19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025
نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴
مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran
۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

ارزیابی اثر کلات آهن Fe-EDDHA و Fe-EDDHSA بر عملکرد، و کارایی تغذیه‌ای گوجه‌فرنگی

غنچه یساری[۱]، احسان قزلباش[۲*]، رسول راهنمایی[۳]،

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران

۲- استادیار گروه علوم و فناوری خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

***ghezelbash@modares.ac.ir**

۳- دانشیار گروه علوم خاک، ددانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران

چکیده

آهن به‌عنوان یکی از ریزمغذی‌های ضروری گیاه، در فرآیندهای حیاتی از جمله رشد، فتوسنتز و بهبود کیفیت میوه نقش اساسی دارد. پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه کارایی دو منبع کلات آهن، Fe-EDDHA و Fe-EDDHSA، در سطوح مختلف غلظت بر عملکرد میوه، شاخص برداشت و غلظت آهن در برگ و میوه گوجه‌فرنگی در شرایط کشت هیدروپونیک انجام شد. آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار، بر روی رقم دافنیس(Dafnis)، در بستر کوکوپیت و پرلیت اجرا شد. تیمارهای آزمایشی شامل دو نوع کلات آهن در پنج سطح غلظتی (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ میکرومولار) بودند. نتایج نشان داد نوع کلات و سطح مصرف آهن تأثیر معنی‌داری بر عملکرد و شاخص برداشت داشتند، به‌طوری‌که بیشترین جرم تر میوه و شاخص برداشت در تیمار Fe-EDDHSA در سطح ۳۵ میکرومولار حاصل شد، در حالی‌که Fe-EDDHA بیشترین کارایی را در سطوح پایین‌تر (۲۰ تا ۲۵ میکرومولار) نشان داد. همچنین غلظت آهن میوه در هر دو کلات به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. بر اساس نتایج این پژوهش، می‌توان استراتژی انتخاب منبع و سطح بهینه کلات آهن را در بهبود عملکرد و کیفیت تغذیه گوجه‌فرنگی در شرایط هیدروپونیک کلیدی و تعیین‌کننده تلقی نمود.

واژگان کلیدی: کلات آهن، گوجه فرنگی، هیدروپونیک، گلخانه

مقدمه

گوجه‌فرنگی (*Solanum lycopersicum* L.) به دلیل ارزش غذایی بالا و مصارف گسترده، یکی از مهم‌ترین سبزی‌های جهان محسوب می‌شود که کیفیت و کمیت آن مستقیماً تحت تأثیر مدیریت تغذیه‌ای قرار دارد (Sellitto et al., 2019). آهن به عنوان یک عنصر کم‌مصرف ضروری، نقش کلیدی در فرآیندهای حیاتی از جمله فتوسنتز، سنتز کلروفیل و عملکرد آنزیم‌ها ایفا می‌کند (El-Desouky et al., 2021). با وجود فراوانی نسبی آهن در خاک‌های مناطق خشک، حلالیت بسیار پایین آن باعث عدم دسترسی زیستی کافی برای گیاهان می‌شود (Alzate Zuluaga et al., 2023). از این رو، استفاده از کودهای کلاته آهن مانند Fe-EDDHA و Fe-EDDHSA جهت تأمین مؤثر این عنصر ضروری است.

کلات Fe-EDDHA به دلیل پایداری در محدوده وسیع pH و آزادسازی تدریجی آهن، به‌طور گسترده استفاده می‌شود. در بین ایزومرهای آن، اورتو-اورتو دارای بالاترین پایداری و قابلیت جذب توسط گیاه است. از سوی دیگر، کلات Fe-EDDHSA با جایگزینی گروه سولفونیک در موقعیت پارا، به طور طبیعی تنها ایزومر اورتو-اورتو تشکیل می‌دهد و از این رو ممکن است کارایی و مقرون‌به‌صرفه‌تری داشته باشد (Klem-Marciniak et al., 2018).

بنابراین، این پژوهش با هدف مقایسه اثر دو منبع کلات آهن (Fe-EDDHA و Fe-EDDHSA) در سطوح مختلف غلظت بر عملکرد میوه، شاخص برداشت و غلظت آهن در برگ و میوه گوجه‌فرنگی انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش آزمایشی به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار، در گلخانه دانشگاه تربیت مدرس (تهران، مرداد تا دی ۱۴۰۳) اجرا شد. تیمارها شامل دو منبع کلات آهن (Fe-EDDHA و Fe-EDDHSA)، و پنج سطح غلظت (۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ میکرومولار) بودند، تیمار شاهد سطح غلظت ۳۰ میکرومولار، از منبع کود Fe-EDDHA بود. گیاه هدف، رقم گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی دافنیس (Dafnis) بود. نشاهای این گونه گیاهی پس از جوانه‌زنی به بستر کوکوپیت و پرلیت (با نسبت۴۰ (کوکوپیت):۶۰ (پرلیت)) در کیسه‌های کشت منتقل شدند. تغذیه گیاهان از طریق سامانه آبیاری قطره‌ای با محلول‌های غذایی اختصاصی هر تیمار انجام گرفت. در پایان دوره رشد، تمامی میوه‌های هر بوته برداشت و جرم تر میوه‌ها با ترازوی دیجیتال (۰/۱ گرم) اندازه‌گیری شد. عملکرد میوه ازحاصل جمع جرم تر میوه‌های هر بوته (با واحد گرم در بوته) محاسبه گردید. همچنین،شاخص برداشت (نسبت بخش اقتصادی محصول به کل زیست‌توده، به‌صورت درصد، یعنی چند درصد از زیست‌توده تولیدشده اقتصادی است)، با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد:

$$\text{شاخص برداشت (درصد)} = \frac{\text{جرم میوه (گرم)}}{\text{جرم کل زیست توده (گرم)}} \times 100 \qquad \text{معادله (۱)}$$

برای تعیین غلظت آهن، نمونه‌های برگ و میوه پس از خشک‌کردن در آون (۶۵–۷۰ درجه سلسیوس، به مدت ۴۸ ساعت) آسیاب و پس از هضم تر، از دستگاه جذب اتمی استفاده شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، با نرم‌افزار SAS (نسخه ۹,۴) انجام شد و مقایسه میانگین نتایج با آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار LSD[1] در سطح ۵ درصد صورت گرفت. همچنین از نرم‌افزار Excel (نسخه ۲۰۱۶) برای رسم نمودارها استفاده شد.

نتایج و بحث

1 - Least Significant Difference

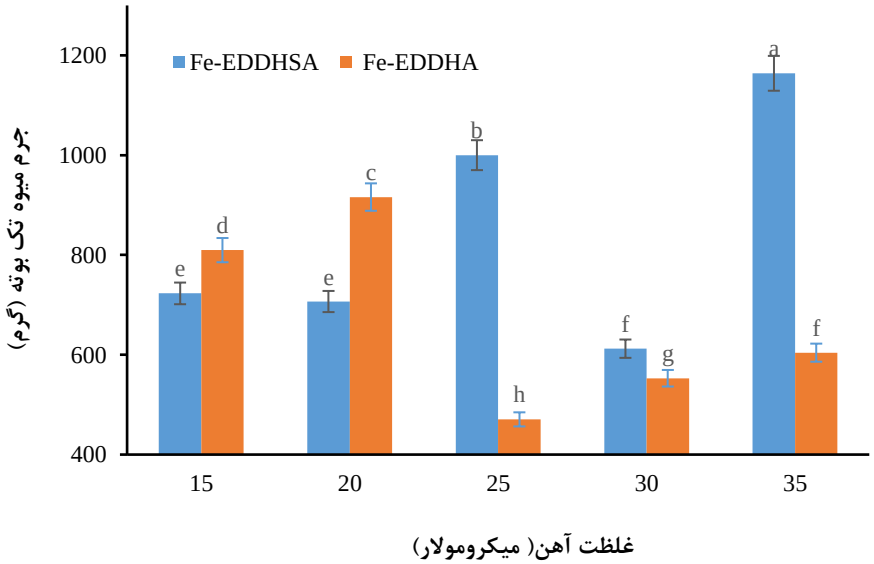
نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای مختلف کلات آهن بر صفات مورد مطالعه در جدول (۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اثر نوع کلات آهن و سطح غلظت آن بر عملکرد میوه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس و نحوه اثر غلظت‌های مختلف آهن بر جرم‌ترمیوه و شاخص برداشت را نشان می‌دهد. نوع کلات آهن و سطح غلظت، بر عملکرد میوه معنی‌دار بود ($P < 0.01$).

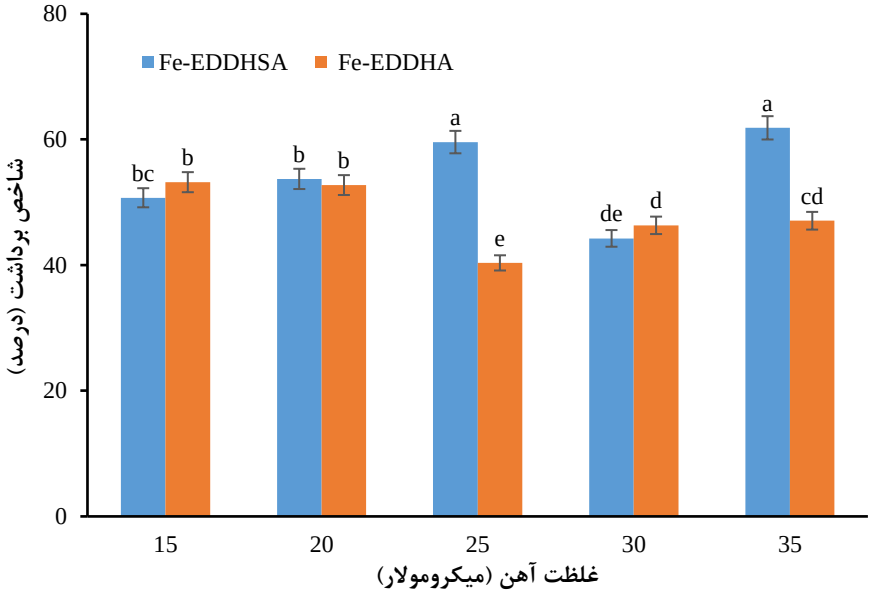
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		جرم تر میوه در بوته	شاخص برداشت
تیمار	۹	۱۸۸۶۰۶/۷۹**	۱۷۹/۱۱**
خطای آزمایشی	۳۰	۵۳۲/۰۱	۷/۶۱
ضریب تغییرات (٪)	-	۳/۰۵	۵/۴۱

** نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد می‌باشد.

نتایج مربوط به تغییرات عملکرد میوه در پاسخ به منابع و سطوح مختلف کلات آهن در شکل (۱) ارائه شده است. در تیمارهای تغذیه‌شده با کلات Fe-EDDHSA، با افزایش غلظت از ۱۵ به ۳۵ میکرومولار، عملکرد میوه در یک روند نسبتاً ثابت افزایش یافت و بیشترین میزان جرم تر میوه (۱۱۵۰ گرم) در غلظت ۳۵ میکرومولار مشاهده شد. در مقابل، در تیمارهای دریافت‌کننده کلات Fe-EDDHA، بیشترین عملکرد در غلظت پایین‌تر(۲۰ میکرومولار) حاصل شد همچنین، ارزیابی شاخص برداشت (شکل ۲) نشان داد که بالاترین میزان این شاخص در غلظت ۳۵ میکرومولار از کلات Fe-EDDHSA به دست آمد. این نتایج حاکی از آن است که استفاده از کلات Fe-EDDHSA در غلظت‌های بالا می‌تواند عملکردی مشابه با کلات Fe-EDDHA در غلظت‌های پایین ایجاد کند. از سوی دیگر، استفاده از کلات Fe-EDDHA در غلظت‌های پایین‌تر می‌تواند به افزایش کارایی مصرف این کود منجر شود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های پیشین مبنی بر تأثیر مستقیم سطوح آهن بر بهبود عملکرد و کیفیت میوه گوجه‌فرنگی مطابقت دارد (Rahman **et** al., 2023).



شکل 1- اثر غلظت تیمارهای آهن (Fe-EDDHA و Fe-EDDHSA) بر جرم میوه تک بوته. محور افقی، در پنج سطح غلظت ۳۰،۲۵،۲۰،۱۵ و۳۵ میکرومولار آهن، نامگذاری شده‌است. تیمار شاهد سطح غلظت ۳۰میکرومولار آهن از منبع کودی Fe-EDDHA می‌باشد. حروف‌های مشترک نشان می‌دهد اختلاف معنی‌دار نیست.



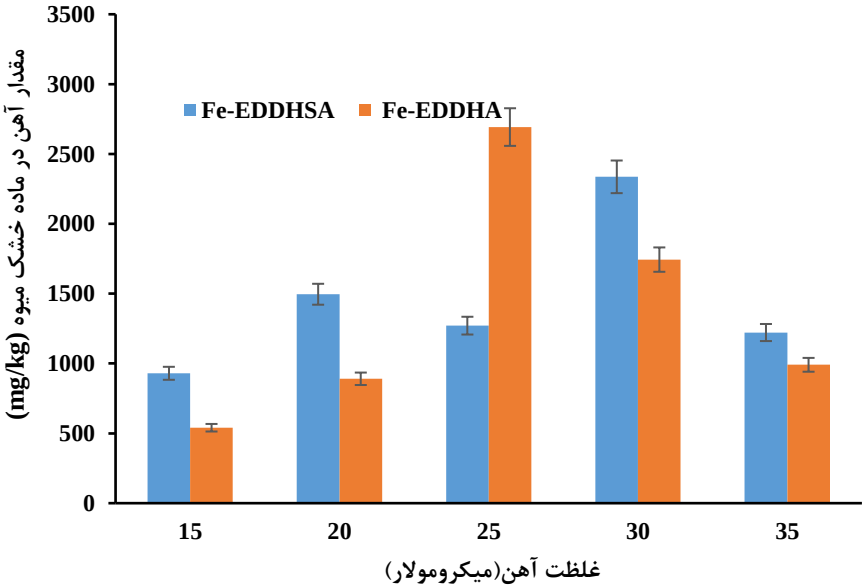
شکل ۱- اثر غلظت تیمارهای آهن(Fe-EDDHA وFe-EDDHSA) بر شاخص برداشت. محور افقی، در پنج سطح غلظت ۱۵،۲۰،۲۵،۳۰ و۳۵ میکرومولار آهن، نامگذاری شده‌است. تیمار شاهد سطح غلظت ۳۰میکرومولار آهن از منبع کودی Fe-EDDHA می‌باشد. حروف‌های مشترک نشان می‌دهد اختلاف معنی‌دار نیست.

غلظت آهن در میوه گوجه‌فرنگی

بررسی تغییرات غلظت آهن در میوه گوجه‌فرنگی نشان داد که هر دو منبع کلات آهن تأثیر معنی‌داری بر این ویژگی داشته‌اند، اما الگوی تغییرات در آنها متفاوت بود (شکل ۳). در تیمارهای تغذیه‌شده با کلات Fe-EDDHSA، افزایش غلظت تا ۳۰ میکرومولار منجر به افزایش معنی‌دار غلظت آهن در میوه شد، در حالی که غلظت‌های پایین‌تر کارایی کمتری نشان دادند. در مقابل، در تیمارهای Fe-EDDHA، بیشترین غلظت آهن میوه در غلظت ۲۵ میکرومولار مشاهده شد و فراتر از آن، کاهش جذب آهن ثبت گردید.

نتایج نشان داد که غلظت آهن میوه در تمام تیمارها در سطح مطلوبی قرار داشت که می‌توان آن را به مزایای سیستم هیدروپونیک نسبت داد. در این سیستم، آهن به صورت یکنواخت در اختیار ریشه قرار می‌گیرد و عوامل محدودکننده رایج در خاک مانند تثبیت توسط کربنات‌ها یا اکسیدهای فلزی وجود ندارد. علاوه بر این، تنظیم pH محلول غذایی در محدوده اسیدی (۵/۵ تا ۶) موجب افزایش حلالیت آهن و تسهیل آزادسازی آن از کمپلکس‌های کلات شده است (Marschner, 2012) ..

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد. گزارش شده است که پایداری کلات‌های Fe-EDDHA و Fe-EDDHSA در محیط اسیدی کاهش یافته و موجب آزادسازی یون آهن می‌شود (Klem-Marciniak et al., 2021). همچنین مطالعات دیگری نشان داده‌اند که تجمع عناصر معدنی در میوه گوجه‌فرنگی در سیستم هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی بیشتر است (Kumar et al., 2022) و افزایش غلظت آهن در محلول غذایی منجر به افزایش جذب این عنصر در میوه می‌شود (Buturi et al., 2022). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شرایط کنترل‌شده هیدروپونیک، به‌ویژه تنظیم pH و حذف عوامل تداخلی خاک، زمینه را برای جذب و انتقال کارآمدتر آهن به میوه فراهم می‌کند.



شکل ۳- اثر غلظت تیمارهای آهن(Fe-EDDHA و Fe-EDDHSA) ، بر مقدار آهن در ماده خشک میوه. محور افقی، در پنج سطح غلظت ۳۰،۲۵،۲۰،۱۵ و۳۵ میکرومولار آهن، نامگذاری شده‌است. تیمار شاهد سطح غلظت ۳۰میکرومولار آهن از منبع کودی Fe-EDDHA می‌باشد. حروف‌های مشترک نشان می‌دهد اختلاف معنی‌دار نیست.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان داد که انتخاب نوع کلات آهن و سطح غلظت بهینه آن تأثیر معنی‌داری بر عملکرد و وضعیت تغذیه‌ای گوجه‌فرنگی، در سیستم کشت گلخانه‌ای دارد. به‌طور مشخص، کاربرد کلات Fe-EDDHSA در غلظت‌های بالاتر (۳۵ میکرومولار) منجر به بهبود قابل‌توجهی در جرم میوه و شاخص برداشت گردید. در مقابل، کلات Fe-EDDHA در غلظت‌های پایین‌تر (۲۰–۲۵ میکرومولار) کارایی بیشتری در بهبود این شاخص‌ها نشان داد.نکته حائز اهمیت آن که هر دو کلات در سطوح بهینه خود قادر به افزایش معنادار غلظت آهن در میوه شدند که نشان‌دهنده نقش کلیدی مدیریت تغذیه‌ای در بهبود کیفیت محصول است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، به‌منظور دستیابی به حداکثر عملکرد و کارایی مصرف آهن، پیشنهاد می‌شود از غلظت‌های بهینه کشف شده در این پژوهش کارایی دو منبع کلات آهن برای اهداف زیر بررسی شود:

الف) از کلات Fe-EDDHSA در غلظت‌های بالاتر (۳۰–۳۵ میکرومولار) برای دستیابی به عملکرد بیشتر

ب) از کلات Fe-EDDHA در غلظت‌های پایین‌تر (۲۰–۲۵ میکرومولار) برای افزایش کارایی مصرف کود

این راهکارها در صورت آزمون در شرایط مختلف و کسب اطمینان کافی، می‌توانند به عنوان یک الگوی مدیریتی مؤثر در سیستم‌های کشت گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی مورد استفاده قرار گیرند.

فهرست منابع

Alzate Zuluaga, M. Y., Cardarelli, M., Rouphael, Y., Cesco, S., Pii, Y., & Colla, G. (2023). Iron nutrition in agriculture: From synthetic chelates to biochelates. *Scientia Horticulturae, 312*, 111833.

Buturi, C. V., Coelho, S. R. M., Cannata, C., Basile, F., Giuffrida, F., Leonardi, C., & Mauro, R. P. (2022). Iron biofortification of greenhouse cherry tomatoes grown in a soilless system. *Horticulturae, 8*(10), 858.

El-Desouky, H. S., Islam, K. R., Bergefurd, B., Gao, G., Harker, T., Abd-El-Dayem, H Zewail, R. M. (2021). Nano iron fertilization significantly increases tomato yield by increasing plants' vegetable growth and photosynthetic efficiency. *Journal of Plant Nutrition, 44*(11), 1649–1663.

Klem-Marciniak, E., Huculak-Mączka, M., Marecka, K., Hoffmann, K., & Hoffmann, J. (2021). Chemical stability of the fertilizer chelates Fe-EDDHA and Fe-EDDHSA over time. *Molecules, 26*(7), 1933.

Kumar, K., Acharya, S., Verma, V. C., Tsewang, T., Tiwari, V. K., Avantika, A., Kumari, K., & Chaurasia, O. P. (2022). Comparative evaluation of physico-chemical response of tomato varieties under hydroponic technique vs soil cultivation in natural ventilated greenhouse at trans-Himalayan India. *Vegetos, 36*(3), 825–832.

Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). London: Academic Press.

Rahman, A., Harker, T., Lewis, W., & Islam, K. R. (2023). Nano and chelated iron fertilization influences marketable yield, phytochemical properties, and antioxidant capacity of tomatoes. *PLOS ONE, 18*(11), e0294033.

Sellitto, V. M., Golubkina, N. A., Pietrantonio, L., Cozzolino, E., Cuciniello, A., Cenvinzo, V., Florin, I., & Caruso, G. (2019). Tomato yield, quality, mineral composition and antioxidants as affected by beneficial microorganisms under soil salinity induced by balanced nutrient solutions. *Agriculture, 9*(6), 110.

Evaluation of the Effects of Fe-EDDHA and Fe-EDDHSA Iron Chelates on Tomato Yield and Nutritional Efficiency

Ghoncheh Yasari[1], Ehsan Ghezelbash[2*], Rasoul Rahnemaie[3]

1- Msc Student, Department of Soil Science and technology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Soil Science and technology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. *ghezelbash@modares.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Soil Science and technology, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

Iron, as an essential micronutrient, plays a crucial role in vital plant processes such as growth, photosynthesis, and fruit quality improvement. The present study was conducted to evaluate and compare the efficiency of two iron chelate sources, Fe-EDDHA and Fe-EDDHSA, at different concentrations on fruit yield, harvest index, and iron concentration in leaves and fruits of tomato under hydroponic conditions. The experiment was arranged as a factorial based on a completely randomized design with four replications, using the tomato cultivar Daphnis grown in a cocopeat and perlite substrate. Treatments consisted of two iron chelate types at five concentration levels (15, 20, 25, 30, and 35 µM). The results indicated that both chelate type and iron concentration had significant effects on yield and harvest index. The highest fruit fresh weight and harvest index were obtained with Fe-EDDHSA at 35 µM, whereas Fe-EDDHA showed higher efficiency at lower levels (20–25 µM). Moreover, fruit iron concentration significantly increased under both chelates. Overall, selecting the appropriate source and concentration of iron chelate can be an effective strategy to improve yield and nutritional efficiency of tomato under hydroponic greenhouse conditions.

Keywords: Fe chelate, Tomato, Hydroponics, Greenhouse