University of Birjand

Journal homepage:
https://escs.birjand.ac.ir

تنشهای محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses In Crop Sciences

Vol. 17, No. 2, pp. 355-370 (Summer 2024)

http://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5805.2177

Original article

The effect of foliar application of different nano fertilizers on the quantitative and qualitative characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.) under water stress conditions

S. Shadkam[1], S. Sharfi[2*], S. Yazdan Seta[2], T. Mir Mahmoudi[2], F. Habibi[3]

1. Ph.D Student, Islamic Azad University, Mahabad Branch, Department of Agronomy and Plant Breeding, Islamic Azad University, Mahabad Branch, Mahabad, Iran
2. Assistant Prof., Department of Agronomy and Plant Breeding, Mahabad Branch, Islamic Azad University, Mahabad, Iran
3. Assistant Prof., Department of Agronomy and Plant Breeding, Miandoab Branch, Islamic Azad University, Miandoab, Iran

Received 19 November 2022; Accepted 24 April 2023

Extended abstract

Introduction

Medicinal plants are precious resources in Iran's broad landscape of natural resources, which can play an essential role in health, employment, and non-petroleum export if recognized, cultivated, developed, and exploited scientifically and correctly. Given the limitation of water resources in Iran, the agricultural sector's use of unconventional water resources has been proposed as a solution. One of these methods is to pass water through a magnetic field before irrigation to improve water productivity. The soil health management is crucial for ensuring ecological and agricultural productions and maintaining plant diversity. The negative impacts of chemical fertilizers forced the agrochemical companies to replace them with Nano-fertilizers in sustainable agricultural systems in order to achieve desirable crop productivity.

Materials and methods

With the aim of investigating the effect of foliar application of different nano fertilizers on the quantitative and qualitative characteristics of peppermint under different irrigation conditions, an experimental experiment was carried out in an agricultural field in Miandoab city in West Azarbaijan province. The experiment was in the form of split plots based on randomized complete block design in three replications. The main plot was assigned to the irrigation cycle (every 5, 7 and 10 days) and the secondary plot was assigned to foliar spraying treatments (control (no foliar spraying) nano NPK, nano Fe, nano Zn and nano Mn). chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid, plant height, number of leaves per plant, leaf weight, fresh yield, dry yield, proline content, essential oil percentage and essential oil yield was measured.

Results and discussion

Based on the results of data variance analysis, all investigated traits were affected by irrigation, foliar application and the interaction of two treatments at the 1% probability level. The interaction of year with foliar application on dry and wet yield of fodder was significant at the probability level of 1%. The triple interaction of year × irrigation× foliar application and was significant only on proline content at the 1% probability level. The results of the mean comparison of irrigation with foliar application interaction

* Corresponding author: Soran Sharfi; E-Mail: sharafi_1352@yahoo.com

© 2024, The Author(s). Published by University of Birjand. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

treatments showed the Foliar application of nano Fe under irrigation conditions once every 5 days had the highest content of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoids (respectively with an average of 13.43, 3.61 and 4.12 mg g fresh weight^{-1}), plant height (33.92 cm), leaf fresh weight (6.71 g), aerial fresh yield (13121 kg ha^{-1}), aerial dry yield (4600.1 kg ha^{-1}) and the lowest proline content (6.32 mmol g weight^{-1}). Also, the highest percentage of essential oil (0.67%) was attributed to nano Fe foliar spraying under irrigation conditions of 7 days once. In this study, although the highest essential oil yield (24.74 kg ha^{-1}) was assigned to the application of nano Zn under the irrigation once every 5 days' condition but there was no significant difference between the mentioned treatment and Foliar application nano NPK and nano-Fe in the irrigation treatment of 7 days' treatments.

Conclusion

It can be stated that the use of NPK and Fe in the form of nanoparticles under mild water stress conditions can improve the economic performance of the product and save water consumption. Also, foliar spraying of this fertilizer it was able to significantly increase the essential oil yield of in this plant under severe water stress conditions. Therefore, foliar spraying of nutritional elements in nano form can be a solution to improve the essential oil yield in peppermint plants under water stress conditions with different intensities.

Keywords: Essential oil, Irrigation, Nano NPK, Proline

تنش‌های محیطی در علوم زراعی
Environmental Stresses in Crop Sciences
جلد هفدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۳

http://dx.doi.org/10.22077/ESCS.2023.5805.2177

مقاله پژوهشی

اثر محلول‌پاشی کودهای مختلف نانو بر خصوصیات کمی و کیفی نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) تحت شرایط تنش کم‌آبی

صادق شادکام[۱]، سوران شرفی[۲*]، سامان یزدان‌ستا[۲]، تورج میرمحمودی[۲]، فرشاد حبیبی[۳]

۱. دانشجو دکتری دانشگاه آزاد اسلامی واحد مهاباد، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهاباد، مهاباد
۲. هیئت‌علمی دانشگاه آزاد اسلامی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهاباد، مهاباد
۳. هیئت‌علمی دانشگاه آزاد اسلامی، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد میاندوآب، میاندوآب

مشخصات مقاله

واژه‌های کلیدی:
آبیاری
اسانس
پرولین
نانو NPK

تاریخ دریافت:
۱۴۰۱/۰۸/۲۸

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۲/۰۲/۰۴

تاریخ انتشار:
تابستان ۱۴۰۳

۱۷(۲): ۳۵۵-۳۷۰

چکیده

با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی کودهای مختلف نانو بر خصوصیات کمی و کیفی نعناع فلفلی تحت شرایط مختلف آبیاری، آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. دور آبیـاری (۵، ۷ و ۱۰ روز یک‌بار) به کرت‌های اصلی و تیمارهای محلول‌پاشی (شاهد (عدم محلول‌پاشی) نانو NPK، نانو Fe، نانو Zn و نانو Mn) به کرت‌های فرعی اختصاص داده شدند. نتایج مقایسه میانگین تیمارهای برهمکنش آبیاری با محلول‌پاشی نشان داد محلول‌پاشی نانو Fe تحت شرایط آبیاری ۵ روز یک‌بار بالاترین محتوی کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید (به ترتیب با متوسط ۱۳/۴۳، ۳/۶۱ و ۴/۱۲ میلی‌گرم وزن تر)، ارتفاع بوته (۳۳/۹۲ سانتی‌متر)، وزن تر برگ (۶/۷۱ گرم)، وزن‌تر اندام هوایی (۱۳۱۲۱ کیلوگرم در هکتار)، وزن خشک اندام هوایی (۴۶۰۰/۱ کیلوگرم در هکتار) و کمترین محتوی پرولین (۶/۳۲ میلی‌مول بر گرم وزن تر) را به خود اختصاص داد. بالاترین درصد اسانس (۰/۶۷ درصد) به محلول‌پاشی نانو Fe تحت شرایط آبیاری ۷ روز یک‌بار اختصاص یافت. در این مطالعه اگرچه بالاترین عملکرد اسانس (۲۴/۷۴ کیلوگرم در هکتار) به کاربرد نانو Zn تحت شرایط آبیاری ۵ روز یک‌بار اختصاص داشت، اما بین تیمار مذکور و تیمارهای محلول‌پاشی نانو NPK و نانو Fe در تیمار آبیاری ۷ روز یک‌بار، اختلاف معنی‌دار وجود نداشت؛ بنابراین می‌توان اظهار داشت محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی به‌خصوص عناصر NPK و Fe به‌صورت نانوذره علاوه بر بهبود خصوصیات کمی و کیفی نعناع فلفلی می‌تواند در مصرف آب نیز صرفه‌جویی کند.

مقدمه

نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) یک گیاه چندساله دارویی است که به خانواده نعنائیان (Lamiaceae) تعلق دارد. نعناع فلفلی هیبرید بین دو گونه *Mentha aquatic* و *Mentha spicata* است، (Peter, 2006). اسانس این گیاه یکی از معروف‌ترین و رایج‌ترین اسانس مورداستفاده است. از مهم‌ترین ترکیبات اصلی اسانس این گیاه می‌توان به منتول و منتون اشاره کرد. خانواده نعناعیان با انتشار و توزیع جهانی از قطب شمال تا جنوب به‌طور گسترده در بسیاری از کشورها عمدتاً به‌عنوان گیاه دارویی باارزش کشت می‌شوند (Keshavarz et al., 2018). گستردگی کشت نعناع فلفلی در جهان، این گیاه را با تنش غیرزنده ازجمله تنش خشکی در طول فصل رشد مواجه می‌نماید. هم‌چنین، کمیت و کیفیت مواد مؤثره گیاهان دارویی به‌صورت هم‌زمان می‌تواند تحت تأثیر عوامل محیطی و ژنتیکی قرار گیرند، بنابراین روش‌هایی که بتواند تولید ترکیبات و متابولیت‌های ثانویه را در گیاهان دارویی افزایش دهد در حال گسترش و توسعه

* نگارنده پاسخگو: سوران شرفی. پست الکترونیک: sharafi_1352@yahoo.com

می‌باشند (Kheiry et al., 2017). آب و عناصر غذایی عوامل عمده تعیین‌کننده سطح تولیدات کشاورزی در جهان هستند که بر کمیت و کیفیت گیاهان دارویی تأثیرگذار هستند (Baghbani Arani et al., 2017).

در کشاورزی متداول کاربرد کودهایی با منابع شیمیایی اگرچه باعث افزایش تولید محصولات زراعی شده است، اما باید توجه داشت که استفاده فشرده از کودهای شیمیایی اثر منفی بر محیط‌زیست دارد. ازجمله این اثرات منفی می‌توان به تجمع سموم و کودها، آلودگی آب‌وخاک، فرسایش خاک، فرسایش ژنتیکی، کاهش تنوع زیستی و شستشوی مواد مغذی خاک اشاره نمود (Daneshmandi and Seyyedi, 2019)؛ به‌عبارت‌دیگر، مصرف بهینه کود به‌عنوان یکی از عوامل محدودکننده، نقش قابل‌توجهی در بهبود و افزایش تولید و عملکرد محصولات زراعی مختلف دارد.

به دلیل اینکه کودهای شیمیایی متداول پس از قرار گرفتن در محیط به مقدار قابل‌توجهی در خاک آزاد می‌شوند، مقدار قابل‌توجهی از آن‌ها از دسترس گیاه خارج می‌شوند. تخمین زده شده است که ۴۰ تا ۵۰ درصد از کودهای نیتروژنه، ۹۰ تا ۷۵ درصد از کودهای فسفره و ۵۰ تا ۴۰ درصد از کودهای پتاسه مورداستفاده در خاک از دسترس گیاه خارج می‌شوند (Moosavi, 2017)؛ بنابراین، فناوری نانو فرصت‌های جدیدی را به‌منظور افزایش کارایی مصرف عناصر غذایی و کاهش هزینه‌های حفاظت از محیط‌زیست، فراهم ساخته است (Naderi and Abdi, 2012). نانو کودها به‌صورت کامل جذب گیاه شده و نیازها و کمبودهای غذایی را به‌خوبی برطرف می‌سازند. از مزیت‌های کاربرد نانوکودها می‌توان به مواردی چون قیمت کم، تأثیر بالا، حلالیت بالا در آب و کنترل‌پذیری بیشتر اشاره نمود (Kochaki and Hosseini, 2011).

کودهای تولیدشده در مقیاس نانو خصوصیات تغییریافته متفاوتی دارند، این تغییر رفتار به کاهش اندازه مولکولی و همچنین به تغییر در برهم‌کنش بین مولکول‌های آن‌ها برمی‌گردد. ویژگی‌های فن‌آوری نانو که می‌تواند تحولی جدید در کشاورزی ایجاد کند با واکنش‌پذیری بالا، افزایش فراهمی زیستی و اثرات سطحی آن‌ها ارتباط دارد (Gutierrez et al., 2012). کودهای نانوذره می‌توانند از طریق منافذ ریز برگ‌ها نفوذ بیشتری به بافت گیاه داشته باشند و کارایی جذب و مصرف عناصر غذایی موردنیاز گیاه را افزایش دهند (Qureshi et al., 2018).

گزارش شده است که استفاده از نانوذره اکسید روی به‌صورت معنی‌داری خصوصیات رشدی مانند ارتفاع و عملکرد ماده خشک را افزایش داد (Adhikari et al., 2015). اثر مثبت عناصر ریزمغذی به‌صورت نانو در بهبود سطوح برگ و محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در گیاه ذرت (*Zea mays*) در مطالعات دیگری نیز اشاره شده است (Janmohammadi et al., 2016; Subbaiah et al., 2016).

در تحقیقی بر روی نعناع فلفلی گزارش شد تنش کم‌آبی محتوی کلروفیل، ارتفاع گیاه، شاخص سطح برگ، وزن خشک و تر زیست‌توده و عملکرد اسانس گیاه را کاهش داد، اما استفاده از ورمی‌کمپوست تحت شرایط تنش کم‌آبی موجب افزایش صفات مذکور شد (Keshavarz et al., 2020). رستمی و همکاران (Rostami et al., 2017) بیشترین میزان شاخص‌های رشد و محتوای رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی را در گیاه نعناع فلفلی تحت شرایط بهینه (عدم شوری) و تنش ملایم (۴۰ میلی‌مولار) همراه با تیمارهای محلول‌پاشی نانوکود آهن و روی گزارش کردند. همچنین در مطالعه آن‌ها بالاترین تلفیق شوری (شوری ۴۰ و ۸۰ میلی‌مولار) و محلول‌پاشی نانوکلات آهن بر مقدار قندهای محلول برگ در گیاه افزود.

در تحقیقی دیگر بر روی گیاه نعناع فلفلی بالاترین شاخص‌های رشدی نظیر ارتفاع بوته، وزن خشک و تر زیست‌توده، عملکرد اسانس و رنگیزه‌های فتوسنتزی در شرایط بهینه رطوبتی ثبت شد. در این مطالعه بالاترین درصد اسانس تحت شرایط تنش ملایم به دست آمد. محلول‌پاشی کود نانو پتاسیم تحت تیمارهای آبیاری کامل، ۸۰ و ۶۰ درصد ظرفیت زراعی بالاترین عملکرد زیست‌توده، عملکرد اسانس و قندهای محلول را به خود اختصاص داد (Saedi et al., 2018).

در مطالعه‌ای بر روی گیاه داروی انیسون (*Pimpinella anisum*)، محلول‌پاشی عناصر آهن و روی به‌صورت جداگانه و هم‌زمان اثر مثبتی بر بهبودی محتوای رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، عملکرد بیولوژیک و درصد اسانس گیاه داشت (Pirzad et al., 2013). در مطالعه امینی و همکاران (Amini et al., 2018) بر روی گیاه زوفا (*Hyssopus officinalis* L.) بالاترین درصد اسانس و عملکرد اسانس در محلول‌پاشی هم‌زمان عناصر آهن+ منگنز+ روی گزارش شد.

همانند گیاهان زراعی، تنش کم‌آبی تولید گیاهان دارویی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. راه‌کارهای مختلفی جهت تعدیل اثر تنش کم‌آبی بر روی گیاهان پیشنهاد شده است،

یکی از این راهکارها بهبود سطوح تغذیه‌ای گیاهان است؛ بنابراین تحقیق حاضر با هدف بررسی اثر محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی بر بهبود مقاومت به تنش کم‌آبی و همچنین مقدار اسانس و متابولیت‌های ثانویه در گیاهان دارویی و به‌خصوص نعناع فلفلی موردبررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در دو سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ در مزرعه کشاورزی در شهرستان میاندوآب در استان آذربایجان غربی اجرا شد. محل مورد آزمایش در ۵ کیلومتری شمال غربی شهر در موقعیت جغرافیایی ۴۶ درجه و ۹۰ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی و در ارتفاع ۱۳۱۴ متری از سطح دریای آزاد قرار دارد. این منطقه ازنظر تقسیمات آب و هوایی کشور دارای رژیم دمایی فریک (متوسط دمای سالیانه خاک بین ۸ الی ۱۵ درجه سانتی‌گراد) و رژیم رطوبتی زریک (نیمه‌خشک) و خاک محل آزمایش دارای بافت سیلتی لوم بود (جدول ۱).

طرح آزمایشی به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار بود. کرت اصلی به دور آبیاری (۵، ۷ و ۱۰ روز یک‌بار) و کرت فرعی به محلول‌پاشی تیمارهای محلول‌پاشی {شاهد (محلول‌پاشی آب مقطر)، کود نانو NPK (۲۰، ۲۰، ۲۰)، کود نانو Fe (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، کود نانو Zn (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر) و نانو Mn (۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر)} اختصاص داده شدند.

جدول ۱. مشخصات فیزیک‌وشیمیایی خاک محل آزمایش

Table 1. Physico-chemical properties of soil

عمق deapth	بافت خاک Texture	شوری Ec	pH	در صد اشباع sp	آهک T.N.V	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	کربن آلی C	N	P	K
		dS m^{-1}		%		---------- % ----------					mg kg^{-1}	
0-30	Loam	1.2	8.5	42	14	26	36	38	0.6	0.15	10.5	255

جهت تهیه بستر کاشت، شخم عمیقی در اوایل بهار زده شد. پس‌ازآن برای نرم نمودن خاک عملیات دیسک‌زنی اجرا گردید. زمین زراعی به سه تکرار و سی واحد آزمایشی تبدیل شد. هر تکرار با فاصله یک متر از تکرار مجاور قرار گرفت. سپس واحدهای آزمایشی در ابعاد ۲/۴ ×۲ متر با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از واحد آزمایشی مجاور ایجاد شدند. هر واحد آزمایشی دارای شش خط کاشت بود. کاشت نشاهای گیاه در هر دو سال آزمایش، در اواسط اردیبهشت صورت گرفت و دور آبیاری نیز هر سه روز یک‌بار انجام شد. اعمال تیمارهای کم‌آبیاری نیز ۴۰ روز پس از کاشت آغاز شد. روش آبیاری، آبیاری قطره‌ای تیپ، به فاصله روزنه‌های ۲۰ سانتیمتر بود که در تمامی تیمارها دو روزنه در طرفین گیاه قرار داده شدند. تراکم کاشت معادل ۱۶ بوته در مترمربع در نظرگرفته شد. مبارزه با علف‌های هرز در طول مدت آزمایش به‌صورت وجین دستی انجام گردید. محلول‌پاشی با عناصر ریزمغذی ۳ بار انجام شد. اولین محلول‌پاشی یک هفته قبل از اعمال تنش صورت گرفت، دومین و سومین محلول‌پاشی هم بعد از اعمال تنش، بافاصله ۳ هفته از هم انجام شد.

وزن تر و وزن خشک بوته (به روش سایه‌خشک) با استفاده از ترازوی دیجیتال با ۰/۰۰۱ توزین شدند. جهت اسانس‌گیری از روش تقطیر با بخار و توسط دستگاه کلونجر MicroSYNTH ساخت شرکت Milestone انجام شد. درصد اسانس براساس نسبت وزن اسانس در ۸۰ گرم برگ و سرشاخه گل‌دار محاسبه شد. عملکرد اسانس نیز از ضرب عملکرد خشک بوته در درصد اسانس به دست آمد.

برای اندازه‌گیری کلروفیل، ۰/۲۵ گرم برگ تازه و کاملاً توسعه‌یافته برداشت و در هاون چینی خرد شد. سپس با ۵ میلی‌لیتر آب مقطر، در محیط خنک و کم‌نور، ساییده شده تا به‌صورت توده یکنواختی در آمدند. مخلوط حاصل در یک بالن ژوژه ۲۵ میلی‌لیتری ریخته شده و به حجم رسانیده شد. ۰/۵ میلی‌لیتر از مخلوط به‌دست‌آمده برداشت‌شده و با ۴/۵ میلی-لیتر استون ۸۰٪ مخلوط و با ۳۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفوژ شد. پس از سانتریفوژ، بخش رویی مخلوط برداشته شده و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (PD-303)، مقدار جذب آن در طول‌موج‌های ۴۷۰، ۶۴۶/۸، ۶۶۳/۲ قرائت گردید. غلظت کلروفیل a، b، کل و کاروتنوئید با استفاده از روابط (۱) تا (۳) محاسبه گردید (Lichtenthaler and Buschmann, 2001).

$$Cholorophyll\ a\ (mg\ g^{-1}\ FW) = 12.2 \cdot (A663.2) - 2.79 \cdot (A646.8) \quad [1]$$

$$Cholorophyll\ b\ (mg\ g^{-1}\ FW) = 21.50\cdot(A646.2) - 5.10\cdot(A663.2) \quad [۲]$$

$$Carotenoid\ (mg\ g^{-1}\ FW) = (1000\cdot(A470) - 1.8\cdot(Chla) - 85.02\cdot(Chlb))/198 \quad [۳]$$

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها، پس از اطمینان از برقراری فرض‌های تجزیه واریانس داده‌ها، با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ انجام شد، همچنین مقایسه میانگین تیمارهای موردبررسی نیز با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها، کلیه صفات موردبررسی در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر آبیاری، محلول‌پاشی و برهمکنش دو تیمار قرار گرفتند. برهم‌کنش سال با محلول‌پاشی بر عملکرد خشک و تر اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود، برهم‌کنش سه‌گانه سال، آبیاری و محلول‌پاشی تنها بر محتوی پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی

در بررسی حاضر با تشدید تنش کم‌آبی از ۵ روز یک‌بار به ۱۰ روز یک‌بار محتوی رنگ‌دانه‌های کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید به‌صورت معنی‌داری کاهش نشان داد اما محلول‌پاشی نانو NPK، نانو Fe، نانو Zn و نانو Mn در دو تیمار آبیاری بعد از ۵ و ۷ روز و محلول‌پاشی نانو NPK، نانو Fe و نانو Mn در تیمار آبیاری ۱۰ روز یک‌بار قادر بودند محتوی هر سه رنگ‌دانه فتوسنتزی را در مقایسه با تیمار شاهد به‌صورت معنی‌داری افزایش دهند.

جدول ۲. تجزیه واریانس مرکب صفات موردبررسی در نعناع فلفلی تحت تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی

Table 2. Combine variance analysis of investigated traits in peppermint under irrigation and foliar application of micronutrient elements

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کارتنوئید Carotenoid	ارتفاع بوته Plant height	تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant	وزن برگ Leaf weight
سال Year (Y)	1	4.21^{ns}	0.01^{ns}	11.25^{ns}	5.69^{ns}	399.42^{ns}	0.30^{ns}
تکرار (سال) R (Y)	4	4.78	1.45	4.11	40.41	229.80	1.07
آبیاری Irrigation (I)	2	266.42**	26.43**	18.00**	893.02**	28908.73**	41.91*
سال × آبیاری Y ×I	2	0.062^{ns}	0.09^{ns}	0.035^{ns}	0.20^{ns}	344.75^{ns}	2.21**
خطای اول Ea	8	1.44	0.08	0.053	10.24	78.39	0.23
محلول‌پاشی Foliar appliciation(F)	4	10.50**	1.05**	0.083**	89.06**	1864.37**	13.28**
سال × محلول‌پاشی Y × F	4	0.071^{ns}	0.034^{ns}	0.01^{ns}	0.20^{ns}	257.41^{ns}	0.71^{ns}
آبیاری × محلول‌پاشی I ×F	8	9.19**	0.85**	0.47**	19.67*	898.92**	3.56**
سال×آبیاری×محلول‌پاشی F ×I × Y	8	0.72^{ns}	0.077^{ns}	0.09^{ns}	0.17^{ns}	262.60^{ns}	0.26^{ns}
خطای دوم Eb	56	1.25	0.070	0.10	9.53	140.08	0.37
ضریب تغییرات CV%	-	*11.97*	*9.28*	*12.36*	*11.18*	*20.29*	*12.83*

Table 2. Continues **جدول ۲. ادامه**

S.O.V منابع تغییر	درجه آزادی df	وزن تر اندام هوایی Fresh yield	وزن خشک اندام هوایی Dry yield	محتوی پرولین Proline content	درصد اسانس Essential Oil Percentage	عملکرد اسانس Essential Oil yield
سال Year (Y)	1	686.00^{ns}	77.55^{ns}	23.38^{ns}	0.016^{ns}	63.04^{ns}
تکرار (سال) R (Y)	4	736.2	94.94	4.17	0.018	26.49
آبیاری Irrigation (I)	2	31340.2**	4039.02**	365.45**	0.23**	1571.14**
سال × آبیاری Y ×I	2	67.0^{ns}	10.45^{ns}	1.38^{ns}	0.06^{ns}	8.37^{ns}
خطای اول Ea	8	329.3	41.43	1.95^{ns}	0.004^{ns}	13.47^{ns}
محلول‌پاشی Foliar appliciation(F)	4	5788.3**	3179.42**	62.34**	0.15**	295.22**
سال × محلول‌پاشی Y × F	4	614.8*	99.53*	2.48^{ns}	0.007*	20.52^{ns}
آبیاری × محلول‌پاشی I ×F	8	859.6**	283.26**	17.57**	0.04**	59.19**
سال×آبیاری×محلول‌پاشی F ×I × Y	8	209.8^{ns}	44.12^{ns}	3.86**	0.002^{ns}	10.41^{ns}
خطای دوم Eb	56	242.8	31.04	1.19	0.003	10.46
ضریب تغییرات CV%	-	*18.60*	*17.75*	*11.97*	*12.14*	*20.14*

*، ** و n.s به ترتب معنی‌دار و غیر معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns, * and **: Not-significant and significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

در مطالعه حاضر کاربرد نانو Fe تحت شرایط ۵ روز یک‌بار آبیاری به ترتیب با متوسط ۱۳/۴۳، ۳/۶۱ و ۴/۱۲ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر بالاترین محتوی کلروفیل a، کلروفیل b و کارتنوئید را تولید کرد، درحالی‌که کمترین محتوی رنگ‌دانه‌های مذکور به ترتیب با متوسط ۵/۶۸، ۱/۶۸، ۱/۷۰ میلی‌گرم بر گرم وزن‌تر به تیمار شاهد محلول‌پاشی تحت شرایط آبیاری بعد از ۱۰ روز اختصاص داشتند، هرچند بین تیمار مذکور و تیمار محلول‌پاشی نانو Zn ازنظر محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد (جدول ۳). کاهش سنتز کمپلکس اصلی رنگ‌دانه کلروفیل، تشدید فعالیت آنزیم‌های کلروفیلاز و پراکسیداز، تولید ترکیبات فنلی، افزایش رادیکال‌های فعال اکسیژن و آسیب رساندن به غشاء کلروپلاست و اختلال در جذب نیتروژن از خاک به‌عنوان مهم‌ترین عوامل کاهنده غلظت کلروفیل در تنش‌های شدید شناخته شده است (Smirnoff, 1993). کاهش محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در اثر تنش کم‌آبی در گیاه نعناع فلفلی در مطالعات دیگری نیز به اثبات رسیده است (Ebrahimi- Sborezi et al., 2021; Baghbani-Arani et al., 2017). تنش کم‌آبی به دلیل افزایش فشار اسمزی موجب کاهش دسترسی گیاه به آب می‌شود، کاهش مقدار رطوبت در دسترس گیاه موجب کاهش میزان تحرک عناصر ماکرو NPK و عناصر میکرو مانند روی، آهن و منگنز می‌شود. با توجه به محدود شدن رشد ریشه‌ها تحت شرایط تنش کم‌آبی گیاه به‌صورت مضاعف با کمبود این عناصر روبرو خواهد شد، بنابراین محلول‌پاشی این عناصر می‌تواند کمبود این عناصر در داخل گیاه را جبران نماید (Cakmak, 2008)، همچنین کودهای نانو به واسطه کوچک بودن قطر ذرات آن‌ها دارای سرعت جذب و انتقال بالایی در گیاه هستند، این ویژگی‌ها می‌تواند قدرت اثربخشی آن‌ها را در داخل گیاه بالا ببرد.

با توجه به اینکه ۴ اتم نیتروژن در ساختار هر مولکول کلروفیل مشارکت دارند و همچنین ارتباط مثبت بین محتوی

کلروفیل و مقدار مصرف کود نیتروژن، می‌توان اظهار داشت در دسترس بودن عنصر نیتروژن در تیمار نانو NPK دلیل بهبود کلروفیل در این تیمار است. همچنین بالا بودن محتوی کلروفیل در تیمارهای کاربرد نانو کود می‌تواند به دلیل آزاد-سازی تدریجی عناصر غذایی در این کودها و جذب مؤثر این عناصر در طول دوره رشد گیاه باشد (Liu and Lal, 2015). بهبود محتوی کلروفیل در اثر محلول‌پاشی آهن را می‌توان به نقش این عنصر در فعال‌سازی و بهبود عملکرد پروتئین سنتتازهای مسیر بیوسنتز کلروفیل و برخی از آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان مانند آسکوربات پراکسیداز و گلوتاتیون ردوکتاز در مسیر حفاظت از تخریب کلروفیل توسط رادیکال‌های آزاد اکسیژن نسبت داد (Ghorbanli, 2005). در تحقیقی بر روی گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) مشاهده شد که استفاده از کود آهن و نانو کود آهن محتوی کلروفیل برگ را افزایش داد (Peyvandi et al., 2011). عنصر آهن یک کوفاکتور مهم برای تعدادی از آنزیم‌هاست که در مسیر بیوسنتز کلروفیل نقش دارند (Claussen, 2005). در مطالعه‌ای بر روی گیاه ریحان کاربرد نانوکود آهن موجب افزایش شاخص کلروفیل در این گیاه شد (Elfeky et al., 2013). علاوه بر آهن، در بررسی حاضر تیمار NPK و دیگر ریزمغذی‌ها موجب بهبود محتوی کلروفیل و کارتنوئید در تیمارهای مختلف آبیاری شدند. گزارش شده است عناصر ریزمغذی، آنزیم‌های دخیل در تولید کلروفیل مانند کربنیک دهیدروژناز، تریپتوفان سنتتاز و غیره را فعال کرده و محلول-پاشی آن‌ها باعث افزایش انواع کلروفیل می‌شود (Mohammadazeh Toutounchi and Amirnia, 2016).

کشاورز و همکاران (Keshavarz et al., 2020) در تحقیقی در نعناع فلفلی (*Mentha piperita*) نشان دادند تنش کم‌آبی محتوی کلروفیل را در مقایسه با شرایط آبیاری نرمال ۳۲ درصد کاهش داد. آن‌ها نشان دادند تحت شرایط تنش کم‌آبی استفاده از ورمی‌کمپوست در مقایسه با کاربرد کودهای شیمیایی توانست محتوی کلروفیل برگ بیشتری به خود اختصاص دهد. در مطالعه‌ای دیگر، تنش کم‌آبی محتوی کلروفیل را در نعناع فلفلی کاهش داد، اما محلول‌پاشی اسید هیومیک تحت شرایط تنش کم‌آبی بر محتوی کلروفیل در این گیاه افزود (Rostami et al., 2019).

جدول ۳، مقایسه میانگین تیمارهای برهمکنش آبیاری با محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی ازلحاظ اثر بر صفات موردبررسی در نعناع فلفلی

Table 3, Mean comparison of the interaction treatments of the irrigation with foliar application of micronutrient elements in terms of effect on investigated traits in peppermint

آبیاری Irrigation	محلول‌پاشی Foliar application	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کارتنوئید Carotenoid	ارتفاع بوته Plant height	تعداد برگ در بوته Number of leaves per plant	وزن برگ Leaf weight
		---------- mg.g^{-1} FW ----------			cm		g
۵ روز یک‌بار Once every 5 days	شاهد Control	10.18^{de}	2.74^{d}	3.03^{d}	28.17^{de}	582.2^{de}	4.57^{c}
	نانو NPK	12.43^{ab}	3.36^{ab}	3.81^{b}	35.42^{a}	1094.4^{a}	6.21^{ab}
	نانو Fe	13.43^{a}	3.61^{a}	4.12^{a}	33.92^{ab}	926.6^{b}	6.71^{a}
	نانو Zn	12.18^{bc}	3.43^{ab}	3.76^{b}	32.42^{abc}	948.8^{b}	5.64^{b}
	نانو Mn	11.18^{cd}	3.18^{bc}	3.45^{c}	31.67^{bc}	799.9^{c}	5.50^{b}
۷ روز یک‌بار Once every 7 days	شاهد Control	8.31^{f}	2.33^{e}	2.52^{e}	23.67^{fgh}	464.4^{ef}	3.75^{de}
	نانو NPK	9.93^{e}	2.69^{d}	3.02^{d}	28.17^{de}	588.8^{d}	3.65^{de}
	نانو Fe	9.93^{e}	2.83^{d}	3.11^{d}	30.17^{cd}	582.2^{de}	4.57^{c}
	نانو Zn	9.43^{e}	2.86^{cd}	2.94^{d}	29.42^{cde}	480.0^{def}	5.74^{b}
	نانو Mn	9.93^{e}	2.74^{d}	3.03^{d}	26.55^{ef}	597.7^{d}	5.67^{b}
۱۰ روز یک‌بار Once every 10 days	شاهد Control	5.68^{hi}	1.68^{f}	1.70^{g}	22.30^{gh}	252.2^{h}	2.54^{f}
	نانو NPK	7.93^{f}	2.11^{e}	2.37^{e}	24.17^{fg}	411.1^{f}	3.14^{ef}
	نانو Fe	6.68^{gh}	2.05^{e}	2.05^{f}	24.30^{fg}	276.6^{gh}	3.37^{de}
	نانو Zn	5.43^{i}	1.61^{f}	1.62^{g}	20.92^{h}	374.4^{fg}	3.95^{cd}
	نانو Mn	7.68^{fg}	2.18^{e}	2.33^{e}	22.67^{gh}	370.0^{fg}	3.50^{de}

جدول ۳. ادامه

Table 3. Continues

آبیاری Irrigation	محلول‌پاشی Foliar application	عملکرد تر Fresh yield	عملکرد خشک Dry yield	محتوی پرولین Proline content	درصد اسانس Essential Oil Percentage	عملکرد اسانس Essential Oil yield
		------- kg ha^{-1} -------		mm.g^{-1} FW	%	kg ha^{-1}
۵ روز یک‌بار Once every 5 days	شاهد Control	9160^{d}	3408.8^{e}	5.11^{h}	0.46^{ef}	15.92^{e}
	نانو NPK	12425^{ab}	4823.5^{a}	6.46^{fg}	0.37^{h}	17.75^{de}
	نانو Fe	13121^{a}	4600.1^{ab}	6.32^{g}	0.46^{ef}	21.83^{bc}
	نانو Zn	11425^{bc}	4218.0^{bc}	6.36^{g}	0.58^{bc}	24.74^{a}
	نانو Mn	9205^{d}	3462.5^{de}	7.78^{e}	0.57^{bc}	19.55^{cd}
۷ روز یک‌بار Once every 7 days	شاهد Control	7038^{fg}	2688.4^{f}	7.58^{ef}	0.38^{gh}	10.77^{f}
	نانو NPK	8918^{d}	3986.4^{cd}	10.44^{c}	0.62^{ab}	24.07^{ab}
	نانو Fe	10777^{c}	3205.7^{ef}	9.43^{cd}	0.67^{a}	21.98^{abc}
	نانو Zn	8591de	3359.8^{e}	9.03^{d}	0.57^{bcd}	19.29^{cd}
	نانو Mn	8918^{d}	3322.3^{e}	9.43^{cd}	0.55^{cd}	18.69^{de}
۱۰ روز یک‌بار Once every 10 days	شاهد Control	3644^{i}	2150.2^{h}	9.31^{cd}	0.26^{i}	5.59^{g}
	نانو NPK	5539^{gh}	2730.6^{f}	12.64^{b}	0.36^{h}	9.43^{f}
	نانو Fe	7296^{ef}	2129.3^{g}	13.71^{ab}	0.43^{fg}	9.87^{f}
	نانو Zn	5597^{g}	1577.9^{gh}	14.70^{a}	0.51^{de}	8.64^{f}
	نانو Mn	4033^{hi}	2124.0^{g}	12.78^{b}	0.44^{f}	9.56^{f}

تیمارهای دارای حروف مشترک فاقد اختلاف معنی دار در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون دانکن هستند

Different letters indicating significant difference at p< 0.05 based on Duncans' Test

بهبود محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در گیاه تحت تیمار آهن و منگنز می‌تواند به نقش آن‌ها در سنتز این ترکیب مرتبط باشد. در تحقیقی بر روی گیاه دارویی آنیسون (*Pimpinella anisum*) بالاترین محتوی کلروفیل برگ در تیمار کاربرد جداگانه و هم‌زمان عناصر آهن و روی گزارش شد (Pirzad et al., 2013).

در مطالعه رستمی و همکاران (Rostami et al., 2017) بالاترین محتوی کلروفیل برگ در گیاه نعناع فلفلی تحت تیمار شاهد شوری و محلول‌پاشی نانو Fe به دست آمد. در مطالعه آن‌ها کاربرد نانو کلات آهن و روی در کلیه سطوح شوری بر محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی افزود. در تحقیقی بر روی گیاه آویشن باغی (*Thymus vulgaris*) محتوی کلروفیل a و b تحت شرایط تنش کمبود نیتروژن کاهش یافت، اما محلول‌پاشی عناصر آهن و روی اثر مثبتی بر افزایش محتوی کلروفیل تحت شرایط تنش مذکور داشت (Asle Mohammadi et al., 2021).

در مطالعه آروین و همکاران (Arvin et al., 2019) بالاترین محتوی کلروفیل و کارتنوئید در گیاه دارویی مرزه (*Satureja hortensis*) به تیمار کود کامل (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) ۲۰- ۲۰-۲۰ اختصاص داشت. در مطالعه ساعدی و همکاران (Saedi et al., 2018) بالاترین محتوی رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در شرایط آبیاری مطلوب و کاربرد ۶ میلی‌گرم در لیتر نانوپتاسیم گزارش شد.

ارتفاع بوته

نتایج مقایسات میانگین ترکیبات تیماری آبیاری با محلول-پاشی عناصر شیمیایی نشان داد محلول‌پاشی نانو NPK، نانو Fe و نانو Zn در دور آبیاری ۵ روز یک‌بار با مقادیر ۳۵/۴۲، ۳۳/۹۲ و ۳۲/۴۲ سانتی‌متر بالاترین ارتفاع بوته را به خود اختصاص دادند، کمترین ارتفاع بوته نیز با متوسط ۲۰/۹۲ سانتی‌متر به تیمار محلول‌پاشی نانو Zn تحت شرایط آبیاری ۱۰ روز یک‌بار تولید شد. نتایج همچنین نشان داد تحت شرایط آبیاری ۵ روز یک‌بار، محلول‌پاشی نانو NPK، نانو Fe، نانو Zn و نانو Mn ارتفاع بوته را در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۲۵/۷۳، ۲۰/۴۱، ۱۵/۰۸ و ۱۲/۴۲ درصد و تحت شرایط آبیاری بعد از ۷ روز به ترتیب ۲۷/۱۹،۴۶/۰۱، ۲۴/۲۹

و ۱۲/۱۶ درصد افزایش دادند. تحت شرایط آبیاری ۱۰ روز یک‌بار اختلاف بین تیمار شاهد و تیمارهای محلول‌پاشی از نظر ارتفاع بوته معنی‌دار نبود (جدول ۳).

دلیل کاهش ارتفاع بوته تحت شرایط تنش کم‌آبی می‌تواند کاهش فشار آماس و در نتیجه آن کاهش تقسیمات سلولی و بزرگ شدن سلول‌ها باشد. با تشدید تنش کم‌آبی فشار آماس در سلول‌های محافظ روزنه و همچنین هدایت روزنه‌ای کاهش یافته و در اثر این پدیده‌ها ارتفاع، سرعت رشد گیاه، مقدار فتوسنتز و زیست‌توده گیاه کاهش خواهد یافت (Baghalian et al., 2011).

افزایش ارتفاع بوته در تیمارهای محلول‌پاشی عناصر غذایی می‌تواند به دلیل نقش این عناصر در فتوسنتز باشد که موجب افزایش ساخت کلروفیل در برگ‌های جوان و افزایش سطح تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی باشد که اثر مستقیمی بر بهبودی فتوسنتز دارند. تحت این شرایط، فتوآسمیلات‌های بیشتری به نقاط مختلف گیاه ازجمله ساقه‌ها واردشده و درنهایت ارتفاع بوته افزایش می‌یابد (Cakmak, 2008). در مطالعه کشاورز و همکاران (Keshavarz et al., 2020) بالاترین ارتفاع بوته در گیاه نعناع فلفلی تحت تیمار آبیاری مطلوب و کاربرد ورمی‌کمپوست و کمترین مقدار در تیمار تنش کم‌آبی شدید و تیمار شاهد کودی گزارش شد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر بر روی نعناع فلفلی تنش کم‌آبی ارتفاع بوته را به‌صورت معنی‌داری کاهش داد، اما در هر سه شرایط آبیاری مطلوب، تنش ملایم و تنش شدید کاربرد کود نیتروژن ارتفاع بوته را بهبود داد (Ebrahimi-Sborezi et al., 2021). در تحقیقی دیگر نیز تشدید تنش کم‌آبی از ارتفاع بوته در نعناع فلفلی کاست (Kheiry et al., 2017). در مطالعه‌ای الفکی و همکاران (Elfeky et al., 2013) کاربرد نانو کود آهن موجب افزایش شاخص کلروفیل در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) شد. در مطالعه‌ای بالاترین ارتفاع بوته نعناع فلفلی در تیمار شاهد بدون تنش و کاربرد ۶ گرم در لیتر نانو پتاسیم به دست آمد (Saedi et al., 2018). در تحقیقی اقدسی و همکاران (Aghdasi et al., 2018) اظهار داشتند محلول‌پاشی آهن و منگنز ارتفاع بوته را در گیاه ماش (*Vigna radiata*) تحت شرایط تنش کم‌آبی افزایش داد.

تعداد و وزن برگ در بوته

در این مطالعه با افزایش روزهای دور آبیاری از تعداد برگ به‌صورت معنی‌داری کاسته شد، اما محلول‌پاشی عناصر غذایی به‌خصوص نانو NPK توانست اثر تنش کم‌آبی را بر تعداد برگ تعدیل نماید. تیمار مذکور تعداد برگ را در سطوح ۵، ۷ و ۱۰ روز آبیاری در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۸۸/۰۴، ۲۶/۸۹ و ۶۳/۰۰ درصد افزایش داد. در این بررسی محلول‌پاشی نانو NPK تحت شرایط ۵ روز آبیاری با متوسط ۱۰۹۴/۴ برگ بیشترین و تیمار شاهد تحت تیمار ۱۰ روز یک‌بار آبیاری با متوسط ۲۵۲/۲ برگ کمترین تعداد برگ را به خود اختصاص دادند (جدول ۳).

در این بررسی کم‌آبی به‌صورت معنی‌داری از وزن تر برگ کاست، اما محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی توانست اثر تنش کم‌آبی را بر وزن برگ تعدیل نماید، به‌طوری‌که در کلیه سطوح آبیاری هر چهار تیمار محلول‌پاشی (به‌غیراز محلول‌پاشی نانو NPK تحت شرایط آبیاری ۷ روز یک‌بار) توانستند وزن برگ را در مقایسه با تیمار شاهد به‌صورت معنی‌داری افزایش دهند در این بررسی محلول‌پاشی نانو NPK و نانو Fe به ترتیب با متوسط ۶/۲۱ و ۶/۷۱ گرم بالاترین و تیمار شاهد محلول‌پاشی تحت شرایط آبیاری بعد از ۱۰ روز با متوسط ۲/۵۴ گرم کمترین وزن برگ را به خود اختصاص دادند. محلول‌پاشی عناصر غذایی در مراحل رشد رویشی با بهبود سطح برگ موجب افزایش مقدار تشعشع دریافتی توسط برگ می‌شود، افزایش مقدار تشعشع دریافتی نیز موجب افزایش وزن خشک برگ می‌شود (Jaleel et al., 2009). آهن با تولید کلروفیل و افزایش غلظت کلروفیل باعث افزایش سطح برگ و وزن برگ می‌شود. با توجه به نقش آهن و دیگر عناصر مغذی مورداستفاده در افزایش و بهبود سطح برگ، می‌توان اظهار داشت افزایش سطح برگ موجب افزایش وزن خشک برگ می‌شود. در مطالعه اقدسی و همکاران (Aghdasi et al., 2018) محلول‌پاشی با آهن و منگنز در هر دو سطح تنش کم‌آبی منجر به کاهش اثرات ناشی از تنش بر وزن خشک برگ در گیاه ماش (*Vigna radiata*) شد.

وزن تر اندام هوایی

مقایسه میانگین ترکیبات تیماری آبیاری با محلول‌پاشی ازلحاظ اثر بر عملکرد تر گیاه نشان داد تحت شرایط آبیاری ۵ و ۱۰ روز یک‌بار، محلول‌پاشی تیمارهای محلول‌پاشی نانو NPK، نانو Fe و نانو Zn و تحت شرایط آبیاری ۷ روز یک‌بار محلول‌پاشی هر چهار تیمار کودی به‌صورت معنی‌داری عملکرد وزن تر را در مقایسه با تیمار شاهد بهبود دادند. در این آزمایش محلول‌پاشی نانو NPK، نانو Fe تحت تیمار

آبیاری ۵ روز یک‌بار به ترتیب با متوسط ۱۲۴۲۵ و ۱۳۱۲۱ کیلوگرم در هکتار بالاترین و تیمار شاهد محلول‌پاشی تحت تیمار ۱۰ روز یک‌بار آبیاری با متوسط ۳۶۴۴ کیلوگرم در هکتار کمترین عملکرد تر را به خود اختصاص دادند (جدول ۳). زمانی که گیاه با تنش کم‌آبی روبرو می‌شود سعی می‌نماید با بسته نگه‌داشتن روزنه‌های مقدار آب ازدست‌رفته را کاهش دهد، بسته شدن روزنه‌ها موجب کاهش مقدار جذب دی‌اکسید کربن و درنهایت کاهش فتوسنتز و عملکرد گیاه خواهد شد (Sun et al., 2013)، همچنین تحت شرایط تنش کم‌آبی، جریان عناصر غذایی در خاک به سمت ریشه‌ها کاهش یافته و کمبود این عناصر در گیاه سبب کاهش عملکرد اقتصادی محصول خواهد شد (Díaz- López et al., 2012). در تحقیقی شرایط تنش ملایم و تنش شدید کم‌آبی عملکرد بیولوژیک را در گیاه نعناع فلفلی در مقایسه با تیمار آبیاری نرمال به ترتیب درصد کاهش داد (Ebrahimi-Sborezi et al., 2021). در تحقیق حاضر محلول‌پاشی عناصر غذایی به‌خصوص نانو NPK، نانو Fe و نانو Zn اثر مثبتی بر بهبود وزن تر نعناع فلفلی داشت، این اثر مثبت را می‌توان به نقش این تیمارها درافزایش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی، ارتفاع بوته و تعداد و وزن برگ نسبت داد که از اجزای وزن تر بوته هستند. برخی محققان علت بهبود خصوصیات رویشی در گیاهان را در تیمارهای محلول‌پاشی با عناصر ریزمغذی را به نقش مهم این عناصر در افزایش محتوی کلروفیل برگ، بهبود فعالیت‌های کاتالیزوری فرایندهای متابولیسمی و حفظ آماس سلولی در گیاه و افزایش پرولین ذکر نموده‌اند که باعث می‌شود گیاه عناصر موردنیاز خود را برای افزایش اسمولیت-ها بهتر و راحت‌تر جذب و در اختیار داشته باشد. تحت چنین شرایطی، سلول به فعالیت‌های حیاتی خود حتی در شرایط تنش ادامه دهد (Thalooth et al., 2006). بهبود وزن خشک و تر گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) در تیمار کود نانو آهن در مطالعه گزارش شده است (Elfeky et al., 2013). در مطالعه‌ای دیگر بر روی نعناع فلفلی بالاترین وزن تر و خشک بوته در تیمار آبیاری مطلوب و کاربرد ۶ میلی‌گرم در لیتر کود نانو پتاسیم گزارش شد (Saedi et al., 2018).

وزن خشک اندام هوایی

نتایج ترکیبات تیماری آبیاری با محلول‌پاشی عناصر غذایی از لحاظ اثر بر وزن خشک نشان داد با تشدید تنش کم‌آبی وزن خشک گیاه کاهش یافت، درحالی‌که محلول‌پاشی عناصر غذایی به‌خصوص نانو NPK توانست اثر تنش کم‌آبی را بر عملکرد خشک تعدیل نموده و مقدار صفت مذکور را در مقایسه با تیمار شاهد به‌صورت معنی‌داری افزایش دهد. در بررسی حاضر محلول‌پاشی نانو NPK تحت تیماری ۵ روز یک‌بار آبیاری با متوسط ۴۸۲۳/۵ کیلوگرم در هکتار بالاترین مقدار صفت مذکور را به خود اختصاص داد. اختلاف بین تیمار مذکور و تیمار محلول‌پاشی نانو Fe تحت تیماری ۵ روز یک‌بار آبیاری از نظر عملکرد خشک معنی‌دار نبود. کمترین وزن خشک نیز با متوسط ۲۱۵۰/۲ کیلوگرم در هکتار به تیمار شاهد محلول‌پاشی تحت شرایط ۱۰ روز یک‌بار آبیاری اختصاص یافت (جدول ۳). می‌توان گفت کودهای نانو به واسطه ساختار خاص خود و رهاسازی آرام ترکیباتشان تأثیر قابل‌توجهی در جذب عناصر توسط گیاه دارند که موجب افزایش مؤثر جذب عناصر غذایی، فتوسنتز بیشتر و تولید زیست‌توده بیشتری می‌شوند (Gahremani et al., 2014). محلول‌پاشی برگی می‌تواند دسترسی گیاهان به عناصر غذایی موردنیاز در جهت حصول عملکرد بالا تضمین کند. با توجه به اینکه در محلول‌پاشی عناصر غذایی برای مصرف سریع‌تر به‌وسیله گیاه فراهم می‌شود از دیدگاه اکولوژیکی، کود دهی برگی در مقایسه با روش‌های متداول قابل‌قبول‌تر است (Štampar et al., 1998).

همسو با نتایج مطالعه حاضر، آبیار و همکاران (Abyar et al., 2017) دریافتند ارتفاع، فاصله میانگره و وزن تر و خشک گیاه نعناع فلفلی تحت شرایط تنش کم‌آبی کاهش معنی‌داری نشان داد. دلیل افزایش وزن خشک اندام هوایی در تحقیق حاضر در اثر کاربر نانو NPK و آهن را می‌توان به نقش عناصر مذکور در بهبود فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان و کاهش گونه‌های فعال اکسیژن و در نتیجه تولید اتیلن نسبت داد (Waraich et al., 2012). در مطالعه پیرزاد و همکاران (Pirzad et al., 2013) محلول‌پاشی عناصر آهن و روی اثر مثبتی در بهبود عملکرد بیولوژیک گیاه دارویی آنیسون داشتند. در تحقیقی دیگر بر روی نعناع فلفلی بالاترین وزن خشک اندام هوایی تحت شرایط آبیاری مطلوب و استفاده از کمپوست و کمترین مقدار تحت شرایط تنش کم‌آبی و عدم استفاده از کود گزارش شد (Keshavarz et al., 2020).

محتوای پرولین

نتایج مقایسات میانگین تیماری از نظر محتوی پرولین نشان داد با تشدید تنش کم‌آبی محتوی پرولین افزایش نشان داد.

همچنین در هر سه سطح آبیاری، محلول‌پاشی عناصر غذایی به‌صورت معنی‌داری محتوای پرولین را در مقایسه با تیمار شاهد افزایش داد. در این بررسی محلول‌پاشی نانو Zn و نانو Fe تحت تیمار آبیاری ۱۰ روز یک‌بار با متوسط ۱۴/۷۰ و ۱۳/۷۱ میلی‌مول بر گرم وزن تر بالاترین و تیمار شاهد محلول‌پاشی همراه با تیمار ۵ روز یک‌بار آبیاری با متوسط ۵/۱۱ میلی‌مول بر گرم وزن تر کمترین محتوای پرولین را تولید کردند (جدول ۳). یکی از مهم‌ترین پاسخ‌های گیاهان به تنش‌های محیطی افزایش محتوی پرولین در بافت‌های سلولی است. سطوح بالای این ترکیب موجب می‌شود پتانسیل آبی در گیاه پایین نگاه داشته شود و توانایی گیاه برای جذب آب از محیط ریشه افزایش یابد. همچنین پرولین در پاک-سازی رادیکال‌های آزاد تولیدشده در جریان تنش کم‌آبی نقش دارد، بنابراین پرولین در فهرست آنتی‌اکسیدان‌های غیر-آنزیمی قرار می‌گیرد که گیاه جهت جلوگیری از اثرات بازدارنده ROSها می‌تواند از آن‌ها استفاده نماید (Baghbani Arani et al., 2017). زمانی که گیاه تحت شرایط تنش کم‌آبی قرار می‌گیرد تجزیه پروتئین‌ها و تولید آمیدها افزایش می‌یابد تا گیاه قادر به جذب آب از خاک شود. یکی از این آمینواسیدها پرولین است، اتکای گیاه به ترکیبات آلی برای تنظیم اسمزی معمولاً هزینه‌بر بوده و این هزینه به‌وسیله کاهش در عملکرد اقتصادی گیاه جبران می‌شود (Gorgini Shabankareh and Khorasaninejad, 2017). در مطالعه‌ای تنش کم‌آبی ملایم و تنش شدید کم‌آبی محتوای پرولین را در گیاه نعناع فلفلی به ترتیب ۴۲/۵۵ و ۳۶/۳۸ درصد افزایش داد (Ebrahimi-Sborezi et al., 2021). در مطالعه اصل محمدی و همکاران (Asle Mohammadi et al., 2021) محلول‌پاشی آهن و روی تحت شرایط مطلوب و کمبود نیتروژن بر محتوای پرولین در آویشن باغی (*Thymus vulgaris*) افزود. ساعدی و همکاران (Saedi et al., 2018) دریافتند بالاترین محتوی پرولین در نعناع فلفلی به شدیدترین سطح تنش خشکی (۶۰٪ ظرفیت زراعی) و کاربرد ۶ میلی‌گرم در لیتر نانوپتاسیم اختصاص داشت. در تحقیقی دیگر روی گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) بالاترین پرولین و قندهای آزاد محلول در محلول‌پاشی پتاسیم و روی گزارش شد (Abedi Baba-Arabi et al., 2011).

درصد اسانس

در این بررسی با افزایش تعداد روزهای آبیاری از ۵ به ۷ روز بر درصد اسانس گیاه افزوده شد. همچنین محلول‌پاشی عناصر غذایی تحت شرایط آبیاری ۷ و ۱۰ روز درصد افزایش اسانس گیاه را تسریع نمود. نتایج نشان داد تحت شرایط آبیاری ۵ روز یک‌بار محلول‌پاشی عناصر مغذی از درصد اسانس گیاه کاست، درحالی‌که در دو سطح آبیاری ۷ و ۱۰ روز انجام محلول‌پاشی هر چهار تیمار کودی درصد اسانس را در مقایسه با تیمار شاهد به‌صورت معنی‌داری افزایش داد. در این بررسی محلول‌پاشی نانو Fe و نانو NPK تحت شرایط ۷ روز یک‌بار آبیاری با متوسط ۰/۶۷ و ۰/۶۲ درصد بالاترین و تیمار شاهد تحت شرایط آبیاری ۱۰ روز یک‌بار با متوسط ۰/۲۶ درصد کمترین درصد اسانس را به خود اختصاص داد (جدول ۳).

افزایش محتوی اسانس و متابولیت‌های ثانویه در اثر تنش کم‌آبی بیانگر نقش حفاظتی این ترکیبات است که به تحت عنوان عوامل غیر آنتی‌اکسیدانی شناسایی شده‌اند. گزارش شده است که تحت شرایط تنش کم‌آبی مقدار تولید مواد مؤثره جهت جلوگیری از وقوع اکسیداسیون درون‌سلولی افزایش می‌یابد. همچنین به واسطه کاهش سطح اندام‌های رویشی مانند برگ‌ها و اندام‌های هوایی، تعداد غده‌های مترشحه اسانس در این اندام‌ها افزایش یافته و متعاقب آن مقدار اسانس در بوته افزایش نشان خواهد داد (Gorgini Shabankareh and Khorasaninejad, 2017). می‌توان اظهار داشت با بسته بودن روزنه‌های تحت شرایط تنش کم‌آبی از مقدار جذب دی‌اکسید کربن کاسته می‌شود، در نتیجه استفاده از NADPH برای تثبیت کربن از طریق چرخه کالوین کاهش یافته و متعاقب آن NADPH بسیار بیشتر از مقدار موردنیاز سلول شده و فرآیندهای متابولیت‌های ثانویه به سمت سنتز موادی مانند اسانس‌ها هدایت خواهد شد (Selmar and Kleinwachter, 2013). گزارش شده است تنش کم‌آبی مقدار سنتز متابولیت‌های ثانویه را در گیاه افزایش می‌دهد. بر اساس فرضیه موازنه رشد تمایز، هر کمبودی که رشد را بیشتر از فتوسنتز محدود کند، تولید و تجمع متابولیت‌ها ثانویه را افزایش می‌دهد (Herms and Mattson, 1992). افزایش محتوی اسانس در اثر کاربرد کودهای شیمیایی به‌خصوص NPK را می‌توان به نقش این عناصر در توسعه و تقسیم سلول‌های جدید حاوی اسانس، کانال‌های اسانس، مجاری ترشحی و کرک‌های غده‌ای نسبت داد (Salehi, 2011). سنتز ترکیبات ترپنی تحت تأثیر عنصر

نیتروژن قرار می‌گیرد و در تأمین ترکیبات ترپنی از طریق فتوسنتز نقش دارد. همچنین فسفر یک جزء اصلی ATP و NADPH است که انرژی موردنیاز برای تولید ترکیبات ترپنی را مهیا می‌سازد. اسانس‌ها ترکیبات ترپنوئیدی هستند که واحدهای سازنده آن‌ها نیاز ضروری به عناصری مانند نیتروژن و فسفر دارد (Arancon et al., 2004). در مطالعه حسن‌پور و همکاران (Hassanpour Aghdam et al., 2008) در گیاه شاهسپرم (Tanacetm balsamita)، بالاترین میزان اسانس در بالاترین میزان کود پتاسیم و نیتروژن کاربردی گزارش شد. آن‌ها اظهار داشتند که تغذیه مناسب گیاهان در قالب کودهای مختلف، سبب تقویت مسیرهای درگیر در تولید متابولیت‌های ثانویه می‌شود. در تحقیقی بر روی نعناع فلفلی هرچند تنش کم‌آبی بر درصد اسانس این گیاه افزود، اما درصد اسانس تحت شرایط شدید تنش کم‌آبی به‌شدت کاهش نشان داد و حتی به کمتر از شرایط آبیاری مطلوب رسید (Keshavarz et al., 2020) که همسو با نتایج مطالعه حاضر است. در تحقیقی دیگر اگرچه با تشدید تنش کم‌آبی بر درصد اسانس گیاه نعناع فلفلی افزوده شد، اما در کلیه سطوح آبیاری کاربرد کود نیتروژن اثر مثبتی بر افزایش درصد اسانس داشت (Ebrahimi-Sborezi et al., 2021). در مطالعه پیرزاد و همکاران (Pirzad et al., 2013) بالاترین درصد اسانس گیاه دارویی آنیسون در محلول‌پاشی عناصر آهن و روی گزارش شد. ساعدی و همکاران (Saedi et al., 2018) نشان دادند بالاترین درصد اسانس در نعناع فلفلی تحت شرایط تنش متوسط (۸۰ درصد ظرفیت زراعی) به دست آمد. هم‌چنین در مطالعه آن‌ها محلول‌پاشی نانو کود پتاسیم درصد اسانس را به‌صورت معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد افزایش داد.

عملکرد اسانس

بر اساس نتایج مقایسه میانگین تیمارهای برهم‌کنش آبیاری با کوددهی، محلول‌پاشی نانو کود Zn تحت شرایط آبیاری بعد از ۵ روز با متوسط ۲۴/۷۴ تن در هکتار بالاترین عملکرد اسانس را به خود اختصاص داد، هرچند اختلاف بین تیمار مذکور و تیمارهای محلول‌پاشی نانو NPK و نانو Fe در تیمار آبیاری ۷ روز یک‌بار از نظر عملکرد اسانس معنی‌دار نبود. در بررسی حاضر تیمار عدم محلول‌پاشی تحت شرایط آبیاری ۵/۵۹ کیلوگرم در هکتار کمترین عملکرد اسانس را تولید کرد. نتایج مقایسات تیمارهای برهم‌کنش همچنین نشان داد در سطوح آبیاری ۷ و ۱۰ روزه، محلول‌پاشی کلیه تیمارهای کودی به‌صورت معنی‌داری بر عملکرد اسانس افزودند (جدول ۳). در بررسی حاضر عملکرد اسانس از دو جزء وزن ماده خشک و درصد اسانس تشکیل شد، اثر مثبت محلول‌پاشی عناصر غذایی در بهبود عملکرد اسانس در سطوح مختلف آبیاری را می‌توان به اثر مثبت این تیمارها بر روی عملکرد خشک و درصد اسانس در این گیاه نسبت داد.

در تحقیقی بر روی گیاه نعناع فلفلی تنش کم‌آبی عملکرد اسانس در این گیاه را در مقایسه با شرایط آبیاری مطلوب کاهش داد (Keshavarz et al., 2020). در مطالعه امینی و همکاران (Amini et al., 2018) بر روی گیاه زوفا (Hyssopus officinalis L.) بالاترین درصد اسانس و عملکرد اسانس در محلول‌پاشی هم‌زمان عناصر آهن+ منگنز+ روی گزارش شد.

نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به این‌که هدف از کشت نعناع فلفلی عملکرد اسانس این گیاه است، در این مطالعه اگرچه بالاترین عملکرد اسانس به کاربرد نانو Zn تحت شرایط آبیاری ۵ روز یک‌بار اختصاص داشت، بین تیمار مذکور و تیمارهای محلول‌پاشی نانو NPK و نانو Fe در تیمار آبیاری ۷ روز یک‌بار اختلاف معنی‌دار وجود نداشت. تیمارهای مذکور به واسطه جذب سریع‌تر از طریق برگ و بهبود خواص فیزیولوژیک و بیوشیمیایی توانسته‌اند عملکرد اسانس را تحت شرایط تنش ملایم افزایش دهند؛ بنابراین می‌توان اظهار داشت که کاربرد دو کود NPK و Fe به‌صورت نانوذره تحت شرایط تنش کم‌آبی ملایم می‌تواند موجب بهبود عملکرد اقتصادی محصول و صرفه‌جویی در مصرف آب شود، همچنین تحت شرایط تنش کم‌آبی شدید نیز توانست به‌صورت معنی‌داری بر عملکرد اسانس در این گیاه بیفزاید.

منابع

Abedi Baba-Arabi, S., Movahhedi Dehnavi, M., Yadavi, A.R., Adhami, E., 2011. Effects of Zn and K foliar application on physiological traits and yield of spring safflower under drought stress. Journal of Crop Production. 4, 75-95. https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008739.1390.4.1.6.8

Abyar, S., Fakheri, B., Mahdinajad, N., Harati Rad. M., 2017. Effects of different levels of vermicompost on growth indices and essential oils essential oil of peppermint (*Mentha piperita* L.) under different irrigation regimes. Journal of Agronomy and Plant Breeding. 13, 29-42. [In Persian].

Adhikari, T., Kundu, S., Biswas, A. K., Tarafdar, J. C., Subba, R. A., 2015. Characterization of zinc oxide nano particles and its effect on growth of maize (*Zea mays* L.) plant. Journal of Plant Nutrition. 38, 1505-1515. https://doi.org/10.1080/01904167.2014.992536

Aghdasi, S., Modares Sanavy, S.A.M., Aghaalikhani, M., Keshavarz, H. 2018. Effect of foliar application of iron and manganese on yield and yield components of mungbean under water deficit stress. Water and Soil Science Journal. 28, 13-25. [In Persian].

Amini, M., Yousefzadeh, S., Sadat-Asilan, K., 2018. A study on variations of essential oil yield and composition of Hyssopus officinalis L. affected by foliar application of zinc, iron and manganese. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants. 34, 143- 131. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2018.115052.2106

Arancon, N.Q., Edwards, C.A., Bierman, P., Metzger, J.D, Lucht, C., 2005. Effects of vermicomposts produced from cattle manure, food waste and paper waste on the growth and yield of peppers in the field. Pedobiologia. 49, 297–306. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.02.001

Arvin, P., 2019. Study of Different Levels of Nitrogen, Phosphorus and Potassium on Physiological and Morphological Parameters and Essential Oils in Savory Plant (Satureja hortensis L.). Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology). 32, 464-473. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23832592.1398.32.2.15.0

Asle Mohammadi, Z., Mohammadkhani, N., Servati, M., 2021. Effect of iron and zinc foliar application on some biochemical traits of Thymus (*Thymus vulgaris* L.) plant under nitrogen deficiency. Journal of Plant Research is the Iranian Journal of Biology. 34, 1-17. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23832592.1400.34.3.7.8

Baghalian, K., Abdoshah, Sh., Khalighi Sigaroodi, F., Paknejad, F., 2011. Physiological and phytochemical response to drought stress of german chamomile (*Matricaria recutita* L.). Plant Physiology and Biochemistry. 49, 201-207. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2010.11.010

Baghbani Arani, A., Modarres-Sanavy, S.A.M., Mashhadi Akbar Boojar, M., Mokhtassi, Bidgoli, A., 2017. Towards improving the agronomic performance, chlorophyll fluorescence parameters and pigments in fenugreek using zeolite and vermicompost under deficit water stress. Industrial Crop and Products. 109, 346–357. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.049

Cakmak, I., 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification. Plant and Soil. 302, 1-17.

Claussen, W., 2005. Proline as a measure of stress in tomato plants. Plant Science, 168, 241-248. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.07.039

Daneshmandi, M. S., Seyyedi, S. M., 2019. Nutrient availability and saffron corms growth affected by composted pistachio residues and commercial poultry manure in a calcareous soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 50, 1465-1475. https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1626871

Díaz-López, L., Gimeno, V., Simón, I., Martínez, V., Rodríguez-Ortega, W. M., García-Sánchez, F., 2012. Jatropha curcas seedlings show a water conservation strategy under drought conditions based on decreasing leaf growth and stomatal conductance. Agricultural Water Management. 105, 48-56. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.001

Ebrahimi-Sborezi, H., Modarres- Sanavy, S.A.M., Baghbani-Arani, A., 2021. Assessment of morpho-physiological and quantitative and qualitative yield of Peppermint (*Mentha*

piperita L.) under different irrigation regimes and application of different nitrogen fertilizer. Environmental Stress in Crop Science. 14, 425-437. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2019.2893.1744

Elfeky, S. A., Mohammed, M. A., Khater, M. S., Osman, Y. A., Elsherbini, E., 2013. Effect of magnetite nano-fertilizer on growth and yield of *Ocimum basilicum* L. International Journal of Indigenous Medicinal Plants. 46, 1286-1293.

Gahremani, A., Akbari, K., Yousefpour, M., and Ardalani, H., 2014. Effects of nano potassium and nano-valcium chelated fertilizers on qualitative and quantitative characteristics of *Ocimum basilicum*. International Journal for Pharmaceutical Research Scholars, 3, 325-241.

Ghorbanli, M., 2005. Mineral Nutrition of Plants. Tarbiat Modarres University Press. 235pp. [In Persian].

Gorgini Shabankareh, H., Khorasaninejad, S., 2017. The effect of application of different levels of vermicompost on some morphophysiological characteristics and essential oil of peppermint medicinal plant under deficit water. Electronical Journal of Crop Pruduction. 10, 59-74. [In Persian]. https://doi.org/10.22069/EJCP.2018.11699.1899

Gutierrez, F. J., Mussons, M. L., Gatón, P., Rojo, R., 2012. Nanotechnology and Food Industry. Scientific, Health and Social Aspects of the Food Industry, IntechOpen, Croatia Book Chapter.

Hassanpour Aghdam, M.B., Tabatabaie, S.J., Nazemiyeh, H., Aflatuni, A., 2008. N and nutrition levels affect growth and essential oil content of costmary (*Tanacetum balsamita* L.). Food, Agriculture and Environment. 6, 150-154.

Herms, D. A., Mattson, W. J., 1992. The dilemma of plants: To grow or defend. The Quarterly Review of Biology. 67, 283-325.

Jaleel, C.A., Manivannan, P., Wahid, A., Farrooq, M., Dmjm, H., 2009. Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. Journal Agriculture Biology. 11, 100-105.

Janmohammadi, M., Navid, A., Segherloo, A. E., Sabaghnia, N., 2016. Impact of nanochelated micronutrients and biological fertilizers on growth performance and grain yield of maize under deficit irrigation condition. Biologija. 62, 134-147. doi.org/10.6001/biologija.v62i2.3339

Keshavarz, H., Modarres Sanavy, S.A.M., Mehdipour Afra, M., 2018. Organic and chemical fertilizer affected yield and essential oil of two Mint species. Journal of Essential Oil Bearing Plants. 21, 1674-1681. [In Persian]. https://doi.org/10.1080/0972060X.2018.1497545

Keshavarz, H., Modarres-Sanavy, S. A. M., Sefidkon, F., Mokhtassi-Bidgoli, A., 2020. Effect of organic fertilizers and Urea fertilizer on phenolic compounds, antioxidant activity, yeld and yield components of peppermint (*Mentha piperita* L.) under drought stress. Iranian Journal of Field Crops Research. 17, 661-672. [In Persian]. https://doi.org/10.22067/GSC.V17I4.80548

Kheiry, A., Tori, H., Mortazavi, N., 2017. Effects of drought stress and jasmonic acid elicitors on morphological and phytochemical characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants. 33, 268-280. [In Persian].

Kochaki, A., Hosseini. M., 2011. Energy efficiency in crop ecosystems. Ferdowsi University of Mashhad. Iran. Pp: 328. [In Persian].

Lichtenthaler, H.K., Buschmann, C., 2001, Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. Current Protocols in Food Analytical Chemistry, 1: F4.3.1-F4.3.8. https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01

Liu, R., Lal, R., 2015. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. Science of the Total Environment. 514, 131-139. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.104

Mohammadazeh Toutounchi, P., Amirnia, R., 2016. Effect of foliar application of micronutrients on some morphological traits of Fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.). Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants. 32, 301-308. [In Persian]. https://doi.org/10.22092/ijmapr.2016.106564

Moosavi, S.M.R., 2017. Effect of nano-K, potassium sulphate and salicylic acid on tomato growth and control of root-knot nematode (*Meloidogyne javanica*). Plant Protection. 40(3), 71-83. [In Persian].

https://doi.org/10.22055/PPR.2017.18661.1268

Naderi, M.R., Abedi, A., 2012. Application of nanotechnology in agriculture and refinement of environmental pollutants. Journal of Nanotechnology. 11, 18-26.

Peter, K., 2006. Handbook of Herbs and Spices. Woodhead Publishing.

Peyvandi, M, Parandeh, H., Mirza, M., 2011. Comparison of Nano with chelated iron chelated iron on growth performance and activity of antioxidant enzymes basil. What's New in Cellular and Molecular Biology Biotechnology Journal, 4, 89-99. [In Persian].

Pirzad, A. R., Tousi, P., Darvishzadeh, R., 2013. Effect of Fe and Zn foliar application on plant characteristics and essential oil content of anise (*Pimpinella anisum* L.). Iranian Journal of Crop Sciences. 15, 12 -23. [In Persian].

Qureshi, A., Singh, D. K., Dwivedi, S., 2018. Nano-fertilizers: a novel way for enhancing nutrient use efficiency and crop productivity. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 7, 3325- 3335.

Rostami, G., Moghaddam, M., Ghasemi Pirbalouti, A., Tehranifar, A., 2018. The effects of iron and zinc spraying in sulfate and nano forms on morphological and biochemical properties of peppermint (*Mentha piperita* L.) under salinity stress. Environmental Stresses in Crop Sciences.11, 707-720. [In Persian]. https://doi.org/10.22077/escs.2018.870.1170

Saedi, F., Sirousmehr, A., Javadi, T., 2018. Effect of nano-potassium fertilizer on some morpho-physiological characters of peppermint (*Mentha piperita* L.) under drought stress. Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology), 33, 33-45. [In Persian]. https://dorl.net/dor/20.1001.1.23832592.1399.33.1.16.6

Salehi, A., 2011. Effect of vermicompost and zeolite on the quantitative and qualitative performance of *Matricaria Chamomilla* L. in achieving a sustainable agricultural system. Trabiat Modares University. Ph.D. Thesis Tarbiat Modares University Faculty of Agriculture. Iran. [In Persian].

Selmar, D., Kleinwachter, M., 2013. Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants. Industrial Crops and Products. 42, 558- 566.

Smirnoff, N., 1993. The role active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. New Phytologist. 125, 27-28.

Štampar, F., Hudina, M., Dolenc, K., Usenik, V., 1999. Influence of foliar fertilization on yield quantity and quality of apple (*Malus domestica borkh*.). In: Anac, D., Martin-PrÉvel, P. (eds.) Improved Crop Quality by Nutrient Management. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 86. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-0-585-37449-9_21

Subbaiah, L.V., Prasad, T.N., Krishna, T.G., Sudhakar, P.B., Reddy, R., Pradeep, T., 2016. Novel effects of nanoparticulate delivery of zinc on Growth, productivity, and zinc bio-fortification in maize (*Zea mays* L.). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 64, 3778-3788. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00838

Sun, X. P., Yan, H. L., Kang, X. Y., and Ma, F. W., 2013. Growth, gas exchange, and water-use efficiency response of two young apple cultivars to drought stress in two scion-one rootstock grafting system. Photosynthetica. 51, 404-410.

Thalooth, A.T., Tawfik, M.M., Magda Mohamed, H., 2006. A comparative study on the effect of foliar application of zinc, potassium and magnesium on growth, yield and some chemical constituents of mungbean plants grown under water stress conditions. World Journal Agricultural Science. 2, 37-46.

Waraich, E.A., Ahmad, R., Halim, A., Aziz, T., 2012. Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants: A review. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 12, 221-244. https://doi.org/10.4067/S0718-95162012000200003