	10.48 e	22.27 b	21.18 a-c	20.33 c	24.72 a-c	24.20 a-c	23.20 a
160	شاهد	13.18 de	20.45 c	21.02 a-c	28.40 a	24.28 a-c	24.48 ab	22.67 a
160	Zeolite	12.08 de	23.33 ab	23.03 a	23.55 bc	26.60 ab	22.40 a-d	23.27 a
160	زئولیت	18.83 c	20.28 c	23.37 a	24.30 b	23.92 bc	26.18 a	22.83 a

زئولیت و کود نانو وجود نداشت ولی با تشدید کم آبی این تیمارها اختلاف خود را بر جای گذاشتند در کل محتوای آنتی اکسیدانی و آسکوربات پراکسیداز در صورت کاربرد توام زئولیت و کود نانو بیشترین مقدار به دست آمد در حالی که در فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز در تیمار زئولیت به تنهایی بیشترین مقدار حاصل گردید در کل نتایج بررسی حاضر نشان می‌دهد که تشدید کم آبی و کاربرد کود نانو و زئولیت باعث افزایش خاصیت آنتی اکسیدانی و میزان فعالیت آنتی اکسیدانت ها می‌شود (جدول ۴). بررسی‌ها نشان داده که کم آبی میزان تولید آنتی اکسیدانت‌ها را افزایش می‌دهد تا توانایی گیاه در برابر تنش‌های محیطی افزایش یابد (موتوسامی و لی، ۲۰۲۴). از سوی دیگر علاوه بر تنش‌های محیطی تعدادی از عوامل مانند کاربرد کودها نیز میزان تولید آنتی اکسیدانت‌ها را در گیاهان افزایش داده و باعث تحریک فعالیت آنتی اکسیدان‌ها و بهبود شرایط درونی گیاه در شرایط تنش و عدم تنش می‌شود (موتوسامی و لی، ۲۰۲۴). چنانچه در بررسی حاضر نیز مشاهده شد که

در بررسی حاضر کل محتوای آنتی اکسیدانی، آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون پراکسیداز تحت تاثیر برهم کنش سطوح آبیاری و زئولیت همراه با کود نانو قرار گرفت با این وجود در میزان فعالیت سوپراکسید دسیموتاز تنها اثر اصلی سطوح آبیاری معنی‌دار بود با بررسی کلی محتوای آنتی اکسیدانی مشاهده شد که بیشترین میزان در تیمار آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد کود زئولیت + کود نانو به دست آمد، با این وجود بیشترین میزان آسکوربات پراکسیداز در تیمارهای آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد کود نانو و آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد کود زئولیت + کود نانو و بهترین فعالیت گلوتاتیون پراکسیداز در آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشتک + کاربرد زئولیت حاصل شد.

بر اساس نتایج در سطوح پایین کم آبی (آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشتک و آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشتک) اختلافی بین سطوح تیماری

کم آبی و کاربرد کودها بر میزان تولید آنتی اکسیدانت ها می افزاید اما ژئولیت نیز با بهبود نگهداری مواد غذایی در ناحیه توسعه ریشه نتیجه ای مشابه با کاربرد کودها دارد (فریرا و همکاران، ۲۰۲۲). در بررسی حاضر میزان فعالیت سوپراکسید دسیموتاز نیز تحت تأثیر کم آبی افزایش یافت (جدول ۳) ولی کاربرد ژئولیت و نانو تأثیر معنی داری بر میزان فعالیت سوپراکسید دسیموتاز نداشت (جدول ۲). در بررسی حاضر نتایج مشابهی از نظر محتوای پروتئین در مقایسه با سایر آنتی اکسیدانت ها به دست آمد در این بررسی کم آبی در تمامی سطوح تیماری کود نانو و ژئولیت بر محتوای پرولین افزودن از این نظر در تمامی سطوح تیماری کود نانو و ژئولیت تیمار آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشک افزایش مشابهی را در محتوای پرولین باعث شد ولی سطوح پایین کم آبی در سطوح مختلف تیماری کود نانو و ژئولیت اختلاف نشان دادند به طوری که در کاربرد ژئولیت با کاهش آب آبیاری از آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشک به آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشک افزایش بیشتری در محتوای پرولین در مقایسه با کاربرد کود ژئولیت+ کود نانو به دست آمد در حالی که در شاهد با کاهش آب آبیاری از آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشک به آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشک کاهش کمتری در محتوای پرولین در مقایسه با کاربرد ژئولیت، کاربرد کود نانو و کاربرد کود ژئولیت+ کود نانو به دست آمد (جدول ۵). این نتایج می توان بیانگر این مطلب باشد که در کم آبی های پایین (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر از تشک) اعمال تیمارهای کودی و ژئولیت می تواند نیاز به تولید آنتی اکسیدانت ها جهت مقابله با کم آبی را کاهش دهد. نتایج مشابهی در سایر بررسی ها نیز گزارش شده است (فریرا و همکاران، ۲۰۲۲). نتایج حاصل از مقایسه میانگین های محتوای مالون دی آلدئید تحت تأثیر بر هم کنش کم آبی در ترکیب های تیماری کودی و ژئولیت نیز نشان می دهد که کاربرد کود نانو و ژئولیت به ویژه به صورت توأم از میزان تولید مالون دی آلدئید به ویژه در شرایط کم آبی می

کاهد که نشان دهنده نقش محافظتی این ترکیب ها از تخریب سلولی و شرایط کم آبی است (جدول ۵). کودها از طریق افزایش پایداری غشاهای سلولی و اجزای سلول و تولید ترکیبات مقابله کننده با اکسیدانت ها، تولید مالون دی آلدئید را کاهش می دهد (کاسترونوو و همکاران، ۲۰۲۰). در بررسی حاضر کل محتوای ترکیبات فنلی در اثر کم آبی افزایش یافت. کم آبی شدید (آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشک محتوای ترکیبات فنلی را در برگ های نعناع فلفلی تا ۷۵ درصد افزایش داد (جدول ۳). ترکیبات فنلی از ترکیب های موثر در گیاه برای مقابله با شرایط نامساعد محیطی مانند کم آبی است (پارک و همکاران، ۲۰۲۳). از سوی دیگر نتایج بررسی حاضر نشان داد که کاربرد کود نانو و ترکیبی از کود نانو و ژئولیت محتوای ترکیبات فلفلی را تا ۱۵ و ۳۰/۱ درصد افزایش می دهد (جدول ۴) که این افزایش می تواند در مقاومت به خشکی در گیاه موثر باشد. در بررسی حاضر محتوای فلاونوئیدها نیز تحت تأثیر کم آبی و کاربرد کود نانو و ژئولیت افزایش یافت. به طوری که بیشترین کل محتوای فلاونوئیدی در تیمار آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشک + کاربرد کود ژئولیت+ کود نانو به دست آمد که در مقایسه با شاهد به میزان ۱۳۵ درصد افزایش داد که افزایش قابل ملاحظه ای به شمار می رود (جدول ۵). فلاونوئیدها به تنظیم فعالیت سلولی و مقابله با رادیکال های آزاد که باعث استرس اکسیداتیو می شوند کمک می کنند (پارک و همکاران، ۲۰۲۳). در بررسی حاضر خاصیت آنتی اکسیدانی اساسی نعناع فلفلی مورد بررسی قرار گرفت. کم آبی خاصیت آنتی اکسیدانت اسانس نعناع فلفلی را افزایش داد بیشترین خاصیت آنتی اکسیدانی در آبیاری پس از ۱۶۰ میلی متر تبخیر از تشک به دست آمد در این تیمار خاصیت آنتی اکسیدانی در مقابله با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر تبخیر از تشک به میزان ۳۲/۸ درصد بیشتر بود (جدول ۲). علاوه بر آن تمامی تیمارهای کاربرد ژئولیت، کاربرد کود نانو و کاربرد کود ژئولیت+ کود نانو افزایش معنی دار و مشابهی را در خاصیت آنتی اکسیدانی اسانس نعناع فلفلی باعث شده و این صفت را تا ۵/۸ درصد

افزایش داد (جدول ۳). فرهودی (۲۰۱۳) نیز در گیاه دارویی رزماری نشان داد که کاربرد کودها و کم آبی خاصیت آنتی اکسیدانی اسانس را افزایش می دهد.

نتیجه گیری کلی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر اصلی تنش کم آبی و تیمار ژئولیت نانو غنی شده به طور معنی داری بر بسیاری از صفات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نعنای فلفلی تأثیرگذار بود. مهم ترین آن ها درصد اسانس، عملکرد اسانس، ترکیبات فنولی، فلاونوئیدی، فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی، پرولین و MDA بودند. آبیاری پس از ۱۳۰ میلی متر تبخیر از تشتک بیشترین درصد اسانس را ایجاد کرد و در مقایسه با آبیاری پس از ۷۰ میلی متر، ۱۷ درصد افزایش در اسانس مشاهده شد با این حال شدت بالای تنش آبی موجب کاهش عملکرد کلی اسانس و افزایش آسیب اکسیداتیو شد. کم آبی متوسط (آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر) بهترین پاسخ را در بیشتر صفات داشت این سطح از تنش موجب فعال سازی مسیرهای تولید ترکیبات ثانویه شد که در دفاع گیاه نقش دارند به طور کلی اثر آبیاری و ژئولیت بر درصد اسانس به ترتیب با میانگین مربعات ۳۰۰/۱۱ و ۲۰۶/۹۶ در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. همچنین عملکرد اسانس نیز به طور معنی داری تحت تأثیر این دو عامل قرار گرفت (به ترتیب ۲۳۶/۸۸ و ۱۵۵/۷۷). این یافته ها بیانگر نقش هم افزایی تنش کنترل شده آبی و استفاده از ژئولیت نانو در ارتقاء کیفیت گیاه دارویی هستند. علاوه بر آن ترکیبات فنولی کل (۶۳۸/۹۶) و فلاونوئیدی (۶۱۲/۲۱)

نیز تحت تأثیر تیمارهای آبیاری به صورت معنی دار افزایش یافتند ژئولیت نانو نیز اثر تقویتی بر این ترکیبات داشت. همچنین فعالیت آنزیم های آنتی اکسیدانی نظیر APX (600.21) و SOD (587.44) به شکل محسوسی در تیمارهای کم آبی متوسط و در حضور نانو ژئولیت افزایش یافتند این آنزیم ها در حذف رادیکال های آزاد و کاهش استرس اکسیداتیو مؤثر بودند. در نهایت مقدار پرولین که به عنوان شاخصی از تنظیم اسمزی شناخته می شود در شرایط کم آبی با میانگین مربع ۳۳۳/۴۲ افزایش یافت. هم زمان MDA به عنوان نشانگر آسیب غشایی نیز در تنش شدید افزایش نشان داد که بیانگر افزایش آسیب سلولی بود. اما کاربرد ژئولیت نانو باعث کاهش MDA شد و نقش حفاظتی برای سلول ایفا کرد.

به طور خلاصه می توان نتیجه گرفت که استفاده از ژئولیت نانو غنی شده در کنار آبیاری پس از ۱۰۰ میلی متر تبخیر بهترین ترکیب برای حفظ کیفیت و کمیت ترکیبات دارویی نعنای فلفلی بوده و موجب بهبود تولید اسانس، افزایش ترکیبات آنتی اکسیدانی و کاهش آسیب های ناشی از تنش شد. این یافته ها می توانند به عنوان راهبردی مؤثر در مدیریت تنش آبی در گیاهان دارویی مورد استفاده قرار گیرند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حوزه معاونت پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی ملکان نهایت تشکر و قدردانی می گردد.

References

1. Belviso, C., Satriani, A., Lovelli, S., Comegna, A., Coppola, A., Dragonetti, G., Cavalcante, G. and Rivelli, A. R. 2022. Impact of zeolite from coal fly ash on soil hydrophysical properties and plant growth. *Agriculture*, 12(3): 356.
2. Bistgani, Z., Barker, A. and Hashemi, M. 2024. Physiology of medicinal and aromatic plants under drought stress. *The Crop Journal*, 12: 330-339.
3. Castronuovo, D., Comegna, A., Belviso, C., Satriani, A. and Lovelli, S. 2023. Zeolite and ascophyllum nodosum- based biostimulant effects on spinach gas exchange and growth. *Agriculture*, 13: 754.
4. de Fraiture, C., Wichelns, D., Rockstrom, J., Kemp-Benedict, E., Eriyagama, N., Gordon, L. J., Hanjra, M. A., Hoogeveen, J., Huber-Lee, A. and Karlberg, L. 2007. Looking ahead to 2050: scenarios of alternative investment approaches. In *Water for food, water for life: a comprehensive assessment of water management in agriculture*. Molden, David (Ed.) London, UK, 2007; Earthscan; Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), pp.91-145.
5. Doula, M. K., Elaiopoulos, K., Kouloubis, P. and Zorpas, A. A. 2018. In situ application of clinoptilolite to improve compost quality produced from pistachio bio-wastes. *Fresenius Environ. Bull.* 27(3): 1312-1318.
6. Doula, M. K., Zorpas, A. A., Inglezakis, V., Navvaro Pedreno, J. and Bilalis, D. J. 2019. Optimization of heavy polluted soil from olive mill waste through the implementation of zeolites. *J. Environ. Eng. Manage*, 18(2): 1297-1309.
7. El-Ramady, H., Abdalla, N., Sári, D., Ferroudj, A., Muthu, A., Prokisch, J., Fawzy, Z.F., Brevik, E.C. and Solberg, S.Ø. 2023. Nanofarming: Promising solutions for the future of the global agricultural industry. *Agronomy*, 13 (6): 1600.
8. El-Saadony, M.T., Almoshadak, A.S., Shafi, M.E., Albaqami, N.M., Saad, A.M., El-Tahan, A.M., Desoky, E-S.M., Elnahal, A.S., Almakas, A. and Abd El-Mageed, T.A. 2021. Vital roles of sustainable nano-fertilizers in improving plant quality and quantity-an updated review. *Saudi journal of biological sciences*, 28 (12): 7349-7359.
9. Farhoudi, R. 2013. Effect of drought stress on chemical constituents, photosynthesis and antioxidant properties of rosmarinus officinalis essential Oil. *Journal of Medicinal plants and By-Products*, 2(1): 17-22.
10. Ferreira, A.P., Almeida-Aguiar, C., Costa, S.P.G. and Neves, I.C. 2022. Essential Oils Encapsulated in Zeolite Structures as Delivery Systems (EODS): An Overview. *Molecules*, 27(23): 8525.
11. Ghiyasi, M., Rezaee Danesh, Y., Amirnia, R., Najafi, S., Mulet, J.M. and Porcel, R. 2023. Foliar Applications of ZnO and its nanoparticles increase safflower (*Carthamus tinctorius* L.) growth and yield under water stress. *Agronomy*, 13 (1): 192.
12. Guang-Cheng, S., Na, L., Zhan-Yu, Z., Shuang-En, Y. and Chang-ren, C. 2010. Growth, yield and water use efficiency response of greenhouse-grown hot pepper under Time-Space deficit irrigation. *Sci. Hortic*, 126(2): 172- 179.
13. Janmohammadi, M. and Sabaghnia, N. 2023. Effects of foliar spray of nano-micronutrient and growth regulators on safflower (*Carthamus tinctorius* L.) performance. *Plant Nano Biology*, 5:100045.
14. Jarosz, R., Szerement, J., Gondek, K., Mierzwa-Hersztek, M. 2022. The use of zeolites as an addition to fertilisers – A review. *Catena*, 213: 106125.
15. Khapte, P.S., Kumar, P., Burman, U. and Kumar, P. 2019. Deficit irrigation in tomato: Agronomical and physio- biochemical implications. *Sci. Hortic*, 248: 256-264.
16. Kumar, D., Punetha, A., Verma, P. S. and Padalia, R.C. 2022. Micronutrient based approach to increase yield and quality of essential oil in aromatic crops. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 26: 126-137.
17. Lovelli, S. 2019. Dryland farming and the agronomic management of crops in arid environments. *J. Agron*, 18: 49–54.

18. Mirás-Avalos, J. M., Pérez-Sarmiento, F., Alcobendas, R., Alarcón, J. J., Mounzer, O. and Nicolás, E. 2016. Using midday stem water potential for scheduling deficit irrigation in mid-late maturing peach trees under Mediterranean conditions. *Irrigation Sci*, 34: 161-173.
19. Mohamed, Y.F. and Ghatas, Y.A. 2016. Effect of mineral, biofertilizer (EM) and zeolite on growth, flowering, yield and composition of volatile oil of *Viola odorata* L. *Plants*, 7: 78-89.
20. Molyneux, P. 2004. The use of the stable free radical diphenylpicrylhydrazyl (DPPH) for estimating antioxidant activity. *Songklanakarin J. Sci. Technol*, 26(2): 211-219.
21. Muhammad, I., Mirza, H., El-Sappah Ahmed, H., Fawad, Z., Nawab, K., Ali, R., Mohammad, S., Shamshad, K., Manzar, M., Muhammad Jawad, A., Jia, D., Xianming, Z. and Xin, Z. 2023. Primary plant nutrients modulate the reactive oxygen species metabolism and mitigate the impact of cold stress in overseeded perennial ryegrass. *Frontiers in Plant Science*, 14: 113-123.
22. Muhammad, O. and Al-Falahi, M. 2023. Effect of spraying nano fertilizer npk and nano fertilizer microelements on the growth characteristics of maize plants (*Zea Mays* L.). In: IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. vol 1. IOP Publishing, p 012063.
23. Muthusamy, M. and SI, L. 2024. Abiotic stress-induced secondary metabolite production in Brassica: opportunities and challenges. *Front. Plant Sci*, 14: 1323085.
24. Nakhli, S.A.A., Delkash, M., Bakhshayesh, B.E. and Kazemian, H. 2017. Application of zeolites for sustainable agriculture: a review on water and nutrient retention. *Water Air Soil Poll*, 228: 464.
25. Nofal, E., Menesy, F., Elbably, S., Abd-El Rahman, M., El-nRamady, H. and Prokisch, J. 2024a. Response of *Kigelia africana* (Lam.) Benth Transplants to Nano-NPK and Nano-Chitosan under Salinity Stress. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64 (2): 661 – 672.
26. Nofal, E., Menesy, F., Elbably, S., Abd-ElRahman, M., El- Ramady, H. and Prokisch, J. 2024b. Nano-NPK and Nano-sulfur boost vegetative growth and chemical constituents of african mahogany (*Khaya senegalensis* L.) seedlings under saline soil conditions. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64 (2): 631-642.
27. Nurzyńska-Wierdak, R. 2013. Does mineral fertilization modify essential oil content and chemical composition in medicinal plants? *Acta Sci. Pol., Hortorum Cultus*, 12(5): 3-16.
28. Papadopoulos, A.V., Doula, M.K., Zorpas, A.A., Kosmidis, S., Assimakopoulou, A. and Kolovos, C. 2020. Pepper cultivation on a substrate consisting of soil, natural zeolite, and olive mill waste sludge: changes in soil properties. *Comptes Rendus. Chimie*, 23(11-12): 721-732.
29. Park, Y., Do Yeon, K., Song Yi, K., To Quyen, T., Sung-Chul, H., Jaeyoung, C., Jinyoung, S. and Sang Min, K. 2023. Identification of drought-responsive phenolic compounds and their biosynthetic regulation under drought stress in *Ligularia fischeri*. *Frontiers in Plant Scienc*, 12: 56-69.
30. Pereira, L.S., Oweis, T. and Zairi, A. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agr. Water Manage*, 57(3): 175-206.
31. Priyanka, T.S., Kerketta, A., Topno, S.E., Mohiddin, S.G. and Tripathi, P. 2022. Effect nano zeolite, nano micronutrients and biocapsules on plant growth, head yield and quality of broccoli (*Brassica oleracea* var Italica). *International Journal of Environment and Climate Change*, 12 (11): 58-65.
32. Ramakrishna, A. and Aswathanarayana Ravishankar, G. 2011. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant Signaling*, 6: 1720-1731.
33. Shalaby, T.A., Bayoumi, Y., Eid, Y., Elbasiouny, H., Elbehiry, F., Prokisch, J., El-Ramady, H. and Ling, W. 2022a. Can nanofertilizers mitigate multiple environmental stresses for higher crop productivity? *Sustainability*, 14 (6): 3480.

34. Shalaby, T.A., El-Bialy, S.M., El-Mahrouk, M.E., Omara, A.E.D., El-Beltagi, H.S. and El-Ramady, H. 2022b. Acclimatization of in vitro banana seedlings using root-applied bio-nanofertilizer of copper and selenium. *Agronomy*, 12 (2): 539.
35. Singh, R.K., Mishra, S. and Bahadur, V. 2023. Effect of nano- chitosan, nano-micronutrients and bio capsules on vegetative growth, flowering and fruiting attributes of strawberry (+) cv. winter dawn. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 54: 13401-13411
36. Szatanik-Kloc, A., Szerement, J., Adamczuk, A. and Józefaciuk, G. 2021. Effect of Low Zeolite Doses on Plants and Soil Physicochemical Properties. *Materials*, 14: 2617.
37. Wang, Y., Chen, J., Sun, Y., Jiao, Y., Yang, Y., Yuan, X., Erik Lærke, P., Wu, Q. and Chi, D. 2023. Zeolite reduces N leaching and runoff loss while increasing rice yields under alternate wetting and drying irrigation regime. *Agr. Water Manage*, 277: 108130.
38. Zhao, L., Zhou, X., Kang, Z., Peralta-Videa, J.R. and Zhu, Y.G. 2023. Nano-enabled seed treatment: A new and sustainable approach to engineering climate-resilient crops. *Science of the Total Environment*, 5:168640.