



Effects of different levels of Fe, Zn, and Mg on cucumber performance under greenhouse conditions (A case study in Jiroft)

Sarhadi, J. *  Heidari, S. and Sharif, M.

Research Assistant Prof., Soil and Water Research Department; South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Jiroft; Iran.

javad.sarhadi2009@gmail.com

Research Assistant Prof., Soil and Water Research Department; South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Jiroft; Iran. s.heyday@areeo.ac.ir

MSc Graduate; Soil and Water Research Department; South Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Jiroft; Iran. z.sh1394@yahoo.com

Article Info

Article Type: Research Article

Received: January 25, 2026

Accepted: April 20, 2026

Keywords: Micronutrient interaction, Crop yield, Alkaline soil, Iron chelate, Zinc sulfate, Fruit nitrate.

Corresponding author's email address:

javad.sarhadi2009@gmail.com

Extended Abstract

Objectives

This study was designed to address a critical agronomic challenge in one of Iran's foremost greenhouse production hubs. The primary objectives were: 1) to determine the precise optimal application rates of iron (Fe), zinc (Zn), and manganese (Mn) micronutrient fertilizers for greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.) cultivation in the distinctive alkaline, sandy, and organic-poor soils in Jiroft region; 2) to evaluate the individual and combined effects of these micronutrients on key quantitative and qualitative yield parameters, including total yield, fruit diameter, and fruit nitrate concentration; 3) to investigate the presence and strength of synergistic interactions among Fe, Zn, and Mn in influencing cucumber performance; and 4) to develop a scientifically-grounded, efficient, and localized fertilization strategy that maximizes productivity and fruit quality while preventing the economic losses and environmental risks associated with both deficiency and toxicity from imbalanced micronutrient application.

Material and Methods

The research was conducted during the 2021-2022 growing season in a fully equipped polyethylene greenhouse at the Agricultural and Natural Resources Research Center of southern Kerman Province, Jiroft. The experiment employed a factorial arrangement based on a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three replications. The three fertilizer factors were: Fe-EDDHA chelate at three levels (namely, 0, 11, and 13 kg/ha), zinc sulfate (ZnSO_4) at three levels (namely, 0, 50, and 80 kg/ha), and manganese sulfate (MnSO_4) at three levels (namely, 0, 50, and 120 kg/ha). This yielded 27 combined treatment combinations plus a control (i.e., no micronutrient application). Prior to planting, an exhaustive soil analysis was performed to find that the soil was sandy loam in texture, alkaline (pH 7.7), low in electrical conductivity (EC 2.50 dS/m), very low in organic carbon content (0.18%), and deficient in available Fe (3.60 mg/kg), Mn (2.30 mg/kg), and Zn (0.80 mg/kg) as extracted by the DTPA method.

Uniform cucumber seedlings at the 3-4 leaf stage were transplanted. All the micronutrient treatments were applied in solution through a drip irrigation system in three splits: at planting, at the beginning of flowering, and at early fruit set. Macronutrient (N, P, K) application was uniform across the plots based on soil test recommendations. Standard pest, disease, and crop management practices were applied uniformly. At final harvest, the following traits were measured: total marketable yield (t/ha), fruit diameter (cm) as measured by a digital caliper, and spectrophotometrically determined fruit nitrate concentration (mg/kg). The data thus collected were subjected to Analysis of Variance (ANOVA) using SAS software (v. 9.4), and mean comparisons were performed using Duncan's Multiple Range Test at the 5% probability level.

Results

Soil analysis confirmed the initial micronutrient deficiencies. ANOVA revealed that the main effects of Fe, Zn, and Mn fertilization were highly significant ($p \leq 0.01$) on all the measured traits of total yield, fruit diameter, and nitrate concentration. Furthermore, all the two-way interactions (Fe $\times$ Zn, Fe $\times$ Mn, Zn $\times$ Mn) and the three-way interaction (Fe $\times$ Zn $\times$ Mn) were found to have significant effects on yield and fruit diameter, underscoring the complex interplay among these nutrients.

The separate application of optimal levels of each single micronutrient was observed to outperform the control treatment in a significant manner. The optimal levels were identified as: 11 kg/ha for Fe-EDDHA (yield: 311.18 t/ha; fruit diameter: 14.56 cm), 50 kg/ha for ZnSO₄ (yield: 310.10 t/ha; fruit diameter: 14.60 cm; nitrate: 48.57 mg/kg), and 50 kg/ha for MnSO₄ (yield: 309.73 t/ha). Application of Zn at 50 kg/ha also resulted in a significant reduction (16.5%) in fruit nitrate concentration compared to the control (58.20 mg/kg).

The most compelling results emerged from the interaction studies. More specifically, the two-way interactions consistently showed that the combination of the optimal level of one element with that of another (e.g., Fe11 with Zn50) produced significantly higher yields and larger fruits than any sub-optimal combination did. The pinnacle of this synergistic effect was observed in the three-way interaction such that the combined application of all the three optimal levels (Fe11Zn50Mn50) produced the absolute maximum values: a yield of 364.30 t/ha and a fruit diameter of 14.83 cm. This result was significantly superior to those obtained from all the other treatment combinations and the individual optimal applications, demonstrating a powerful synergistic interaction. Importantly, applying levels higher than these identified optima (e.g., 13 kg/ha Fe, 80 kg/ha Zn, or 120 kg/ha Mn) provided no additional benefit and, in some cases, even led to a relative decrease in performance, indicating the risk of imbalance or incipient toxicity.

Conclusion

This study conclusively establishes that balanced micronutrient fertilization is a decisive factor contributing to successful greenhouse cucumber production in the alkaline, impoverished soils in Jiroft region. The research identifies a highly efficient and specific fertilization formula of 11 kg/ha of Fe-EDDHA chelate, 50 kg/ha of zinc sulfate, and 50 kg/ha of manganese sulfate. While the individual application of each of these optimal levels significantly enhances yield and fruit size, the key finding is the pronounced synergistic interaction among Fe, Zn, and Mn so that their simultaneous application at optimal rates yields a supra-additive effect, leading to the highest possible productivity and fruit quality. Hence, the critical superiority of an integrated and balanced nutritional program over the single-element fertilization cannot be overemphasized.

A significant quality-related outcome was the role optimal zinc nutrition played in significantly reducing nitrate accumulation in fruits to enhance the product's safety for consumption. The results also delivers a crucial cautionary note: application rates exceeding the identified optima are economically unjustified and potentially counterproductive, as they do not improve yield but may induce nutrient imbalances or environmental loading. In summary, this research provides a robust, evidence-based protocol for micronutrient management in greenhouse cucumber cultivation under conditions similar to those in Jiroft. This strategy promises maximized yield and quality, improved economic returns for growers, and enhanced environmental sustainability by preventing both deficient and excessive fertilizer application.

Cite this Article: Sarhadi, J., Heidari, S. and Sharif, M., 2026. Effects of different levels of Fe, Zn, and Mg on cucumber performance under greenhouse conditions (A case study in Jiroft). *Journal of Land Management*, 14(1), PP.1-11.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.372083.400>

بررسی اثر مقادیر مختلف آهن، روی و منگنز بر عملکرد خیار گلخانه‌ای (مطالعه موردی: در شرایط جیرفت)

جواد سرحدی* , صابر حیدری و مهری شریف

استادیار پژوهشی بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران. javad.sarhadi2009@gmail.com

استادیار پژوهشی بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران. s.heyday@areeo.ac.ir

کارشناس بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، جیرفت، ایران. z.sh1394@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	هدف این مطالعه، تعیین سطوح مصرف کودهای ریزمغذی آهن، روی و منگنز به منظور بهبود عملکرد و کیفیت خیار گلخانه‌ای در شرایط خاک‌های قلیایی و فقیر منطقه جیرفت بود. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و با استفاده از سه فاکتور کودی (کلات EDDHA آهن در مقادیر صفر، ۱۱ و ۱۳ کیلوگرم در هکتار، سولفات روی در مقادیر صفر، ۵۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار و سولفات منگنز در مقادیر صفر، ۵۰ و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار) اجرا شد. صفات اندازه‌گیری شده شامل عملکرد کل، طول میوه، طول ساقه و غلظت نیترات در میوه بودند. نتایج نشان داد که کاربرد جداگانه سطوح ۱۱ کیلوگرم در هکتار آهن، ۵۰ کیلوگرم در هکتار روی و ۵۰ کیلوگرم در هکتار منگنز، در مقایسه با تیمار شاهد، به طور معنی‌داری عملکرد و طول میوه را افزایش داد. با این حال، قوی‌ترین اثر مربوط به کاربرد هم‌زمان این سه سطح بهینه ($Fe_{11}Zn_{50}Mn_{50}$) بود که بالاترین عملکرد ($364/30$ تن در هکتار) و بزرگ‌ترین طول میوه ($14/83$ سانتی‌متر) را تولید کرد که برهمکنش هم‌افزایی قوی بین این عناصر را نشان داد. مصرف روی (50 کیلوگرم در هکتار) به کاهش معنی‌دار غلظت نیترات میوه منجر شد. در مقابل، مصرف سطوح بالاتر از مقادیر بهینه، بهبود اضافی در پی نداشت. به طور کلی، این پژوهش سطوح ۱۱، ۵۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار را به ترتیب برای کودهای کلات آهن، سولفات روی و سولفات منگنز، به عنوان الگوی تغذیه‌ای کارآمد برای دستیابی به حداکثر عملکرد و کیفیت خیار گلخانه‌ای در شرایط مشابه با خاک مورد آزمایش معرفی می‌کند.
واژه‌های کلیدی: برهمکنش ریزمغذی‌ها، خاک قلیایی، عملکرد کمی، نیترات میوه	
آدرس ایمیل نویسنده مسئول: javad.sarhadi2009@gmail.com	

استناد: سرحدی، جواد، حیدری، صابر، و شریف، مهری، ۱۴۰۵. بررسی اثر مقادیر مختلف آهن، روی و منگنز بر عملکرد خیار گلخانه‌ای (مطالعه موردی: در

شرایط جیرفت). نشریه مدیریت اراضی، ۱۴(۱)، صص. ۱۱-۱.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.372083.400>

مقدمه

خیار (*Cucumis sativus* L.) یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین محصولات سبزی و صیفی در سراسر جهان محسوب می‌شود. این محصول به دلیل دوره رشد نسبتاً کوتاه، بازدهی بالا و تقاضای مداوم بازار برای مصرف تازه‌خوری، جایگاه ویژه‌ای در سبد غذایی جوامع دارد. در دهه‌های اخیر، کشت گلخانه‌ای خیار به‌عنوان راهکاری کارآمد برای تولید خارج از فصل، افزایش کنترل بر عوامل محیطی، کاهش مصرف آب و آفات و در نهایت دستیابی به عملکرد و کیفیت پایدار، گسترش چشمگیری یافته است (Rouphael et al., 2020). در ایران نیز با توجه به محدودیت منابع آبی و تنوع اقلیمی، توسعه کشت‌های گلخانه‌ای از جمله برای خیار، به یک اولویت استراتژیک در بخش کشاورزی تبدیل شده است.

منطقه جیرفت در جنوب استان کرمان، به لطف برخورداری از نور فراوان، دمای مناسب و طول فصل رشد طولانی، به یکی از قطب‌های اصلی تولید محصولات گلخانه‌ای ایران به‌ویژه خیار تبدیل شده است. با این وجود، چالش‌های متعددی پایداری و سودآوری این سامانه‌های تولیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. خاک‌های این منطقه عموماً دارای بافت سبک (شنی تا شن لومی)، واکنش قلیایی (pH بالا) و محتوی ماده آلی بسیار پایین هستند (سرحدی و همکاران، ۱۴۰۱). این ترکیب نامناسب خاک، پیامدهای متعددی دارد: اولاً، ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی در خاک بسیار کاهش می‌یابد. ثانیاً، قلیایی بودن خاک، قابلیت جذب عناصر کم‌مصرف ضروری برای گیاه را به‌شدت محدود می‌کند. در این شرایط، عناصری مانند آهن (Fe)، روی (Zn) و منگنز (Mn) که در pH‌های خشتی تا اسیدی قابل جذب‌تر هستند، در خاک تثبیت شده و به شکل غیرقابل استفاده برای گیاه درمی‌آیند (Rengel, 2015). این کمبودهای تغذیه‌ای پنهان یا آشکار، به‌طور مستقیم فیزیولوژی، رشد و نهایتاً عملکرد کمی و کیفی محصول خیار را محدود می‌سازند.

نقش حیاتی عناصر کم‌مصرف خصوصاً عناصر آهن، روی و منگنز در فیزیولوژی و عملکرد خیار مشهود است. این سه عنصر، علی‌رغم نیاز کم گیاه، نقش‌های بیوشیمیایی کلیدی و غیرقابل جایگزینی ایفا می‌کنند. آهن (Fe)، هسته مرکزی ساختار مولکول کلروفیل نیست، اما برای سنتز آن و تشکیل سبزینه (کلروپلاست) کاملاً ضروری است. کمبود آهن بلافاصله به‌صورت کلروز بین رگبرگی در برگ‌های جوان (سبز ماندن رگبرگ‌ها و زردی فاصله بین آن‌ها) ظاهر شده و با مختل کردن فرآیند فتوسنتز، تولید ماده خشک و اندازه میوه را کاهش می‌دهد (Briat et al., 2015). همچنین روی (Zn) به‌عنوان کوفاکتور یا جزء ساختاری برای بیش از ۳۰۰ آنزیم در گیاه عمل می‌کند. این عنصر در سنتز هورمون رشد اکسین (که مسئول طول‌شدن سلول‌ها و رشد ریشه است)، سنتز پروتئین و تنظیم متابولیسم نیتروژن نقش دارد. کمبود روی منجر به توقف رشد، ریزبرگی و تشکیل گره‌های کوتاه در ساقه (ظاهر رزت‌گونه) می‌شود و به‌شدت بر تعداد و توسعه اولیه میوه تأثیر می‌گذارد (Hafeez et al., 2013). منگنز (Mn) نیز برای تجزیه مولکول‌های آب در طی فرآیند فتوسنتز (سیستم فتوسیستم II) و فعال‌سازی آنزیم‌های متعدد در چرخه کربن و دفاع آنتی‌اکسیدانی گیاه ضروری است. کمبود آن نیز علائمی شبیه به کمبود آهن ایجاد می‌کند، اما معمولاً ابتدا در برگ‌های مسن‌تر دیده می‌شود (Alejandro et al., 2020).

اهمیت تغذیه متعادل در کشت گلخانه‌ای خیار در مطالعات مختلف داخلی و خارجی مورد تأکید قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، تحقیقات نشان داده‌اند که کاربرد کودهای آلی و زیستی مانند ورمی‌کمپوست می‌تواند با بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و جمعیت میکروبی مفید، به افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود شاخص‌های رشدی و کیفیت پس از برداشت خیار کمک کند (Ebrahimzadeh et al., 2021). همچنین، استفاده ترکیبی از این کودها در شرایط تنش کم‌آبی می‌تواند به حفظ عملکرد و افزایش کارایی مصرف آب بینجامد.

(Behdarnejad et al., 2023). مطالعات دیگر بر نقش کودهای زیستی در افزایش مقاومت سیستمیک گیاه در برابر بیماری‌های خاک‌زی مانند *Pythium* تأکید داشته‌اند که نشان‌دهنده ارتباط تنگاتنگ بین تغذیه مناسب و سلامت گیاه است (Sabbagh and Valizadeh, 2016).

با وجود این تحقیقات ارزشمند، یک شکاف دانش عملی مشهود است. بسیاری از توصیه‌های کودی موجود برای عناصر کم‌مصرف، یا کلی هستند و یا از شرایط خاکی و اقلیمی دیگر مناطق اقتباس شده‌اند. منطقه جیرفت با ویژگی‌های خاکی منحصربه‌فرد خود (شنی بودن، قلیایت بالا و فقر ماده آلی) نیازمند پژوهش‌های بومی‌شده است (Sarhadi et al. 2022). عدم تعیین دقیق سطوح بهینه مصرف این کودها می‌تواند منجر به دو مشکل شود: ۱) مصرف ناکافی و تداوم کمبود که باعث کاهش عملکرد می‌شود. ۲) مصرف بیش از حد که نه تنها از نظر اقتصادی به‌صرفه نیست، بلکه می‌تواند منجر به سمیت عنصری، برهم خوردن تعادل تغذیه‌ای (مانند ایجاد کمبود ثانویه عناصر دیگر) و آلودگی زیست‌محیطی شود (Zhou et al., 2020). بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی اثر سطوح مختلف مصرف کودهای آهن، روی و منگنز بر عملکرد، اجزای عملکرد و برخی شاخص‌های کیفی خیار گلخانه‌ای در شرایط خاکی و اقلیمی منطقه جیرفت طراحی و اجرا شد. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند پشتوانه علمی محکمی برای تدوین برنامه غذایی دقیق و کارآمد برای گلخانه‌داران این منطقه فراهم کرده و با دستیابی به نقطه بهینه مصرف کود، گامی در جهت افزایش بهره‌وری تولید، بهبود کیفیت محصول، صرفه‌جویی اقتصادی و کاهش پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی بردارد.

مواد و روش

این پژوهش در طی سال زراعی ۱۴۰۰ در یکی از گلخانه‌های تجهیز شده مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان واقع در منطقه جیرفت انجام شد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای آزمایش

شامل سه فاکتور کودی بودند: کلات آهن (Fe-EDDHA) در سه سطح (۰، ۱۱ و ۱۳ کیلوگرم در هکتار)، سولفات روی ($ZnSO_4$) در سه سطح (۰، ۵۰ و ۸۰ کیلوگرم در هکتار) و سولفات منگنز ($MnSO_4$) در سه سطح (۰، ۵۰ و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار). در مجموع ۲۷ تیمار ترکیبی و یک تیمار شاهد (عدم مصرف هر سه کود) در سه بلوک مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۱، شماره‌گذاری و علائم مربوط به تیمارها نشان داده شده است. آزمایش در یک گلخانه پلی‌اتیلنی چندگانه با سیستم آبیاری قطره‌ای و کنترل نسبی دما و رطوبت اجرا شد. کشت در بستر خاکی طبیعی گلخانه انجام گرفت. مقادیر کودهای آهن، روی و منگنز توصیه‌شده در تیمارها با توجه به فقر خاک مورد آزمایش و PH بالا و در طول یک فصل زراعی (حدود ۸ ماه) و در سطح یک هکتار بود که طبق نتایج تحقیقات و بررسی‌ها و نشریات ترویجی و تجربه نگارنده به دست آمد.

پیش از کشت، نمونه‌های خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر تهیه و برای تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی اولیه به آزمایشگاه منتقل شد. بافت خاک به روش هیدرومتری تعیین گردید (Gee & Bauder, 1986). pH و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک اندازه‌گیری شدند. کربن آلی (OC) به روش Walkley-Black، فسفر قابل جذب به روش Olsen، پتاسیم قابل جذب با استات آمونیوم ۱ نرمال و عناصر کم‌مصرف آهن، روی و منگنز با استفاده از روش عصاره‌گیری DTPA و قرائت توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شدند (Sparks et al., 1996). نتایج آنالیز اولیه خاک در جدول ۲ ارائه شده است. زمین به‌صورت جوی و پشته‌ای آماده شد. آماده کردن خاک برای کشت از یک ماه قبل از کشت شروع شد. به دلیل فقر مواد آلی در اکثر خاک‌های منطقه، کودهای حیوانی قابل توصیه برای گلخانه‌های منطقه، ترکیبی از کودهای گاوی سالم و کود مرغ می‌باشند. در این پژوهش به ازای هر خط کاشت ۵۰ متری ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم کود حیوانی (مخلوطی از کود مرغ و گاو) ۲-۳ کیلوگرم سولفات پتاسیم و ۱/۵-۱ کیلوگرم سوپرفسفات

تریپل قیل از کاشت مصرف شد. نهال‌های خیار که به‌صورت یکنواخت و سالم در خزانه رشد کرده بودند، در مرحله ۳-۴ برگی به فاصله ۲۵ سانتی‌متر روی ردیف و فاصله ردیف‌های ۱/۵ متری نشاء شدند. کشت با توجه به شرایط منطقه در نیمه اول مهرماه انجام شد و برداشت از اواسط آبان ماه آغاز گردید و تا اواسط خرداد ماه ادامه یافت. فعالیت گلخانه در یک بازه هشت ماه و نیمه بوده که در هفت ماه و نیم آن برداشت محصول صورت پذیرفت که در شرایط پاییز به فاصله یک تا دو روز در میان، در زمستان دو تا سه روز در میان و در بهار به فاصله یک روز در میان است.

کلیه تیمارهای کودی بر اساس سطوح طراحی شده، به‌صورت محلول در آب و از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای در سه مرحله اعمال شدند. مرحله اول هم‌زمان با کاشت، مرحله دوم در آغاز گلدهی و مرحله سوم در مرحله تشکیل میوه اولیه. مقادیر کودهای ماکرو (نیتروژن، فسفر و پتاسیم) برای همه تیمارها یکسان و بر اساس آزمون خاک و توصیه‌های رایج برای خیار گلخانه‌ای اعمال شد. مدیریت آفات، بیماری‌ها و عملیات زراعی دیگر در تمام پلات‌ها به‌صورت یکسان انجام گرفت.

در پایان دوره رشد و در زمان برداشت نهایی، صفات زیر اندازه‌گیری و ثبت شدند. لازم به ذکر است که انتخاب صفات برای اندازه‌گیری، بر اساس نظر موسسه تحقیقات خاک و آب و با توجه به امکانات آزمایشگاهی

موجود در مرکز تحقیقات جنوب کرمان (محل اجرای آزمایش) صورت گرفته است.

۱. عملکرد کل: میوه‌های رسیده هر پلات در چندین نوبت برداشت و وزن کل آن‌ها بر حسب تن در هکتار محاسبه شد (جدول ۴).

۲. صفات مورفولوژیک: طول میوه (با کولیس دیجیتالی) و قطر ساقه اصلی (در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک) اندازه‌گیری شد. با توجه به سازه گلخانه‌های منطقه (حداکثر ارتفاع چهار متر) و با توجه به طول زیاد بوته‌های خیار گلخانه‌ای در اینجا که به شش متر یا بیشتر هم می‌رسد، در طول دوره داشت بوته‌ها را به‌صورت دستی روی هم قرار می‌دهند و اصطلاحاً بوته را می‌خوابانند که در این حالت تفکیک بوته‌ها از هم برای اندازه‌گیری طول میانگره‌ها امکان‌پذیر نیست.

۳. شاخص‌های کیفی: میزان نیترات میوه با استفاده از روش اسپکتروفتومتری پس از عصاره‌گیری با آب مقطر اندازه‌گیری شد (Cataldo et al., 1975).

داده‌های حاصل با استفاده از تجزیه واریانس (ANOVA) در نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹٫۴ مورد تحلیل قرار گرفتند. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد. همچنین برای تجسم بهتر برهمکنش‌ها از نمودارها استفاده گردید.

جدول ۱- شماره‌گذاری و سطوح تیمارهای مورد استفاده در تحقیق
Table 1- Numbering and levels of treatments used in the study

تیمار Factor	کلات آهن (کیلوگرم در هکتار) Fe-EDDHA (kg/ha)	سولفات روی (کیلوگرم در هکتار) ZnSO ₄ (kg/ha)	سولفات منگنز (کیلوگرم در هکتار) MnSO ₄ (kg/ha)	سطح Level
	0	0	0	120
	11	50	50	50
	13	80	80	80
	c1	d1	e1	e3
	c2	d2	e2	e2
	c3	d3	e3	e1

نتایج

نتایج حاصل از آنالیز اولیه خاک محل اجرای آزمایش (جدول ۲) نشان داد که خاک مورد مطالعه دارای بافت لوم شنی، واکنش قلیایی ($pH=7/7$)، هدایت

الکتریکی (دسی زیمنس بر متر $EC=2/5$) و محتوای ماده آلی بسیار پایین (درصد $O.C=0/18$) بود. مقادیر عناصر کم‌مصرف آهن، منگنز و روی به ترتیب $3/6$ ، $2/3$ و $0/8$ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک اندازه‌گیری شد.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 2- Physical and chemical properties of the studied soil

روزی	منگنز	آهن	پتاسیم	فسفر	کربن آلی	هدایت الکتریکی	اسیدیته	بافت خاک
Zn	Mn	Fe	K	P	OC	EC	pH	Soil texture
mg.kg ⁻¹					درصد	mmohs.cm ⁻¹		
0.8	2.3	3.6	230	14	0.18	2.50	7.7	لوم شنی

تجزیه واریانس (جدول ۳) اثرات اصلی کودهای آهن، روی و منگنز بر عملکرد را در سطح احتمال یک درصد معنی دار نشان داد. همچنین، اثرات متقابل دوگانه و سه گانه بین این عناصر ($\text{Zn} \times \text{Mn}$, $\text{Fe} \times \text{Mn}$, $\text{Fe} \times \text{Zn}$) و

بر عملکرد و طول میوه و طول ساقه یک درصد معنی دار بود. تیمار سولفات روی تنها تیماری بود که بر میزان نیترات میوه اثر معنی دار (در سطح یک درصد) داشت.

جدول ۳- تجزیه واریانس اثرات ساده و متقابل تیمارهای کودی بر صفات مورد مطالعه

Table 3- Analysis of variance of simple and interaction effects of fertilizer treatments on studied traits

میانگین مربعات (Mean squares)				درجه آزادی df	منابع تغییرات S.O.V
نیترات Nitrate	طول ساقه Stem length	طول میوه Fruit length	عملکرد Yeild		
55.08	0.01	0.28	28.85	2	r
317.25	0.10	0.94**	4103.83**	2	کلات آهن (Fe)
636.85**	0.76	1.17**	3488.06**	2	سولفات روی (Zn)
131.51	0.22	0.26	3259.92**	2	سولفات منگنز (Mn)
173.14	0.17	0.54**	780.97**	4	$\text{Fe} \times \text{Zn}$
24.47	0.23	0.45**	677.55**	4	$\text{Fe} \times \text{Mn}$
73.83	0.04	0.31*	770.86**	4	$\text{Zn} \times \text{Mn}$
131.52	0.23	0.40**	468.91**	5	$\text{Fe} \times \text{Zn} \times \text{Mn}$
117.62	0.20	0.10	133.78	52	خطا

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱٪

* and ** significant at 5 and 1% probability level respectively

برترین نتیجه را داشت. این تیمار همچنین سبب کاهش معنی دار محتوای نیترات میوه (۴۸/۵۷ میلی گرم در کیلوگرم) در مقایسه با تیمار شاهد (۵۸/۲۰ میلی گرم در کیلوگرم) گردید. برای کود منگنز نیز سطح ۵۰ کیلوگرم در هکتار (تیمار e2) با عملکرد ۳۰۹/۷۳ تن در هکتار، برترین سطح شناخته شد.

بر اساس مقایسه میانگین اثرات ساده (جدول ۴)، کاربرد ۱۱ کیلوگرم در هکتار کلات آهن (تیمار c2) با میانگین عملکرد ۳۱۱/۱۸ تن در هکتار و طول میوه ۱۴/۵۶ سانتی متر، به طور معنی داری برتر از سطوح صفر و ۱۳ کیلوگرم در هکتار بود. در مورد کود روی، مصرف ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی (تیمار d2) با میانگین عملکرد ۳۱۰/۱۰ تن در هکتار و طول میوه ۱۴/۶ سانتی متر،

جدول ۴- اثرات ساده تیمارهای کودی بر صفات مورد مطالعه

Table 4- Simple effects of fertilizer treatments on studied traits

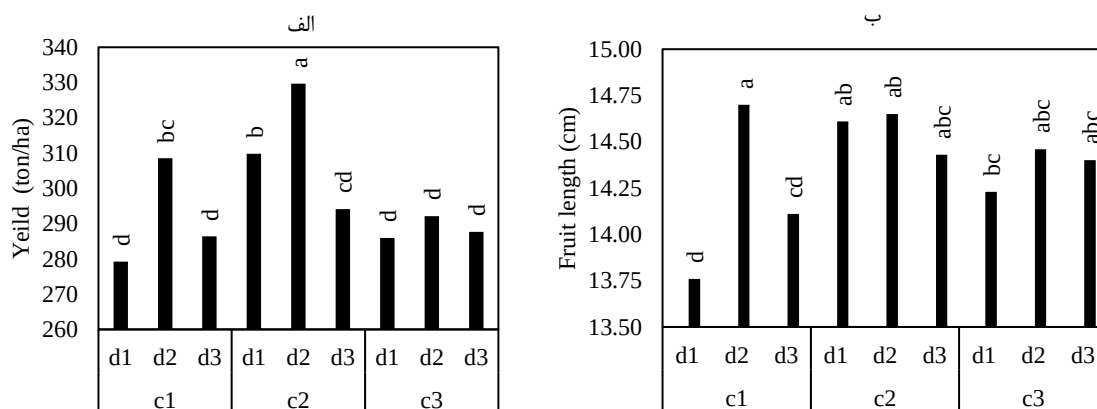
تیمار Factor	شماره تیمار	صفات		
		عملکرد (تن در هکتار) Yeild (ton/ha)	طول میوه (سانتی‌متر) Fruit length (cm)	نیترات (میلی‌گرم بر کیلوگرم) Nitrate (mg/kg)
کلات آهن (Fe)	c1	291.35b	14.19b	-
	c2	311.18a	14.56a	-
	c3	288.58b	14.36ab	-
سولفات روی (Zn)	d1	291.63b	14.20b	58.20a
	d2	310.10a	14.60a	48.57b
	d3	289.39b	14.31b	54.47ab
سولفات منگنز (Mn)	e1	290.87b	-	-
	e2	309.73a	-	-
	e3	290.53b	-	-

در هکتار منگنز (c2e2) با عملکرد ۳۳۰/۶۰ تن در هکتار و طول میوه ۱۴/۶۲ سانتی‌متر، بالاترین مقادیر را به خود اختصاص داد.

همچنین، اثر متقابل روی و منگنز (شکل ۳) حاکی از آن بود که تیمار ترکیبی ۵۰ کیلوگرم در هکتار روی و ۵۰ کیلوگرم در هکتار منگنز (d2e2) با عملکرد ۳۲۹/۱۱ تن در هکتار و طول میوه ۱۴/۶۴ سانتی‌متر، بهترین نتیجه را تولید کرد.

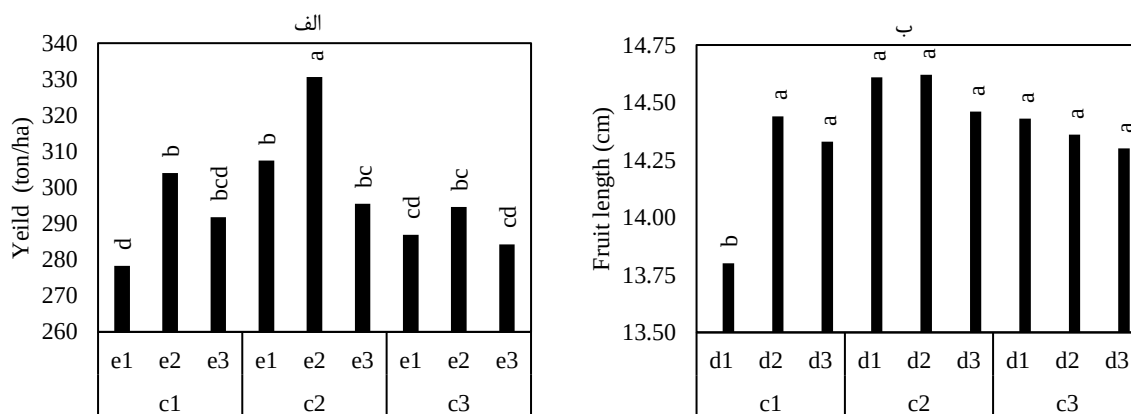
نتایج اثر متقابل دوتایی آهن و روی (شکل ۱) نشان داد که بیشترین عملکرد (۳۲۹/۶۶ تن در هکتار) و بزرگ‌ترین طول میوه (۱۴/۵۶ سانتی‌متر) از تیمار ترکیبی کاربرد ۱۱ کیلوگرم در هکتار آهن و ۵۰ کیلوگرم در هکتار روی (c2d2) حاصل شد که برتری معنی‌داری با سایر ترکیب‌ها داشت.

در بررسی اثر متقابل آهن و منگنز (شکل ۲)، ترکیب تیماری ۱۱ کیلوگرم در هکتار آهن و ۵۰ کیلوگرم



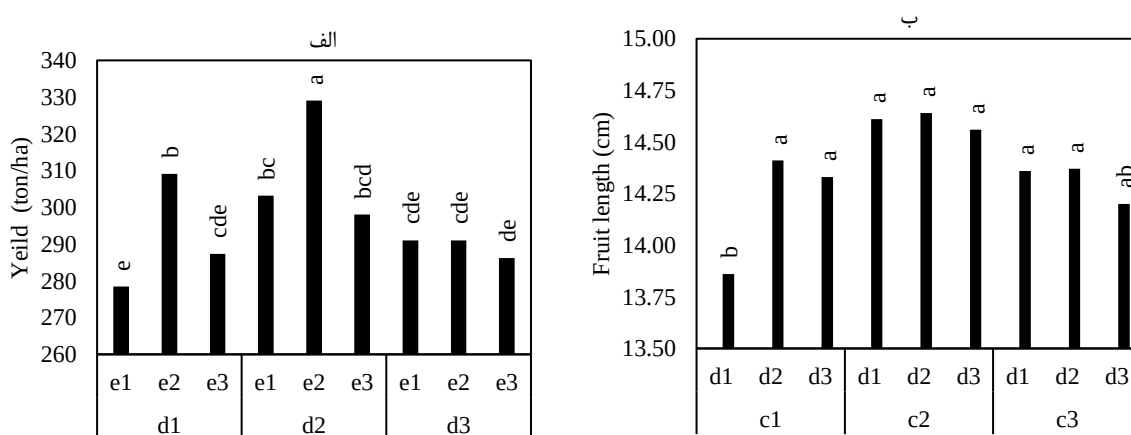
شکل ۱- اثر کود آهن و روی بر الف) عملکرد، ب) طول میوه خیار. وجود حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح خطای پنج درصد است

Figure 1- Interaction between Fe and Zn fertilizer on (a) yeilds, (b) fruit length. Similar letters indicate no significant difference at 5% error level



شکل ۲- اثر کود آهن و منگنز بر الف) عملکرد، ب) طول میوه خیار. وجود حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح خطای پنج درصد است

Figure 2- Interaction between Fe and Mn fertilizer on (a) yeilds, (b) fruit length. Similar letters indicate no significant difference at 5% error level

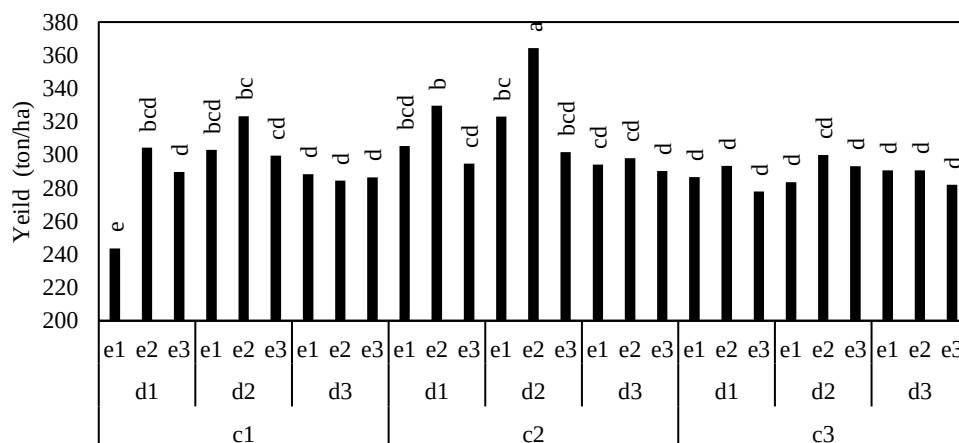


شکل ۳- اثر کود روی و منگنز بر الف) عملکرد، ب) طول میوه خیار. وجود حروف مشابه نشان دهنده عدم اختلاف معنی دار در سطح خطای پنج درصد است

Figure 3- Interaction between Zn and Mn fertilizer on (a) yeilds, (b) fruit length. Similar letters indicate no significant difference at 5% error level

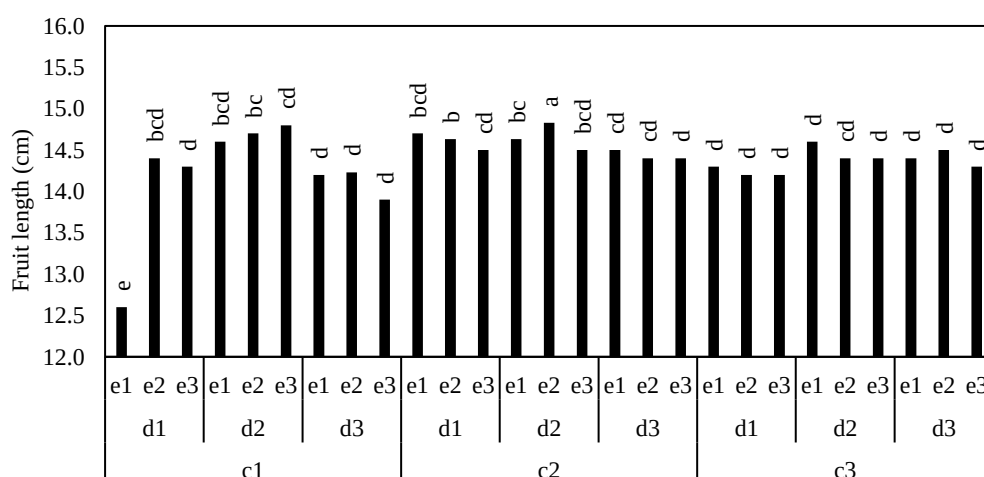
کلات آهن، ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی و ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات منگنز) بود. این تیمار به طور معنی داری برتر از سایر تیمارهای ترکیبی قرار گرفت.

بررسی اثر متقابل سه گانه عناصر (شکل ۴ و ۵) نشان داد که بالاترین عملکرد کل (۳۶۴/۳۰ تن در هکتار) و بیشترین طول میوه (۱۴/۸۳ سانتی متر) مربوط به تیمار ترکیبی c2d2e2 (مصرف هم زمان ۱۱ کیلوگرم در هکتار



شکل ۴- اثر متقابل کودهای آهن، روی و منگنز بر عملکرد خیار. وجود حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح خطای پنج درصد است

Figure 4- Interaction between Fe, Zn and Mn fertilizers on yields. Similar letters indicate no significant difference at 5% error level



شکل ۵- اثر متقابل کودهای آهن، روی و منگنز بر طول میوه خیار. وجود حروف مشابه نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح خطای پنج درصد است

Figure 5- Interaction between Fe, Zn and Mn fertilizers on fruit length. Similar letters indicate no significant difference at 5% error level

(Rengel, 2015). در چنین شرایطی، مصرف بهینه این

عناصر از طریق کوددهی، می‌تواند تنش تغذیه‌ای را کاهش داده و پتانسیل ژنتیکی گیاه برای رشد و عملکرد را محقق سازد.

بر اساس نتایج، کاربرد ۱۱ کیلوگرم در هکتار کلات آهن، ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی و ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات منگنز به‌طور جداگانه، منجر به بهبود معنی‌دار عملکرد و طول میوه نسبت به تیمار شاهد شد. این بهبود می‌تواند ناشی از نقش کلیدی این عناصر در

بحث

نتایج این پژوهش به‌وضوح نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار و مثبت کاربرد متعادل کودهای ریزمغذی آهن، روی و منگنز بر عملکرد و کیفیت خیار گلخانه‌ای است. خاک‌های دارای ویژگی‌هایی مشابه خاک گلخانه موردنظر، با دارا بودن بافت سبک، واکنش قلیایی ($pH > 8$) و محتوای پایین ماده آلی، به‌طور معمول با محدودیت دسترسی به عناصر کم‌مصرف به‌ویژه آهن، روی و منگنز مواجه هستند

غذایی جامع و متعادل به جای مصرف تک‌عنصری کودها تأکید دارد.

یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، کاهش معنی دار غلظت نیترات در میوه‌های تیمار شده با سطح بهینه روی (۵۰ کیلوگرم در هکتار) در مقایسه با شاهد بود. نیترات انباشته در سبزی‌ها می‌تواند به یک نگرانی بهداشتی تبدیل شود. روی به عنوان کوفاکتور آنزیم نیترات ریداکتاز (NR) شناخته می‌شود که اولین و تنظیم‌کننده‌ترین گام در احیای نیترات به نیتريت در گیاه است؛ بنابراین، تأمین کافی روی می‌تواند فعالیت این آنزیم را افزایش داده و با تسريع تبدیل نیترات به ترکیبات آلی نیتروژن‌دار، از انباشت آن در واکوئل‌های سلول‌های میوه بکاهد. این نتیجه با پژوهش‌های دیگر که نشان می‌دهند روی عنصری ضروری برای فعال کردن آنزیم‌های نیترات رداکتاز و نیتريت رداکتاز و تجزیه نیترات است و مصرف متعادل آن می‌تواند از انباشت نیترات در گیاه ممانعت به عمل آورد، همسو است (Chenchen et al, 2021 و Asbaghian N et al, 2021).

اگرچه نتایج، مزایای مصرف بهینه را نشان می‌دهد اما باید توجه داشت که مصرف سطوح بالاتر (مانند ۱۳ کیلوگرم در هکتار آهن یا ۸۰ کیلوگرم در هکتار روی)، نه تنها بهبود بیشتری در عملکرد ایجاد نکرد، بلکه در برخی موارد منجر به کاهش نسبی نیز شد. این موضوع احتمالاً می‌تواند ناشی از برهم خوردن تعادل تغذیه‌ای، ایجاد سمیت ناشی از یک عنصر خاص یا مهار جذب عناصر دیگر باشد (Zhou et al., 2020). به عنوان مثال، مقادیر بسیار بالای آهن می‌تواند جذب منگنز و روی را مهار کند و بالعکس. این یافته بر لزوم دقت در تعیین دقیق نیاز گیاه و شرایط خاک و پرهیز از مصرف بی‌رویه کودها که علاوه بر هزینه اضافی، خطرات زیست‌محیطی نیز به دنبال دارد، تأکید می‌کند.

فرآیندهای فیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه باشد. آهن اگرچه در هسته مولکول کلروفیل حضور ندارد، اما برای سنتز آن کاملاً ضروری است و کمبود آن با ایجاد کلروز بین رگبرگی در برگ‌های جوان، فتوسنتز و در نهایت تولید ماده خشک را محدود می‌کند (Briat et al., 2015). روی نیز به عنوان کوفاکتور صدها آنزیم، در سنتز اکسین (هورمون رشد)، پروتئین‌سازی و متابولیسم نیتروژن نقش حیاتی ایفا می‌کند (Hafeez et al., 2013). منگنز نیز در فعال‌سازی آنزیم‌های مهم چرخه کالوین و سیستم فتوسیستم II برای تجزیه آب در فتوسنتز ضروری است (Alejandro et al., 2020)؛ بنابراین، رفع کمبود این عناصر، زمینه افزایش نرخ فتوسنتز، بهبود رشد رویشی و زایشی و در نتیجه افزایش عملکرد را فراهم می‌آورد. یافته‌های مشابهی توسط Ebrahimzadeh, et al. (۲۰۲۱) گزارش شده که کاربرد کودهای زیستی حاوی ریزمغذی‌ها توانست شاخص‌های رشدی و کیفی خیار را به‌طور معنی‌داری افزایش دهد.

از نتایج جالب توجه این تحقیق، معنی‌دار بودن برهم‌کنش‌های دوتایی و سه‌تایی بین عناصر آهن، روی و منگنز بر عملکرد و صفات میوه بود. بالاترین عملکرد (۳۶۴/۳۰ تن در هکتار) و بیشترین طول میوه (۱۴/۸۳ سانتی متر) از تیمار کاربرد هم‌زمان سطوح بهینه هر سه عنصر (کودهای آهن ۱۱ کیلوگرم، روی و منگنز هر کدام ۵۰ کیلوگرم در هکتار) حاصل شد. این پدیده نشان‌دهنده وجود روابط سینرژیستی بین این ریزمغذی‌ها است. به عنوان مثال، روی برای سنتز پیش‌سازهای مولکول کلروفیل لازم است و آهن برای تشکیل نهایی کلروپلاست ضروری است. از سوی دیگر، منگنز با حفظ یکپارچگی غشاهای کلروپلاستی، محیط مناسب برای عملکرد این دو عنصر را فراهم می‌کند (Cakmak, 2000). همچنین، گزارش شده است که جذب و انتقال این عناصر در گیاه می‌تواند تحت تأثیر یکدیگر قرار گیرد و تعادل مناسب بین آن‌ها برای دستیابی به حداکثر کارایی فیزیولوژیک ضروری است (Zhou et al., 2020). این نتیجه بر اهمیت یک برنامه

نتیجه‌گیری کلی

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که در شرایط خاک‌های قلیایی، سبک و فقیر مصرف کودهای ریزمغذی آهن، روی و منگنز عامل تعیین‌کننده‌ای در دستیابی به عملکرد مطلوب و بهبود کیفیت خیار گلخانه‌ای است. کاربرد جداگانه سطوح بهینه این عناصر (۱۱ کیلوگرم در هکتار کلات آهن، ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات روی و ۵۰ کیلوگرم در هکتار سولفات منگنز) موجب افزایش معنی دار عملکرد و صفات کیفی نسبت به تیمار شاهد گردید. نکته قابل توجه، بروز اثر سینرژیستی میان این سه عنصر بود، به‌طوری‌که کاربرد هم‌زمان سطوح بهینه، بیشترین تأثیر را بر افزایش عملکرد و طول میوه نشان داد. این پدیده بر اهمیت برنامه‌ریزی تغذیه‌ای متوازن و یکپارچه در کشت گلخانه‌ای تأکید دارد. همچنین، تأمین مناسب روی موجب

کاهش معنی‌دار غلظت نیترات در میوه شد که از جنبه سلامت محصول حائز اهمیت است. با این حال، مصرف مقادیر فراتر از سطح مذکور نه تنها موجب بهبود نشد، بلکه احتمال ایجاد عدم تعادل تغذیه‌ای را افزایش می‌دهد. در مجموع، نتایج این پژوهش الگوی مشخصی برای مصرف ریزمغذی‌های آهن، روی و منگنز در کشت خیار گلخانه‌ای در شرایط مشابه با گلخانه مورد مطالعه ارائه می‌دهد که می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تدوین توصیه‌های کودی کارآمد و پایدار باشد.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

Reference

1. Alejandro, S., Holler, S., Meier, B., & Peiter, E. (2020). Manganese in plants: From acquisition to subcellular allocation. *Frontiers in Plant Science*, 11, 300.
2. Asbaghian Namini, S. A., Malakouti, M. J., Ghavidel, A. 2021. The effect of zinc chelate and potassium sulfate topdressing on alleviating the cadmium (Cd) and nitrate (NO₃) toxicity in potato tubers of Ardabil province, IRAN. *Journal of agricultural science of food and technology*. 7(1): 34- 42.
3. Behdarnejad, M., Piri, H., & Delbari, M. (2023). The effect of combined use of vermicompost and poultry manure on the growth and yield of cucumber plants in different conditions of deficit irrigation. *Journal of Water and Soil*, 37(2), 237-259.
4. Briat, J. F., Dubos, C., & Gaymard, F. (2015). Iron nutrition, biomass production, and plant product quality. *Trends in Plant Science*, 20(1), 33-40.
5. Cakmak, I. (2000). Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist*, 146(2), 185-205.
6. Cataldo, D. A., Maroon, M., Schrader, L. E., & Youngs, V. L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6(1), 71-80.
7. Chenchen, J.i., Junli, L. i., Cuncang, J., Lin, Z., Lei, S., Fangsen X., Hongmei, C. 2021. Zinc and nitrogen synergistic act on root-to-shoot translocation and preferential distribution in rice. *Journal of advanced research*. 20(35):187–198.
8. Ebrahimzadeh, A., Davoudi, S., Hassanpouraghdam, M. B., & Rasuli, F. (2021). The effect of three different fertilizers (biofertilizer, organic and inorganic fertilizer) on some post-harvest quality attributes of cucumber (*Cucumis sativus* L.) cultivar "Nagin". *SAPS*, 31(4), 271-286.
9. Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. In A. Klute (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 1. Physical and mineralogical methods* (pp. 383-411). SSSA Book Series.

10. 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.
11. Rengel, Z. (2015). Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 397-409.
12. Rouphael, Y., Kyriacou, M. C., & Petropoulos, S. A. (2020). Editorial: Improving vegetable quality in controlled environments. *Frontiers in Plant Science*, 11, 645.
13. Sabbagh, S. K. and Valizadeh, S. (2016). Effect of bio-fertilizers on greenhouse cucumber resistant to damping-off disease caused by *Pythium aphanidermatum* and increase of yield component. *BIOLOGICAL CONTROL OF PESTS AND PLANT DISEASES*, 5(1), 111-122. **doi: 10.22059/jbioc.2016.58933**
14. Sarhadi, J., Heidari, S., Salarinejad, P. (2022). The best amount of iron, zinc and manganese fertilizers in greenhouse cucumber cultivation in the southern region of Kerman province. *Greenhouse Vegetables*, 5(1), 17-22. (in Persian)
15. Sparks, D., Page, A., Helmke, P., Loeppert, R., Soltanpour, P., Tabatabai, M., Johnston, C., & Summer, M. (1996). Methods of soil analysis, parts 2 and 3 chemical analysis. Soil Science Society of America Inc., Madison.
16. Zhou, J., Zhang, C., Du, B., Cui, H., Fan, X., Zhou, D., & Zhou, J. (2020). Effects of zinc application on cadmium (Cd) accumulation and plant growth through modulation of the antioxidant system and translocation of Cd in low- and high-Cd wheat cultivars. *Environmental Pollution*, 265, 115045.
17. Zhou, X., Yang, J., Kronzucker, H. J., & Shi, W. (2020). Selenium biofortification and interaction with other elements in plants: A review. *Frontiers in Plant Science*, 11, 586421.