

The effect of different zinc sources on the morphophysiological and phytochemical characteristics of tomato plant (*Lycopersicon esculentum*) under pot condition

Abbas Hossein Herat¹, Bahman Hosseini^{2*}, Abbas Hassani², MirHassan Rasouli-Sadaghiani³

(Received: June, 2025)

Accepted: August, 2025)

Abstract

A study was conducted to evaluate the effects of different zinc fertilizer sources on morphological, photosynthetic pigment, biochemical, and phytochemical traits of tomato (*Lycopersicon esculentum*) (cv. SAMAR). The experiment followed a completely randomized design with three replications. The different fertilizer source treatments included zinc sulfate, zinc chelate (Zn-EDTA), and Nano-zinc (ZnO NPs) that each applied at three different concentrations (0, 2.5, and 5 mg/kg soil). All treatments and concentrations were added to potting soil. Different plant characteristics such as plant height, stem diameter, fruit weight, fruit yield per plant, chlorophyll a, and chlorophyll b content, beta-carotene, lycopene, vitamin C, total phenolic content, total flavonoid content, in fruit were measured. There was a significant difference between fertilizer sources. The maximum plant height (104.33 cm), the largest stem diameter (10.48 mm), and the largest fruit weight (133 g) were observed in the 5 mg nano-zinc concentration, and the minimum height (74 cm), stem diameter (11.8 mm), and the lowest fruit weight (69.66 g) were observed in the control treatment. All various zinc sources significantly improved the studied traits compared to the control. In all traits, nano zinc showed a greater effect in improving morphological indices, photosynthetic pigments, and biochemical parameters.

Key words: Chlorophyll, Nanozinc, Plant Yield, Phenol Content, Zinc Sulfate.

Hossein Herat A., Hossein B., Hassani A., Rasouli-Sadaghiani M. 2025. The effect of different zinc sources on the morphophysiological and phytochemical characteristics of tomato plant (*Lycopersicon esculentum*) under pot condition. *Applied Soil Research*, 14(1): 51-71.

1- PhD student, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Urmia University

2- Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran

3- Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Urmia University, Iran

*Corresponding author email: b.hosseini@urmia.ac.ir

تأثیر منابع مختلف روی بر برخی ویژگی های مورفوفیزیولوژیکی و فیتوشیمیایی گیاه گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) در شرایط گلدانی

عباس حسین هراط^۱، بهمن حسینی^{۲*}، عباس حسنی^۲، میرحسن رسولی صدقیانی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

چکیده

به منظور بررسی تأثیر منابع مختلف کود روی، بر برخی شاخص های مورفولوژیکی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) رقم SAMAR، آزمایش گلدانی در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام شد. منابع مختلف کود روی شامل سولفات روی ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)، کلات روی ($Zn-EDTA$) و نانو اکسید روی (ZnO NPs) بودند که هر کدام در سه غلظت شامل ۰، ۲/۵ و ۵ میلی گرم روی عنصری بر کیلوگرم به خاک گلدان ها اضافه شدند. صفات گیاهی نظیر ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن میوه، عملکرد میوه در بوته، محتوی کلروفیل a، کلروفیل b، بتاکاروتن، لیکوپن، ویتامین C، محتوای فنل و فلاونوئید کل در میوه به طور معنی داری تحت تأثیر کاربرد منابع مختلف روی قرار گرفتند. بر اساس نتایج به دست آمده، منابع مختلف کود روی، بر همه شاخص های مورد اندازه گیری اثر مثبت و افزایشی داشت و بین منابع کودی اختلاف معنی داری وجود داشت. حداکثر ارتفاع گیاه (۱۰۴/۳۳ سانتی متر) بیشترین قطر ساقه (۱۰/۴۸ میلی متر) و بیشترین وزن میوه (۱۳۳ گرم) در غلظت ۵ میلی گرم نانو روی و حداقل ارتفاع (۷۴ سانتی متر)، قطر ساقه (۸/۱۱ میلی متر) و کمترین وزن میوه (۶۹/۶۶ گرم) در تیمار شاهد مشاهده گردید. در همه صفات، نانو اکسید روی تأثیر بیشتری در بهبود شاخص های مورفولوژیکی، رنگیزه های فتوسنتزی و بیوشیمیایی نشان داد و تأثیر غلظت ۵ میلی گرم در کیلوگرم نانو روی در مقایسه با غلظت ۲/۵ میلی گرم در کیلوگرم و سایر تیمارها بیشتر بود. در مجموع یافته های این تحقیق نشان داد که کاربرد نانو کود روی در غلظت ۵ میلی گرم در کیلوگرم به منظور تولید اقتصادی، ارتقاء کیفیت تغذیه ای و بازاریابی محصول قابل توصیه است.

واژه های کلیدی: سولفات روی، عملکرد میوه، کلروفیل، محتوای فنل، نانوروی

حسین هراط ع.، حسینی ب.، حسنی ع.، رسولی صدقیانی م. ۱۴۰۴. تأثیر منابع مختلف روی بر برخی ویژگی های مورفوفیزیولوژیکی و فیتوشیمیایی گیاه گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) در شرایط گلدانی. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۴، شماره ۱. ص: ۵۱-۷۱.

۱- دانشجوی دکتری گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

۲- استاد گروه علوم باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

۳- گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

* پست الکترونیک: b.hosseini@urmia.ac.ir

مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش کمیت و کیفیت محصول و مواد مغذی حیاتی به منظور برآوردن نیازهای غذایی جمعیت رو به افزایش بشر، مورد توجه زیادی قرار گرفته است (Paria *et al.*, 2022). از سوی دیگر میزان تولیدات گیاهی به دلیل بروز انواع تنش‌های محیطی نظیر کمبود مواد غذایی دچار کاهش شده است. مواد معدنی جزء عوامل موثری هستند که بر سلامت گیاه و همچنین عملکرد محصول تأثیر می‌گذارند (Kusale *et al.*, 2021). در خاکهای فقیر از نظر مواد غذایی، ریشه‌ها قادر به جذب و انتقال مواد غذایی نبوده و بنابراین توانایی گیاه برای تولید عملکرد مناسب وابسته به مقدار عناصر غذایی خاک هست که از محیط دریافت می‌کند. در نتیجه رشد و باردهی مطلوب شدیداً تحت تأثیر دریافت و جذب عناصر غذایی از خاک خواهد بود (Bhatla *et al.*, 2018). در چنین شرایطی برای جبران کمبود عناصر غذایی در خاک، از کودها به عنوان منبع اصلی تغذیه گیاهان استفاده می‌شود (Kusale *et al.*, 2021). برای اطمینان از اینکه گیاهان می‌توانند مواد غذایی را جذب کنند، کودها با مواد مغذی تکمیل می‌شوند. از سوی دیگر، استفاده از کودهای معمولی لزوماً منجر به تولید محصول مناسب نمی‌شود. کودهای معمولی بازده استفاده از مواد مغذی را به ترتیب ۳۵-۳۰ درصد، ۲۰-۱۸ درصد و ۴۰-۳۵ درصد برای نیتروژن، فسفر و پتاسیم دارند. (Takeshima *et al.*, 2020). تغذیه سالم از جمله عوامل مهم در پیش‌گیری از بیماری‌های مزمن و به دنبال آن بهبود انرژی و مدیریت وزن می‌باشد. امروزه استفاده از محرک‌های زیستی گیاهی و مکملهای کودی، ابزاری ضروری مدیریت یکپارچه بخش کشاورزی بوده که به پایداری و انعطاف‌پذیری کشاورزی کمک می‌کنند (Hamid *et al.*, 2021). این ممکن است با روش‌های مختلفی انجام شود، مانند تأمین محرک‌های زیستی یا اجرای تعدادی از راهبردهای تغذیه گیاهی، مانند تکمیل غذا با عناصر کمیاب که معمولاً در رژیم غذایی معمولی انسان وجود ندارد (Yakhin *et al.*, 2016).

روی (Zn) یک عنصر غذایی ضروری و کم‌مصرف برای رشد و نمو گیاه محسوب می‌شود که کمبود و بیش‌بود آن برای

سیستم‌های بیولوژیکی در غلظت‌های خاص، یعنی ناکافی یا مضر و بالای محدوده بهینه، نقش مهمی در بیوشیمی و متابولیسم گیاهان دارد. این عنصر به چندین فعالیت سلولی و فیزیولوژیکی گیاهان کمک می‌کند و باعث رشد، نمو و عملکرد گیاه می‌شود. روی یک جزء مهم ساختاری، آنزیمی و تنظیم کننده بسیاری از پروتئین‌ها و آنزیم‌ها است (Van De Mortel *et al.*, 2006). عنصر روی علاوه بر نقش خود به عنوان یک عامل کلیدی برای حفظ یکپارچگی ساختاری ریبوزوم‌ها، نقش‌های بیولوژیکی و شیمیایی مهم دیگری را در گیاهان ایفا می‌کند، از جمله این نقش‌ها می‌توان به تنظیم و فعال‌سازی ژن، سنتز پروتئین، دخالت در متابولیسم کربوهیدرات‌ها و دخالت در فعالیت غشاءهای زیستی اشاره کرد. علاوه بر این، تعامل بین فسفولیپیدهای روی و خوشه‌های سولفیدریل پروتئین‌های غشایی، سبب افزایش پایداری غشا می‌شود (Bhatla & Kathpalia, 2018). تخمین زده می‌شود که بیش از ۳۰ درصد خاک‌های کشاورزی در جهان از کمبود روی رنج می‌برند و کمبود آن در خاک یک نگرانی بین‌المللی است. از طرفی دخالت فیزیکیوشیمیایی روی در سیستم‌های خاک-گیاه در نتیجه دسترسی ناکافی روی در خاک بویژه در خاک‌های آهکی و با pH بالا یکی از ملاحظات اصلی برای تغذیه گیاه است که منجر به کاهش قابل توجهی در تولید و محتوای مواد مغذی گیاه می‌شود و بنابراین تولید محصول کمتر و ارزش غذایی میوه‌ها، دانه‌ها، مشتقات دانه‌ها و سایر غذاها کاهش می‌یابد (Saleem *et al.*, 2024). عنصر روی می‌تواند به شکل کلات روی، نانو روی و کودهای حاوی روی مورد استفاده گیاه قرار گیرد. کلات‌کننده‌ها یکی از محرک‌های زیستی است که به تدریج به محیط وارد می‌شوند تا فرآیندهای فیزیولوژیکی در گیاهان را تحت تأثیر قرار داده و تولید را افزایش دهند. برخی از محرک‌های زیستی نیز می‌تولند به عنوان تقویت‌کننده زیستی عمل کنند و جذب مواد معدنی و فراهمی زیستی گیاهان را افزایش دهند (Hawrylak-Nowak, 2022).

نانوذرات مولکول‌های کوچکی هستند (لندازه‌های بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) که خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتی نسبت به سایر مواد حجیم دارند (Reda *et al.*, 2021). نانو کودها

بصری کمبود ناشی از آن غلبه کند. بنابراین استفاده از ترکیبات غذایی روی در خاک گزینه بهتری می‌تولند باشد (Verma et al., 2023).

تأثیر کاربرد منابع مختلف کودهای روی در مطالعات مختلفی بررسی شده است. به طور مثال، در مطالعه‌ای تأثیر نانواکسیدروی بر رشد و واکنش‌های فتوسنتزی گیاه گوجه‌فرنگی توسط Faizan و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که کاربرد نانو روی منجر به افزایش ارتفاع بوته، شاخص کلروفیل، رنگیزه‌های فتوسنتزی و میزان فتوسنتز خالص شد. در مطالعه‌ای دیگر، نقش کود آلی و سولفات روی در کشت مرزه (*Satureja hortensis* L.) مورد بررسی قرار گرفت. فاکتورهای آزمایشی شامل کود آلی با چهار سطح (۰، ۳، ۶ و ۹ تن در هکتار) و فاکتور دوم سولفات روی با چهار سطح (۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک) بود. نتایج به دست آمده نشان داد که کاربرد کود آلی و سولفات روی منجر به افزایش ارتفاع گیاه، افزایش میزان کلروفیل و بهبود میزان جذب عناصر شد (Raei et al., 2023). در پژوهشی دیگر به منظور مقایسه رشد، عملکرد و ترکیبات فیتوشیمیایی ریحان (*Ocimum basilicum*) اثر محلول پاشی عناصر ریز مغذی توسط Aghamirzaei و همکاران (۲۰۲۴) انجام شد. سولفات روی در غلظت ۰/۱ درصد مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به دست آمده بیانگر افزایش پارامترهای رشدی مانند ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک گیاه، بهبود محتوای فنلی و فلاونوئیدی بود.

گوجه‌فرنگی با نام علمی *Solanum lycopersicum* Miller گیاهی علفی و چندساله از تیره بادمجانیان (Solanaceae) می‌باشد که در مناطق معتدل و سردسیر به صورت یکساله کشت می‌شود. این گیاه از رایج‌ترین محصولات در سبزیجات مصرفی می‌باشد و به صورت تازه خوری و فراوری شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از ترکیبات اساسی آن می‌توان به لیکوپن اشاره کرد که حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد محتوای کل کاروتنوئید گیاه گوجه‌فرنگی را تشکیل می‌دهد (Shi & Maguer, 2000). بتاکاروتن، عنوان پیش ساز رژیمی قوی ویتامین A، تقریباً ۷ درصد محتوای کاروتنوئید گوجه فرنگی را تشکیل می‌دهد (Soytong et al., 2021; Tufail et al., 2024). اسیدآسکوربیک موثرترین آنتی‌اکسیدان در گیاهان و

مواد مغذی را به شکل نانو فراهم می‌کنند و منجر به افزایش رشد و تولید محصولات کشاورزی می‌شوند (Dimkpa & Bindraban, 2016). بر اساس نیاز گیاهان، نانوکودها را می‌توان به سه بخش، نانو کودهای ماکرو، نانوکودهای میکرو و کودهای نانوذره تقسیم کرد (Chhipa & Joshi, 2016; Devi et al., 2023). آن‌ها مواد مغذی را به شکل قابل دسترس در اختیار گیاهان قرار می‌دهند، بنابراین جذب مواد مغذی و در نتیجه تولید را افزایش می‌دهند. از ویژگی‌های مهم نانوکودها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) تحویل مناسب مواد مغذی برای افزایش رشد محصول از طریق خاک و محلول پاشی، (۲) منابع مقرون به صرفه و پایدار از مواد مغذی برای گیاهان هستند و (۳) نقش کلیدی در کاهش آلودگی محیط زیست دارند (Guru et al., 2015). استفاده از نانوکودها از طریق مقرون بودن، ظرفیت گیاه را برای استقرار محصولات در شرایط مختلف محیطی افزایش می‌دهد (Devi et al., 2023).

نانوذرات اکسید روی (ZnO) یکی از نانوکودهای میکرو است و تأثیر قابل توجهی بر افزایش رشد و تولید گیاه نشان داده‌اند. نانوذرات اکسید روی، روی را به عنوان یک ماده مغذی مهم برای تنظیم فرآیندهای اساسی گیاه، از جمله جوانه‌زنی، سنتز رنگدانه‌های فتوسنتزی، بیان ژن، متابولیسم و تکثیر سلولی فراهم می‌کند (Saleem et al., 2024). کلات‌های روی مانند Zn-EDTA منبع رایجی هستند که برای کاهش کمبود روی در گیاهان استفاده می‌شود. کلات‌ها به عنوان موثرترین منبع ریزمغذی‌های گیاهی در نظر گرفته می‌شوند (Alloway et al., 2009). کلات‌ها (عوامل کیلیت‌کننده) به قدری در محیط پایدار هستند که می‌توانند تا حد زیادی در تسریع حرکت روی و سایر فلزات کمک کنند (Rodella & Chiou, 2009). سولفات روی به دلیل حلالیت بالا و هزینه کم، پرمصرف‌ترین کود است. با این حال، کارایی سولفات روی در تامین روی برای گیاهان بسیار پایین فرض می‌شود (Amer et al., 1980). لذا استفاده از کودهای موثرتر در افزایش کارایی گیاه توصیه می‌شود.

کودهای حاوی عنصر روی را می‌توان در خاک یا با محلول پاشی بر روی برگ‌ها مورد استفاده قرار داد. با این حال، محلول پاشی روی تنها می‌تواند بر علائم و نشانه‌های

یک ماده فیتوشیمیایی مهم در میوه گوجه فرنگی نیز می‌باشد (Gao et al., 2023). میوه گوجه‌فرنگی بدلیل داشتن محتوای فیبر نسبتاً بالا، مواد معدنی، فلاونوئیدها، ویتامین‌ها و منبع کالری محدود، به یک غذای کاربردی عالی تبدیل شده است و نیازهای تغذیه‌ای اساسی و مهم را برآورده می‌کند (Tufail et al., 2024).

خاک‌های آهکی در کشور بسیار حاکم هستند و عنصر روی در این خاک‌ها به دلیل اینکه به حالت نامحلول تبدیل می‌شود و همچنین رقابت عنصر کلسیم با روی و به تبع کاهش میزان روی روی در محصولات کشاورزی و افت کمی و کیفی آنها، این پژوهش با هدف بررسی اثرات انواع منابع کود بر روی عملکرد، ویژگی‌های فیتوشیمیایی، مورفولوژیکی گیاه گوجه فرنگی در جذب روی از خاک انجام گردید.

مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر به صورت یک آزمایش گلدانی، در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، در قالب طرح کاملاً تصادفی و در سه تکرار انجام گرفت. برای انجام این مطالعه از بذور گوجه‌فرنگی رقم SAMAR (NONGWOO BIO- Korea) استفاده شد. بذره‌های خریداری شده به منظور تهیه نشاء در سینی‌های کشت و در شرایط گلخانه کشت داده شدند. خاک مورد نیاز آزمایش از خاک سطحی (۰-۲۰

سانتیمتری) منطقه قره‌باغ بین ارومیه و سلماس تهیه شد و مقدار روی قابل دسترس (قابل استخراج با DTPA) در خاک مورد آزمایش پایین و ۰/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۱). خاک با الک پنج میلی‌متر الک شد و سپس سه منبع کود روی شامل سولفات روی، کلات روی (Zn-EDTA) و نانوکود روی (شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان-ایران) با مشخصات (اندازه ۱۸ نانو متر، خلوص ۹۹.۹۵٪، مساحت سطح ویژه ۷۰-۴۰ متر مربع بر گرم، رنگ سفید شیری، شکل کروی و تک کریستال) در سه غلظت صفر، ۲/۵ و ۵ میلی‌گرم روی در کیلوگرم خاک به طور جداگانه و یکنواخت به خاک‌ها افزوده شدند. مدت پرورش نشاء سه هفته بود و پس از آن نشاءها به گلدان‌های ۱۰ کیلوگرمی با سوراخهایی در انتها جهت زهکشی انتقال داده شدند. برای تامین عناصر غذایی مورد نیاز، محلول غذایی مختص گوجه‌فرنگی با نسبت آمونیوم به نترات ۳۰:۷۰ تهیه شده و در هفته (۵۰۰ میلی لیتر) سه بار به گیاهان داده شد. آبیاری گلدانها بصورت وزنی و با توجه به ظرفیت زراعی خاک (۲۱ درصد) انجام گردید. در انتهای آزمایش (پس از رسیدن کامل بقیه میوه‌ها) برخی از ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی و بیوشیمیایی به شرح ذیل مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. صفات مورفولوژیکی: شامل ارتفاع بوته بوسیله خط کش، قطر ساقه توسط کولیس دیجیتالی، وزن متوسط میوه و عملکرد میوه در بوته توسط ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شدند.

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1: Some physical and chemical properties of soil

pH	EC	OC	CaCO ₃	Soil Texture	N	P	K	Fe	Zn	Cu	Mn
	dS m ⁻¹	%	%		%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
7.19	0.91	0.31	9.62	SL	0.07	1.55	166	4.37	0.20	0.56	2.71

EC; electrical conductivity, OC; organic carbon, SL; silty loam

داده شد و میزان جذب در طول موج ۵۰۵ نانومتر قرائت گردید. مقدار لیکوپن با استفاده از ضریب خاموشی آن ۳۴۰۰ محاسبه شد (Davies, 1976).

میزان ویتامین C

برای تعیین ویتامین C از روش تیتراسیون در حضور ید در یدورپتاسیم و معرف نشاسته ۱ درصد استفاده گردید (Majedi, 1994). برای این منظور ابتدا ۱۰ میلی لیتر ید ۰/۰۱ نرمال را در بالن ۱۰۰ میلی لیتری ریخته و ۱/۶ گرم یدور پتاسیم به آن اضافه شد و با آب مقطر، بالن به حجم رسانده شد. سپس نشاسته ۱ درصد تهیه شد، برای این منظور ۱ گرم پودر نشاسته در یک بالن ۱۰۰ میلی لیتری ریخته و چند قطره آب مقطر سرد به آن اضافه شد و به خوبی حل گردیدند، سپس ۹۰ میلی لیتر آب مقطر در حال جوش به آن اضافه کرده و روی هیتر گذاشته تا زمانی که محلول شفاف به دست می آید، روی هیتر بهم زده می شود و سپس توسط آب مقطر به حجم رسانده شد. برای اندازه گیری ویتامین C، ۵ میلی لیتر آب میوه در یک ارلن ۲۵۰ میلی لیتر ریخته شد و ۲۰ میلی لیتر آب مقطر به آن اضافه شد، محلول به دست آمده با استفاده از ید در یدور پتاسیم، در حضور ۲ میلی لیتر معرف نشاسته ۱ درصد به خوبی تیترا شدند تا رنگ آبی ظهور پیدا کند. در نهایت میزان ویتامین C از رابطه ۲ محاسبه شد.

رابطه ۲:

$$\% \text{ Ascorbic acid} = \frac{0.88 \times V}{\text{juice volume (cc)}} \times 100$$

Ascorbic acid: میزان ویتامین C بر حسب میلی گرم در ۱۰۰ میلی لیتر آب میوه، V: حجم ید در یدور پتاسیم مصرفی بر حسب میلی لیتر، ۰/۸۸: عدد ثلثت و بیانگر ۱ میلی لیتر ید ۰/۰۱ نرمال، برابر با ۰/۸۸ میلی گرم ویتامین C

محتوی فنل میوه

جهت اندازه گیری فنل کل از معرف فولین سیوکالتیو استفاده شد. برای انجام این کار ابتدا مقدار ۳۰ میکرو لیتر عصاره غلیظ تهیه شده با متانول ۸۰ درصد در داخل لوله آزمایش

میزان رنگیزه های فتوسنتزی

تعیین رنگیزه های فتوسنتزی به روش Lichtenthaler (۱۹۸۷) انجام گرفت. ۰/۱ گرم از برگ های کامل توسعه یافته با قیچی خرد شده و در یک هاون چینی با ۵ میلی لیتر استون ۱۰۰ درصد سائیده تا به صورت توده یکنواختی درآید و عمل سائیدن و له کردن بافت برگ در محیط خنک و در نور کم انجام شد. سپس نمونه ها در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۲۵۰۰ دور به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده شد. عصاره جدا شده فوقانی حاصل از سانتریفیوژ به لوله شیشه ای انتقال داده شد. جهت تنظیم دستگاه اسپکتروفتومتر از استون استفاده گردید. در پایان مقدار ۲ میلی لیتر از نمونه داخل لوله در سل اسپکتروفتومتر ریخته شد و سپس به طور جداگانه در طول موج های ۶۴۵، ۶۶۳ و ۴۷۹ نانومتر مورد قرائت قرار گرفت. در نهایت با استفاده از فرمول های زیر میزان کلروفیل a و b و بتاکاروتن بر حسب میلی گرم بر گرم وزن تر نمونه ها از رابطه ۱ محاسبه شد.

رابطه ۱:

$$\begin{aligned} \text{Chlorophyll a (mg/g FW)} &= 11.75 \times (\text{OD663}) - 2.350 \times (\text{OD645}) \times (V/(1000 \times W)) \\ \text{Chlorophyll b (mg/g FW)} &= 18.61 \times (\text{OD645}) - 3.96 \times (\text{OD663}) \times (V/(1000 \times W)) \\ \beta\text{-carotene} &= 0.8 A_{479} - 0.0312 A_{645} + 0.039 a_{663} - 0.005 \end{aligned}$$

V: حجم نمونه، W: وزن تر نمونه برگی

میزان لیکوپن

با توجه به حلالیت لیکوپن در حلال های آلی و پژوهش های انجام شده در این راستا، حلال هگزان و استون برای استخراج لیکوپن استفاده شد. مقدار ۰/۳ گرم از پوست گوجه فرنگی را به وسیله نیتروژن مایع منجمد و پودر کرده و پودر حاصل را با ۱۰ میلی لیتر از محلول هگزان: استون به نسبت ۲:۱ عصاره گیری نموده و سوسپانسیون حاصل به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با دور ۵۰۰۰ قرار داده شد. لایه بالایی سوسپانسیون خارج شده و در دستگاه اسپکتروفتومتر قرار

معادل کوئرسستین بر گرم وزن تر گیاه گزارش شد (Chang et al., 2002).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

برای انجام تجزیه واریانس و مقایسه میانگین صفات مورد بررسی، از نرم افزار SAS نسخه ۹/۲ استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۱ درصد انجام گرفت. همچنین، برای رسم نمودار از نرم افزار Excel 2016 استفاده گردید.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج به دست آمده از جدول تجزیه واریانس داده‌ها مشخص شد که کاربرد منابع کودی روی (کلات روی، نانو روی و سولفات روی) بر شاخص‌های مورفولوژیکی (ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن متوسط میوه و عملکرد میوه در بوته)، رنگیزه‌های فتوسنتزی (کلروفیل a و کلروفیل b)، میزان بتاکاروتن، لیکوپن و شاخص‌های فیتوشیمیایی (فنل و فلاونوئید کل میوه) در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

ریخته و ۹۰ میکرولیتر آب مقطر به آن اضافه گردید. پس از آن ۶۰۰ میکرولیتر فولین ۱۰ درصد (۱۰ میلی‌لیتر فولین با ۹۰ میلی‌لیتر آب مخلوط شد) به آن‌ها اضافه و بعد از گذشت ۵-۱۰ دقیقه ۴۸۰ میکرولیتر کربنات سدیم ۷/۵ درصد به آن افزوده شد و پس از قراردادن به مدت نیم ساعت در تاریکی و در دمای اتاق، جذب نمونه‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۷۶۰ نانومتر قرائت شد. جهت رسم منحنی استاندارد از اسید گالیک استفاده شد. میزان فنل کل عصاره‌ها براساس میلی‌گرم معادل اسید گالیک بر گرم وزن تر گزارش شد (Ebrahimzadeh et al., 2008).

محتوی فلاونوئید میوه

برای اندازه‌گیری فلاونوئید کل از معرف آلومینیوم کلراید استفاده شد. ابتدا به ۵۰۰ میکرولیتر از هر عصاره، ۱/۵ میلی لیتر متانول ۸۰٪، ۱۰۰ میکرولیتر محلول آلومینیوم کلراید ۱۰ درصد، ۱۰۰ میکرولیتر محلول استات پتاسیم ۱ مولار و ۳/۸ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شد. جذب مخلوط بعد از گذشت ۴۰ دقیقه در طول موج ۳۸۰ نانومتر نسبت به شاهد قرائت گردید. برای رسم منحنی استاندارد از کوئرسستین استفاده شد. میزان فلاونوئید کل عصاره‌ها براساس میلی‌گرم

جدول ۲- تجزیه واریانس برخی پارامترهای مورد بررسی مربوط به گیاه گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum*) در اثر کاربرد منابع مختلف

کودی روی

Table 2. Analysis of variance of certain parametres of tomato (*Lycopersicon esculentum*) as affected by the application of various zinc fertilizer sources

Sources of variation	Df	Mean Square										Fruit flavonoids
		Plant height	Stem diameter	Fruit weight	Fruit yield	Chlorophyll a	Chlorophyll b	Beta-carotene	Lycopene	Fruit vitamin C	Fruit total phenolics	
Fertilizer sources	6	255.93**	1.78**	1024.7**	0.368**	3.88**	0.954**	0.033**	0.167**	415.81**	5.86**	0.44**
Error	14	14.38	0.204	21.71	0.008	0.125	0.043	0.0039	0.0061	9.71	0.46	0.037
Coefficient of variation (%)		4.16	4.71	4.49	4.99	4.18	5.53	11.32	6.62	3.66	7.31	4.62

** Significant at 1% probability level

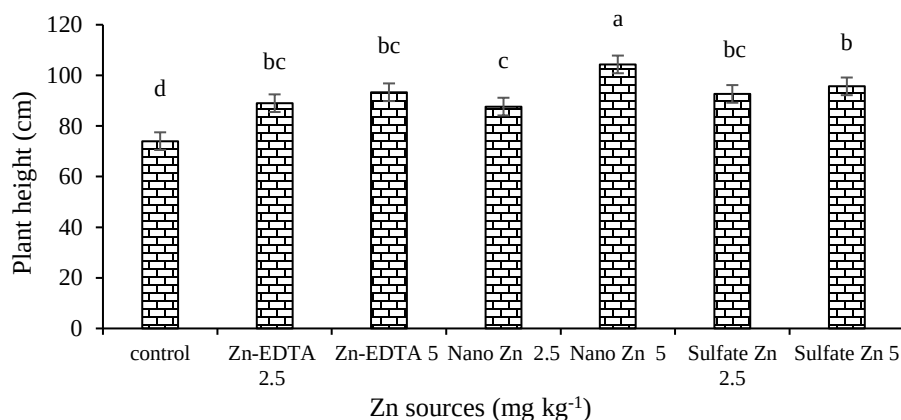
در هر سه منبع با افزایش غلظت، ارتفاع بوته افزایش نشان داد و البته اختلاف بین غلظت‌های مختلف کاربرد کلات روی و سولفات روی از این نظر معنی‌دار نبود. بیشترین ارتفاع

ارتفاع بوته

نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد روی منجر به افزایش ارتفاع بوته نسبت به شاهد شد.

منجر به افزایش ۴۰/۹۸ درصدی ارتفاع بوته در مقایسه با شاهد شد (شکل ۱).

بوته در غلظت ۵ میلی گرم در کیلوگرم نانوروی مشاهده گردید که دارای اختلاف معنی داری با سایر تیمارها بود و



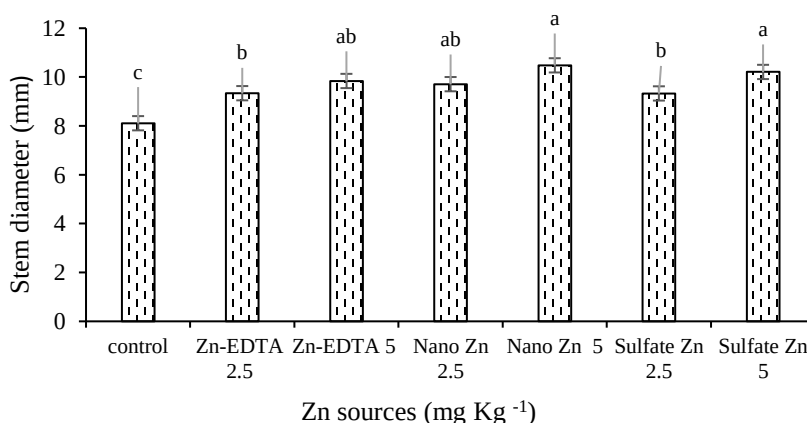
شکل ۱- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر ارتفاع بوته در گیاه گوجه فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 1. Mean comparison of different Zn sources on tomato plant height. Different letters show significant difference at 1% according to Duncan test. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test

(۱۰/۴۸ میلی متر) در غلظت ۵ میلی گرم در کیلوگرم نانوروی بدست آمد، که اختلاف معنی داری با کلات روی و سولفات روی ۵ میلی گرم در کیلوگرم و نانوروی ۲/۵ میلی گرم در کیلوگرم نداشت (شکل ۲).

قطر ساقه

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها مشخص شد که با افزایش غلظت در هر سه منبع کودی عنصر روی، قطر ساقه افزایش یافت به طوری که قطر ساقه در تیمار شاهد به طور معنی داری کمتر از تیمارهای کاربرد کود روی بود. بیشترین قطر ساقه



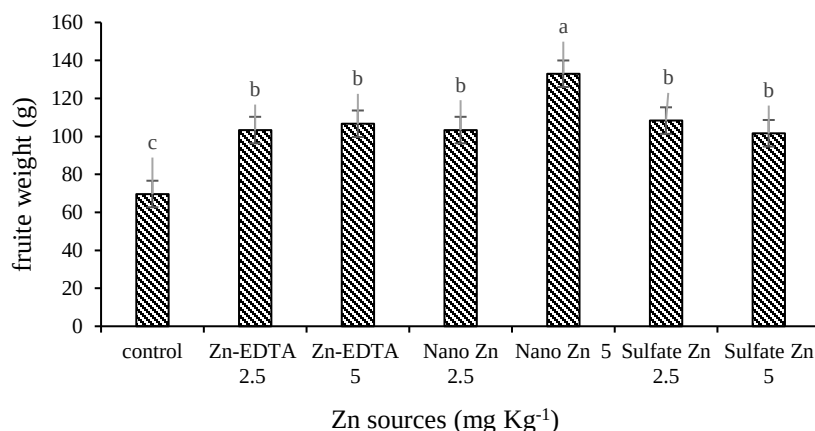
شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر قطر ساقه در گیاه گوجه فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 2. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on stem diameter in tomato plant cultivar SAMAR. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test

آب نسبتاً کند است و تنها ۲ درصد روی در عرض ۲۴ ساعت از نانوذره آزاد می‌شود (Reed *et al.*, 2012)، بنابراین پس از اتصال نانوذرات روی به سطح برگ‌های گوجه‌فرنگی، یون روی ممکن است به طور مداوم آزاد شوند و منبع طولانی از روی را فراهم کنند.

وزن متوسط میوه

طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، کاربرد منابع مختلف روی باعث افزایش وزن میوه گوجه‌فرنگی شدند. بیشترین وزن میوه (۱۳۳ گرم) در تیمار ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نانو روی و کمترین وزن میوه (۶۹/۶۶ گرم) نیز در تیمار شاهد بدست آمد که دارای اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها بودند. همچنین اختلاف بین غلظت‌های ۲/۵ و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کلات روی و سولفات روی با ۲/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوروی معنی‌دار نبود (شکل ۳).



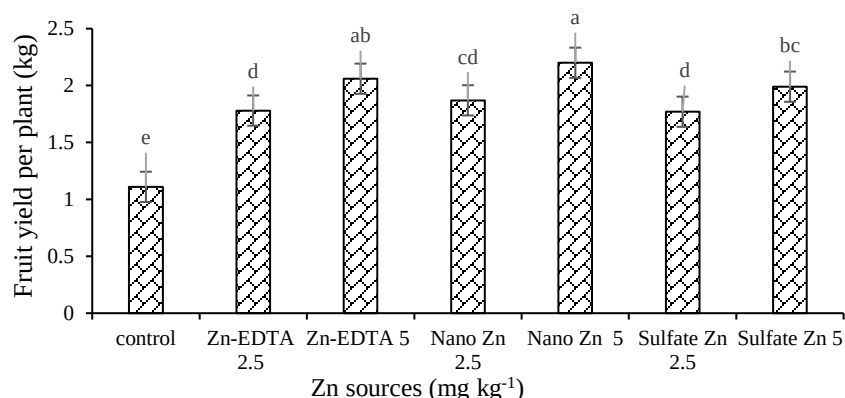
شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر وزن میوه در گیاه گوجه‌فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 3. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on fruit weight in tomato plant cultivar SAMAR. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test

معنی‌داری با سایر تیمارها به غیر از کلات روی ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم داشت. کمترین عملکرد میوه (۱/۱۱ کیلوگرم در بوته) نیز در تیمار شاهد مشاهده شد که دارای اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها بود (شکل ۴).

عملکرد میوه در بوته

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، کاربرد هر سه منبع کودی منجر به افزایش عملکرد میوه در بوته گوجه‌فرنگی شد. بیشترین عملکرد میوه (۲/۲ کیلوگرم در بوته) در غلظت ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوروی بدست آمد، که اختلاف



شکل ۴- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر عملکرد میوه در گیاه گوجه‌فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 4. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on fruit yield in tomato plants of the SAMAR cultivar. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test

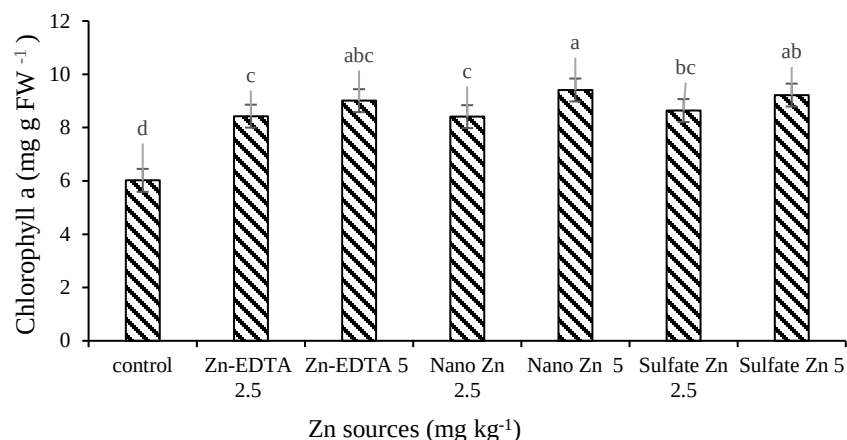
زیستی روی برای گیاهان می‌شود که باعث افزایش رشد گیاه و تولید بیشتر میوه می‌شود. تیمارهایی که روی استفاده نشد (شاهد)، میزان تولید ماده خشک کمتری را نسبت به تیمار روی اعمال شده نشان دادند (Ellison *et al.*, 2013). گزارش شده است که نانوذرات روی به دلیل اوره پوشش داده شده، به طور مداوم در دسترس گیاه قرار می‌گیرد و نیاز گیاه به عنصر روی را برآورده می‌کند (Trenkel, 2021) و لذا وزن تر و عملکرد گیاه را افزایش می‌دهد (Adil *et al.*, 2022).

کلروفیل a

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیانگر افزایش میزان کلروفیل a در نتیجه کاربرد منابع کودی روی بود. در هر سه منبع کودی با افزایش غلظت، میزان کلروفیل a افزایش یافت. بیشترین میزان کلروفیل a (۹/۴۱ میلی‌گرم در گرم وزن تر) در غلظت ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوروی بدست آمد که تفاوت معنی‌داری با غلظت ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم کلات روی و سولفات روی نداشت. کمترین میزان کلروفیل a (۶/۰۲ میلی‌گرم در گرم وزن تر) نیز در تیمار شاهد مشاهده شد که اختلاف معنی‌داری با سایر تیمارها داشت (شکل ۵).

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که کاربرد روی منجر به افزایش عملکرد میوه در بوته گوجه‌فرنگی شد. عنصر روی در بهبود تولید هورمون اکسین نقش دارد. تولید این هورمون منجر به افزایش سطح برگ و نهایتاً افزایش تعداد میوه در هر گیاه می‌شود (Marschner *et al.*, 2012). علاوه بر این برخی منابع گزارش کرده‌اند که محلول‌پاشی عنصر روی از طریق کاهش ریزش میوه، منجر به افزایش تعداد میوه و عملکرد در گیاهان می‌شود (Razzaq *et al.*, 2013). در تأیید نتایج مطالعه حاضر، Zhang و همکاران (۲۰۱۴) گزارش کردند که کاربرد عناصر آهن و روی منجر به افزایش تعداد میوه و عملکرد در نارنگی (*Citrus unshiu*) شد که با نتایج مطالعه حاضر در یک راستا است. بهبود عملکرد میوه که در مطالعه حاضر مشاهده شد می‌تواند به تأثیر مفید منابع مختلف روی در بهبود فیزیولوژی گیاهان نظیر افزایش فتوسنتز و جذب مواد مغذی، افزایش اکسین، تحمل دمایی و بهبود رندمان مصرف آب مربوط باشد (Sher *et al.*, 2022).

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که کاربرد نانوروی منجر به افزایش بیشتری در وزن میوه گوجه‌فرنگی شد. احتمالاً نانوذرات روی باعث آزاد شدن آهسته کود و افزایش فراهمی



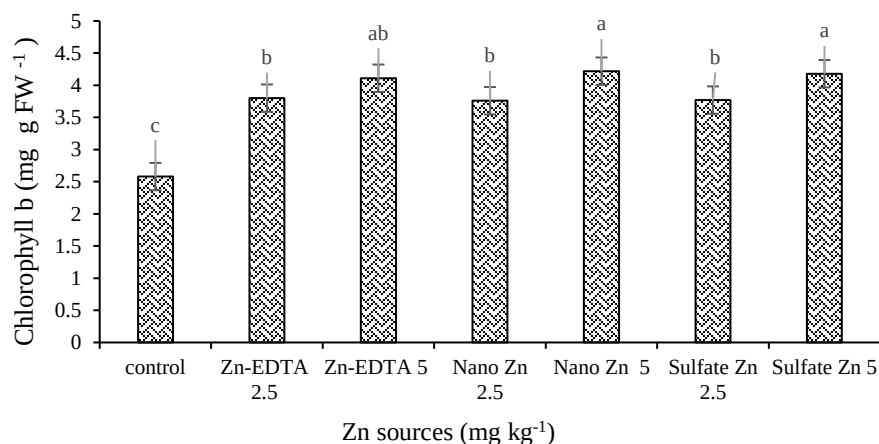
شکل ۵- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر میزان کلروفیل a در گیاه گوجه‌فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 5. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on chlorophyll a content in tomato plants of the SAMAR cultivar. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test

در کیلوگرم هر سه نوع منبع کود روی مشاهده گردید. کمترین میزان کلروفیل b (۲/۵۸ میلی‌گرم در گرم وزن تر) نیز در تیمار شاهد ثبت شد (شکل ۶).

کلروفیل b

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها، در هر سه منبع کودی بکار رفته با افزایش غلظت میزان کلروفیل b افزایش یافت به‌طوری که بیشترین میزان کلروفیل b در غلظت ۵ میلی‌گرم



شکل ۶- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر میزان کلروفیل b در گیاه گوجه‌فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 6. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on chlorophyll b content in tomato plants of SAMAR cultivar. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test.

عنصر روی یکی از عناصر کمیاب ضروری برای رشد و نمو گیاه است، اما حضور بیش از حد آن در گیاهان مانع از

نتایج مطالعه حاضر نشان داد که کاربرد منابع روی منجر به افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی از قبیل کلروفیل a و b شد.

کلروفیل *b* در گیاهانی مانند گندم (*Triticum aestivum*)، گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum*)، برنج (*Oryza sativa*) و ذرت (*Zea mays*) می‌شود (Suganya et al., 2020; Prasad et al., 2021; Bashir et al., 2023) که با نتایج مطالعه حاضر در یک راستا است.

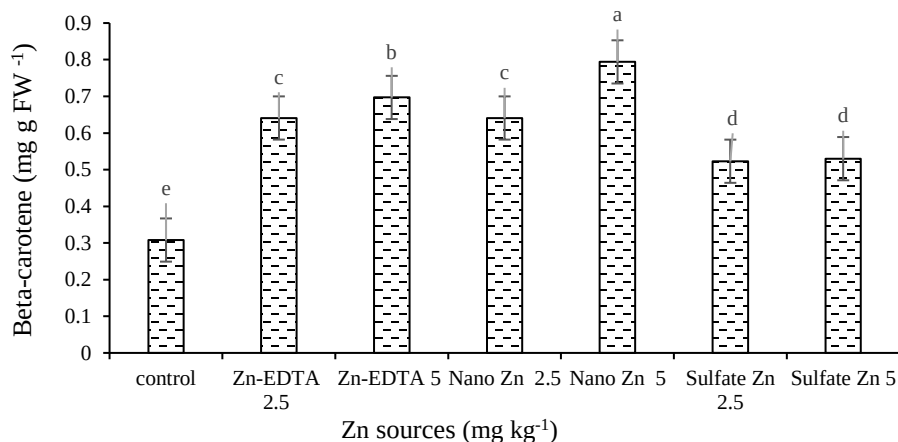
بتا کاروتن

نتایج به دست آمده از مقایسه میانگین داده‌ها بیانگر افزایش مقدار بتاکاروتن در نتیجه کاربرد منابع مختلف روی بود. همچنین با افزایش غلظت روی در هر سه منبع کودی میزان این صفت افزایش نشان داد. بیشترین میزان بتاکاروتن (۰/۷۹۴ میلی گرم در گرم وزن تر) در غلظت ۵ میلی گرم در کیلوگرم نانوروی بدست آمد که اختلاف معنی داری با سایر تیمارها داشت و منجر به افزایش ۲/۵۸ برابری بتاکاروتن در مقایسه با شاهد شد (شکل ۷). عنصر روی از ریزمغذی‌های مهم در گیاهان است که علاوه بر نقش آن در فرآیندهای آنزیمی و متابولیسم عمومی، تأثیر چشمگیری بر سنتز رنگدانه‌های کاروتنوئیدی از جمله بتا-کاروتن دارد. بتا-کاروتن پیش‌ساز ویتامین A است و وجود آن در میوه‌ها و سبزی‌ها باعث افزایش ارزش تغذیه‌ای آن‌ها می‌شود. عنصر روی از طریق فعال‌سازی آنزیم‌هایی که در مسیر بیوسنتز کاروتنوئیدها نقش دارند، مانند فیتوئن سنتاز و فیتوئن دستراز، می‌تواند میزان تجمع کاروتن را افزایش دهد (Hafeez et al., 2013). مطالعات نشان داده‌اند که افزایش میزان روی در خاک یا محلول غذایی می‌تواند موجب افزایش محتوای کاروتن در محصولات می‌مانند هویج (*Daucus carota* L.)، گوجه‌فرنگی، و فلفل (*Capsicum annuum*) شود (Fageria et al., 2002). کمبود روی منجر به کاهش فتوسنتز، کاهش بیان ژن‌های دخیل در سنتز رنگدانه‌ها و در نتیجه کاهش تولید کاروتن می‌گردد. همچنین، عنصر روی نقش مهمی در محافظت سلول‌های گیاهی در برابر تنش اکسیداتیو دارد که این ویژگی نیز به حفظ و تثبیت رنگدانه‌های کاروتنوئیدی کمک می‌کند (Marschner, 2012).

عملکرد طبیعی فیزیولوژیکی گیاهان می‌شود (Rodrigo et al., 2012). عنصر روی در ساخت اسیدآمین ترپتوفان و سپس هورمون اکسین نقش دارد که به طور غیرمستقیم روی سنتز کلروفیل دخیل است (Si-ping et al., 2022). عنصر روی از طریق دخالت در تنظیم غلظت‌های سیتوپلاسمی آهن و منیزیم، در بیوسنتز کلروفیل نقش مهمی ایفا می‌کند (Mahmoud Soltani et al., 2019). همچنین عنصر روی در تحریک بیوسنتز پروتئین و آنزیم‌های مختلف نقش دارد و به عنوان کوفاکتور آنزیم نقش مهمی در تجمع پیگمان‌های رنگی به ویژه کلروفیل دارد (Cui et al., 2017). تأثیر عنصر روی بر محتوای کلروفیل به افزایش فعالیت برخی آنزیم‌های نیازمند به یون Zn^{+2} نسبت داده شده است (Poornima & Koti, 2020). همچنین نشان داده است که محلول پاشی روی از طریق افزایش سطح برگ منجر به افزایش تولید کلروفیل می‌شود (Samreen et al., 2017). همچنین گزارش شده است که عنصر روی یک عنصر مهم کلیدی در بسیاری از واکنش‌های آنزیمی مرتبط با تولید پروتئین‌ها، ویتامین‌ها، سرعت فتوسنتز برگ و بهبود متابولیسم سلول‌های گیاهی توسط اسید آمینه می‌باشد (Marschner et al., 2012) و از این طریق می‌تواند روی میزان کلروفیل تأثیر گذار باشد.

به طور کلی می‌توان گفت عنصر روی در ساختار کلروفیل نقشی مستقیم ندارد، اما از طریق مکانیسم‌های زیر موجب افزایش میزان کلروفیل در برگ‌ها می‌شود: (۱) فعال‌سازی آنزیم‌های دخیل در متابولیسم نیتروژن (مانند نیتريت ردوکتاز و گلوتامات دهیدروژناز)، که پیش‌نیاز سنتز کلروفیل است، (۲) افزایش جذب عناصر کلیدی مانند منیزیم و آهن که در ساختار کلروفیل نقش دارند، (۳) کاهش تولید رادیکال‌های آزاد و جلوگیری از تخریب کلروفیل در شرایط تنش اکسیداتیو و (۴) افزایش سنتز ترپتوفان، که پیش‌ساز هورمون رشد اکسین است و در افزایش سطح کلروفیل مؤثر است (Cakmak, 2000; Kumar et al., 2023).

تحقیقات نشان داده‌اند که کاربرد کودهای حاوی روی، به‌ویژه به‌صورت محلول پاشی، باعث افزایش کلروفیل *a* و



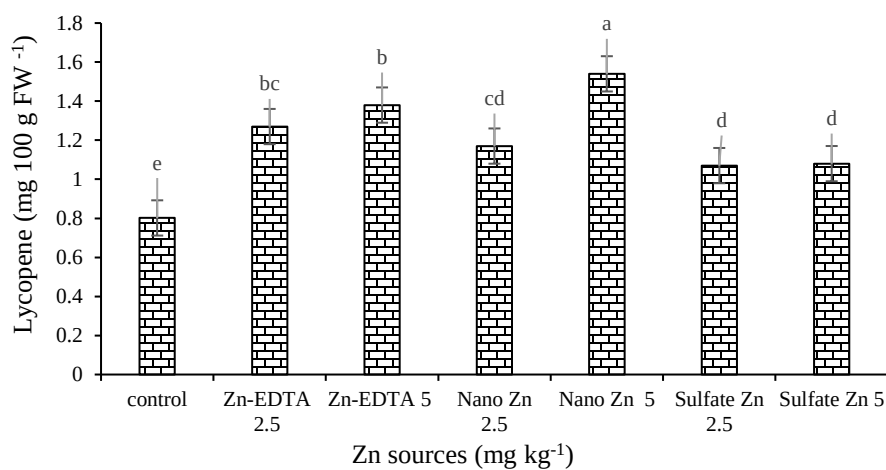
شکل ۷- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر بتاکاروتن در گیاه گوجه‌فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 7. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on beta-carotene in tomato plants of the SAMAR cultivar. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test.

کیلوگرم نانوروی در افزایش لیکوپن بیشتر بود که منجر به افزایش ۹۲/۰۱ درصدی لیکوپن در مقایسه با تیمار شاهد شد (شکل ۸).

لیکوپن

طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، کاربرد منابع مختلف روی منجر به افزایش معنی‌دار میزان لیکوپن میوه گردید. و در بین تیمارهای کودی، تأثیر غلظت ۵ میلی‌گرم در



شکل ۸- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر میزان لیکوپن در گیاه گوجه‌فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 8. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on lycopene content in tomato plants of the SAMAR cultivar. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test.

متابولیکی نقش دارد. این عنصر با فعالیت بیش از ۳۰۰ آنزیم مختلف در گیاه مرتبط بوده و نقش کلیدی در تنظیم

عنصر روی یکی از ریزمغذی‌های ضروری برای رشد و توسعه گیاهان است که در بسیاری از واکنش‌های آنزیمی و

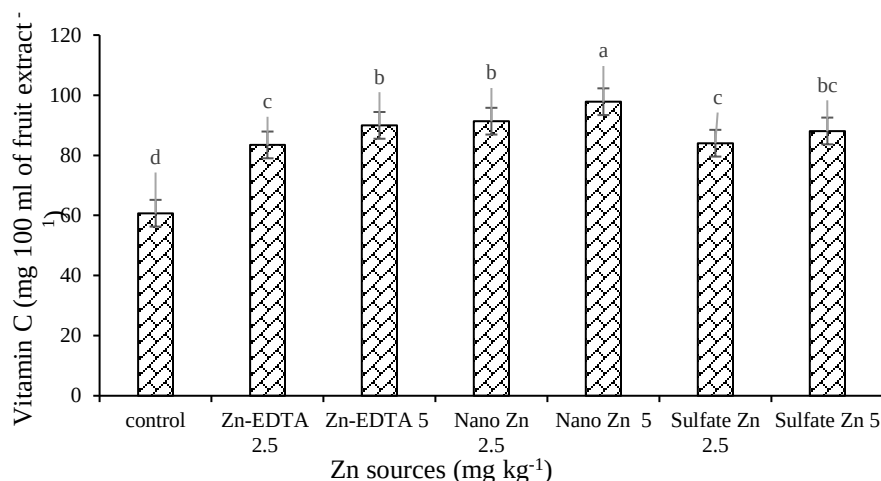
آن ممکن است منجر به بروز سمیت و اختلال در جذب سایر عناصر ریزمغذی مانند آهن و منگنز گردد که خود می‌تواند به‌طور غیرمستقیم بر سنتز لیکوپن اثر منفی بگذارد (Marschner, 2012).

ویتامین C میوه

بر اساس نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل ۹) مشخص شد که کاربرد منابع کودی عنصر روی منجر به افزایش ویتامین C در گوجه‌فرنگی شد و در بین تیمارها، تأثیر غلظت ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوروی در افزایش ویتامین C بیشتر بود. کمترین میزان ویتامین C ($60/73$ میلی‌گرم در 100 میلی‌لیتر عصاره میوه) در تیمار شاهد ثبت شد که اختلاف معنی‌داری با تیمارهای کاربرد روی داشت. همچنین اختلاف معنی‌داری بین غلظت‌های 5 میلی‌گرم در کیلوگرم کلات روی و سولفات روی و غلظت $2/5$ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوروی وجود نداشت.

فرآیندهای فیزیولوژیکی از جمله سنتز رنگدانه‌ها، به‌ویژه کاروتنوئیدها و لیکوپن ایفا می‌کند (Alloway, 2008). مطالعات نشان داده‌اند که عنصر روی به‌عنوان کوفاکتور برخی آنزیم‌های درگیر در مسیر بیوسنتز کاروتنوئیدها مانند فیتوئن دستراز عمل کرده و تأثیر مستقیمی بر تجمع لیکوپن دارد (Dumas et al., 2003; Umair Hassan et al., 2020). کمبود روی می‌تواند با کاهش فعالیت این آنزیم‌ها، موجب کاهش سنتز لیکوپن و در نتیجه کاهش کیفیت تغذیه‌ای میوه‌هایی مانند گوجه‌فرنگی شود (Clemens et al., 2022). Hayat و Faizan (۲۰۱۹) گزارش کردند که محلول پاشی با غلظت 50 ppm نانوروی باعث افزایش محتوای لیکوپن میوه (۲۳ درصد) نسبت به شاهد شد که با نتایج مطالعه حاضر در یک راستا است.

مصرف متعادل کودهای حاوی روی می‌تواند باعث افزایش تولید لیکوپن شود؛ اما باید توجه داشت که مصرف بیش‌ازحد



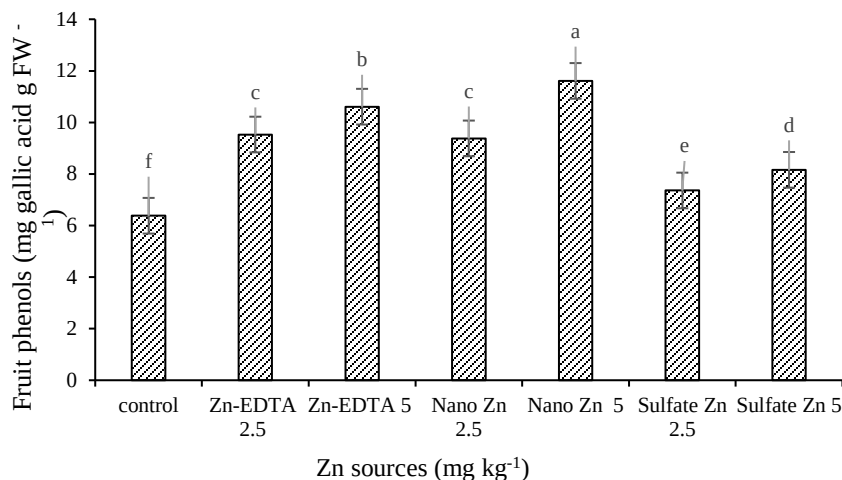
شکل ۹- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر میزان ویتامین C در گیاه گوجه‌فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 9. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on vitamin C content in tomato plants of the SAMAR cultivar. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test.

میلی‌گرم اسید گالیک در گرم وزن تر) و کمترین ($6/38$ میلی‌گرم اسیدگالیک در گرم وزن تر) میزان فنل کل میوه به ترتیب در تیمار نانوروی 5 میلی‌گرم در کیلوگرم و تیمار شاهد مشاهده گردید (شکل ۱۰).

فنل کل میوه

طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، روند تغییرات فنل کل میوه در پاسخ به کاربرد منابع و غلظت‌های مختلف روی مشابه سایر صفات بود. به‌طوری‌که بیشترین ($11/61$)



شکل ۱۰- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر میزان فنل کل میوه در گیاه گوجه‌فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

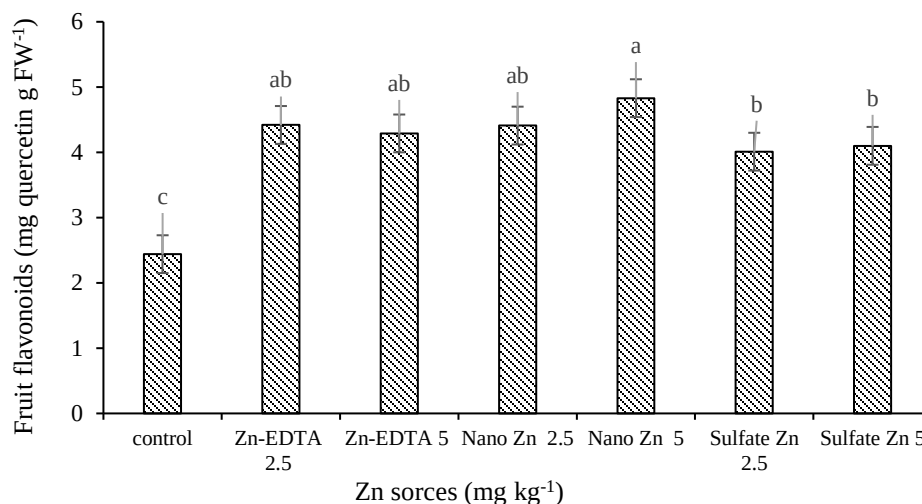
Figure 10. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on the total phenolic content of fruit in tomato plant cultivar SAMAR. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test.

فلاونوئید کل میوه

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها بیانگر افزایش میزان فلاونوئید کل در میوه گوجه‌فرنگی در اثر کاربرد منابع کودی عنصر روی بود و اگرچه بیشترین میزان فلاونوئید کل در تیمارهای نانوروی بدست آمد اما اختلاف معنی‌داری بین سطوح مختلف کاربرد نانوروی و کلات روی مشاهده نگردید. همچنین سطوح مختلف کاربرد سولفات روی دارای اختلاف معنی‌داری با غلظت‌های مختلف کاربرد کلات روی و غلظت ۲/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نانو روی نبود (شکل ۱۱). همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود کاربرد نانوروی در غلظت ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم منجر به افزایش ۸۰/۷۴ درصدی فلاونوئید میوه در مقایسه با شاهد شد.

نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر نشان داد که منابع مختلف روی منجر به افزایش میزان بتاکاروتن، ویتامین C، لیکوپن، محتوای فنل و فلاونوئید میوه شد. بیشترین میزان

ویتامین C (۹۷/۸۳ میلی‌گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر عصاره میوه) مربوط به تیمار ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم نانوروی بود. نتایج پژوهش حاضر با یافته‌های تعدادی از فعالیت‌های تحقیقاتی قبلی مربوط به سایر محصولات کشاورزی مطابقت دارد (Subedi & Walsh, 2009; Sun *et al.*, 2020). در مطالعه‌ای دیگر گزارش شد که گیاهان گوجه‌فرنگی تیمار شده با غلظت ۱۰۰ ppm نانوروی، ۱۱۳/۱ درصد افزایش در اسید اسکوربیک میوه داشتند (Raliya *et al.*, 2015). همانطور که در مطالعه حاضر نیز محتوای اسید اسکوربیک در میوه‌های گوجه‌فرنگی در گیاهان تیمار شده با نانوروی نسبتاً بیشتر از گیاهان تیمار شده با سایر منابع کودی روی بود. عنصر روی علاوه بر تأثیر بر رشد، فتوسنتز، و سنتز پروتئین، نقش مهمی در مسیرهای ثانویه‌ی متابولیکی ایفا می‌کند که منجر به تولید ترکیبات آنتی‌اکسیدانی مانند فنل‌ها، فلاونوئیدها و ویتامین ث می‌شود.



شکل ۱۱- مقایسه میانگین تأثیر منابع کود روی بر میزان فلاونوئید کل در گیاه گوجه‌فرنگی رقم SAMAR. حروف غیرمشابه بیانگر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد با آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Figure 11. Comparison of the average effect of zinc fertilizer sources on the total flavonoid content in tomato plants of the SAMAR cultivar. Unlike letters indicate significance at the 1% probability level using Duncan's multiple range test.

پاسخ به کاربرد روی افزایش یافتند، همخوانی دارد. گیاهان معمولاً از نظر محتوای فنلی متفاوت هستند زیرا ترکیب ژنتیکی و محیط یک عامل اساسی است (Awika & Rooney, 2004). ترکیبات فنلی ظرفیت آنتی‌اکسیدانی سلول را با غیرفعال کردن رادیکال‌های آزاد تحمل گیاه را افزایش می‌دهند (Valifard *et al.*, 2014). بهبود در تولید فنل کل توسط کاربرد خارجی روی به توسعه کربوهیدرات‌های غیرساختاری، افزایش فتوسنتز و جابجایی مناسب فرآورده‌های فتوسنتزی نسبت داده می‌شود (Ibrahim *et al.*, 2012). فلاونوئیدها پلی فنول‌هایی با وزن مولکولی کم هستند که از سلول‌های فتوسنتز کننده محافظت می‌کنند و در از بین بردن رادیکال‌های سوپراکسید نقش دارند و لذا فتوسنتز را بهبود می‌بخشند. در مطالعه حاضر، محتوای فلاونوئید پس از کاربرد روی افزایش یافت. نتایج مشابهی توسط Al-Zahrani و همکاران (۲۰۲۱) گزارش شد با این حال نقش روی در افزایش محتوای فلاونوئید هنوز نامشخص است.

عنصر روی از طریق فعال‌سازی آنزیم‌هایی مانند فنیل‌آلانیل آمونیالایز که آنزیم کلیدی در مسیر بیوسنتز فنل‌ها است، منجر به افزایش میزان فنل در گیاهان می‌شود. همچنین این

ویتامین ث یکی از مهم‌ترین آنتی‌اکسیدان‌های محلول در آب است که در حفظ سلامت گیاه و انسان اهمیت دارد. عنصر روی با مکانیسم‌های زیر بر تولید ویتامین C اثر می‌گذارد و منجر به افزایش ویتامین ث در میوه و برگ می‌شود: الف) کاهش تنش‌های اکسیداتیو و افزایش نیاز به تولید ویتامین C برای مقابله با رادیکال‌های آزاد، ب) فعال‌سازی آنزیم‌های دخیل در مسیر سنتز اسید آسکوربیک اسید مانند گلونولاکتون اکسیداز و ج) افزایش جذب و انتقال مواد فتوسنتزی (Kaya *et al.*, 2015). در تایید نتایج مطالعه حاضر، فورتنس و همکاران (Fortis-Hernández, *et al.*, 2023) گزارش کردند که کاربرد نانوذرات روی منجر به افزایش ویتامین C می‌شود و این افزایش با بهبود فعالیت‌های آنزیمی مرتبط با سنتز ویتامین C همراه بود که می‌تواند علت احتمالی افزایش ویتامین C در مطالعه حاضر نیز باشد.

ترکیبات فنلی به ویژه اسیدهای فنولیک و فلاونوئیدها نقش اساسی در از بین بردن گونه‌های اکسیژن فعال اضافی دارند. در مطالعه حاضر مشاهده شد کاربرد منابع کودی روی محتوای فنل و فلاونوئید را به عنوان یک پاسخ دفاعی در گوجه‌فرنگی افزایش داد که با مطالعه Sun و همکاران (۲۰۲۰) که گزارش کردند مواد فنولیک و فلاونوئیدها در

است. در کل هزینه های اقتصادی استفاده از نانوکودها بالا باشد لیکن هم از این نظر که مقدار نیاز گیاه به عناصر میکرو از جمله روی پایین است و با مقادیر کم کودی میتوان گیاه را از نظر روی تغذیه نمود. از طرف دیگر در محصولات لوکس و سالم بویژه در گلخانه میتوان از این نانوکودها استفاده نمود و محصول با بازارپسندی بالا تولید نمود.

نتیجه گیری کلی

نتایج آنالیز کاربرد منابع مختلف کودی سولفات روی، کلات روی و نانو اکسید روی بر برخی صفات مورفولوژیکی، رنگیهای فتوسنتزی و پارامترهای بیوشیمیایی و فیتوشیمیایی در کشت گلدانی گیاه گوجه فرنگی نشان داد که تاثیر این منابع بسته به نوع و غلظت /انها متفاوت میباشد. تاثیر سولفات روی به نسبت نانوروی و کلات روی کمتر بود هر چند که در مقایسه با شاهد دارای اثرات بهبود دهنده مثبت در فاکتورهای مورد بررسی بود. کاربرد نانوروی به ویژه در غلظت ۵ میلی گرم در کیلوگرم در بهبود پارامترهای ذکر شده موثرتر بود و به منظور تولید اقتصادی، ارتقاء کیفیت تغذیه ای و بازارپسندی محصول توصیه می شود. در نتیجه، مدیریت دقیق و علمی تغذیه گیاه با عنصر روی، به ویژه در دوره رسیدگی میوه، می تواند راهکاری مؤثر برای ارتقاء ارزش تغذیه ای محصولات زراعی به ویژه گوجه فرنگی باشد.

عنصر از طریق کاهش تنش اکسیداتیو و بهبود متابولیسم گیاه و افزایش پایداری ساختارهای سلولی منجر به افزایش میزان فنل در گیاهان می شود (Cakmak, 2000; Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2010). مطالعات اخیر نشان داده اند که کاربرد روی می تواند به طور قابل توجهی میزان ترکیبات فنلی را در گیاهان افزایش دهد. به عنوان مثال، در مطالعه ای کاربرد محلول پاشی سولفات روی بر درختان انگور منجر به افزایش تجمع فنل ها در پوست میوه شد. این افزایش با افزایش بیان ژن های مسیر بیوسنتز فنل ها همراه بود (Mahdavi *et al.*, 2022) که با نتایج مطالعه حاضر در یک راستا است.

فلاونوئیدها گروهی از ترکیبات فنلی هستند که علاوه بر خاصیت آنتی اکسیدانی، در رنگ، عطر و مقاومت گیاه نقش دارند. عنصر روی با تأثیر مثبت بر بیان ژنهای مسیر سنتز فلاونوئیدها مانند دی هیدرو فلاونول-ردوکتاز (DFR)، فلاونول سنتاز (FLS) و چالکون سنتاز (CHS) و افزایش تولید پیش سازهای مسیر فنیل پروپانویید منجر به افزایش میزان فلاونوئید می شود (Broadley *et al.*, 2007). استفاده از نانوکودها در کشاورزی سابقه زیادی ندارد و هنوز در مرحله تحقیق و پژوهش می باشد. در این تحقیق نیز مقایسه ای بین منابع کودی مرسوم روی در کشاورزی و نانو کود اکسید روی انجام گردیده است و نتایجی حاصل شده

Reference

- Adil, M., Bashir, S., Bashir, S., Aslam, Z., Ahmad, N., Younas, T., & Elshikh, M. S. (2022). Zinc oxide nanoparticles improved chlorophyll contents, physical parameters, and wheat yield under salt stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, 932861.
- Aghamirzaei, H., Mumivand, H., Nia, A. E., Raji, M. R., Maroyi, A., & Maggi, F. (2024). Effects of micronutrients on the growth and phytochemical composition of basil (*Ocimum basilicum* L.) in the field and greenhouse (hydroponics and soil culture). *Plants*, 13(17), 2498.
- Alloway, B. J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition. [Publisher unknown].
- Alloway, B. J. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31(5), 537–548.
- Al-Zahrani, H. S., Alharby, H. F., Hakeem, K. R., & Rehman, R. U. (2021). Exogenous application of zinc to mitigate the salt stress in *Vigna radiata* (L.) Wilczek—Evaluation of physiological and biochemical processes. *Plants*, 10(5), 1005.
- Amer, F., Rezk, A. I., & Khalid, H. M. (1980). Fertilizer zinc efficiency in flooded calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 1025–1030.
- Awika, J. M., & Rooney, L. W. (2004). Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health. *Phytochemistry*, 65(9), 1199–1221.

- Bashir, A., Khan, Q. U., Alem, A., Hendi, A. A., Zaman, U., Khan, S. U., ... & Abdelrahman, E. A. (2023). Zinc and potassium fertilizer synergizes plant nutrient availability and affects growth, yield, and quality of wheat genotypes. *Plants*, 12(12), 2241.
- Bhatla, S. C., Lal, M. A., Kathpalia, R., & Bhatla, S. C. (2018). Plant mineral nutrition. In *Plant physiology, development and metabolism* (pp. 37–81). Springer.
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, 173(4), 677–702.
- Chang, C. C., Yang, M. H., Wen, H. M., & Chern, J. C. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10.(۳)
- Chaudhry, S., & Sidhu, G. P. S. (2022). Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: A comprehensive review. *Plant Cell Reports*, 41(1), 1–31.
- Clemens, S. (2022). The cell biology of zinc. *Journal of Experimental Botany*, 73(6), 1688–1698.
- Cui, Z., Li, C. X., He, Y. Y., Li, X. X., & Ren, Q. S. (2017). Responses of growth, photosynthesis of *Ulmus pumila* 'Jinye' and *Shepherdia argentea* to soil zinc contamination. *Scientia Silvae Sinicae*, 53, 114–122.
- Davies, B. H. (1976). Carotenoid analysis. In T. H. Goodwin (Ed.), *Chemistry and biochemistry of plant pigments* (2nd ed., Vol. 2, pp. 38–165). Academic Press.
- Devi, O. R., Ojha, N., Laishram, B., Dutta, S., & Kalita, P. (2023). Roles of nano-fertilizers in sustainable agriculture and biosafety. In *Nano-fertilizers for sustainable agriculture* (pp. [page range if available]). Springer.
- Dimkpa, C. O., & Bindraban, P. S. (2016). Fortification of micronutrients for efficient agronomic production: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 7.
- Dumas, Y., Dadomo, M., Di Lucca, G., & Grolier, P. (2003). Effects of environmental factors and agricultural techniques on antioxidant content of tomatoes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(5), 369–382.
- Ebrahimzadeh, M. A., Hosseinimehr, S. J., Hamidinia, A., & Jafari, M. (2008). Antioxidant and free radical scavenging activity of *Feijoa sallowiana* fruits peel and leaves. *Journal of Pharmacology Online*, 1, 7–14.
- Ellison, E., Blaylock, A., Sanchez, C., & Smith, R. (2013). Exploring controlled release nitrogen fertilizers for vegetable and melon crop production in California and Arizona. In *Proceedings of the 2013 Western Nutrient Management Conference* (Vol. 10, pp. 17–22).
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Clark, R. B. (2002). Micronutrients in crop production. *Advances in Agronomy*, 77, 185–268.
- Faizan, M., & Hayat, S. (2019). Effect of foliar spray of ZnO-NPs on the physiological parameters and antioxidant systems of *Lycopersicon esculentum*. *Polish Journal of Natural Sciences*, 34(6), 87–105.
- Faizan, M., Faraz, A., Mir, A. R., & Hayat, S. (2021). Role of zinc oxide nanoparticles in countering negative effects generated by cadmium in *Lycopersicon esculentum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 101–115.
- Fortis-Hernández, M., Galindo-Guzmán, C., Preciado-Rangel, P., Galindo-Guzmán, A. P., & Flores-Loyola, E. (2023). Biofortification with ZnO NPs as nanofertilizers to improve sustainable commercial and phytochemical quality in basil plants. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 51(2), 13078.
- Gao, F., Li, H., Mu, X., Gao, H., Zhang, Y., Li, R., ... & Ye, L. (2023). Effects of organic fertilizer application on tomato yield and quality: A meta-analysis. *Applied Sciences*, 13(4), 2184.
- Guru, T., Veronica, N., Thatikunta, R., & Reddy, S. N. (2015). Crop nutrition management with nano fertilizers. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1(1), 4–6.
- Hafeez, B., Khanif, Y. M., & Saleem, M. (2013). Role of zinc in plant nutrition—A review. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3(2), 374–391.
- Hamid, B., Zaman, M., Farooq, S., Fatima, S., Sayyed, R. Z., Baba, Z. A., ... & Suriani, N. L. (2021). Bacterial plant biostimulants: A sustainable way towards improving growth, productivity, and health of crops. *Sustainability*, 13(5), 2856.

- Hawrylak-Nowak, B. (2022). Biological activity of selenium in plants: Physiological and biochemical mechanisms of phytotoxicity and tolerance. In *Selenium and nano-selenium in environmental stress management and crop quality improvement* (pp. 341–363). Springer.
- Ibrahim, M. H., Jaafar, H. Z., Karimi, E., & Ghasemzadeh, A. (2012). Primary, secondary metabolites, photosynthetic capacity and antioxidant activity of the Malaysian herb Kacip Fatimah (*Labisia pumila* Benth) exposed to potassium fertilization under greenhouse conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(11), 15321–15342.
- Kaya, C., Ashraf, M., Sonmez, O., Tuna, A. L., & Cullu, M. A. (2015). The role of exogenous zinc in alleviating oxidative stress in plants. *Journal of Plant Nutrition*, 38(11), 1782–1795.
- Khoshgoftarmanesh, A. H., Shariatmadari, H., Karimian, N., & Schulin, R. (2010). Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality. *Scientia Horticulturae*, 124(3), 388–394.
- Kumar, D., Shahi, U. P., Shekhar, C., Kumar, A., Pal, S., & Kumar, S. (2023). Effect of soil and foliar application of Zn and Fe on nutrient status of hybrid maize (*Zea mays* L.). *International Journal of Plant and Soil Science*, 35(19), 1110–1119.
- Kusale, S. P., Attar, Y. C., Sayyed, R. Z., Malek, R. A., Ilyas, N., Suriani, N. L., Khan, N., & El Enshasy, H. A. (2021). Production of plant beneficial and antioxidants metabolites by *Klebsiella variicola* under salinity stress. *Molecules*, 26(7), 1894.
- Lichtenthaler, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350–382.
- Mahdavi, S., Karimi, R., & Valipouri Goudarzi, A. (2022). Effect of nano zinc oxide, nano zinc chelate and zinc sulfate on vineyard soil Zn-availability and grapevines (*Vitis vinifera* L.) yield and quality. *Journal of Plant Nutrition*, 45(13), 1961–1976.
- Mahmoud Soltani, Sh., El-Gholipour, M., Shakouri-Katigari, M., Paykan, M., Shabanzadeh, H., Attar, A., Tabalvandi, A., & Keshtkar, F. (2019). Study of simultaneous application of soil application and foliar application of zinc sulfate fertilizer on yield, grain protein content and zinc content in rice plant organs at different growth stages. *Journal of Soil Research*, 34(3), 328–309. (in Persian).
- Majedi, M. (1994). Chemical test procedures of food material. Jahad Daneshgahi, University of Tehran.
- Marschner, P. (2012). Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press.
- Paria, K., Pyne, S., & Chakraborty, S. K. (2022). Optimization of heavy metal (lead) remedial activities of fungi *Aspergillus penicillioides* (F12) through extra cellular polymeric substances. *Chemosphere*, 286, 131874.
- Poornima, R., & Koti, R. V. (2020). Influence of zinc oxide nano particle on biophysical parameters, yield and grain zinc content of rabi sorghum (*Sorghum bicolor*). *International Journal of Chemical Studies*, 8(2), 2385–2389.
- Prasad, P. S., Subbarayappa, C. T., Sathish, A., & Ramamurthy, V. (2021). Impact of zinc fertilization on tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield, zinc use efficiency, growth and quality parameters in Eastern Dry Zone (EDZ) soils of Karnataka, India. *International Journal of Plant and Soil Science*, 33(7), 20–38.
- Raei, R., Akbarpour, V., & Bahmanyar, M. A. (2023). Morphological attributes and phytochemical compounds of *Satureja hortensis* L. in response to poultry pellet and zinc sulphate applications. *Journal of Horticultural Science*, 36(4), 763–776.
- Raliya, R., Nair, R., Chavalmane, S., Wang, W. N., & Biswas, P. (2015). Mechanistic evaluation of translocation and physiological impact of titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles on the tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plant. *Metallomics*, 7(12), 1584–1594.
- Razzaq, K., Khan, A. S., Malik, A. U., Shahid, M., & Ullah, S. (2013). Foliar application of zinc influences the leaf mineral status, vegetative and reproductive growth, yield and fruit quality of 'Kinnow' mandarin. *Journal of Plant Nutrition*, 36(10), 1479–1495.
- Reda, F. M., El-Saadony, M. T., El-Rayes, T. K., Attia, A. I., El-Sayed, S. A., Ahmed, S. Y., ... & Alagawany, M. (2021). Use of biological nano zinc as a feed additive in quail nutrition: Biosynthesis,

- antimicrobial activity and its effect on growth, feed utilisation, blood metabolites and intestinal microbiota. *Italian Journal of Animal Science*, 20(1), 324–335.
- Reed, R. B., Ladner, D. A., Higgins, C. P., Westerhoff, P., & Ranville, J. F. (2012). Solubility of nano-zinc oxide in environmentally and biologically important matrices. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 31, 93–99.
- Rodella, A. A., & Chiou, D. G. (2009). Copper, zinc, and manganese mobilization in a soil contaminated by a metallurgy waste used as micronutrient source. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40(9–10), 1634–1644.
- Rodrigo, R. W., Schmidt, É. C., & Bouzon, Z. L. (2013). Changes in ultrastructure and cytochemistry of the agarophyte *Gracilaria domingensis* (Rhodophyta, Gracilariales) treated with cadmium. *Protoplasma*, 250, 297–305.
- Rossi, L., Fedenia, L. N., Sharifan, H., Ma, X., & Lombardini, L. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 135, 160–166.
- Saleem, M. H., Parveen, A., Perveen, S., Akhtar, N., Abasi, F., Ehsan, M., ... & Alwasel, Y. A. (2024). Alleviation of cadmium toxicity in pea (*Pisum sativum* L.) through Zn–Lys supplementation and its effects on growth and antioxidant defense. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(7), 10594–10608.
- Samreen, T., Shah, H. U., Ullah, S., & Javid, M. (2017). Zinc effect on growth rate, chlorophyll, protein and mineral contents of hydroponically grown mungbeans plant (*Vigna radiata*). *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1802–S1807.
- Sher, A., Sarwar, B., Sattar, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Hayat, M. T., & Elesawy, B. H. (2022). Exogenous application of zinc sulphate at heading stage of wheat improves the yield and grain zinc biofortification. *Agronomy*, 12(3), 734.
- Shi, J., & Le Maguer, M. (2000). Degradation of lycopene in tomato processing. *Acta Horticulturae* (542), 289–296.
- Si-ping, L. S. P., Zeng, L. S., & Su, Z. L. (2022). Wheat growth, photosynthesis and physiological characteristics under different soil Zn levels. *Journal of Integrative Agriculture*, 21(7), 1927–1940.
- Soytong, M., Guevarra, P. R., Mateo, J. M. C., & Galvez, H. F. (2021). Evaluation of tomatoes fruits flesh colour, beta-carotene and lycopene content. *International Journal of Agricultural Technology*, 17(2), 727–736.
- Subedi, P. P., & Walsh, K. B. (2009). Non-invasive techniques for measurement of fresh fruit firmness. *Postharvest Biology and Technology*, 51(3), 297–304.
- Suganya, A., Saravanan, A., & Manivannan, N. (2020). Role of zinc nutrition for increasing zinc availability, uptake, yield, and quality of maize (*Zea mays* L.) grains: An overview. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(15), 2001–2021.
- Sun, L., Wang, Y., Wang, R., Wang, R., Zhang, P., Ju, Q., & Xu, J. (2020). Physiological, transcriptomic, and metabolomic analyses reveal zinc oxide nanoparticles modulate plant growth in tomato. *Environmental Science: Nano*, 7(11), 3587–3604.
- Takeshima, A., Kim, H., Shiogama, H., Lierhammer, L., Scinocca, J. F., Seland, Ø., & Mitchell, D. (2020). Global aridity changes due to differences in surface energy and water balance between 1.5 °C and 2 °C warming. *Environmental Research Letters*, 15(9), 0940a7.
- Trenkel, M. E. (2021). Slow-and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. *International Fertilizer Industry Association (IFA)*.
- Tufail, T., Bader Ul Ain, H., Noreen, S., Ikram, A., Arshad, M. T., & Abdullahi, M. A. (2024). Nutritional benefits of lycopene and beta-carotene: A comprehensive overview. *Food Science and Nutrition*, 12(11), 8715–8741.
- Umair Hassan, M., Aamer, M., Umer Chattha, M., Haiying, T., Shahzad, B., Barbanti, L., ... & Guoqin, H. (2020). The critical role of zinc in plants facing the drought stress. *Agriculture*, 10(9), 396.

- Valifard, M., Mohsenzadeh, S., Kholdebarin, B., & Rowshan, V. (2014). Effects of salt stress on volatile compounds, total phenolic content and antioxidant activities of *Salvia mirzayanii*. *South African Journal of Botany*, 93, 92–97.
- Van De Mortel, J. E., Almar Villanueva, L., Schat, H., Kwekkeboom, J., Coughlan, S., Moerland, P. D., ... & Aarts, M. G. (2006). Large expression differences in genes for iron and zinc homeostasis, stress response, and lignin biosynthesis distinguish roots of *Arabidopsis thaliana* and the related metal hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Plant Physiology*, 142(3), 1127–1147.
- Verma, D., Meena, R. H., Sukhwal, A., Jat, G., Meena, S. C., Upadhyay, S. K., & Jain, D. (2023). Effect of ZSB with graded levels of zinc fertilizer on yield and zinc uptake under maize cultivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*, 93(2), 379–385.
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A., & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in plant science: A global perspective. *Frontiers in Plant Science*, 7, 2049.
- Zhang, Y., Hu, C. X., Tan, Q. L., Zheng, C. S., Gui, H. P., Zeng, W. N., ... & Zhao, X. H. (2014). Plant nutrition status, yield and quality of satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) under soil application of Fe-EDDHA and combination with zinc and manganese in calcareous soil. *Scientia Horticulturae*, 174, 46–53.