

Evaluation of Application Methods of Iron (Fe) Aminocheates and FeSO₄ on Fe Speciation in Soil Solution and Fe Uptake in Sunflower

Mina Alipour Babadi^{1*} , Mojtaba Norouzi Masir¹, Abdolamir Moezzi¹, Afrasyab Rahnama Ghahfarokhi² and Mehdi Taghavi Zahedkolaei³

(Received: August 10-2025 ; Revised: October 10-2025 ; Accepted: October 19-2025)

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
2. Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.
3. Department of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

* Corresponding Author, Email: m-alipour_babadi@stu.scu.ac.ir

Abstract

This study aimed to evaluate the effectiveness of iron (Fe) aminocheate application methods on Fe chemical speciation in the soil solution, as well as Fe concentration and uptake in sunflower seeds (*Helianthus annuus* L. cv. Oscar). The experiment was conducted in a randomized complete block design with three replications at the research field of Shahid Chamran University of Ahvaz. Treatments included two application methods (seed priming and fertigation) and three Fe sources: Fe–glycine aminocheate [Fe(Gly)₂], Fe–methionine aminocheate [Fe(Met)₂], and ferrous sulfate (FeSO₄·7H₂O), along with an unfertilized control. Fe speciation was determined using Visual MINTEQ software. Results indicated that Fe aminocheates, [Fe(Met)₂], significantly decreased soil pH and increased DTPA-extractable Fe (by 35.7%), seed Fe concentration (by 13.5%), and seed Fe uptake (by 79.1%) compared with the control ($p < 0.01$). Application of Fe fertilizers also significantly enhanced the concentrations of dominant Fe species (Fe²⁺ and FeSO_{4(aq)}) in the soil solution, with the highest Fe²⁺ level (3.1-fold higher than the control) observed under [Fe(Met)₂] seed priming. Strong and significant positive correlations between Fe²⁺ and FeSO_{4(aq)} concentrations and both DTPA-extractable Fe ($r = 0.88^{**}$ and $r = 0.89^{**}$, respectively) and seed Fe uptake ($r = 0.84^{**}$ and $r = 0.87^{**}$, respectively) highlight the pivotal role of these species in improving Fe bioavailability and uptake by plants in calcareous soils.

Keywords: Aminocheates, Fe uptake, Speciation, Sunflower

How to cite this article: Alipour Babadi, M., Norouzi Masir, M., Moezzi, A., Rahnama Ghahfarokhi, A. and Taghavi Zahedkolaei, M. 2026. Evaluation of Application Methods of Iron (Fe) Aminocheates and FeSO₄ on Fe Speciation in Soil Solution and Fe Uptake in Sunflower. *J. Water and Soil Sci.* 30(1): 32-48. DOI: [10.47176/jwss.30.1.71891](https://doi.org/10.47176/jwss.30.1.71891)

Copyright © 2026 Alipour Babadi et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

ارزیابی روش‌های کاربرد آمینوکلات‌های آهن و سولفات آهن بر گونه‌های شیمیایی آهن در محلول خاک و جذب آهن در آفتابگردان

مینا عالی‌پور بابادی^{۱*} , مجتبی نوروزی مصیر^۱، عبدالامیر معزی^۱، افراسیاب راهنما قهفرخی^۲ و مهدی تقوی زاهد کلانی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۱۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۷/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۲۷)

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
 ۲. گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
 ۳. گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
- *: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m-alipour_babadi@stu.scu.ac.ir

چکیده

این آزمایش با هدف بررسی اثربخشی روش‌های کاربرد آمینوکلات‌های آهن بر تعیین گونه‌های شیمیایی آهن محلول خاک و نیز غلظت و جذب آهن دانه آفتابگردان رقم اسکار در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل دو روش کاربرد (پرایمینگ بذر و کودآبیاری) و سه نوع منبع آهن شامل آمینوکلات‌های گلیسین - آهن $[Fe(Gly)_2]$ ، متیونین - آهن $[Fe(Met)_2]$ ، کود سولفات آهن و نیز شاهد (بدون کود) بود. به منظور تعیین گونه‌های شیمیایی مختلف آهن از نرم‌افزار Visual MINTEQ استفاده شد. نتایج نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های آهن به ویژه متیونین - آهن به طور معنی‌داری pH خاک را کاهش داده و موجب افزایش معنی‌دار غلظت آهن قابل دسترس (۳۵/۷ درصد) و نیز غلظت (۱۳/۵ درصد) و جذب آهن دانه (۷۹/۱ درصد) در گیاه نسبت به شاهد شد. کاربرد منابع آهن، به طور معنی‌داری غلظت گونه‌های شیمیایی غالب آهن (گونه Fe^{2+} و $FeSO_4(aq)$) را در محلول خاک افزایش داد؛ به طوری که بیشترین غلظت گونه Fe^{2+} ، با کاربرد تیمار پرایمینگ آمینوکلات متیونین - آهن نسبت به شاهد (۳/۱ برابر) به دست آمد. وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین غلظت گونه‌های Fe^{2+} و $FeSO_4(aq)$ ، با غلظت آهن قابل دسترس (به ترتیب $r^{**}=0/89$ و $r^{**}=0/87$) و جذب آهن دانه (به ترتیب $r^{**}=0/84$ و $r^{**}=0/88$) از نقش کلیدی این گونه‌ها در افزایش فراهمی زیستی آهن و بهبود جذب آن توسط گیاه در شرایط خاک آهکی بود.

واژه‌های کلیدی: آمینوکلات، آفتابگردان، جذب آهن، گونه‌بندی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

آهن یکی از عناصر کم‌مصرف ضروری برای رشد و نمو گیاهان است که در بسیاری از فرایندهای حیاتی از جمله کلروفیل‌سازی، فتوسنتز، تنفس سلولی، ساخت متالوپروتئین‌ها و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی نقش کلیدی ایفا می‌کند (۲۶).

با وجود اهمیت بیولوژیکی زیاد این عنصر، کمبود آهن یکی از شایع‌ترین اختلالات تغذیه‌ای گیاهی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارای خاک آهکی، با pH زیاد و غلظت کربنات کلسیم زیاد است (۲۵). در این شرایط، آهن تمایل زیادی به رسوب به صورت اکسیدها، هیدروکسیدها و کربنات‌های نامحلول دارد که فراهمی زیستی آن برای گیاه را به شدت کاهش می‌دهد (۲۹). در بین شکل‌های شیمیایی مختلف آهن در خاک، تنها مقدار اندکی از آهن، به طور عمده در فاز محلول، برای جذب گیاهان قابل دسترس است (۲۰). این بخش قابل جذب، به صورت یون‌های آزاد آهن، کمپلکس‌های آلی - فلزی، کلات‌های طبیعی (مانند اسیدهای آلی) و ترکیبات مصنوعی مانند DTPA و EDDHA در فاز محلول خاک حضور دارد (۸). پایداری و حلالیت این گونه‌ها به شرایط خاک از جمله pH، ظرفیت اکسایش - کاهش، محتوای مواد آلی محلول، و فعالیت میکروبی بستگی دارد (۲). به دلیل رفتار پیچیده و پویای آهن و همچنین غلظت بسیار کم آن در فاز محلول خاک، اندازه‌گیری مستقیم گونه‌های شیمیایی آن به ندرت امکان‌پذیر است. ازاین‌رو، شناسایی و تعیین کمی گونه‌های آهن اغلب از طریق روش‌های غیرمستقیم، به‌ویژه مدل‌سازی تعادلی ژئوشیمیایی انجام می‌گیرد. در این میان، نرم‌افزارهایی مانند Visual MINTEQ ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی نظری توزیع گونه‌های مختلف فلزات از جمله آهن در شرایط شیمیایی مشخص خاک (مانند pH، قدرت یونی و حضور لیگاندها) فراهم می‌کنند (۱، ۴ و ۱۳). مدل‌سازی این توزیع گونه‌ها، علاوه بر درک رفتار شیمیایی آهن، زمینه را برای ارزیابی اثربخشی منابع مختلف کود آهن در شرایط مختلف خاک فراهم می‌کند. با توجه به محدودیت‌های جذب آهن در خاک‌های آهکی، استفاده از منابع

آمینوکلات آهن به‌عنوان راهکار مؤثر برای افزایش فراهمی آهن در خاک و جذب آن توسط گیاه پیشنهاد شده است (۳۴). آمینوکلات‌های آهن از ترکیب آهن با اسیدهای آمینه طبیعی حاصل شده و به دلیل پایداری و زیست‌سازگاری بیشتر، سمیت کمتر و توانایی حفظ آهن در فاز محلول، نسبت به منابع معدنی مانند کود سولفات آهن، کارایی بیشتری در خاک‌های آهکی نشان داده‌اند (۳ و ۳۳). علاوه بر نوع منبع آهن، روش کاربرد آن نیز نقش مهمی در بازدهی مصرف کود دارد. روش‌های کوددهی مانند پرایمینگ بذر، با تأثیرگذاری بر ریزوسفر، فعال‌سازی مکانیسم‌های جذب گیاه، رشد اولیه گیاهچه و نیز توسعه ریشه، می‌تواند زمینه را برای جذب مؤثرتر آهن فراهم کند (۲۲). از سوی دیگر، روش کودآبیاری نیز می‌تواند جذب آهن را در مراحل رویشی تسهیل کرده و پایداری آن در فاز محلول خاک را افزایش دهد (۲۳)؛ بنابراین، درک دقیق رفتار گونه‌های شیمیایی آهن در فاز محلول خاک و بررسی روابط آن با غلظت آهن جذب‌شده توسط گیاه، می‌تواند به انتخاب نوع کود و روش کاربرد مناسب کمک کند. با وجود اهمیت آهن در تغذیه گیاهی و مطالعات گسترده در زمینه بهبود فراهمی آن در خاک‌های آهکی، به نظر می‌رسد که بررسی‌های اندکی به‌طور خاص به گونه‌بندی شیمیایی آهن در فاز محلول خاک و ارتباط آن با روش کاربرد و منبع کود آهن پرداخته‌اند. ازاین‌رو، این پژوهش با هدف بررسی اثر روش‌های مختلف کاربرد (پرایمینگ بذر در مقابل کودآبیاری) آمینوکلات‌های آهن، در مقایسه با کود شیمیایی سولفات آهن، بر گونه‌های شیمیایی آهن در فاز محلول خاک و کارایی جذب آن در گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) در شرایط خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

طراحی آزمایش

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز طی فصل زراعی زمستان ۱۴۰۰ تا بهار ۱۴۰۱ انجام شد. این منطقه در موقعیت جغرافیایی ۳۱/۲۲ درجه

کمتر از حد بحرانی در خاک های آهنی ایران بوده (۱۸) و بنابراین خاک از نظر تأمین آهن برای گیاه دچار کمبود است. برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ ارائه شده اند.

تهیه و مشخصه یابی آمینوکلات های روی

آمینوکلات های آهن مورد استفاده در این پژوهش شامل دو کمپلکس $[Fe(Met)_2]$ و $[Fe(Gly)_2]$ بودند که با به کارگیری روش اصلاح شده اشמיד و همکاران (۵) تهیه شدند. در این فرایند، اسید آمینه های گلیسین و متیونین با خلوص ۹۹ درصد (Merck, Germany) به عنوان لیگاند با محلول سولفات آهن ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) در نسبت مولاری ۲:۱ واکنش داده شدند. مخلوط واکنشی در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد و شرایط کنترل شده pH تحت هم زدن یکنواخت و در محیط آبی به مدت حدود دو ساعت نگه داشته شد. برای حذف آنیون های سولفات و ناخالصی های جانبی، مقدار معینی از محلول اشباع کربنات کلسیم ($CaCO_3$) به محیط افزوده شد تا رسوب سولفات کلسیم تشکیل و از محلول جدا شود. محلول شفاف بالایی پس از فیلتراسیون، تحت تبخیر جزئی و سپس خشک کردن در دمای ۴۵ درجه سانتی گراد قرار گرفت تا کریستال های جامد کمپلکس های آهن - اسید آمینه به دست آید. نمونه ها با اتانول ۹۵ درصد شستشو داده شده و پس از خشک شدن در مجاورت هوا جمع آوری شدند. برای تأیید ترکیب عنصری، درصد کربن، هیدروژن و نیتروژن توسط دستگاه CHN آنالایزر (Elementar, Vario EL III, Germany) اندازه گیری شد. بر اساس استوکیومتری و فرمول عمومی (شامل یک اتم آهن و دو لیگاند اسید آمینه)، درصد نظری آهن در ترکیبات تولید شده محاسبه شد که برای آمینوکلات گلیسین - آهن و متیونین - آهن به ترتیب ۲۷/۱ و ۱۵/۸ درصد بود. با فرض ناخالصی تقریبی حدود پنج درصد، مقادیر عملی آهن در ترکیبات مورد استفاده به ترتیب ۲۵/۸ و ۱۵/۰ درصد به دست آمد (جدول ۲). شناسایی ساختار مولکولی کمپلکس های سنتز شده با استفاده از طیف سنجی هسته ای ^1H-NMR انجام شد. الگوهای جابجایی

عرض شمالی و ۴۸/۰۷ درجه طول شرقی، با ارتفاع ۲۲ متر از سطح دریا و میانگین بارندگی سالانه ۲۱۳ میلی متر قرار دارد. بذره های آفتابگردان رقم "اسکار" از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شدند. طرح آزمایش به صورت کرت های خرد شده در قالب بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل اصلی شامل دو روش کاربرد (پرایمینگ بذر و کودآبیاری) و عامل فرعی شامل سه نوع تیمار کودی آهن شامل آمینوکلات گلیسین - آهن $[Fe(Gly)_2]$ ، آمینوکلات متیونین - آهن $[Fe(Met)_2]$ و کود شیمیایی سولفات آهن ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) بود. علاوه بر این، یک تیمار بدون مصرف تیمار کودی آهن به عنوان شاهد مشترک برای هر دو روش کاربرد در نظر گرفته شد تا مبنایی برای مقایسه تأثیر تیمارهای کودی در هر روش فراهم شود.

نمونه برداری خاک و اندازه گیری ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آن

به منظور شناسایی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش، نمونه برداری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری به صورت مرکب انجام شد. نمونه ها پس از خشک شدن در دمای محیط، از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری (۳۰)، اندازه گیری pH و هدایت الکتریکی در سوسپانسیون ۱:۲/۵ خاک به آب، و تعیین کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۳۸) صورت گرفت. میزان کربنات کلسیم معادل با استفاده از روش تیتراسیون برگشتی با سود پس از خنثی سازی با اسید کلریدریک (۹) محاسبه شد. فسفر قابل جذب با روش اولسن (۲۷)، پتاسیم قابل تبادل با استفاده از استات آمونیوم و نیتروژن کل به روش کج لیدال (۶) تعیین شد. برای اندازه گیری آهن قابل دسترس در خاک، از عصاره گیری با محلول DTPA-TEA (۵ میلی مولار، pH=۷/۳) بهره گرفته شد و غلظت آهن به وسیله دستگاه جذب اتمی با کوره گرافیتی (PerkinElmer AAnalyst 800) اندازه گیری شد (۱۵). نتایج نشان داد که مقدار آهن قابل استخراج با DTPA

کرت‌ها صورت پذیرفت. در طول فصل رشد، دو نوبت کنترل علف‌های هرز به روش دستی اجرا شد. همچنین عملیات تنک کردن بوته‌ها پس از رویش اولیه و در مرحله چهار تا شش‌برگی انجام شد تا تراکم یکنواختی در سطح مزرعه ایجاد شود.

در روش کودآبیاری، آمینوکلات‌های آهن با دوز ۴ لیتر در هکتار و کود سولفات آهن به میزان ۲۰ کیلوگرم در هکتار بر اساس آزمون خاک و دستورالعمل مصرف کودهای ریزمغذی در خاک‌های آهکی ایران (۱۹) استفاده شدند. کودآبیاری در سه نوبت و هم‌زمان با مراحل کلیدی رشد گیاه شامل: مرحله ۴ تا ۶ برگی، آغاز غنچه‌دهی و ظهور طبق، همراه با آبیاری انجام شد. در تیمار شاهد مربوط به کودآبیاری، تنها از آب آبیاری بدون هیچ‌گونه افزودن کود استفاده شد. در پایان دوره رشد (حدود ۱۲۰ روز) و هم‌زمان با رسیدگی فیزیولوژیکی گیاه، برداشت آفتابگردان صورت گرفت. به منظور جلوگیری از تأثیر شرایط حاشیه‌ای، نمونه‌برداری تنها از ردیف‌های مرکزی هر کرت انجام شد. پس از جداسازی دانه‌ها از طبق، نمونه‌های گیاهی (برگ و دانه) برای حذف رطوبت به مدت ۷۲ ساعت در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. سپس عملکرد دانه محاسبه و غلظت آهن کل موجود در برگ و دانه آفتابگردان پس از خاکستر کردن نمونه‌های خشک و انحلال خاکستر در اسید هیدروکلریک دو نرمال، با استفاده از دستگاه جذب اتمی (PerkinElmer مدل AAAnalyst 800) مجهز به کوره گرافیتی برای افزایش دقت و حساسیت، اندازه‌گیری شد (۸ و ۳۹).

گونه‌بندی شیمیایی آهن

برای پیش‌بینی گونه‌های شیمیایی آهن در فاز محلول خاک از مدل تعادلی Visual MINTEQ (v.4.0) استفاده شد (۳۵). این مدل با بهره‌گیری از ضرایب پایداری ترمودینامیکی، تعادل میان یون‌های آزاد و کمپلکس‌های آلی و معدنی را شبیه‌سازی می‌کند. ورودی‌های مدل شامل pH عصاره اشباع، غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-)، آهن محلول و کربن آلی محلول (DOC) بودند.

شیمیایی مربوط به گروه‌های آمینی و کربوکسیلی در طیف NMR، تغییرات قابل‌توجهی نسبت به اسیدآمینه‌ی آزاد نشان دادند که بیانگر تشکیل پیوندهای کنوردینانسی بین یون Fe^{2+} و گروه‌های دهنده‌ی لیگاندها بود. نتایج کمی و کیفی حاصل از آنالیزهای یادشده در جدول ۲ ارائه شده است. در این ترکیبات، آهن به‌صورت کمپلکس‌های دوکوردیناسیونی با لیگاندهای اسیدآمینه پایدار شده و ساختار ملکولی آنها شامل پیوندهای کنوردینانسی بین گروه‌های آمینی (NH_2^-) و کربوکسیلی (COOH^-) اسیدآمینه با یون فلزی است (شکل ۱).

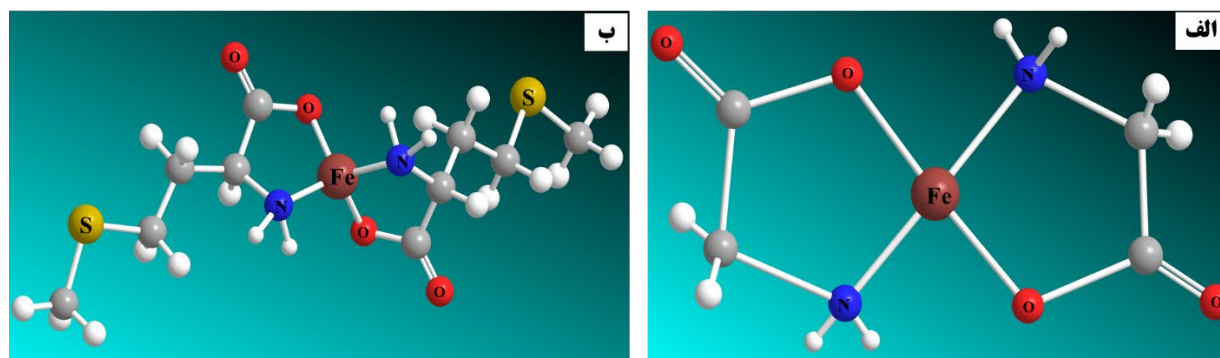
تیماردهی و عملیات مزرعه‌ای

برای اعمال تیمارهای پرایمینگ، ابتدا بذور آفتابگردان بر اساس تراکم کاشت مورد نیاز انتخاب و با الکل ۷۰ درصد و سپس محلول هیپوکلریت سدیم ۵۰ درصد ضدعفونی شدند. سپس، بذور به مدت ۱۲ ساعت در محلول‌های پرایمینگ حاوی دو درصد آهن از هر یک از ترکیبات کودی در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) خیسانده شدند. پس از تیماردهی، بذور با آب مقطر آبکشی و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. گفتنی است که در تیمار شاهد پرایمینگ، هیچ‌گونه خیساندنی انجام نشد تا اثرات فیزیولوژیکی ناشی از پرایمینگ آبی (هیدروپرایمینگ) حذف و تنها اثر اختصاصی منابع آهن در پرایمینگ قابل بررسی باشد (۱۰).

پس از آماده‌سازی زمین زراعی و اجرای خاک‌ورزی، کرت‌های آزمایشی به طول سه متر طراحی شدند که هر کرت شامل سه ردیف کشت با فاصله بین ردیف‌ها ۶۰ سانتی‌متر و فاصله بذرها روی هر ردیف ۲۰ سانتی‌متر (تراکم ۸۰ هزار بوته در هکتار) بود. به منظور کاهش تأثیر متقابل تیمارهای مجاور، فاصله یک‌متری میان کرت‌های مجاور رعایت شد. با توجه به نتایج حاصل از آزمون خاک، نیاز کودی گیاه به نیتروژن از طریق کود اوره (۱۴۰ کیلوگرم در هکتار) برآورده شد. نخستین آبیاری بلافاصله پس از کاشت انجام شد و تا زمان تثبیت کامل مزرعه، آبیاری‌ها با فاصله پنج‌روزه از طریق نهرهای خاکی حاشیه

جدول ۱. ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

ویژگی	بافت	pH	قابلیت هدایت الکتریکی (EC)	کربن آلی	کربنات کلسیم	نیتروژن کل	فسفر قابل دسترس	پتاسیم قابل تبادل	آهن قابل دسترس
واحد	-	-	dS m ⁻¹	%	%	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
مقدار	کلی لوم	۷/۷	۳/۸	۰/۳۵	۳۷/۵	۰/۰۶	۱۶	۲۷۵	۴/۱۵



شکل ۱. ساختارهای مولکولی فرضی آمینوکلات های (الف) گلیسین - آهن [Fe(Gly)₂] و (ب) متیونین - آهن [Fe(Met)₂] ترسیم شده با استفاده از نرم افزار ChemDraw Ultra (v.20.1)

جدول ۲. ویژگی های ساختاری آمینوکلات های آهن

آمینوکلات	فرمول مولکولی	وزن مولکولی	به‌دست آمده (محاسبه‌شده)			نظری (خالص)	¹ H NMR (400 MHz, D ₂ O)
			(٪)				
			C	H	N	Fe	
گلیسین – آهن [Fe (Gly) ₂]	C ₄ H ₈ N ₂ O ₄ Fe	۲۱۳/۵	(۲۲/۵۰) ۲۲/۳۹	۳/۹۱ (۳/۷۵)	۱۳/۰۴ (۱۳/۱۲)	(۲۵/۸) ۲۷/۱	δ 3.44 (s, 4H, 2 x CH ₂) δ 2.02–2.10 (m, 2H, 2 x 1H of CH (β)), 2.14 (s, 6H, 2 x CH ₃), 2.24–2.30 (m, 2H, 2 x 1H of CH (β)), 2.57–2.65 (m, 4H, 2 x CH ₂ -S), 3.55–3.62 (m, 2H, 2 x CH (α))
متیونین – آهن [Fe (Met) ₂]	C ₁₀ H ₂₀ N ₂ O ₄ S ₂ Fe	۳۵۲/۲۶	۳۴/۰۰ (۳۴/۰۷)	۵/۷۳ (۵/۶۸)	(۷/۹۵) ۷/۹۳	(۱۵/۰) ۱۵/۸	

است. مدل با استفاده از معادلات موازنه جرم، غلظت کل فلز و لیگاند را حفظ کرده و از ثابت های پایداری از پیش تعریف شده در پایگاه داده خود برای محاسبه توزیع گونه ها بهره می گیرد. نمونه برداری از محدوده خاک اطراف ریشه پس از برداشت گیاه و در پایان دوره رشد انجام شد. برای این منظور، بوته ها به آرامی از خاک خارج شدند و خاک چسبیده به ریشه ها که مستقیماً با

خروجی مدل شامل غلظت و توزیع نسبی گونه های مختلف آهن (شامل یون های آزاد، کمپلکس های آلی و معدنی و گونه های غیر محلول) و ضرایب فعالیت یون ها در شرایط خاک آهکی بود. این نرم افزار مجموعه ای از محاسبات تعادلی بر اساس اصول ترمودینامیکی انجام می دهد و فرض اساسی آن، برقراری حالت تعادلی بین تمامی واکنش های شیمیایی محلول

نسبت به تیمار شاهد شدند. تیمار آمینوکلات متیونین - آهن بیشترین تأثیر را بر کاهش pH خاک داشت (شکل ۲). با این وجود تفاوت معنی‌داری بین تیمار متیونین - آهن و گلايسين - آهن در کاهش pH خاک وجود نداشت.

کربن آلی محلول

با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) اثرات متقابل نوع کاربرد و تیمارهای کودی بر غلظت کربن آلی محلول خاک معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تیمار پرایمینگ بذر با آمینوکلات متیونین - آهن با بیشترین تأثیر بر افزایش کربن آلی محلول به ترتیب سبب افزایش ۴۱/۹ و ۹۳/۵ درصدی این مؤلفه نسبت به تیمار پرایمینگ سولفات آهن و شاهد شد (شکل ۳). پس از آن تیمار پرایمینگ بذر با آمینوکلات گلايسين - آهن نیز میزان کربن آلی محلول خاک را تا ۷۵/۳ درصد نسبت به شاهد افزایش داد.

آهن قابل دسترس خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر کاربرد آمینوکلات‌های آهن و کود سولفات آهن بر غلظت آهن قابل دسترس خاک معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۳). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که تیمارهای کودی سبب افزایش ۷/۱ تا ۳۵/۷ درصدی آهن قابل دسترس خاک در مقایسه با تیمار شاهد شدند. تیمار آمینوکلات متیونین - آهن و کود شیمیایی سولفات آهن به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر افزایش آهن قابل دسترس خاک داشتند (شکل ۴).

در خاک‌های قلیایی، استفاده از کودهای آهن بر پایه اسیدآمین می‌تواند از طریق چندین مکانیسم، منجر به بهبود فراهمی زیستی آهن شود. تجزیه آمینوکلات‌ها در محیط ریزوسفری موجب آزادسازی یون‌های هیدروژن (H^+) و ترکیبات کربوکسیلی می‌شود که این فرایند به‌طور موضعی باعث کاهش pH محلول خاک و افزایش حلالیت ترکیبات نامحلول آهن مانند $FeCO_3$ و $FePO_4$

سطح ریشه در تماس بود، با تکان دادن آرام ریشه‌ها درون پاکت تمیز جمع‌آوری شد. این بخش از خاک به‌عنوان نماینده ناحیه فعال اطراف ریشه در نظر گرفته شد. نمونه‌های به‌دست‌آمده از هر کرت پس از اختلاط کامل، به‌صورت نمونه مرکب تهیه و برای آنالیزهای شیمیایی و مدل‌سازی استفاده شد. اندازه‌گیری غلظت کلسیم و منیزیم محلول از طریق تیتراسیون با EDTA، سدیم و پتاسیم به کمک فلیم‌فتومتر (مدل Sherwood 410)، کلر محلول با تیتراسیون نیترات نقره ۰/۰۱ نرمال و سولفات محلول از طریق تیتراسیون پس از افزودن کلرید باریم صورت پذیرفت. همچنین، بیکربنات محلول به روش تیتراسیون با اسید سولفوریک اندازه‌گیری شد (۳۰). تعیین غلظت آهن محلول با استفاده از دستگاه جذب اتمی و کربن آلی محلول با دستگاه TOC آنالایزر (Shimadzu مدل TOC-VCPH) انجام شد.

تحلیل‌های آماری

تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار RStudio نسخه (v.12.1+402, 2023) صورت گرفت. به منظور انجام مقایسات میانگین از آزمون چند مرحله‌ای Tukey's HSD در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. ضرایب همبستگی پیرسون بین میزان آهن در گیاه و آهن قابل دسترس خاک با غلظت گونه‌های شیمیایی آهن در خاک با استفاده از نرم‌افزار RStudio نسخه (v.12.1+402, 2023) برآورد شد. ترسیم شکل‌ها نیز با استفاده از نرم‌افزار OriginPRO نسخه (v.10.2, 2025) انجام شد.

نتایج و بحث

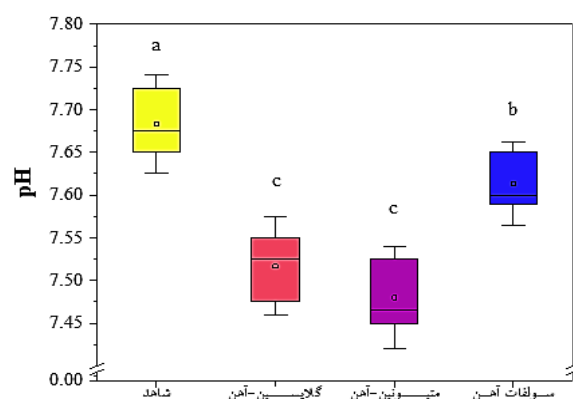
pH خاک

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر کاربرد آمینوکلات‌های آهن و کود سولفات آهن بر pH خاک معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۳). مطابق با نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، کاربرد آمینوکلات‌های آهن سبب کاهش معنی‌دار pH خاک

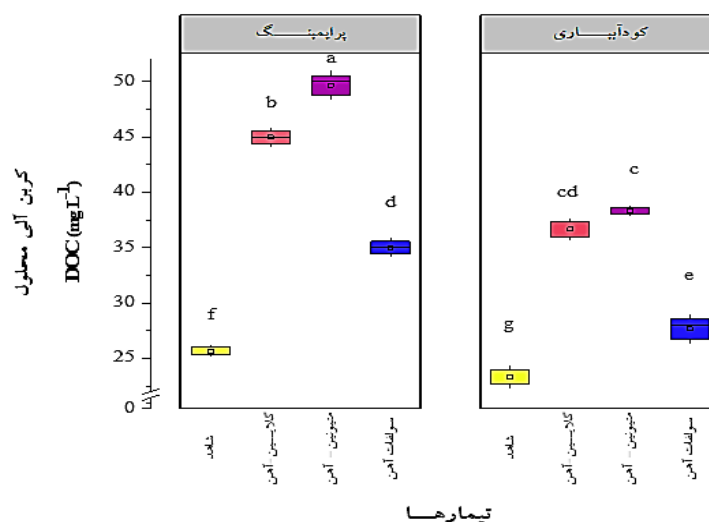
جدول ۳. تجزیه واریانس اثر تیمارها بر pH، کربن آلی محلول و آهن قابل دسترس در خاک

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات		
		pH	کربن آلی محلول	آهن قابل دسترس
بلوک	۲	7.77×10^{-3} ns	1.29 ns	2.6×10^{-2} ns
نوع کاربرد	۱	0.01 ns	322.3^{**}	1.8×10^{-2} ns
خطای a	۲	8.4×10^{-3}	1.79	9.2×10^{-3}
نوع کود	۳	0.05^{**}	477.2^{**}	2.86^{**}
نوع کاربرد × نوع کود	۳	1.6×10^{-3} ns	21.0^{**}	8.3×10^{-2} ns
خطای b	۱۲	1.4×10^{-3}	1.15	4.3×10^{-3}
ضریب تغییرات (درصد)	-	۰/۵	۳/۰	۱/۳

ns و ** به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد



تیمارهای کودی

شکل ۲. مقایسه میانگین اثر نوع تیمارهای کودی بر pH خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($p \leq 0.05$)

تیمارها

شکل ۳. مقایسه میانگین اثرات متقابل روش‌های کاربرد و نوع تیمارهای کودی بر غلظت کربن آلی محلول خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($p \leq 0.05$)

غلظت گونه آهن آزاد (Fe^{2+}) در محلول خاک بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۴). تیمار پرایمینگ بذر با آمینوکلات متیونین - آهن با بیشترین تأثیر، سبب افزایش به ترتیب ۲/۰ و ۳/۱ برابری غلظت گونه Fe^{2+} نسبت به تیمار پرایمینگ سولفات آهن و شاهد شد (شکل ۵). پس از آن تیمار کودآبیاری متیونین - آهن نیز غلظت این گونه را تا ۲/۴ برابر نسبت به تیمار شاهد افزایش داد.

گونه سولفات آهن ($FeSO_4(aq)$)

اثر کاربرد آمینوکلات‌های آهن و کود سولفات آهن بر غلظت گونه $FeSO_4(aq)$ در محلول خاک معنی‌دار بود ($p \leq 0.01$) (جدول ۴). با توجه به نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، تیمار آمینوکلات متیونین - آهن با بیشترین میانگین سبب افزایش ۲/۳ برابری غلظت گونه $FeSO_4(aq)$ شده و تیمارهای گلاسیسین - آهن و کود سولفات آهن نیز به ترتیب سبب افزایش ۱۰۲/۳ و ۳۷/۶ درصدی غلظت این گونه در مقایسه با تیمار شاهد شدند (شکل ۶).

در بیشتر خاک‌ها، Fe^{2+} به عنوان گونه غالب آهن محلول شناخته می‌شود و غلظت آن تابعی از مقدار کل آهن محلول حضور لیگاند‌های آلی در محیط است (۲۸). نتایج این پژوهش نشان داد که مصرف آمینوکلات‌های آهن با افزایش غلظت Fe^{2+} در محلول خاک همراه بود؛ این اثر را می‌توان به نقش همزمان این ترکیبات در کاهش موضعی pH ریزوسفر از طریق گروه‌های کربوکسیلی و نیز تشکیل کمپلکس‌های پایدار با آهن نسبت داد (۳۶). به نظر می‌رسد، کاهش pH (شکل ۲) و افزایش کربن آلی محلول (شکل ۳) که در تیمارهای آمینوکلات دیده شد، آزادسازی آهن از فاز جامد به محلول را تسهیل کرده و الگوی توزیع گونه‌های شیمیایی آهن را به سمت فرم‌های فعال‌تر تغییر داده است. از سوی دیگر، $FeSO_4(aq)$ یکی از گونه‌های پایدار آهن در محیط‌های با اسیدیته پایین و شرایط احیایی است؛ با این حال، در خاک‌های آهکی با pH زیاد به سرعت دچار هیدرولیز و رسوب می‌شود (۱۴ و ۱۷). عملکرد نسبتاً ضعیف تیمار سولفات آهن در حفظ $FeSO_4$ محلول را می‌توان به عدم حضور ترکیبات پایدارکننده مانند لیگاند‌های آلی نسبت داد (۱۶). در مقابل،

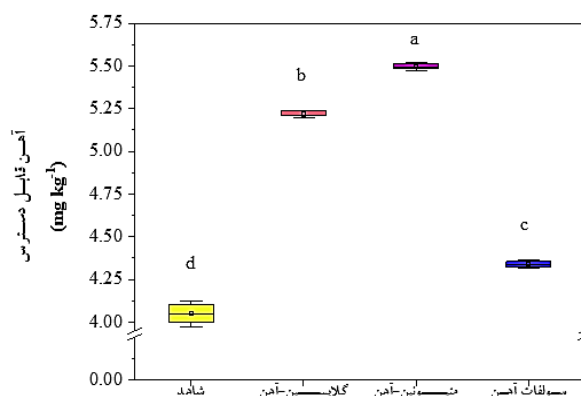
می‌شود (۱۲ و ۳۷). همچنین، اسیدهای آمینه موجود در آمینوکلات‌ها، به‌ویژه در شکل دوقطبی (zwitterion)، بسته به pH محیط به‌عنوان لیگاند‌های مؤثر عمل کرده و در آزادسازی بیشتر یون‌های H^+ نقش دارند (۲۱ و ۴۰). افزون بر این، کاربرد آمینوکلات‌ها، به‌ویژه به‌صورت پرایمینگ بذر، موجب افزایش غلظت کربن آلی محلول (DOC) در خاک شد (شکل ۳). این افزایش، حتی با مقادیر کم آمینوکلات، به دلیل تمرکز ترکیبات آلی در مجاورت ریشه و همچنین تحریک ترشح اسیدهای آلی توسط ریشه و فعالیت میکروبی در مراحل اولیه رشد گیاه، قابل توجه است (۴ و ۲۴). در مقابل، کاربرد سولفات آهن باعث افزایش محسوس DOC نشد؛ زیرا فاقد لیگاند‌های آلی پایدارکننده است و اثر آن محدود به فرآیندهای طبیعی ریشه و میکروبیست. ترکیبات آلی محلول، مانند فولویک اسیدها، از طریق تشکیل کمپلکس‌های پایدار با آهن، از رسوب آن جلوگیری کرده و جذب ریشه‌ای را افزایش می‌دهند؛ به‌ویژه در شرایط قلیایی که آهن تمایل زیادی به غیرفعال شدن دارد (۲ و ۴۱).

اثر کاربرد تیمارها بر غلظت گونه‌های شیمیایی غالب آهن در فاز محلول خاک با استفاده از مدل ژئوشیمیایی Visual MINTEQ

بر اساس نتایج خروجی مدل Visual MINTEQ، در هر دو روش مصرف کود آهن (کودآبیاری و پرایمینگ)، گونه‌های آهن آزاد (Fe^{2+}) و سولفات آهن محلول ($FeSO_4(aq)$) به ترتیب گونه‌های شیمیایی غالب آهن، در محلول خاک را تشکیل دادند. به طور کلی، گونه‌های Fe^{2+} و $FeSO_4(aq)$ بیش از ۹۹ درصد کل آهن محلول را تشکیل دادند و غلظت سایر گونه‌ها (مانند $Fe(OH)_2(aq)$ و $FeCl_2(aq)$) ناچیز بود. نتایج نشان داد که حدود ۵۶/۹ تا ۶۴/۲ درصد از غلظت کل آهن محلول را گونه Fe^{2+} و ۳۵/۲ تا ۴۲/۶ درصد را گونه $FeSO_4(aq)$ به خود اختصاص داده است.

گونه آهن آزاد (Fe^{2+})

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از معنی‌دار بودن اثرات متقابل نوع کاربرد و نوع تیمارهای کودی مختلف بر



تیمارهای کودی

شکل ۴. مقایسه میانگین اثر نوع تیمارهای کودی بر غلظت آهن قابل دسترس در خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی دار براساس آزمون توکی است ($p \leq 0.05$)

جدول ۴. تجزیه واریانس اثر تیمارها بر گونه های شیمیایی غالب آهن در فاز محلول خاک

میانگین مربعات		درجه آزادی	منابع تغییر
FeSO ₄ (aq)	Fe ²⁺		
۱/۱×۱۰ ^{-۱۳} ns	۱/۷×۱۰ ^{-۱۳*}	۲	بلوک
۳/۱×۱۰ ^{-۱۳} ns	۳/۶×۱۰ ^{-۱۲**}	۱	نوع کاربرد
۲/۶×۱۰ ^{-۱۴}	۸/۰×۱۰ ^{-۱۵}	۲	خطای a
۱/۶×۱۰ ^{-۱۱**}	۶/۰×۱۰ ^{-۱۱**}	۳	نوع کود
۱/۷×۱۰ ^{-۱۴} ns	۱/۳×۱۰ ^{-۱۲**}	۳	نوع کاربرد × نوع کود
۸/۸×۱۰ ^{-۱۴}	۸/۱×۱۰ ^{-۱۴}	۱۲	خطای b
۳/۴	۱/۲	-	ضرب تغییرات (درصد)

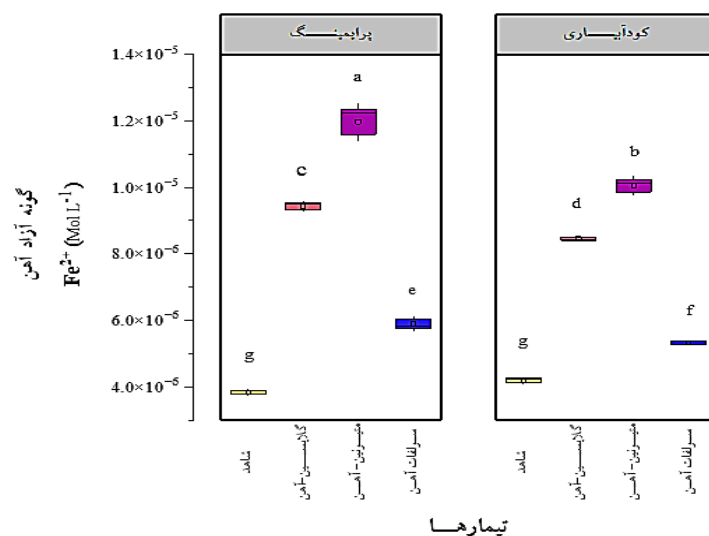
ns، * و ** به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

آمینوکلات ها در اسیدی سازی موضعی و پایداری کمپلکس های آهن تأکید دارد.

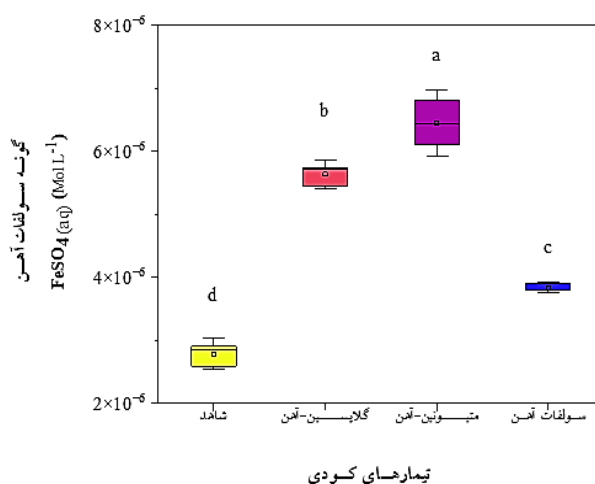
اثر کاربرد تیمارهای مختلف بر غلظت آهن در بخش های مختلف گیاه آهن برگ

اثرات متقابل نوع کاربرد و تیمارهای کودی بر غلظت آهن برگ گیاه معنی دار بود ($p \leq 0.01$ ، جدول ۵). تیمار پرایمینگ بذر با

آمینوکلات ها با افزایش پویایی آهن، موجب تقویت حضور هر دو گونه فعال Fe^{2+} و $FeSO_4$ (aq) در فاز محلول خاک شدند. این رفتار با نتایج گزارش شده در مورد تأثیر کاربرد خاکی آمینوکلات های آهن نیز مطابقت دارد که منجر به افزایش معنی دار جذب آهن در شرایط کمبود شده است (۲۳). همچنین، پیرسون و همکاران (۲۸) و جلیلی و طاهرونند (۳۶) گزارش کردند که غلظت گونه Fe^{2+} به شدت از غلظت آهن محلول و فراوانی لیگاندهای آلی تأثیر می پذیرد که بیانگر ظرفیت زیاد کمپلکس سازی در محلول خاک است. این نتایج هم راستا با یافته های حاضر، بر نقش دوگانه



شکل ۵. مقایسه میانگین اثرات متقابل روش‌های کاربرد و نوع تیمارهای کودی بر غلظت گونه آهن آزاد در محلول خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($p \leq 0.05$)



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر نوع تیمارهای کودی بر غلظت گونه سولفات آهن محلول ($\text{FeSO}_4(\text{aq})$) در خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($p \leq 0.05$)

غلظت و جذب آهن دانه

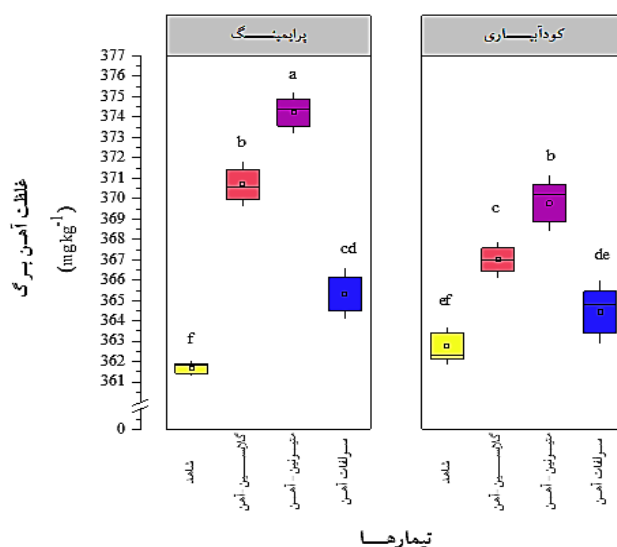
کاربرد آمینوکلات‌های گلايسين - آهن و متيونين - آهن اثر معنی‌داری بر غلظت و جذب آهن دانه آفتابگردان داشت (جدول ۵، $p \leq 0.01$). آمینوکلات‌های گلايسين - آهن و متيونين - آهن به ترتیب سبب افزایش ۱۰/۲ و ۱۳/۵ درصدی غلظت آهن دانه نسبت به شاهد شدند (شکل ۸-الف). در مقابل،

آمینوکلات متيونين - آهن با افزایش ۳/۴ درصدی، بیشترین تأثیر را بر غلظت آهن برگ نسبت به شاهد داشت (شکل ۷). تیمار پرایمینگ بذر با آمینوکلات گلايسين - آهن نیز به ترتیب سبب افزایش ۱/۵ و ۲/۵ درصدی غلظت آهن برگ نسبت به کود سولفات آهن و شاهد شد.

جدول ۵. تجزیه واریانس اثر تیمارها بر غلظت و جذب آهن در گیاه

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		غلظت آهن برگ	جذب آهن دانه
بلوک	۲	۲/۸۴ ^{ns}	۴/۷۲*
نوع کاربرد	۱	۲۳/۸*	۱/۴ ^{ns}
خطای a	۲	۰/۲۶	۰/۱۷
نوع کود	۳	۱۱۱/۵**	۲۰/۳**
نوع کاربرد × نوع کود	۳	۹/۸۹**	۰/۱۳ ^{ns}
خطای b	۱۲	۱/۶۵	۰/۹۹
ضریب تغییرات (درصد)	-	۰/۱	۱/۳
		۳/۵	۳/۵

ns، * و ** به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد

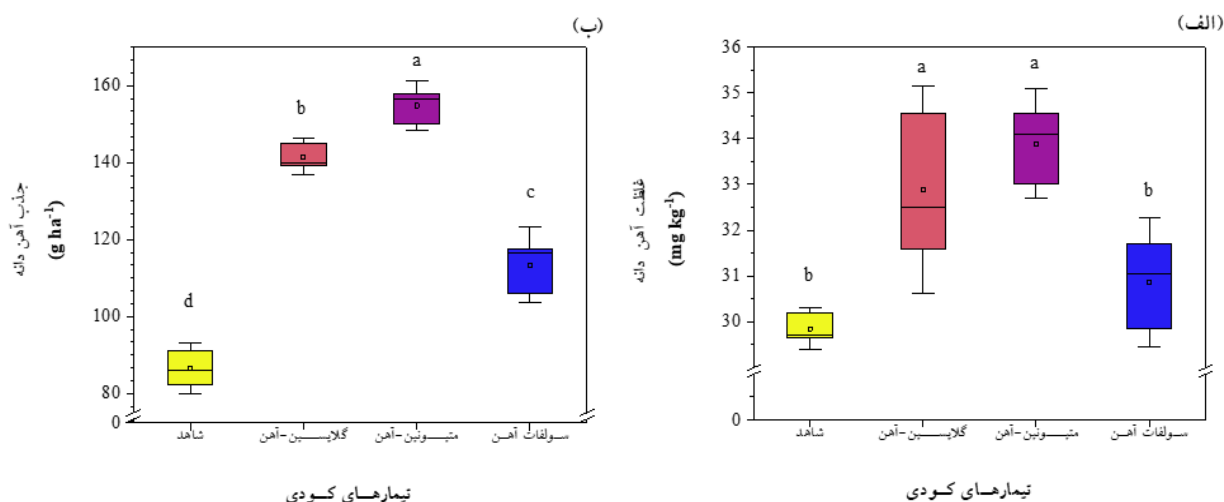


شکل ۷. مقایسه میانگین اثرات متقابل روش های کاربرد و نوع تیمارهای کودی بر غلظت آهن برگ گیاه. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی دار براساس آزمون توکی است (p ≤ ۰/۰۵)

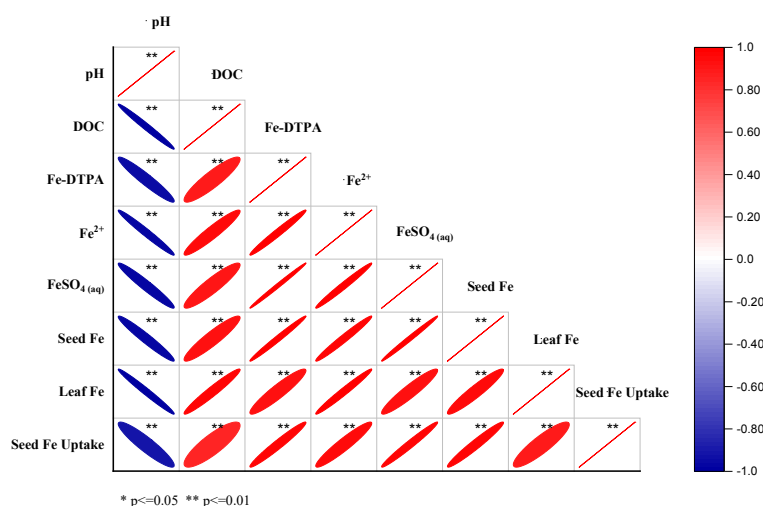
در pH زیاد جلوگیری کرده و جذب آهن را در ناحیه ریزوسفری گیاه بهبود می بخشد (۲۳). همچنین، کاربرد آمینوکلات های آهن در مقایسه با کودهای معدنی مانند سولفات آهن، با بهبود فراهمی زیستی آهن در ریزوسفر (شکل ۴)، می تواند منجر به آزادسازی تدریجی تر آهن و انطباق بهتر با سرعت جذب گیاه شود. از سوی دیگر، آمینوکلات های آهن با فراهم سازی هم زمان آهن و نیتروژن می توانند از طریق تحریک سنتز ناقل های غشایی، جذب آهن را در گیاه افزایش دهند (۱۱).

کاربرد کود سولفات آهن اختلاف معنی داری با شاهد نشان نداد. همچنین، تیمارهای کودی جذب آهن دانه را ۳۱/۲ تا ۷۹/۱ درصد نسبت به شاهد افزایش دادند. تیمار آمینوکلات متیونین - آهن و کود شیمیایی سولفات آهن به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر افزایش جذب آهن دانه داشتند (شکل ۸-ب).

آمینوکلات های آهن با تشکیل کمپلکس های پایدار میان یون آهن و لیگاند های آمینه، از اکسیداسیون سریع Fe^{2+} به Fe^{3+}



شکل ۸. مقایسه میانگین اثر نوع تیمارهای کودی بر (الف) غلظت و (ب) جذب آهن دانه گیاه. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($p \leq 0.05$)



شکل ۹. ضرایب همبستگی پیرسون بین غلظت گونه‌های غالب آهن (Fe^{2+} و $\text{FeSO}_4(\text{aq})$) در فاز محلول خاک با pH، کربن آلی محلول (DOC)، غلظت آهن قابل دسترس (Fe-DTPA)، جذب آهن دانه (Seed Fe Uptake) و غلظت آهن دانه (Seed Fe) و برگ (Leaf Fe) آفتابگردان

ویژگی می‌تواند به بهبود جذب و ذخیره آهن در گیاه، به‌ویژه در شرایط محدودیت آهن مانند خاک‌های آهکی، منجر شود. با وجود کفایت غلظت آهن در برگ‌های شاهد، کاهش رشد رویشی و عملکرد در این تیمارها دیده شد که به پدیده "نارسایی فیزیولوژیک آهن" در خاک‌های آهکی نسبت داده می‌شود (۳۱). در این شرایط، آهن در برگ‌ها عمدتاً به شکل نامحلول رسوب

همچنین به نظر می‌رسد، نقش تغذیه‌ای اسید آمینه متیونین به‌عنوان لیگاند مؤثر حاوی گوگرد، جذب آهن را تسهیل و انتقال آن به اندام‌های هوایی و زایشی گیاه را تقویت کرده است. حضور گوگرد در زنجیره جانبی متیونین (در گروه تیول اتر $(-\text{S}-\text{CH}_3)$) (شکل ۱) به تشکیل کمپلکس پایدار با آهن کمک می‌کند. این

مرتبط بوده و مدیریت صحیح منابع آمینوکلات آهن می تواند نقش مؤثری در بهبود تغذیه آهن و غنی سازی دانه ایفا کند.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که میان روش های مختلف کاربرد منابع آهن، پرایمینگ بذر با آمینوکلات متیونین - آهن مؤثرترین راهبرد در بهبود وضعیت آهن خاک و گیاه در شرایط خاک آهکی بود. این تیمار، با افزایش غلظت گونه های محلول و فعال آهن (به ویژه Fe^{2+}) و کاهش موضعی pH ریزوسفر، فراهمی زیستی آهن را به طور قابل توجهی افزایش داد. این عوامل، به طور هم افزا با تسهیل شرایط جذب و انتقال آهن، موجب افزایش غلظت آهن در بافت های گیاه شده و در نهایت توان گیاه برای مقابله با کمبود آهن را افزایش می دهد. بر این اساس، پرایمینگ بذر با متیونین - آهن می تواند به عنوان یک راهکار زیست پایدار و کارآمد برای مدیریت کمبود آهن در محصولات زراعی به ویژه در خاک های آهکی معرفی شود. برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می شود پایداری کمپلکس های آمینوکلات در شرایط مزرعه ای و در حضور سایر عناصر ریزمغذی بررسی گردد و همچنین ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی این ترکیبات در مقایسه با کودهای شیمیایی متداول مورد مطالعه قرار گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل حمایت مالی از این پژوهش در قالب پژوهانه رساله دکتری به شماره SCU.AS1401.26962 اعلام می نمایند.

کرده و برای متابولیسم گیاه در دسترس نیست (۳۲)؛ بنابراین، اثرات مفید آمینوکلات ها بیشتر به بهبود قابلیت استفاده درون گیاهی آهن و بازتوزیع آن مربوط می شود تا افزایش مقدار کل آهن در بافت ها. این نتایج نشان داد که آمینوکلات ها علاوه بر بهبود وضعیت تغذیه ای آهن، موجب افزایش کارایی فیزیولوژیک و رشد گیاه نیز شده اند.

همبستگی بین گونه های شیمیایی آهن در محلول خاک با غلظت

آهن قابل دسترس خاک و غلظت و جذب آهن در گیاه

نتایج همبستگی (شکل ۹) نشان داد که بین غلظت گونه های Fe^{2+} و $FeSO_4(aq)$ در فاز محلول و آهن قابل دسترس خاک (به ترتیب $r=0.88^{**}$ و $r=0.89^{**}$) ارتباط مثبت و معنی داری وجود دارد. همچنین، غلظت آهن در دانه با غلظت گونه های Fe^{2+} ($r=0.85^{**}$) و $FeSO_4(aq)$ ($r=0.87^{**}$)، همبستگی مثبت و معنی داری نشان داد. جذب آهن دانه نیز با غلظت آهن قابل دسترس خاک همبستگی معنی دار قوی و مثبت داشت ($r=0.87^{**}$). علاوه بر این، بین کربن آلی محلول خاک و غلظت گونه های شیمیایی آهن نیز همبستگی مثبت و معنی داری دیده شد که نقش این ترکیب آلی در پایداری و تحرک پذیری آهن در فاز محلول خاک را برجسته می سازد. همچنین بین pH خاک و سایر مولفه ها، همبستگی منفی و معنی داری دیده شد که بیانگر تأثیر کاهش pH خاک در افزایش تحرک پذیری و فراهمی زیستی آهن در خاک های آهکی است. این الگوهای همبستگی مؤید آن است که حضور گونه های محلول آهن با بهبود وضعیت تغذیه ای آهن در گیاه و افزایش ذخیره آن در دانه

منابع مورد استفاده

References

1. Abdollahi, A., M. Norouzi Masir, M. Taghavi and A. Moezzi. 2020. Effect of Functionalized Iron Oxide Nanoparticles and Zinc Sulfate Chemical Fertilizer on Zinc Speciation in Soil and Uptake of Zinc in Wheat. *Journal of Water and Soil Science* 24(2): 87-103 (in Farsi). <https://doi.org/10.47176/jwss.24.2.36041>
2. Ahmed, E. and S.J.M. Holmström. 2014. Siderophores in environmental research: Roles and applications. *Microbial Biotechnology* 7(3): 196-208. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12117>

3. Alipour Babadi, M., M. Norouzi Masir, A.A. Moezzi, A. Rahnama and M. Taghavi. 2025. Iron (Fe) biofortification using Fe-aminochelates in sunflower growing in calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 188: 519–535. <https://doi.org/10.1002/jpln.12004>
4. Alipour Babadi, M., M. Norouzi Masir, A. Moezzi, A. Rahnama Ghahfarokhi and M. Taghavi Zahedkolaei. 2025. The effect of priming application of zinc amino chelate and ZnSO₄ fertilizer on the chemical forms of zinc in the soil solution phase and its correlation with zinc concentration in sunflower. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 56 (5): 1379-1399. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.391572.669895>
5. Ashmead, S. D., D. C. Wheelwright, C. Ericson and M. Pedersen. 2000. A composition and method for preparing amino acid chelates free of interfering ions (U.S. Patent No. WO2002030948A3). Google Patents. <https://patents.google.com/patent/WO2002030948A3>
6. Bremner, J.M. and C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-Total. PP. 595-624. In: A.L. Page, R.H. Miller and D.R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison.
7. Campbell C.R. and C.O. Plank. 1998. Preparation of Plant Tissue for Laboratory Analysis. PP. 37-50. In: Kalra, Y.P.(Ed.), *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*, CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton.
8. Colombo, C., G. Palumbo, J. He, R. Pinton and S. Cesco. 2014. Review on iron availability in soil: interaction of Fe minerals, plants, and microbes. *Journal of Soils and Sediments* 14: 538-548. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0814-z>
9. Elfaki, J.T., M.O. Gafer, M.M. Sulieman and M.E. Ali. 2016. Assessment of Calcimetric and Titrimetric Methods for Calcium Carbonate Estimation of Five Soil Types in Central Sudan. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 4: 120-127. <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2016.4101%234>
10. Farooq, M., M. Usman, F. Nadeem, H.U. Rehman, M.A. Wahid Abdul, S. Basra and H.M. Siddique Kadambot. 2019. Seed priming in field crops: potential benefits, adoption and challenges. *Crop and Pasture Science* 70: 731-771. <https://doi.org/10.1071/CP18604>
11. Ghasemi, S., A.H. Khoshgoftarmanesh, H. Hadadzadeh and M. Jafari. 2012. Synthesis of Iron-Amino Acid Chelates and Evaluation of Their Efficacy as Iron Source and Growth Stimulator for Tomato in Nutrient Solution Culture. *Journal of Plant Growth Regulation* 31(4): 498–508. <https://doi.org/10.1007/S00344-012-9259-7>
12. Jacob, R.H., A.S. Afify, S.M. Shanab and E.A. Shalaby. 2022. Chelated amino acids: biomass sources, preparation, properties, and biological activities. *Biomass Conversion and Biorefinery* 14(3): 2907–2921. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02333-3>
13. Jebri, N., R. Boden and C. Braungardt. 2021. The effect of pH, calcium, phosphate and humic acid on cadmium availability and speciation in artificial groundwater. In *Journal of Physics: Conference Series*. Bristol, UK. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1879/2/022020>
14. Lindsay, W.L., A.P. Schwab. 1982. The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition* 5(4–7): 821–840. <https://doi.org/10.1080/01904168209363012>
15. Lindsay, W.L. and W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428.
16. Loeppert, R.H. and W.P. Inskeep. 1996. Iron. PP. 639-664. D.L. Sparks (Ed.), In *Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical Methods*, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison.
17. Lucena, J. J. 2003. Fe chelates for remediation of Fe chlorosis in strategy I plants. *Journal of Plant Nutrition* 26(10–11): 1969–1984. <https://doi.org/10.1081/PLN-120024257>
18. Mafi, M. and M.J. Malakouti. 1994. Determination of critical levels of micronutrients in Iranian soils and their effects on crop yield. Soil and Water Research Institute, Ministry of Agriculture, Tehran, Iran (in Farsi).
19. Malakouti, N. and A. Kianoush. 2001. Determination of fertilizer requirements of agricultural and horticultural crops in Iran based on soil, water, plant tests and deficiency symptoms (2nd ed.), Soil and Water Research Institute, Pars Nahal Services-Research Publishing, Tehran (in Farsi).
20. Marschner, H. 2012. *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press, London.
21. Marukhlenko, A.V., M.A. Morozova, A.M.J. Mbarga, N.V. Antipova, A.V. Syroeshkin, I.V. Podoprigora and T.V. Maksimova. 2022. Chelation of Zinc with Biogenic Amino Acids: Description of Properties Using Balaban Index,

- Assessment of Biological Activity on Spirostomum Ambiguum Cellular Biosensor, Influence on Biofilms and Direct Antibacterial Action. *Pharmaceuticals* 15(8): 979. <https://doi.org/10.3390/ph15080979>
22. Mazhar, M.W., M. Ishtiaq, M. Maqbool, F. Ullah, S.R.M. Sayed and E.A. Mahmoud. 2023. Seed priming with iron oxide nanoparticles improves yield and antioxidant status of garden pea (*Pisum sativum* L.) grown under drought stress. *South African Journal of Botany* 162: 577–587. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.09.047>
 23. Mirbolook A., M.H. Rasouli-Sadaghiani, E. Sepehr, A. Lakzian and M. Hakimi. 2020. Effect of iron chelates and their application methods on iron nutrition status of bean plant (*Phaseolus vulgaris*) in a calcareous soil. *Applied Soil Research* 8(3): 109-128 (in Farsi).
 24. Mousavi, S.M., B. Moteszarezhadeh, H. Mirseyed Hosseini, H. Alikhani and A.A. Zolfaghari. 2018. Root-induced changes of Zn and Pb dynamics in the rhizosphere of sunflower with different plant growth promoting treatments in a heavily contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 147: 206-216. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.045>
 25. Naeem, A., P. Deppermann and K.H. Mühling. 2023. Ammonium fertilization enhances nutrient uptake, specifically manganese and zinc, and growth of maize in unlimed and limed acidic sandy soil. *Nitrogen* 4(2): 239–252. <https://doi.org/10.3390/nitrogen4020017>
 26. Ning, X., M. Lin, G. Huang, J. Mao, Z. Gao and X. Wang. 2023. Research progress on iron absorption, transport, and molecular regulation strategy in plants. *Frontiers in plant science* 14: 1190768. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1190768>
 27. Olsen, S.R. and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. PP. 403-430. In: Page, A.L. (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison.
 28. Pearson, H.B.C., S.D.W. Comber, C.B. Braungardt, P. Worsfold, A. Stockdale and S. Lofts. 2018. Determination and Prediction of Zinc Speciation in Estuaries. *Environmental Science and Technology* 52: 14245–14255. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04372>
 29. Priyadarshini, P., T. Chitdeshwari and C. Sudhalakshmi. 2019. Iron availability in calcareous and non-calcareous soils as influenced by various sources and levels of iron. *Madras Agricultural Journal* 106(1): 12–24. <https://doi.org/10.29321/maj.2019.000265>
 30. Rhoades, J. D. 1996. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. PP. 417-435. D.L. Sparks (Eds.), *Soil Science Society of America book series*, Madison. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
 31. Römhelt, V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grapevine. *Journal of Plant Nutrition* 23(11–12): 1629–1643. <https://doi.org/10.1080/01904160009382129>
 32. Römhelt, V. and H. Marschner. 1986. Evidence for a specific uptake system for iron phytosiderophores in roots of grasses. *Plant physiology* 80(1): 175–180. <https://doi.org/10.1104/pp.80.1.175>
 33. Souri, M. K. 2015. Chelates and amino-chelates, and their role in plant nutrition. Agriculture Education and Extension Press, Tehran, Iran (in Farsi).
 34. Souri, M. K., M. Naiji and M. Aslani. 2018. Effect of Fe-Glycine Amino-chelate on Pod Quality and Iron Concentrations of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Under Lime Soil Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 49(2): 215–224. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1421655>
 35. Stephan, C. H., F. Courchesne, W.H. Hendershot, S.P. McGrath, A.M. Chaudri, V. Sappin-Didier and S. Sauvé. 2008. Speciation of zinc in contaminated soils. *Environmental pollution (Barking, Essex: 1987)* 155(2): 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.12.006>
 36. Tahervand, S. and M. Jalali. 2016. Sorption, desorption, and speciation of Cd, Ni, and Fe by four calcareous soils as affected by pH. *Environmental Monitoring and Assessment* 188(6): 322. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5313-4>
 37. Violante, A., V. Cazzolano, L. Perelomov, A.G. Caporale and M. Pigna. 2010. Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 10(3): 268–292. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000100005>
 38. Walkley, A. 1947. A Critical Examination of a Rapid Method for Determining Organic Carbon in Soils: Effect of Variations in Digestion Conditions and of Inorganic Soil Constituents. *Soil Science* 63: 251-264. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194704000-00001>

-
39. Wolf, B. 1982. A comprehensive system of leaf analyses and its use for diagnosing crop nutrient status. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 13(12): 1035–1059. <https://doi:10.1080/00103628209367332>
 40. Zhang, R., Q. Liu, X. Xu, M. Liao, L. Lin, R. Hu, X. Luo, Z. Wang, J. Wang, Q. Deng, D. Liang, H. Xia, X. Lv, Y. Tang and X. Wang. 2022. An amino acid fertilizer improves the emergent accumulator plant *Nasturtium officinale* R. Br. phytoremediation capability for cadmium-contaminated paddy soils. *Frontiers in Plant Science* 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1003743>
 41. Zuo, Y. and F. Zhang. 2011. Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops. *Plant and Soil* 339(1/2): 83–95. <http://www.jstor.org/stable/24130837>