



Research Paper

Investigating the Morphophysiological and Biochemical Indicators of Parsley (*Petroselinum Sativum*) Using Iron Chelate and Iron Nano-Chelate

Morteza Mohamadi¹, Elham Danaee^{2*}

¹M. Sc, Department of Horticultural Sciences, Garmsar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran

²Associate Professor, Department of Horticultural Sciences, Garmsar Branch, Islamic Azad University, Garmsar, Iran

Received: 13/10/2023, Accepted: 30/06/2024

Abstract

Iron is one of the important micronutrients in the growth and development of plants. In order to investigate the effects of iron chelate and nano-iron chelate on the morphophysiological and biochemical indicators of parsley, an experiment was conducted in the form of a completely randomized statistical design with five treatments, three replications and each replication containing three pots, in a commercial greenhouse located in Garmsar city. Iron chelate and iron nano-chelate were sprayed on the plants in three concentrations of 0, 2.5 and 5 g/L in 4 and 6 leaf stages. The results of the evaluated traits showed that the highest fresh and dry weight of shoots and roots were in nano iron chelate 5 g/L treatment. Iron chelates 5 g/L treatment had the highest total chlorophyll content. The highest amount of iron (79.23 mg/g dry weight) was obtained in nano iron chelate, 5 g/L treatment. Also, the highest activities of peroxidase and superoxide dismutase enzymes were in iron chelate 5 g/L and nano iron chelate 5 g/L treatments, respectively. Therefore, according to the results of the present research, the use of iron chelate and nano-iron chelate of 5 g/L is recommended to improve the morphophysiological and biochemical indicators of parsley.

Keywords: Iron, Iron Chelate, Iron Nano Chelate, Parsley

Citation: Mohamadi M, Danaee E, Investigating the morphophysiological and biochemical indicators of parsley (*Petroselinum sativum*) using iron chelate and iron nano-chelate. *Quality and Durability of Agricultural Products and Food Staffs*, 2024; 4(1): 1-13.



© The Author(s) **Publisher:** Islamic Azad University of Kerman, Iran

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2024.915902>

*Corresponding author: Elham Danaee, Email: dr.edanaee@yahoo.com

Extended Abstract

Introduction

Parsley (*Petroselinum sativum*) is a widely cultivated herb, renowned for its rich content of essential micronutrients, vitamins, and phytochemicals, which contribute to its broad application in food, pharmaceutical, and cosmetic industries. Iron (Fe) is one of the critical micronutrients in plant metabolism, necessary for various physiological processes such as photosynthesis, respiration, and nitrogen fixation. However, its availability in alkaline soils is often limited due to its low solubility, which can cause iron deficiency and result in chlorosis and reduced plant performance. Iron chelates, particularly nano-iron chelates, are gaining attention as innovative fertilizers due to their enhanced solubility and plant uptake efficiency. This study investigates the impact of iron chelate and nano-iron chelate on the morphophysiological and biochemical traits of parsley, assessing their potential to improve plant growth and nutritional quality.

Methods

The study was conducted in a commercial greenhouse in Garmsar, Iran, using a completely randomized design with five treatments, three replications, and each replication consisting of three pots. Parsley seeds (*Petroselinum sativum*) were planted in pots filled with sandy loam soil and grown under controlled conditions. Iron chelate (Fe-EDDHA) and nano-iron chelate, at concentrations of 0, 2.5, and 5 g/L, were applied as foliar sprays during the 4-leaf and 6-leaf growth stages. The study measured several growth and biochemical parameters, including fresh and dry weights of shoots and roots, total chlorophyll content, iron concentration in plant tissues, and the activities of key

antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD). Statistical analysis was performed using SAS software, and mean comparisons were made using Duncan's multiple range test at 1% and 5% significance levels.

Results and Discussion

The results indicated that the application of both iron chelate and nano-iron chelate significantly influenced various growth and biochemical parameters. The highest fresh and dry weights of both shoots and roots were observed in the treatment with nano-iron chelate at 5 g/L. This treatment also resulted in the highest total chlorophyll content (4319.5 mg/g fresh weight) and the highest iron content in plant tissues (79.23 mg/g dry weight). The enzyme activity results showed that the highest superoxide dismutase (SOD) activity (46.2 units/mg fresh weight) was recorded in the nano-iron chelate 5 g/L treatment, while the highest peroxidase (POD) activity (41.8 units/mg fresh weight) was observed in the iron chelate 5 g/L treatment. These findings suggest that nano-iron chelate provides superior plant nutrition, enhancing both growth and antioxidant defense mechanisms. The results of this study are consistent with previous research indicating that the availability of iron plays a critical role in enhancing plant growth and improving metabolic functions. Iron is integral to photosynthesis and chlorophyll synthesis; hence, its adequate supply directly impacts plant health and productivity. The increased chlorophyll content and higher iron accumulation observed in plants treated with nano-iron chelate can be attributed to the enhanced bioavailability and uptake of iron due to the nano-structural properties of the chelate. These findings are in line with studies that report improved plant growth and higher chlorophyll content with nano-iron applications compared to traditional chelates. Furthermore, the increased activity of antioxidant enzymes in treated

plants reflects enhanced stress resistance, which is vital for maintaining plant health under various environmental conditions. The superior performance of nano-iron chelates over traditional iron chelate could be explained by the higher surface area and reactivity of nanoparticles, which facilitate more efficient nutrient uptake. Additionally, the slower and controlled release of nutrients from nano-chelates minimizes nutrient leaching and enhances nutrient use efficiency, making them an effective alternative to conventional fertilizers.

Conclusion

This study demonstrates that foliar application of iron chelate and nano-iron chelate significantly improves the morphophysiological and biochemical characteristics of parsley. Among the treatments tested, nano-iron chelate at a concentration of 5 g/L was most effective in enhancing plant growth, chlorophyll content, iron accumulation, and antioxidant enzyme activity. Therefore, the use of nano-iron chelate is recommended for improving parsley growth and quality, offering a sustainable alternative to conventional iron fertilizers. Further research is needed to explore the long-term effects of nano-iron chelates on different plant species and under varying environmental conditions.

Keywords: Iron, Iron Chelate, Iron Nano Chelate, Parsley

Funding: There was no external funding in this study.

Authors' contribution: All authors contributed equally to the writing and preparation of this manuscript.

Conflict of interest: The authors do not have any conflicts of interest with any commercial or other association with the article.



مقاله پژوهشی

بررسی شاخص‌های مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه جعفری (*Petroselinum sativum*)
با کاربرد کلات آهن و نانو کلات آهن

مرتضی محمدی^۱، الهام دانائی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، گروه علوم باغبانی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران

^۲ دانشیار، گروه علوم باغبانی، واحد گرمسار، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمسار، ایران

دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰

چکیده

آهن یکی از ریزمغذی‌های مهم در رشد و نمو گیاهان است. به‌منظور بررسی اثرات کلات آهن و نانو کلات آهن بر شاخص‌های مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه جعفری، پژوهشی در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با ۵ تیمار، ۳ تکرار و هر تکرار حاوی ۳ گلدان، در گلخانه تجاری واقع در شهرستان گرمسار، انجام شد. کلات آهن و نانو کلات آهن هر کدام در سه غلظت صفر، ۲/۵ و ۵ گرم در لیتر در مراحل ۴ و ۶ برگ‌ریزی گیاهان محلول‌پاشی شد. نتایج صفات مورد ارزیابی نشان داد که بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه در تیمار نانو کلات آهن ۵ گرم در لیتر، بود. تیمار کلات آهن ۵ گرم در لیتر، بالاترین محتوای کلروفیل کل (۵/۴۳۱۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر) را داشت. بیشترین میزان آهن (۷۹/۲۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) در تیمار نانو کلات آهن ۵ گرم در لیتر، به دست آمد. همچنین بیشترین فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز (۲/۴۶) واحد آنزیم در گرم وزن تر) و پراکسیداز (۸/۴۱) واحد آنزیم در گرم وزن تر) به ترتیب در تیمارهای کلات آهن ۵ گرم در لیتر و نانو کلات آهن ۵ گرم در لیتر، بود. لذا با توجه به یافته‌های به‌دست‌آمده، استفاده از کلات آهن و نانو کلات آهن ۵ گرم در لیتر برای بهبود شاخص‌های مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه جعفری، توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آهن، کلات آهن، نانو کلات آهن، جعفری

استناد: مرتضی محمدی، الهام دانائی، بررسی شاخص‌های مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه جعفری (*Petroselinum sativum*) با کاربرد کلات آهن و نانو کلات آهن، کیفیت و ماندگاری تولیدات کشاورزی و مواد غذایی،

(۱۴۰۳)، دوره ۴، شماره ۱، صفحات ۱-۱۳.

DOI: <https://doi.org/10.71516/qafj.2024.915902>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان، ایران

© نویسندگان



مقدمه

جعفری با نام علمی *Petroselinum sativum* Mill گیاهی از خانواده چتریان (Apiaceae)، است که در بسیاری از نقاط جهان و ایران کشت می‌شود (۱). این گیاه منبع غنی از آهن، فسفر، کلسیم، پتاسیم، منیزیم، روی، ید و ویتامین‌های A، B و C است. جعفری یکی از گیاهان پرمصرف در صنایع غذایی، دارویی، عطر و آرایشی-بهداشتی می‌باشد (۲). این گیاه طبیعت گرم و خشک دارد. در طب سنتی از برگ آن برای درمان یبوست، نفخ شکم، یرقان، قولنج، ادم، روماتیسم، مشکلات پروستات و بیماری کبدی استفاده می‌شود. روغن‌های ضروری آپیل، مریستیسین و فلاونوئیدهای آپیین و لوتولین در جعفری وجود دارد که نقش چشمگیری در فعالیت‌های فارماکولوژیکی دارند (۳). همچنین این گیاه حاوی استرول‌های اشباع‌نشده، ساپونین‌ها، گلیکوزیدها، کارتوئیدها، کومارین‌ها، اسید آسکوربیک، برگابتن، توکوفرول، سسکوئی‌ترین است (۴). کاربرد بیش از اندازه کودهای شیمیایی سبب مشکلات متعددی از جمله تغییر ساختمان خاک، کاهش نفوذپذیری خاک، آلودگی آب‌های زیرزمینی، تجمع نیترات و سمیت عناصر سنگین شده است (۵)؛ بنابراین، استفاده صحیح از عناصر غذایی در طول مراحل رشد گیاهان، علاوه بر نقش مؤثری که در افزایش عملکرد آن‌ها دارد موجب بهبود کیفیت و عملکرد نیز می‌شود (۶). همچنین شناخت عوامل تغذیه‌ای گیاه و نحوه تأثیر آن‌ها بر خصوصیات کمی و کیفی محصول از مهم‌ترین جنبه‌های موفقیت به شمار می‌رود (۷). امروزه انواع عناصر کم‌مصرف با فناوری نانو به دو شکل نانوذره و نانو کلات غنی شده‌اند تا ضمن ایجاد محیطی مناسب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها، توان گیاه را در رشد و تولید محصول تقویت کند (۸ و ۹). استفاده از فناوری نانو در تمام عرصه‌ها از جمله کشاورزی در حال گسترش می‌باشد. نانوکودها به‌عنوان جایگزین کودهای مرسوم، عناصر غذایی را به تدریج و به صورت کنترل شده در خاک آزاد می‌کنند (۱۰). از جمله مزایای استفاده از نانوکودها می‌توان به افزایش راندمان و کیفیت منابع غذایی به‌واسطه سرعت جذب بالا (۱۱)، کاهش قابل‌توجه آلودگی خاکی،

ذخایر آبی و محصولات غذایی به واسطه کاهش آبخوبی کودها، عدم اتلاف کودها توسط آبخوبی و جاذب کامل کود توسط گیاه به دلیل رهاسازی عناصر غذایی کود با سرعت مطلوب در تمام طول فصل رشد اشاره کرد (۱۲). گیاهان برای رشد مناسب به عرضه مداوم آهن نیاز دارند. آهن یکی از اساسی‌ترین عناصر تشکیل‌دهنده سیستم‌های اکسید و احیاکننده در گیاهان است و به علت توانایی در تغییر ظرفیت می‌تواند به‌عنوان یک جزء اساسی در سیستم اکسید و احیا، انتقال الکترون را تسهیل کند. این عنصر از مهم‌ترین ترکیبات آنزیم‌های مرتبط با انتقال الکترون مانند سیتوکروم، پروتئین و سولفور آهن است. همچنین جزء اصلی پروتئین‌های مرتبط با فتوسنتز و تثبیت نیتروژن و تنفس می‌باشد. بیشترین مقدار آهن در کلروپلاست برگ‌های سبز وجود دارد. کم‌تحرك بودن و جذب کم آهن یکی از دلایل مهم و اصلی برای زردی ناشی از کمبود آهن در گیاهانی است که در خاک‌های آهکی رشد می‌کنند (۱۳). استفاده از ترکیبات آهن بهترین راه‌حل برای برطرف کردن زردی ناشی از کمبود آهن در همه خاک‌ها و به‌خصوص خاک‌های قلیایی بوده و می‌توانند شدیدترین مشکلات تغذیه‌ای گیاهان را علاج نمایند و از آنجاکه دامنه محدودی بین اثرات سمیت و کمبود آهن در گیاهان وجود دارد، بنابراین توجه به نوع کود آهن و میزان مصرف آن ضروری می‌باشد (۱۴). بر همین اساس، نتایج تحقیق Kobdani و همکاران (۱۴۰۰)، نشان داد که استفاده از نانو کلات آهن موجب بهبود عملکرد، درصد موسیلاژ و روغن میوه بامیه (*Abelmoschus esculentus* L.) شد (۱۱). Fatahi- Siahkamari و همکاران (۱۳۹۸)، اثر نانوکلات آهن بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و اسانس گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.)، بررسی کردند و نتیجه گرفتند که کاربرد کودهای نانو می‌تواند گام مؤثری در جهت بهبود عملکرد و کیفیت محصول و جایگزینی مناسب برای کاهش مصرف کودهای شیمیایی باشد (۵). همچنین در رابطه با گیاه سیب (*Malus pumila*) استفاده از کلات آهن تأثیر معنی‌داری بر کیفیت و عملکرد محصول داشت (۱۵). استفاده از نانو کلات آهن

در ارقام خرفه (*Portulaca oleracea* L.)، موجب افزایش عملکرد شد (۱۶). نتایج تحقیق Azad و همکاران (۲۰۱۷)، نشان داد که مصرف نانو کلات آهن سبب بهبود عملکرد و سیستم فتوسنتزی گیاه بابونه (*Matricaria Chamomilla* L.) شد (۱۷). با توجه به نقش ترکیبات آهن در بهبود کیفیت و عملکرد گیاهان، این تحقیق به منظور بررسی شاخص‌های رشد گیاه جعفری با کاربرد کلات آهن و نانو کلات آهن انجام گردید.

روش کار

به منظور بررسی تأثیر محلول پاشی کلات آهن و نانو کلات آهن بر شاخص‌های رشد گیاه جعفری، آزمایشی در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با ۵ تیمار، ۳ تکرار و هر تکرار حاوی ۳ گلدان، در گلخانه تجاری واقع در شهرستان گرمسار با دوره نوری شامل ۱۴ ساعت روشنایی و ۱۰ ساعت تاریکی و درجه حرارت 26 ± 2 و 20 ± 2 درجه

سانتی‌گراد به ترتیب در طول روز و شب، اجرا شد. بذرهای جعفری (F1) خریداری شده از شرکت پاکان بذر اصفهان در گلدان‌هایی به قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۶ سانتی‌متر حاوی خاک لومی شنی، کشت شد. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری در پنج نقطه به طور تصادفی برداشت شد و ویژگی‌های آن به شرح جدول (۱) تعیین گردید (۱۸). محلول پاشی کلات آهن و نانو کلات آهن در مراحل ۲ تا ۴ برگ و ۴ تا ۶ برگ، محلول پاشی به اندازه‌ای صورت گرفت که تمام اندام هوایی گیاه خیس گردد. برای جلوگیری از جذب خاکی محلول، سطح بستر پوشانده شد. کلات آهن (Fe-EDDHA) و نانو کلات آهن (شرکت خضراء) هر کدام در سه غلظت صفر، ۲/۵ و ۵ گرم در لیتر و آب مقطر به عنوان شاهد (غلظت صفر) بود. نمونه برداری و سنجش صفات، دو هفته پس از آخرین محلول پاشی انجام شد.

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

بافت خاک	pH	EC (dS.m-1)	کربن آلی (درصد)	نیترژن کل (درصد)	فسفر (میلی گرم در گرم)	پتاسیم (میلی گرم در گرم)	آهن (میلی گرم در گرم)
لومی شنی	۶/۹۵	۱/۴۱	۰/۷۲	۰/۰۸۱	۱۱	۳۲۷	۱/۴

Flex 6600)، قرائت گردید و در نهایت برحسب میلی گرم در گرم وزن تر برگ، بیان شد (۲۰).

$$\text{Chl} = (20.2 \times (A_{645}) + 8.02 \times (A_{663})) \times V / (1000 \times W)$$

طول موج: A، وزن نمونه: W، حجم نمونه: V

وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه

وزن تر اندام هوایی و ریشه بلافاصله پس از برداشت و وزن خشک آن‌ها پس از ۷۲ ساعت که در آون با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند، توسط ترازوی دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ گرم، اندازه‌گیری شد (۱۹).

آهن

از بافت‌های گیاهی تمیز شده که در داخل آون با دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت به صورت کامل خشک شده‌اند، برای اندازه‌گیری میزان آهن توسط دستگاه جذب اتمی (Analyst 700, Perkin Elmer)

کلروفیل کل

برای سنجش محتوای کلروفیل کل، ۰/۳ گرم نمونه از برگ گیاه در حلال استون ۸۰ درصد، سائیده شد. سپس میزان جذب در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر (UV Visible مدل Spectro

۵۶۰ نانومتر، قرائت و برحسب واحد آنزیم در گرم وزن تر برگ بیان شد (۲۱).

USA) استفاده گردید. میزان آهن بر حسب میلی گرم در گرم وزن خشک به دست آمد (۱۵).

فعالیت آنزیم پراکسیداز

ابتدا ۲ میلی لیتر تامپون استات (۰/۲ مولار با pH معادل ۵)، ۰/۴ میلی لیتر آب اکسیژنه (۳ درصد) و ۰/۲ میلی لیتر بنزیدین محلول در الکل ۵۰ درجه ۰/۱ مولار مخلوط شد و سپس به آن ۰/۱ میلی لیتر عصاره آنزیم اضافه گردید. میزان جذب نمونه ها در طول موج ۵۳۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر، قرائت و در نهایت بر حسب واحد آنزیم در گرم وزن تر برگ به دست آمد (۲۲).

فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز

عصاره آنزیم از ۱ گرم برگ گیاه تهیه شد. سپس ۱ میلی لیتر از محلول حاوی بافر فسفات (۵۰ میلی مولار با pH ۷/۸، متیونین (۹/۹ میلی مولار)، NBT (۵۷ میکرومولار) و تریتون (۰/۰۲۵ درصد) به ۲۰ میکرولیتر عصاره آنزیم، اضافه گردید. با اضافه کردن ریبوفلاوین (۱۰ میکرولیتر) و قرار دادن نمونه ها در جعبه حاوی ۲ لامپ فلوروسنت برای ۷ دقیقه، واکنش صورت گرفت. میزان جذب با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر محلول پاشی کلات آهن و نانو کلات آهن بر شاخص های رشد گیاه جعفری

میانگین مربعات									منبع تغییرات
پراکسیداز	سوپراکسید دیسموتاز	آهن	کلروفیل کل	وزن خشک ریشه	وزن تر ریشه	وزن خشک اندام هوایی	وزن تر اندام هوایی	درجه آزادی	
۳۷/۲۵۶*	۷/۸۲۵**	۳۴/۶۱۸*	۲۷/۱۹۳**	۶/۳۲۸*	۲۳/۱۶۹**	۱۱/۲۴۷**	۵۶/۵۷۲**	۴	تیمار
۰/۶۳۹	۰/۱۶۹	۰/۵۸۷	۰/۵۱۸	۰/۰۹۷	۰/۴۶۳	۰/۲۲۶	۰/۸۴۱	۱۰	خطا
۱۰/۴۹	۱۱/۳۷	۹/۶۸	۹/۴۶	۱۰/۵۳	۹/۷۵	۹/۴۱	۱۰/۲۳	-	ضریب تغییرات (%)

***، **، * ns به ترتیب، معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد و غیرمعنی دار

وزن خشک ریشه و فعالیت آنزیم پراکسیداز در سطح ۵ درصد معنی دار شد (جدول ۲).

وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه

مقایسه میانگین داده ها نشان داد که بیشترین و کمترین وزن تر اندام هوایی به ترتیب در تیمار نانو کلات آهن ۵ گرم در لیتر (۱۳/۲۷ گرم) و تیمار شاهد (۸/۱۴ گرم) بود. تیمار نانو کلات آهن ۵ گرم در لیتر با ۲/۷۵ گرم، بیشترین و تیمار شاهد با ۱/۴۸ گرم، کمترین وزن خشک اندام هوایی را داشتند. بیشترین وزن تر و خشک ریشه به ترتیب در تیمار نانو کلات آهن ۵ گرم در لیتر با

تجزیه و تحلیل آماری

داده های حاصل از انجام آزمون ها، با نرم افزار SAS (ver 9.1) آنالیز شد. مقایسه میانگین ها با آزمون چند دامنه ای دانکن در سطح ۱ و ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر محلول پاشی کلات آهن و نانو کلات آهن بر وزن تر و خشک اندام هوایی، وزن تر ریشه، محتوای کلروفیل کل، میزان آهن و فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سطح ۱ درصد و بر

۴/۶۳ گرم و ۱/۵۸ گرم بود. کمترین وزن تر و خشک ریشه به ترتیب با ۲/۷۴ گرم و ۰/۶۹ گرم در تیمار شاهد به دست آمد (جدول ۳). فراهمی عناصر غذایی از طریق تأثیر بر فرآورده‌های رشد گیاهان، می‌تواند موجب افزایش عملکرد و بهبود رشد شود (۲۳). Amaliotis و همکاران (۲۰۰۲)، گزارش کردند که بین غلظت آهن و عملکرد گیاه یک رابطه خطی معنی‌داری وجود دارد، به‌طوری‌که در اثر مصرف آهن، محتوای کلروفیل، فتوسنتز و رشد رویشی گیاه افزایش می‌یابد و این مسئله سبب افزایش سطح کربن‌گیری و در نتیجه میزان ماده خشک تولیدی در گیاه می‌شود (۲۴). نتایج آزمایش Singh و همکاران (۲۰۰۳)، نشان داد که مصرف ترکیبات آهن‌دار موجب افزایش عملکرد گیاه علف لیمو (*Cymbopogon flexuosus*) می‌گردد (۲۵). در آزمایشی مصرف نانوذرات آهن موجب افزایش رشد طولی لوبیا (*Vigna sinensis*) گردید که این به دلیل سطح مخصوص نانوذرات آهن و

قابلیت جذب و تحرک بیشتر در گیاه است (۲۶). همچنین Pourebrahimi و همکاران (۲۰۱۴)، بیان کردند که به نظر می‌رسد محلول‌پاشی نانو کلات آهن سبب دسترسی بهتر به عناصر غذایی، افزایش فتوسنتز و ماده‌سازی در گیاهان می‌شود و افزایش فتوسنتز و ماده‌سازی موجب افزایش چشمگیر وزن تر و خشک ریشه و اندام هوایی می‌گردد (۲۳). نتایج Jabeen و همکاران (۲۰۱۱)، در آفتابگردان (۲۷) و Zayed و همکاران (۲۰۱۱)، در برنج (۲۸) نیز حاکی از افزایش وزن تر و خشک گیاه در نتیجه دسترسی به اشکال مختلف آهن است. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه گیاه جعفری با استفاده از کلات و نانو کلات آهن افزایش یافت که کاربرد نانو کلات آهن به دلیل فراهمی و در دسترس قرار دادن بیشتر عنصر غذایی آهن، نسبت به کلات معمولی دارای برتری داشت.

جدول ۳- تأثیر محلول‌پاشی کلات آهن و نانو کلات آهن بر شاخص‌های رشد گیاه جعفری

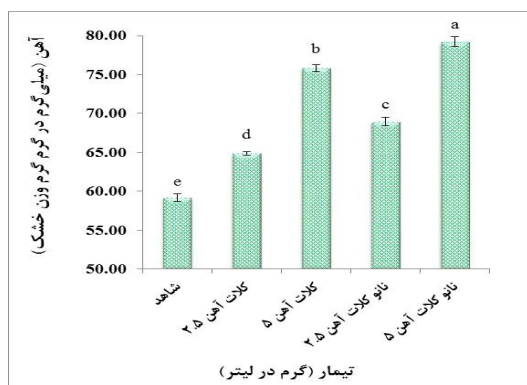
تیمار (گرم در لیتر)	وزن تر اندام هوایی (گرم)	وزن خشک اندام هوایی (گرم)	وزن تر ریشه (گرم)	وزن خشک ریشه (گرم)
شاهد (عدم محلول‌پاشی)	۸/۱۴ ^e	۱/۴۸ ^e	۲/۷۴ ^e	۰/۶۹ ^d
کلات آهن ۲/۵	۱۰/۹۳ ^c	۱/۹۳ ^c	۳/۲۷ ^d	۰/۹۳ ^c
کلات آهن ۵	۱۲/۶۵ ^b	۲/۴۳ ^b	۴/۳۱ ^b	۱/۴۳ ^a
نانو کلات آهن ۲/۵	۱۰/۴۸ ^d	۱/۷۶ ^d	۳/۶۵ ^c	۱/۱۵ ^b
نانو کلات آهن ۵	۱۳/۲۷ ^a	۲/۷۵ ^a	۴/۶۳ ^a	۱/۵۸ ^a

حروف یکسان بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار در سطح $P \leq 0.05$ است.

کلروفیل کل و میزان آهن

نتایج نشان داد که بیشترین محتوای کلروفیل کل در تیمار کلات آهن ۵ گرم در لیتر (۵/۴۳۱۹ میلی‌گرم در گرم وزن تر) و کمترین در تیمار شاهد (۳/۴۲۷۴ میلی‌گرم در گرم وزن تر) بود (شکل ۱). همچنین بیشترین و کمترین میزان آهن به ترتیب در تیمار نانو

کلات آهن ۵ گرم در لیتر (۷۹/۲۳ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) و تیمار شاهد (۵۹/۱۷ میلی‌گرم در گرم وزن خشک) بود (شکل ۲). در بین عناصر کم‌مصرف، گیاهان به آهن نیاز بیشتری دارند که ممکن است به صورت یون فریک (Fe^{3+}) یا فرو (Fe^{2+}) جذب شود، البته به دلیل بیشتر بودن محلولیت یون فرو، جذب آن نیز بیشتر

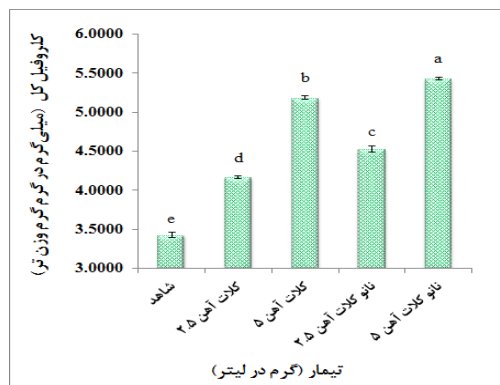


شکل ۲- تأثیر محلول پاشی کلان آهن و نانو کلان آهن بر میزان آهن

آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز

نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز به ترتیب در تیمار نانو کلان آهن ۵ گرم در لیتر (۲/۴۷ واحد آنزیم در گرم وزن تر) و کمترین در تیمار شاهد (۱/۲۶ واحد آنزیم در گرم وزن تر) بود. بیشترین فعالیت آنزیم پراکسیداز با ۸/۴۱ واحد آنزیم در گرم وزن تر در تیمار کلان آهن ۵ گرم در لیتر و کمترین با ۶/۱۳ واحد آنزیم در گرم وزن تر در تیمار شاهد به دست آمد (شکل‌های ۳ و ۴). در برخی گزارش‌ها ذکر شده است که کمبود آهن موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز می‌گردد که این امر سبب کاهش شدید نرخ فتوسنتزی گیاه و کاهش عملکرد، می‌شود (۳۵)؛ زیرا آهن نقش مستقیمی در فعالیت آنزیم‌ها و چرخه انتقال الکترون دارد (۳۱) و به‌عنوان فعال‌کننده آنزیم‌ها و یا کوفاکتور در ساخت کلروفیل عمل می‌کند که در فتوسنتز گیاه مؤثر است. فراهمی این عنصر با تأثیر بر متابولیسم گیاه می‌تواند نقش مؤثری در فعالیت آنزیم‌ها، داشته باشد (۳۲). نتایج این تحقیق نیز، نشان داد محلول پاشی کلان آهن و نانو کلان آهن در گیاه جعفری، سبب افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز و پراکسیداز شد. مطابق با یافته‌های Yousefzadeh و همکاران (۲۰۱۶)، کاربرد کلان آهن و نانو کلان آهن با فراهمی و تسهیل دسترسی به عناصر غذایی در گیاهان موجب بهبود فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و سوپراکسید دیسموتاز در گیاه بادرشبو (*Dracocephalum moldavica* L.) شد (۳۶). همچنین فعالیت آنزیم‌های پراکسیداز و سوپراکسید

می‌باشد (۲۹). کمبود آهن موجب از بین رفتن همزمان کلروفیل و تخریب ساختمان کلروپلاست می‌شود که در نتیجه منجر به بروز زردی سطح کل برگ به جز رگبرگ‌ها می‌گردد. این علائم ابتدا در برگ‌های جوان و قسمت بالای ساقه مشاهده می‌شود و به تدریج کل گیاه را در برمی‌گیرد. همچنین کمبود آهن سبب تغییر غلظت و میزان آهن در بافت‌های گیاهی می‌گردد که رابطه نزدیکی با عملکرد گیاهان دارد (۳۰). مهم‌ترین عواملی سبب کمبود آهن در گیاهان می‌شوند شامل بالا بودن pH خاک، سطح بالای آهک، زیاد بودن غلظت بی‌کربنات محلول در خاک، کمبود مواد آلی، ناتوانی ریشه گیاهان در جذب آهن و رطوبت زیاد خاک است (۳۱). به‌طور کلی آهن نقش مستقیمی در ساختار کلروفیل، تثبیت نیتروژن و فتوسنتز دارد و کاربرد اشکال مختلف آهن سبب افزایش میزان آهن در بافت‌های گیاهی و افزایش محتوای کلروفیل می‌گردد (۳۲). در این تحقیق محتوای کلروفیل و میزان آهن در گیاهان تیمار شده با غلظت‌های مختلف کلان آهن و نانو کلان آهن، بیشتر از تیمار شاهد بود که با نتایج Rusta و همکاران (۲۰۱۷)، هم‌راستا می‌باشد که نشان داد در فلفل دلمه‌ای (*Capsicum annum* L.) استفاده از کلان آهن و نانو کلان آهن با تأمین ذخایر عناصر غذایی کافی برای گیاه سبب افزایش میزان آهن و محتوای کلروفیل میوه می‌شود (۳۳) و نیز، با دستاوردهای Izadi و همکاران (۲۰۱۸)، که بیان کردند با بهبود دسترسی گیاه ماش (*Vigna Radiata* L.) به آهن، میزان این عنصر کم‌مصرف با استفاده از نانو کلان آهن افزایش یافت (۳۴)، مطابقت دارد.



شکل ۱- تأثیر محلول پاشی کلان آهن و نانو کلان آهن بر محتوای کلروفیل کل

***، * و ns به ترتیب، معنی دار در سطح احتمال ۱ درصد، ۵ درصد و غیر معنی دار

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که بیشترین وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، میزان آهن و فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در تیمار نانو کلات آهن ۵ گرم در لیتر، به دست آمد. بیشترین محتوای کلروفیل کل و فعالیت آنزیم پراکسیداز در تیمار کلات آهن ۵ گرم بود. در مجموع می توان بیان کرد که محلول پاشی کلات آهن و نانو کلات آهن نقش مؤثری در بهبود شاخص های رویشی و افزایش فعالیت

آنزیمی گیاه جعفری داشت. این تأثیر در گیاهان تیمار شده با نانو کلات آهن محسوس تر از تیمارهای کلات آهن بود. لذا کاربرد کود آهن به صورت نانو کلات به دلیل استفاده کمتر از این منبع کودی و عملکرد تولیدی بیشتر در مقایسه با کلات معمولی توصیه می شود.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی ندارند.

References

1. Barati S, Lahouti M, Cheniany M. Effects of molybdenum stress on antioxidant system performance of parsley seedlings (*Petroselinum sativum* L.) under laboratory condition. Iranian Journal of Horticultural Science. 2021; 52(2): 281-291. [In Persian]
2. Jamali S, Shaifan H, Sajadi F. Effect of irrigation with conjunctive caspian seawater and fresh water on yield and yield components of parsley (*Petroselinum crispum* Mill). Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 2018; 6(11): 935-946. [In Persian]
3. Cheraghi J, Krishchi P, Nasri S, Borbor M. The Effect of Ethanolic extracts of *petroselinum crispum* leaves on histopathological and activity of liver enzymes in streptozotocin-induced diabetic rats. scientific Journal of Ilam University of Medical Sciences. 2015; 23(7): 190-202. [In Persian]
4. Khani M.R, Bigdeli R, Vazini H, Notghi P. The effect of leaf extract of parsley (*Petroselinum crispum*) on serum levels of gonadotropins and testosterone hormones in male rats receiving leads acetate. Medical Journal of Tabriz University of Medical Sciences and Health Services. 2018; 40(2):33-39. [In Persian]
5. Fatahi-Siahkamari S, Arouei H, Azizi Arani M, Salehi Sardoei A. Effect of nano chelates (iron and zinc) and nitrogen (biofertilizer and chemical fertilizer) on some morphophysiological characteristics and essential oil yield of two basil populations. Eco-phytochemical Journal of Medicinal Plants. 2020. 8(1): 106-118. [In Persian]
6. Panahinia M, Sanikhani M, Kheiri A. Morphological Characteristics and essential oil production of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.) under application of nitrogen and iron. Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production. 2016; 26(4): 158-166.
7. Ahmadi L, Ghobadi M, Saeidi M, Ghaderi J. The effect of supplemental irrigation, time and methods of Fe fertilizer application on qualitative and quantitative traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Iranian Journal of Pulses Research. 2019; 10(2): 119-131. [In Persian]
8. Maleki Lajayer H, Soltanzadeh-pormehr S, Torabi- giglou M, Poorbeyrami Hir Y, Chamani E. Effects of pre-treatment with salicylic acid and silicon nanoparticles on germination, growth and physiological indices of savory (*Satureja hortensis*) seeds under lead heavy metal stress. Journal of Vegetables Sciences. 2021; 4(2): 147-160. [In Persian]
9. Ghani A, Mohtashami S, Jamalians S. Morphological and biochemical responses of summer savory (*Satureja hortensis* L.) to chelated plus nano fertilizer application. Journal of Vegetables Sciences. 2021; 4(2): 81-96. [In Persian]
10. Naderi A, Daneshe Shhahraki O. Application of nanotechnology to optimize the formation of chemical fertilizers. Nanotechnology Monthly. 2013; 4(20): 22-165.
11. Kobdani A, Piri I, Tavassoli A. Effect of iron nano-chelate fertilizer on quantity and quality yield of Okra (*Abelmoschus esculentus* L.) in condition of drought stress. Journal of Vegetables Sciences. 2021; 5(1): 109-123. [In Persian]
12. Liu R, Lal R. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions. Science of the Total Environment. 2015; 514: 131-139.

13. Hosseinifard S.J, Sedaghati N, Mohammadi Mohammadabadi A, Alipour H, Nikooei Dastjerdi M.R. Effects of Fe foliar spraying from sulphate and chelate resources on yield and quality of pistachio (*Pistacia vera* L. cv. Owahdi) Trees Fruit in Kerman Province. *Pistachio Science and Technology*. 2020; 4(8): 43-60.
14. Bayati F, Ayne Band A, Fateh E. effect of nano fertilizer values and times on yield and yield components of *Brassica napus* L. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 2015; 12(4): 805-812.
15. Mirakhorli T, Oraghi Ardebili Z, Ladan-Moghadam A, Danaee E. Nitric oxide improved growth and yield in soybean (*Glycine max*) by mediating physiological, anatomical, and transcriptional modifications. *Journal of Plant Growth Regulation (JPGR)*. 2022; 41: 13311-1343.
16. Mahdi nezhad N, Jamalpour H, Fakheri B, Azad H. The study of the response of some physiological characteristics and grain yield of purslane cultivars to drought stress and foliar application of chelated nano iron. *Journal of Plant Environment Physiology*. 2019; 14(54): 74-89. [In Persian]
17. Azad godjebigloo H, Fakheri B, Mehdi Nejjhad N, Parmoon, G. Response of different irrigation on nano iron chelated to chamomile genotypes. *Journal of Crop Ecophysiology*. 2017; 11(3): 565-584. [In Persian]
18. Alhverdzadeh S, Danaee E. Effect of humic acid and vermicompost on some vegetative indices and proline content of *Catharanthus roseous* under low water stress. *Environment and Water Engineering*. 2023; 9(1): 141-152. [In Persian]
19. Danaee E, Abdossi V. Phytochemical and morphophysiological responses in basil (*ocimum basilicum* L.) plant to application of polyamines. *Journal of medicinal plants*. 2017; 18(1): 125-134. [In Persian]
20. Soroori S, Danaee E, Hemmati Kh, Ladan Moghadam A. The metabolic response and enzymatic activity of *Calendula officinalis* L. to foliar application of spermidine, citric acid and proline under drought stress and in a post harvest condition. *Journal of Agriculture Science and Technology*. 2021; 23 (6): 1339-1353.
21. Abdossi V, Danee E. Effects of Some Amino Acids and Organic Acids on Enzymatic Activity and Longevity of *Dianthus caryophyllus* cv. Tessino on at Pre-Harvest Stage. *Journal of Ornamental Plants*. 2019; 9(2): 93-104.
22. Dareini H, Abdossi V, Danaee E. Effect of some essential oils on postharvest quality and vase life of gerbera cut flowers (*Gerbera Jamesonii* cv. Sorbet). *European Journal of Experimental Biology*. 2014; 4(3): 276-280.
23. Pourebrahimi M, Roosta H.R, Hamidpour M. Interactive effect of sodium bicarbonate and different Fe sources on micronutrients concentration in bell pepper plants. *Journal Science and Technolgy Greenhouse Culture*. 2014; 5 (17): 27-38.
24. Amaliotis D, Velemis D, Bladenopoulou S, Karapetsas N. Leaf nutrient levels of strawberries (cv. Tudla) in relation to crop yield. *Acta Horticulture*. 2002; 567: 447-450.
25. Singh R.K, Singh R.P, Singh R.S. Effect of iron on herbage and oil yield of lemon grass (*Cymbopogon flexuosus*). *Crop Research*. 2003; 26: 185-187.
26. Khalaj H, Baradarn Firouzabadi M, Delfani M. Effect of nano iron and magnesium chelate fertilizers on growth and grain yield of *Vigna sinensis* L. *Journal of Plant Process and Function*. 2019; 9(35): 160-177. [In Persian]
27. Jabeen N, Ahmad R. Effect of foliar-applied boron and manganese on growth and biochemical activities in sunflower under saline conditions. *Pakistan Journal of Botany*. 2011; 43 (2): 1271-1282.
28. Zayed B.A, Salem A.K.M, Sharkawy H, El M. Effect of different micronutrient treatments on rice (*Oriza Sativa* L.) growth and yield under saline soil conditions. *World Journal of Agricultural Sciences*. 2011; 7 (2): 179-84.
29. Shiemshi D. Leaf chlorosis and stomatal aperture. *New Phytologist*. 2007; 166: 455-461.
30. Rout G.R, Sahoo S. Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*. 2015; 3: 1-24.

31. Alvarez-Fernandez A, Melgar J.C, Abadia J, Abadia A. Effects of moderate and severe iron deficiency chlorosis on fruit yield, appearance and composition in pear (*Pyrus communis* L.) and peach (*Prunus persica* L. Batsch). *Experimental Botany*. 2011; 71: 280–286.
32. Mahdavia H, Mahna N. In vitro evaluation of iron-deficiency tolerance in an endemic putative apple rootstock. *Research in Plant Biology*. 2012; 2(6): 23-29.
33. Rusta H.R., Rezakhanejad D, Ragami M, Ismailizadeh M. Comparison of the effect of nano iron chelate with iron chelate on the growth and physiological characteristics of two varieties of sweet pepper in alkaline conditions in soilless cultivation system. 2017; 8(1):35-54.
34. Izadi Y, Modares Sanavey S.A.M. Effect of nano iron and manganese fertilizers on mung bean growth and yield in water deficit stress condition. *Iranian Journal of Field Crops Research*. 2018; 16(3): 651-664. [In Persian]
35. Ahmadi L, Ghobadi M, Saeidi M, Ghaderi J. The effect of supplemental irrigation, time and methods of Fe fertilizer application on qualitative and quantitative traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Iranian Journal of Pulses Research*. 2019; 10(2): 119-131. [In Persian]
36. Yousefzadeh S, Naghdi Badi H, Sabaghnia N, Janmohammadi M. The effect of foliar application of nano-iron chelates on physiological and chemical traits of dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.). *Journal of Medicinal. Plants*. 2016; 15(60): 152-160. [In Persian]
37. Peyvandi M, Parandeh H, Mirza M. Comparison of nano Fe and Fe chelate fertilizers on the quality and the quantity of *Ocimum basilicum* L. essential oil. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*. 2015; 31(2): 185-193. [In Persian]
38. Nasiri Y, Zehtab-Salmasi S, Nasrullahzadeh S.N, Najafi N, Ghassemi-Golezani K. Effects of foliar application of micronutrients (Fe and Zn) on flower yield and essential oil of chamomile (*Matricaria chamomilla* L.). *Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*. 2010; 4(17): 1733 – 37. [In Persian]