



The effect of fertigation application of zinc aminochelate and ZnSO_4 on zinc speciation in soil and its concentration in sunflower

Mina Alipour Babadi¹, Mojtaba Norouzi Masir^{*2}, Abdolamir Moezzi³, Afrasyab Rahnama Ghahfarokhi⁴, Mehdi Taghavi Zahedkolaei⁵

1. Ph.D. Student, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m-alipour_babadi@stu.scu.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.norouzi@scu.ac.ir
3. Professor, Dept. of Soil Science and Engineering, Faculty of agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: moezzi151@scu.ac.ir
4. Professor, Dept. of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: a.rahnama@scu.ac.ir
5. Assistant Prof., Dept. of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.taghavi@scu.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Full Length Research Paper	Background and Objectives: Zinc (Zn) is an essential micronutrient for various physiological and biochemical processes in plants. Zn deficiency affects plant growth and development and reduces plant yield and nutritional quality. In calcareous soils, Zn aminochelate is one of the novel fertilization strategies to address Zn deficiency for plant. This study was conducted to determine Zn speciation in soil solution and predict Zn chemical species and their correlation with Zn concentration in sunflower (Oscar cultivar).
Article history: Received: --- Revised: --- Accepted: ---	
Keywords: Aminochelate, Available Zinc, Chemical fertilizer, Dissolved organic carbon, Sunflower	Materials and Methods: This experiment was conducted using a randomized complete block design with three replications under field conditions. The experimental treatments consisted of fertigation of Zn-glycine [$\text{Zn}(\text{Gly})_2$] and Zn-methionine [$\text{Zn}(\text{Met})_2$] aminochelates (4 L^{-1}) and ZnSO_4 fertilizer (40 kg ha^{-1}) and control treatment (without fertilizer). Following the cultivation period, soil chemical properties were analyzed, including pH, dissolved organic carbon (DOC), cations and anions, soil soluble Zn, soil available Zn and Zn concentration in plant leaves and seeds. Visual MINTEQ geochemical software was utilized to determine the dominant Zn species in the soil solution phase.
	Results: The results showed that soil pH, soil soluble Zn, soil available Zn, and DOC were affected by experimental treatments. Zn aminochelates, especially [$\text{Zn}(\text{Met})_2$] significantly reduced soil pH. [$\text{Zn}(\text{Gly})_2$] and [$\text{Zn}(\text{Met})_2$] aminochelates significantly increased DOC (25.6 and 30.4%), soil soluble Zn (25.5 and 26.8%), soil available Zn (23.9 and 11.2%), and Zn concentration in leaves (32.8 and 34.8%) and seeds (2.25 and 3.19%), respectively, compared to the ZnSO_4 treatment. The highest amount of Zn bound to dissolved organic matter (Zn-DOM) species was obtained by the application of the [$\text{Zn}(\text{Met})_2$] aminochelate treatment. [$\text{Zn}(\text{Gly})_2$] and [$\text{Zn}(\text{Met})_2$] aminochelates and ZnSO_4 fertilizer also significantly increased the concentration of free Zn specie (Zn^{2+}) (43.2-76.1%) compared to the control treatment. The results also indicated a strong positive correlation between the concentrations of Zn^{2+} and Zn-

DOM species and Zn concentration in plant leaves and seeds.

Conclusion: The results of this study demonstrated that the application of Zn aminochelates can be considered as an effective approach to improve soil conditions, increase Zn availability and improve the nutritional quality of sunflower plants under Zn deficiency conditions.

Cite this article: Alipour Babadi, Mina, Norouzi Masir, Mojtaba, Moezzi, Abdolamir, Rahnama Ghahfarokhi, Afrasyab, & Taghavi Zahedkolaei, Mehdi. 2025. The effect of fertigation application of zinc aminochelate and ZnSO₄ on zinc speciation in soil and its concentration in sunflower. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, --- (---), --- - ---.



© The Author(s).

DOI: -----

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources



تأثیر کاربرد کود آبیاری آمینوکلات‌های روی و سولفات روی بر گونه‌بندی روی در خاک و غلظت آن در آفتابگردان

مینا عالی پور بابادی^۱، مجتبی نوروزی مصیر^{۲*}، عبدالامیر معزی^۳، افراسیاب راهنما قهفرخی^۴، مهدی تقوی زاهد کلانی^۵

۱. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه:

m-alipour_babadi@stu.scu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه:

m.norouzi@scu.ac.ir

۳. استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه:

moezzi151@scu.ac.ir

۴. استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه:

a.rahnama@scu.ac.ir

۵. استادیار گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه:

m.taghavi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۴ واژه‌های کلیدی: آمینوکلات، آفتابگردان، روی قابل دسترس، کربن آلی محلول، کود شیمیایی	سابقه و هدف: روی (Zn) یک عنصر ریز مغذی ضروری برای فرآیندهای مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاهان است. کمبود آن بر رشد و نمو گیاه تأثیر گذاشته و سبب کاهش عملکرد و کیفیت تغذیه می‌شود. در خاک‌های آهکی، آمینوکلات روی، یکی از راهکارهای نوین کوددهی جهت رفع کمبود روی قابل دسترس برای گیاه می‌باشد. این مطالعه با هدف گونه‌بندی شیمیایی روی در محلول خاک به منظور تعیین شکل‌های شیمیایی مختلف روی و همبستگی آنها با غلظت روی در گیاه آفتابگردان (رقم اسکار) انجام شد. مواد و روش‌ها: این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار در شرایط مزرعه انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کود آبیاری آمینوکلات گلاسیسین- روی [Zn (Gly)₂] (۴ لیتر در هکتار)، آمینوکلات متیونین- روی [Zn (Met)₂] (۴ لیتر در هکتار)، کود سولفات روی (به مقدار ۴۰ کیلوگرم در هکتار) و تیمار شاهد (بدون کود) بود. پس از اتمام دوره کشت ویژگی‌های شیمیایی خاک از جمله pH، کربن آلی محلول، کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول، روی محلول خاک، روی قابل دسترس در خاک و غلظت روی در برگ و دانه گیاه اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین گونه‌های شیمیایی غالب روی در فاز محلول خاک، از نرم افزار ژئوشیمیایی Visual MINTEQ استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که pH خاک، روی محلول خاک، روی قابل دسترس در خاک و کربن آلی محلول خاک تحت تأثیر تیمارهای آزمایش قرار گرفتند. آمینوکلات‌های روی به ویژه تیمار آمینوکلات متیونین- روی به طور معنی‌داری pH خاک را کاهش دادند. آمینوکلات‌های گلايسين- روی و متیونین- روی به ترتیب موجب افزایش معنی‌دار کربن آلی محلول (۲۵/۶ و ۳۰/۴ درصد)، روی محلول خاک (۲۵/۵ و ۲۶/۸ درصد)، روی قابل دسترس در خاک (۲۳/۹ و ۱۱/۲ درصد) و نیز غلظت روی در برگ (۳۲/۸ و ۳۴/۸ درصد) و دانه (۲/۲۵ و ۳/۱۹ درصد) نسبت به تیمار سولفات روی شدند. همچنین، بیشترین مقدار گونه روی پیوند یافته با ماده آلی محلول (Zn-DOM) در اثر کاربرد تیمار آمینوکلات متیونین- روی بدست آمد. آمینوکلات‌های گلايسين- روی و متیونین- روی و کود شیمیایی سولفات روی، غلظت گونه آزاد روی (Zn^{2+}) را نیز به‌طور معنی‌داری (۴۳/۲ تا ۷۶/۱ درصد) در مقایسه با تیمار شاهد افزایش دادند. همچنین نتایج حاکی از وجود همبستگی مثبت و معنی‌دار بین گونه‌های Zn^{2+} و Zn-DOM با غلظت روی در برگ و دانه آفتابگردان بود.

نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی می‌تواند به عنوان یک رویکرد مؤثر جهت بهبود شرایط خاک، افزایش قابلیت دسترسی روی و بهبود کیفیت تغذیه‌ای گیاه آفتابگردان در شرایط کمبود روی در نظر گرفته شود.

استناد: عالی پور بابادی، مینا، نوروزی مصیر، مجتبی، معزی، عبدالامیر، راهنما قهفرخی، افراسیاب، تقوی زاهد کلانی، مهدی (۱۴۰۴). تأثیر کاربرد کودآبیاری آمینوکلات‌های روی و سولفات روی بر گونه‌بندی روی در خاک و غلظت آن در آفتابگردان. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار، --- (---)، --- - ---.

DOI: -----



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

افزایش جمعیت جهانی، کمبود اراضی قابل کشت و تغییرات آب و هوایی، پیامدهای مخاطره آمیزی برای سیستم‌های کشاورزی داشته و امنیت غذایی را تهدید می‌کنند (۱). بخش زیادی از جمعیت جهان از نظر عناصر ریزمغذی ضروری دچار کمبود هستند، که تقاضا برای به کارگیری شیوه‌های پایدار کشاورزی، برای کیفیت و عملکرد بالاتر محصولات را افزایش می‌دهد (۲، ۳). کمبود عناصر ریزمغذی در خاک، یک نگرانی قابل توجه برای سلامت جهانی بوده که حدود یک سوم جمعیت دنیا (بیش از ۲ میلیارد انسان) را تحت تاثیر قرار داده است (۱، ۲). علاوه بر این، سطح وسیعی از خاک‌های قابل کشت، به دلیل pH بالای خاک و وجود اکسیدها، کربنات‌های نامحلول و بی-کربنات‌ها، کمبود گسترده عناصر ریزمغذی، از جمله روی را نشان می‌دهند (۴). زمانیکه pH و مقدار کربنات خاک بالا باشد، روی می‌تواند به شکل نمک کربنات رسوب کند (۵). بنابراین، کمبود روی اغلب در خاک‌های آهکی با pH بالا رخ می‌دهد. بنابراین، اتخاذ روش‌های نوین کوددهی در خاک‌های آهکی، به منظور افزایش جذب روی توسط گیاه، افزایش عملکرد محصول و به دنبال آن عرضه بیشتر روی در چرخه غذایی، بسیار ضروری به نظر می‌رسد (۶، ۷). اثربخشی زراعی کودهای روی به ویژگی‌های خاک و نیز ترکیب کود بستگی دارد (۸). کودهای کلات روی می‌توانند موثرتر از کودهای معمول در خاک‌های آهکی با pH بالا عمل کنند (۹). در این راستا، استفاده از کودهای نوین نظیر آمینوکلات‌ها می‌تواند بسیار کارآمد باشد (۱۰).

آمینوکلات‌ها نسل جدیدی از کودها بر پایه‌ی اسیدهای آمینه بوده که فراهمی زیستی عناصر ریزمغذی را برای گیاه بهبود می‌بخشد. مطالعات طی سال‌های اخیر، افزایش فراهمی زیستی عنصر روی و

جذب آن در گیاه و نیز افزایش مقاومت گیاه به تنش کمبود روی را به ویژه در خاک‌های آهکی، به دنبال کاربرد آمینوکلات روی گزارش داده‌اند (۱۱-۱۳). آمینوکلات‌ها از واکنش‌های شیمیایی نظیر تثبیت، تشکیل کمپلکس، تبخیر، ترسیب و نیز آبشویی که منجر به کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی فلزی مانند روی برای گیاه می‌شود، جلوگیری می‌کنند (۱۴). این امر ممکن است به دلیل کلات شدن آنها و نفوذپذیری بیشتر غشای سلولی برای اسیدهای آمینه باشد (۱۵). افزایش مقدار کل روی در خاک، شاخص دقیقی برای ارزیابی اثربخشی زراعی کود نیست. پویایی و قابلیت دسترسی روی بواسطه‌ی گونه‌های شیمیایی روی موجود در محلول خاک کنترل می‌شود. بنابراین، تعیین گونه‌های شیمیایی روی و شناخت مکانیسم‌هایی که گونه‌های روی را در خاک‌های دچار کمبود کنترل می‌کنند، حائز اهمیت است.

عواملی نظیر pH خاک، پتانسیل ریداکس و نیز میزان ماده آلی، کنترل کننده گونه‌های روی در خاک می‌باشند (۱۶). در خاک‌های اسیدی، کمپلکس‌های روی با اکسیدهای آهن و آلومینیوم گونه‌های غالب بوده (۱۷)؛ درحالی‌که در خاک‌های با pH قلیایی، گونه‌های کربنات روی و هیدروکسید کربنات روی غالب هستند (۱۸، ۱۹). اندازه‌گیری مستقیم گونه‌های شیمیایی روی در محلول خاک به ندرت امکانپذیر است. شناسایی و تعیین کمی گونه‌های روی در خاک نیازمند تکنیک‌های ویژه است. استفاده از مدل سازی گونه‌بندی ژئوشیمیایی فلزات، مانند Visual MINTEQ می‌باشد. این مدل‌ها قادر هستند توزیع گونه‌های شیمیایی فلزات نظیر روی را از نظر تئوری و به سرعت تخمین بزنند (۲۰).

با وجود مطالعات صورت گرفته پیرامون شکل-های شیمیایی مختلف روی در خاک، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تأثیر آمینوکلات‌های روی بر توزیع گونه-

بندی روی در فاز محلول خاک انجام نشده است. بنابراین این مطالعه با هدف بررسی تغییر شکل‌های شیمیایی روی در فاز محلول خاک با استفاده از مدل Visual MINTEQ و همبستگی آن‌ها با غلظت و جذب روی در گیاه آفتابگردان تحت تأثیر کود آبیاری آمینوکلات‌های روی در خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی آمینوکلات‌های روی

اسیدهای آمینه گلیسین (Glycine) و متیونین (Methionine) با درصد خلوص ۹۹ درصد از شرکت مرک تهیه شده و به عنوان لیگاند به طور جداگانه با نمک سولفات روی ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) با نسبت مولاری ۲ به ۱ مخلوط شدند. مخلوط در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت روی صفحه داغ قرار گرفت و به شدت هم زده شد. سپس آمینوکلات‌های گلیسین-روی $[\text{Zn}(\text{Gly})_2]$ و متیونین-روی $[\text{Zn}(\text{Met})_2]$ به فرم میکروکریستال پس از شستشو با اتانول ۹۵ درصد و هوا خشک شدن، بدست آمد (۲۱).

مشخصه‌یابی آمینوکلات‌های روی

به منظور تعیین ویژگی‌های ساختاری آمینوکلات‌های روی و تایید تشکیل کمپلکس بین لیگاند آزاد و فلز روی، طیف سنجی مادون قرمز با استفاده از دستگاه FT-IR^۱ مدل Shimadzu 8400 در دامنه cm^{-1} ۴۰۰^۱ تا ۴۰۰۰ با صفحه KBr انجام شد (شکل ۱). مقدار کربن، نیتروژن و هیدروژن ترکیبات با استفاده از دستگاه elemental analyzer مدل Perkin-Elmer 2400 اندازه‌گیری شدند. همچنین اسپکتروسکوپی ^1H NMR با استفاده از دستگاه Bruker Avance DRX فرکانس ۴۰۰ مگاهرتز (Germany) با استفاده از حلال D_2O انجام شد. داده‌های نظری مربوط به مشخصه‌یابی

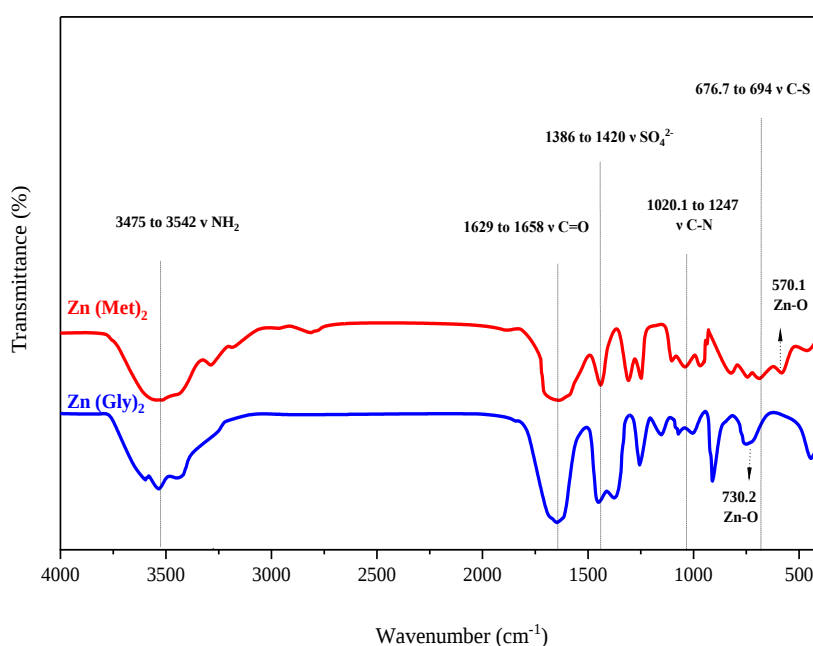
آمینوکلات‌های گلیسین-روی و متیونین-روی در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱، اسیدهای آمینه متیونین و گلیسین در حالت کریستالی به صورت زوئتریون هستند و در کمپلکس‌های خود با فلز روی به عنوان لیگاند دوتایی، با توجه به pH محلول عمل می‌کنند. ارتعاشات غالب برای لیگاند‌های اسید آمینه با $\nu_{\text{st}}(\text{C}=\text{O})$ ، $\nu_{\text{st}}(-\text{NH}_2)$ و $\nu_{\text{st}}(-\text{COO}^-)$ و $\nu_{\text{st}}(\text{C}-\text{N})$ همراه است. هر اسید آمینه به صورت دو دندانه‌ای با یک اتم اکسیژن و یک اتم نیتروژن به فلز روی متصل می‌شود. همچنین، گروه‌های عاملی $(\text{C}=\text{O})$ با کمپلکس مجاور یا با ملکول آب شبکه پیوند هیدروژنی دارند و همچنین پیوند ضعیفی با کمپلکس مجاور حاوی فلز روی تشکیل می‌دهند. به طور کلی نتایج حاکی از وجود الگوی جذب مشابهی بین لیگاند‌های اسید آمینه همراه با فلز روی در محدوده cm^{-1} ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ می‌باشد. همچنین پیک‌های واضح در محدوده cm^{-1} ۳۴۰۰ تا ۳۵۰۰ برای گروه‌های NH_2 - نشان دهنده وجود پیوندهای ویریشنال در کلات‌های آلی با فلز روی بوده که به واکنش‌های بین مولکولی در حالت جامد بسیار حساس می‌باشند. داده‌های رقومی موجود در جدول ۱ نیز نشان می‌دهد که ویژگی‌های اسپکتروسکوپی و نظری آمینوکلات‌ها مطابق با هم هستند.

^۱ Fourier-transform infrared

جدول ۱- ویژگی‌های آمینوکلات‌های روی.

Table 1. Characteristic of Zinc aminochelates.

آمینوکلات Aminochelate	فرمول ملکولی Molecular formula	وزن ملکولی Molecular weight	بدست آمده (محاسبه شده) (%) Found (calculated) (%)			¹ H NMR (400 MHz, D ₂ O)
			C	H	N	
گلیسین- روی [Zn (Gly) ₂]	C ₄ H ₈ N ₂ O ₄ Zn	213.50	22.47 (22.50)	4.57 (3.75)	12.99 (13.12)	δ 3.57 (s, 4H, 2 x CH ₂) δ 2.01–2.11 (m, 2H, 2 x 1H of CH (β)), 2.16 (s, 6H, 2 x CH ₃), 2.21–2.29 (m, 2H, 2 x 1H of CH (β)), 2.62–2.70 (m, 4H, 2 x CH ₂ -S), 3.59–3.67 (m, 2H, 2 x CH (α))
متیونین- روی [Zn (Met) ₂]	C ₁₀ H ₂₀ N ₂ O S ₂ Zn	361.80	32.89 (33.17)	5.62 (5.53)	7.66 (7.74)	



شکل ۱- طیف‌های مادون قرمز آمینوکلات‌های گلیسین- روی [Zn (Gly)₂] و متیونین- روی [Zn (Met)₂].

Figure 1. FT-IR spectra of [Zn (Gly)₂] and [Zn (Met)₂] aminochelates

رقم اسکار مورد بررسی قرار گرفت. بذر آفتابگردان از موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. تیمارهای آزمایش شامل آمینوکلات‌های گلیسین- روی و متیونین- روی، کود شیمیایی سولفات روی (ZnSO₄.7H₂O) و تیمار شاهد (بدون کود) بود.

جهت تعیین ویژگی‌های خاک مورد مطالعه، ابتدا نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتیمتری به صورت مرکب انتخاب و پس از هوا خشک شدن از الک ۲

طراحی آزمایش

این پژوهش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز با موقعیت جغرافیایی ۳۲/۲۲ درجه شمالی و ۴۸/۰۷ درجه شرقی، ارتفاع ۲۲ متر از سطح دریا و میانگین بارش سالانه ۲۱۳ میلی متر صورت گرفت. در این آزمایش تأثیر کودآبیاری آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی بر گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.)

DTPA-TEA (۵ میلی مولار) استفاده شد و غلظت روی در عصاره به وسیله دستگاه جذب اتمی PerkinElmer مجهز به کوره گرافیتی (مدل AAnalyst 800) تعیین شد (۲۷). غلظت پایین روی قابل دسترس در خاک در عصاره‌گیری با DTPA (۰/۴۴ میلی گرم بر کیلوگرم) نشان داد که خاک در شرایط کمبود روی است (۲۸). برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش در جدول ۲ ارائه شده است.

میلی‌متری عبور داده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (۲۲)، هدایت الکتریکی و pH در سوسپانسیون ۱:۲/۵ خاک: آب، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۳)، کربنات کلسیم به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک و تیتراسیون برگشتی با هیدروکسید سدیم (۲۴)، فسفر قابل دسترس به روش اولسن (۲۵)، پتاسیم قابل تبادل با استفاده از استات آمونیوم و نیتروژن به روش کج‌لدال (۲۶) تعیین شد. برای اندازه‌گیری روی قابل دسترس از محلول

جدول ۲- ویژگی‌های خاک مورد مطالعه.

Table 2. Characteristic of studied soil.

Property	Value
Texture	Clay Loam
pH	7.7
EC (dSm ⁻¹)	3.8
Organic C (%)	0.35
CaCO ₃ (%)	37.5
Total N (%)	0.06
P _{ava} (mg kg ⁻¹)	16
K _{EXC} (mg kg ⁻¹)	275
DTPA-extractable Zn (mg kg ⁻¹)	0.44

از استقرار کامل گیاهچه‌ها و در مرحله چهار تا شش برگی، عملیات تنک انجام شد. تیمارهای کودی شامل آمینوکلات‌های گلايسين- روی و متيونين- روی به مقدار ۴ لیتر در هکتار و کود شیمیایی سولفات روی به مقدار ۴۰ کیلوگرم در هکتار، به روش کودآبیاری در سه نوبت در طول دوره رشد گیاه (مرحله چهار برگی، مرحله ظهور طبق و مرحله پر شدن دانه) اعمال شدند. پس از اتمام دوره رشد (۱۲۰ روز) و رسیدگی فیزیولوژیکی، گیاه آفتابگردان با در نظر گرفتن اثرات حاشیه‌ای ردیف‌های کناری برداشت شد. سپس نمونه‌های گیاهی در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۷۲ ساعت قرار داده شد. سپس دانه‌های آفتابگردان به دقت از طبق جدا شده و توزین شدند. جهت تعیین غلظت کل روی در برگ و دانه گیاه از روش هضم خشک (هضم با اسید هیدروکلریک ۲ نرمال) و دستگاه جذب اتمی PerkinElmer (مدل

پس از انجام عملیات خاکورزی در مزرعه، کرت-هایی به طول ۳ متر شامل ۳ ردیف کاشت به فاصله ۶۰ سانتیمتر و فاصله بذر روی ردیف ۲۰ سانتی‌متر (تراکم بوته حدود ۸۰۰۰۰ در هکتار) در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از اثرهای متقابل تیمارهای هم-جوار، فاصله بین دو کرت مجاور ۱ متر در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج آزمون خاک، مقدار عناصر فسفر قابل دسترس و پتاسیم قابل استفاده بیش از حدود بحرانی بوده، بنابراین با توجه به نیاز کودی گیاه، تنها مدیریت کودی نیتروژن صورت گرفت. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت دانه آفتابگردان و آبیاری‌های بعدی تا استقرار کامل مزرعه هر پنج روز یکبار به وسیله ایجاد نهرهای خاکی در کنار هر کرت انجام شد. همچنین در طول مراحل رشد دو مرحله مبارزه با علف‌های هرز به صورت دستی انجام گردید. پس

تحلیل‌های آماری

گونه بندی شیمیایی روی

جهت پیش بینی گونه‌های شیمیایی روی در فاز محلول خاک پس از اعمال تیمارهای کودی مختلف، از نرم افزار Visual MINTEQ (نسخه ۴,۰) استفاده شد (۳۱). مدل سازی با استفاده از اطلاعات حاصل از اندازه گیری عصاره اشباع خاک شامل pH، غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در محلول خاک، مقدار کربن آلی محلول خاک و روی محلول خاک انجام شد. خروجی این مدل نیز شامل برآورد تمام گونه‌های آزاد و کمپلکس شده معدنی و آلی روی بود. بدین منظور غلظت کلسیم و منیزیم محلول بوسیله تیتراسیون با EDTA، سدیم و پتاسیم بوسیله دستگاه فلیم فتومتر (Sherwood 410)، کلر محلول به روش تیتراسیون با نیترات نقره ۰/۰۱ نرمال، سولفات محلول به روش افزودن کلریدباریم و تیتراسیون با EDTA و بیکربنات محلول به روش تیتراسیون با سولفوریک اسید اندازه گیری شد (۲۲). روی محلول با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه گیری شد. میزان کربن آلی محلول در عصاره خاک با استفاده از دستگاه TOC (Shimadzu) Analyzer مدل (TOC-VCPH) اندازه گیری شد.

تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم افزار RStudio نسخه (12.1+402, 2023) صورت گرفت. به منظور انجام مقایسات میانگین از آزمون چند مرحله ای Tukey's HSD در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد. ضرایب همبستگی پیرسون بین گونه‌های روی در محلول خاک با میزان غلظت روی در گیاه با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه (27.0.1) برآورد شد. ترسیم نمودارها نیز با استفاده از نرم افزار OriginPRO نسخه (2024b) انجام شد. جهت ارزیابی ارتباط بین تیمارها و متغیر-های مورد مطالعه، نقشه حرارتی خوشه بندی سلسله مراتبی نیز با استفاده از نرم افزار RStudio نسخه (12.1+402, 2023) ترسیم شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی بر pH خاک، کربن آلی محلول، روی محلول و روی قابل دسترس در خاک معنی دار بود ($P \leq 0.01$) (جدول ۳)

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

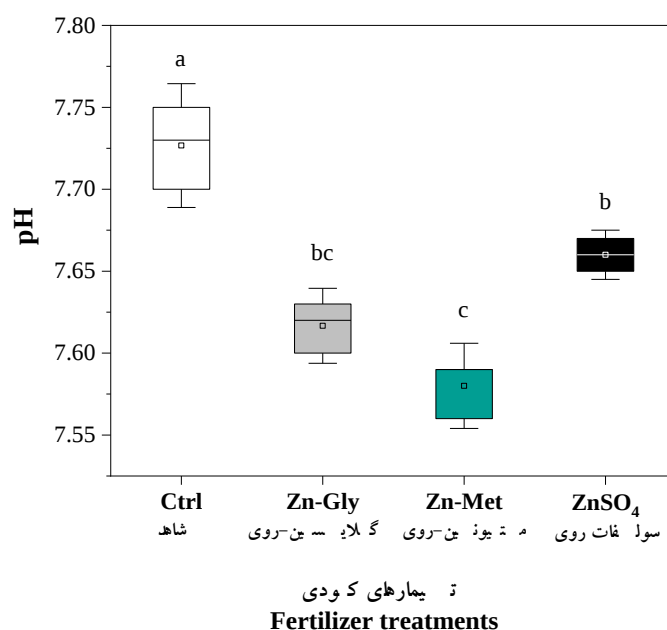
Table 3. Analysis of variance of the effect of treatments on pH, DOC, soil soluble Zn and soil available Zn.

Mean squares میانگین مربعات				درجه آزادی	منابع تغییر
روی قابل دسترس Zn Available	روی محلول Soluble Zn	کربن آلی محلول DOC	pH	Degree of freedoms	Sources of variation
9.9×10^{-6ns}	4.8×10^{-6ns}	0.75^{ns}	0.001^{ns}	2	Block بلوک
$1.7 \times 10^{-4**}$	$1.5 \times 10^{-4**}$	97.8^{**}	0.01^{**}	3	Treatment تیمار
1.1×10^{-4}	1.4×10^{-6}	1.1	5.2×10^{-5}	6	Error خطا
2.28	4.68	3.44	0.10	-	ضریب تغییرات Coefficient of variation

^{ns} و ^{**} به ترتیب عدم معنی داری و معنی داری در سطح احتمال ۱ درصد
^{ns} and ^{**} nonsignificant and significant at 1% probability levels, respectively

کاهش معنی دار pH خاک نسبت به تیمار شاهد شدند (شکل ۲). تیمار آمینوکلات متیونین- روی بیشترین تأثیر را بر کاهش pH خاک داشت (شکل ۲).

pH
مطابق با نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی، سبب



شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر pH خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).
($\leq$)

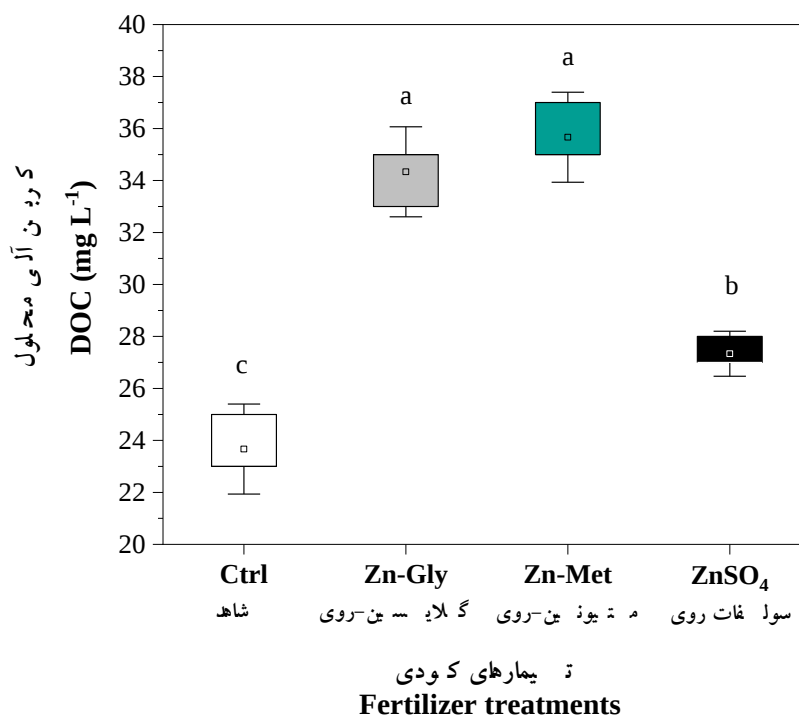
Figure 2. Mean comparisons of the effect of treatments on soil pH. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

صورت کودآبیاری، سبب افزایش معنی دار غلظت کربن آلی محلول خاک نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۳). تیمارها سبب افزایش ۱۵/۴ تا ۵۰/۷ درصد

کربن آلی محلول خاک (DOC)
نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی به

تفاوت معنی‌داری بین تیمار آمینوکلات متیونین- روی و آمینوکلات گلیسین- روی در افزایش کربن آلی محلول خاک وجود نداشت (شکل ۳).

میزان کربن آلی محلول خاک در مقایسه با تیمار شاهد شدند. تیمار آمینوکلات متیونین- روی و کود شیمیایی سولفات روی به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر افزایش غلظت کربن آلی محلول داشتند. با این وجود،



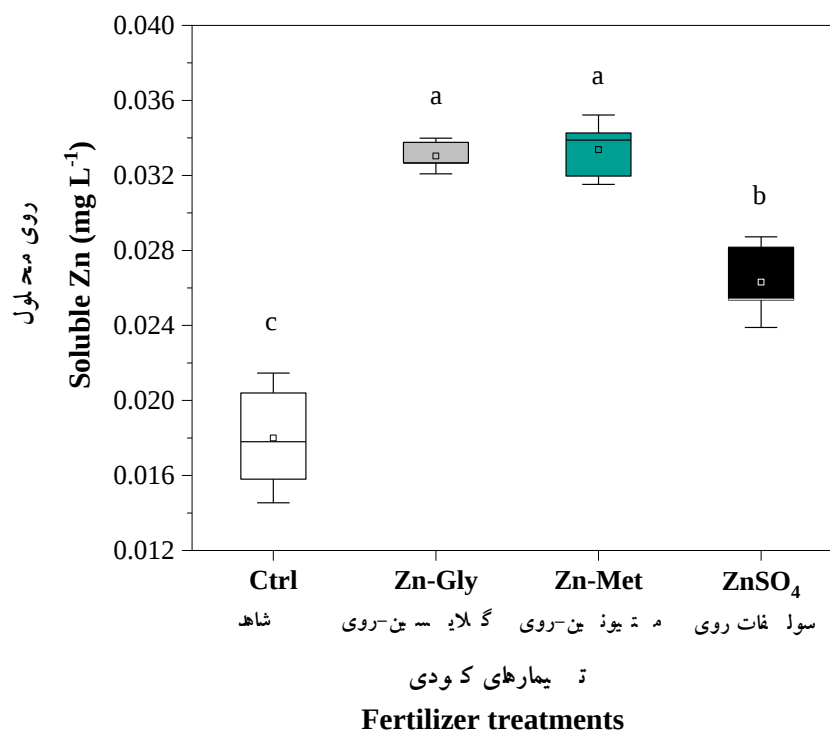
شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر کربن آلی محلول خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 3. Mean comparisons of the effect of treatments on soil DOC. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

افزایش ۴۶/۱ تا ۸۵/۴ درصد روی محلول خاک در مقایسه با تیمار شاهد شدند. با این وجود، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای آمینوکلات متیونین- روی و آمینوکلات گلیسین- روی در افزایش روی محلول خاک وجود نداشت (شکل ۴).

روی محلول خاک (Soluble Zn)

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی، سبب افزایش معنی‌دار غلظت روی محلول خاک نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۴). تیمارها سبب



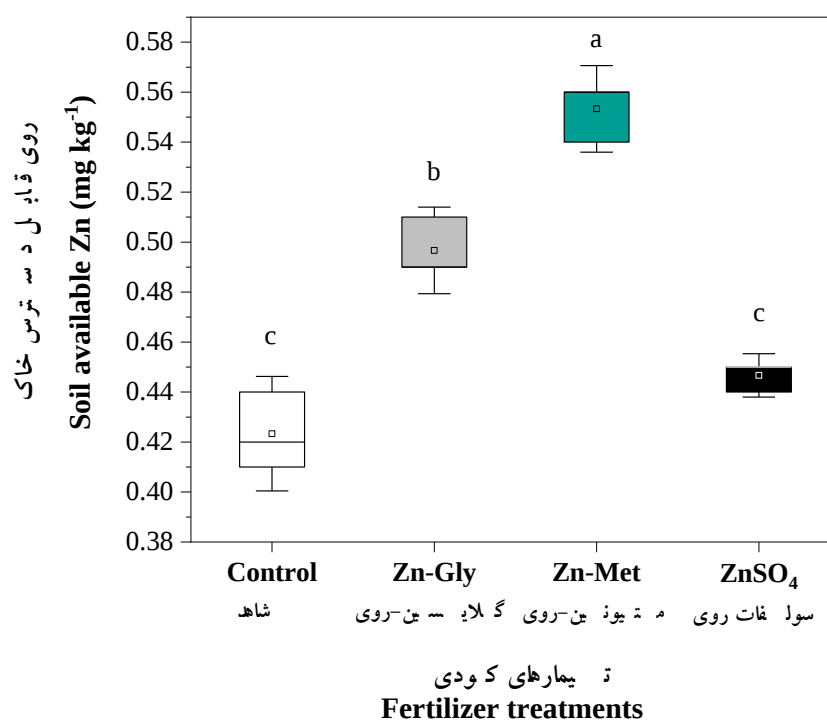
شکل ۴- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت رُوی محلول خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 4. Mean comparisons of the effect of treatments on concentration of soil soluble Zn. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

و آمینوکلات گلیسین-رُوی، به ترتیب سبب افزایش ۳۰/۷ و ۱۷/۳ درصدی غلظت رُوی قابل دسترس خاک نسبت به تیمار شاهد شدند. تفاوت معنی‌داری بین تیمار کود سولفات رُوی و شاهد در مقدار رُوی قابل دسترس خاک وجود نداشت (شکل ۵).

رُوی قابل دسترس خاک (Available Zn)

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های رُوی، سبب افزایش معنی‌دار غلظت رُوی قابل دسترس خاک نسبت به تیمار شاهد شدند (شکل ۵). تیمارهای آمینوکلات متیونین-رُوی



شکل ۵- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت روی قابل دسترس در خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 5. Mean comparisons of the effect of treatments on concentration of soil available Zn. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

آمینوکلات‌ها دارای پایداری زیاد و سرعت رهاسازی عناصر ریز مغذی کمتری بوده، که ممکن است با سرعت جذب توسط گیاه مطابقت بیشتری داشته باشد و منجر به استفاده کارآمدتر از عناصر غذایی در مقایسه با کودهای معدنی نظیر کودهای سولفات شود (۳۶، ۳۷). بنابراین، اگرچه کود سولفات روی با افزایش غلظت یون سولفات می‌تواند سبب کاهش pH خاک و افزایش غلظت روی محلول خاک شود (۵)، ولی اشکال کلات شده روی مانند آمینوکلات‌های روی، بواسطه محافظت از یون روی در برابر فعل و انفعالات موجود در خاک، اغلب مقدار روی قابل دسترس بیشتری را در خاک به ویژه در خاک‌هایی با pH بالا یا محتوای بی‌کربنات بالا فراهم می‌کنند (۱۴). علاوه بر این، آمینوکلات روی با تحریک فرآیندهای فیزیولوژیکی گیاه از جمله متابولیسم نیتروژن،

غلظت روی در محلول خاک عمدتاً به pH خاک و غلظت کربن آلی محلول خاک بستگی دارد (شکل ۴). به طور کلی، pH خاک و ویژگی‌های کلات کنندگی مواد آلی، حلالیت فلزات را در خاک تعیین می‌کنند (۳۲). خاک با pH بالا، غلظت روی قابل دسترس کمتری نسبت به خاک با pH پایین‌تر دارد (۳۳). کاهش pH خاک ممکن است اثربخشی لیگاندهای آلی را در افزایش دسترسی روی برای گیاه بهبود بخشد. استفاده از لیگاندهای آلی نظیر اسیدهای آلی و یا کلات‌های اسید آمینه، منجر به تشکیل کمپلکس‌های آلی پایدار با روی در خاک شده، که حلالیت روی را افزایش می‌دهند (۳۴، ۳۵). تشکیل کمپلکس‌های پایدار روی با آمینوکلات روی در مقایسه با سولفات روی، حلالیت و دسترسی روی را برای گیاه تسهیل می‌کند (۳۵). علاوه بر این،

مورد بررسی قرار گرفت. این سه گونه بیش از ۹۳ درصد کل روی محلول را تشکیل دادند و غلظت سایر گونه‌ها (نظیر $\text{Zn}(\text{OH})_2$ (aq) و ZnCl_2 (aq)) ناچیز بود.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از معنی‌دار بودن تفاوت بین اثر تیمارهای کودی مختلف بر غلظت گونه‌های غالب روی در محلول خاک بود ($P \leq 0.01$) (جدول ۴).

اثر بخشی بیشتری بر زیست فراهمی روی نسبت به کود سولفات روی دارد. این افزایش زیست فراهمی می‌تواند منجر به جذب موثر روی و بهبود رشد گیاه شود (۳۵).

کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی بر غلظت گونه‌های شیمیایی غالب روی در فاز محلول خاک با استفاده از مدل ژئوشیمیایی Visual MINTEQ

در این مطالعه تأثیر تیمارها بر غلظت گونه‌های غالب روی (Zn^{2+} , Zn-DOM و ZnSO_4) در خاک

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر غلظت گونه‌های شیمیایی غالب روی در فاز محلول خاک.

Table 4. Analysis of variance of the effect of treatments on concentration of Zn dominant chemical species in the soil solution phase.

میانگین مربعات Mean squares			درجه آزادی Degree of freedoms	منابع تغییر Sources of variation
ZnSO_4	Zn-DOM	Zn^{2+}		
$2.9 \times 10^{-16\text{ns}}$	$4.2 \times 10^{-19\text{ns}}$	$2.0 \times 10^{-16\text{ns}}$	2	بلوک Block
$2.9 \times 10^{-15**}$	$1.2 \times 10^{-15**}$	$8.8 \times 10^{-15**}$	3	تیمار Treatment
2.2×10^{-17}	5.3×10^{-18}	1.2×10^{-16}	6	خطا Error
3.53	6.05	4.96	-	ضریب تغییرات Coefficient of variation

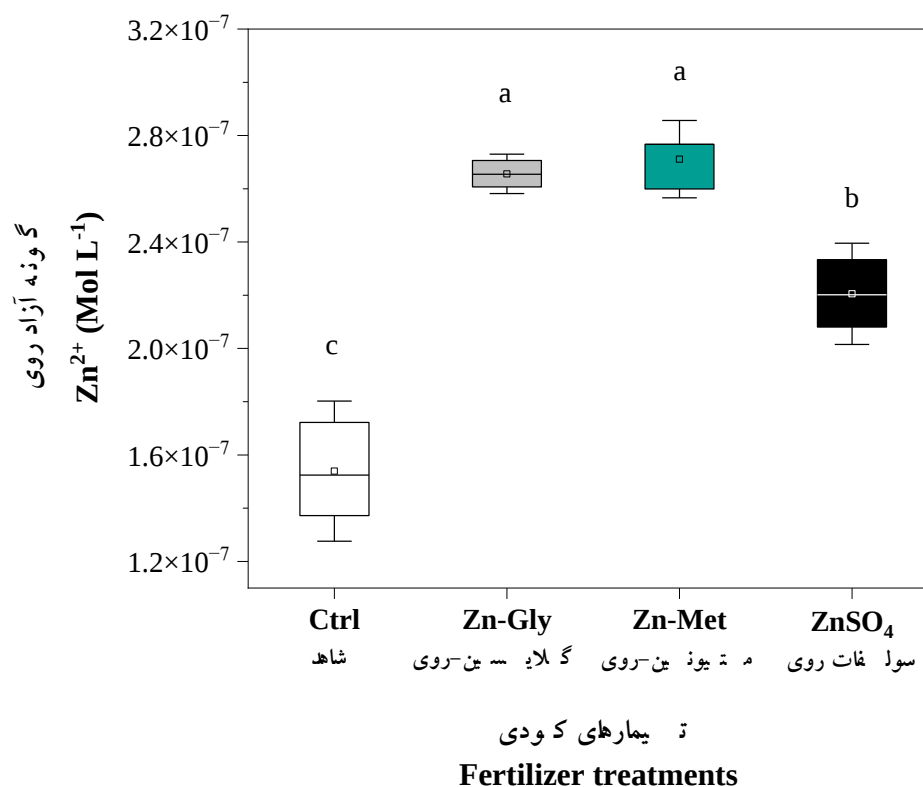
^{ns} و ^{**} به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد

^{ns} and ^{**} nonsignificant and significant at 1% probability levels, respectively

سبب افزایش ۴۳/۲ تا ۷۶/۱ درصد غلظت گونه Zn^{2+} در محلول خاک در مقایسه با تیمار شاهد شدند. این افزایش در مورد تیمارهای آمینوکلات‌های روی بیشتر از سولفات روی بود (شکل ۶).

گونه آزاد روی (Zn^{2+})

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی، سبب افزایش معنی‌دار غلظت گونه Zn^{2+} در محلول خاک نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۶). تیمارها

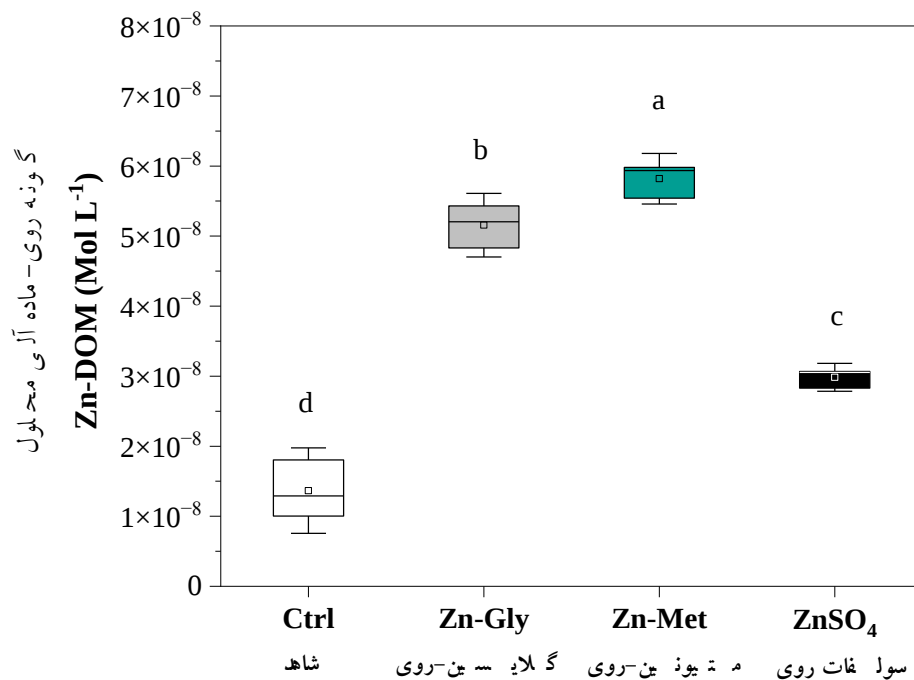


شکل ۶- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت گونه آزاد روی (Zn^{2+}) در فاز محلول خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی-دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 6. Mean comparisons of the effect of treatments on concentration of Zn^{2+} in soil solution. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

محلول خاک نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۷). تیمار آمینوکلات متیونین- روی با افزایش بیش از ۴,۴ برابر، بیشترین تأثیر را بر افزایش غلظت گونه Zn^{2+} در DOM در محلول خاک در مقایسه با تیمار شاهد داشت (شکل ۷).

گونه کمپلکس شده با ترکیبات آلی (DOM)
نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی، سبب افزایش معنی‌دار غلظت گونه Zn^{2+} -DOM در



تیمارهای کودی
Fertilizer treatments

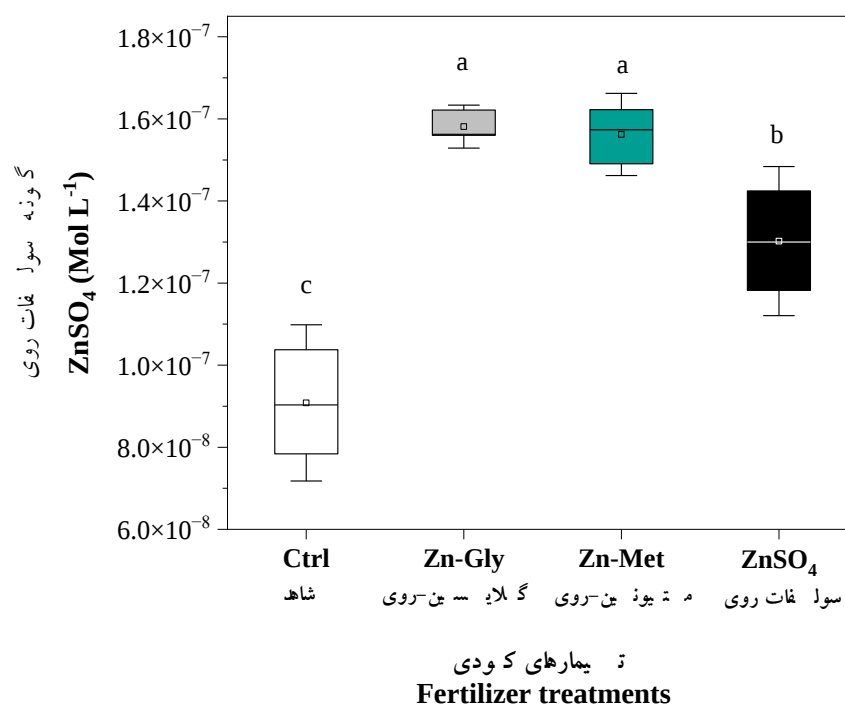
شکل ۷- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت گونه روی کمپلکس شده با ترکیبات آلی (Zn-DOM) در فاز محلول خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 7. Mean comparisons of the effect of treatments on concentration of Zn-DOM in soil solution. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

ZnSO₄ در محلول خاک در مقایسه با تیمار شاهد شدند. با این وجود، تفاوت معنی داری بین تیمارهای آمینوکلات گلیسین-روی و متیونین-روی در افزایش غلظت گونه ZnSO₄ محلول خاک وجود نداشت (شکل ۸).

گونه ZnSO₄

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی، سبب افزایش معنی دار غلظت گونه ZnSO₄ در محلول خاک نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۸). تیمارها سبب افزایش ۴۳/۳ تا ۷۴/۱ درصد غلظت گونه



شکل ۸- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت گونه سولفات روی (ZnSO₄) در فاز محلول خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 8. Mean comparisons of the effect of treatments on concentration of ZnSO₄ in soil solution. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

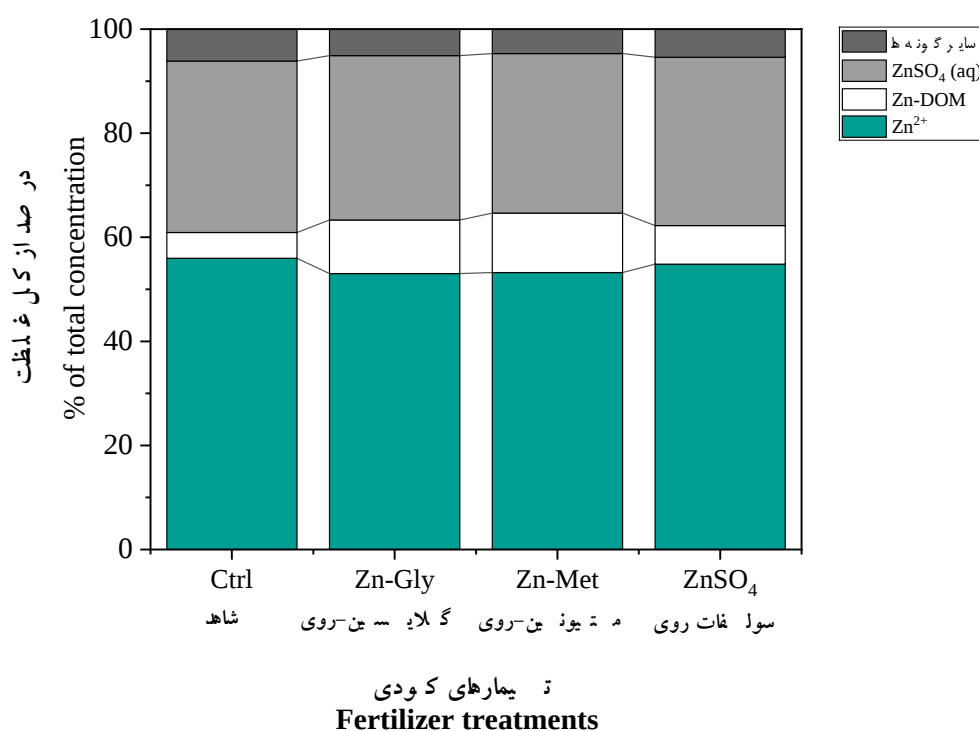
در خاک، pH مهمترین متغیر کنترل کننده غلظت گونه‌های شیمیایی مختلف روی است (۱۶). با کاهش pH خاک، غلظت گونه آزاد فلز افزایش می‌یابد (۴۱). آمینوکلات‌ها به واسطه داشتن گروه عاملی کربوکسیل، سبب تعدیل pH خاک به ویژه در خاک‌های آهکی شده (۱۵) و در نتیجه بر گونه‌بندی و قابلیت دسترسی فلزات تأثیر می‌گذارند. آمینوکلات به عنوان عامل کلات کننده آلی، عنصر روی را احاطه کرده و از واکنش آنها با سایر ذرات خاک جلوگیری می‌کند و به راحتی با تشکیل کمپلکس با روی، موجب افزایش حلالیت آن در محلول خاک می‌شود. از سوی دیگر تغییرات گونه روی کمپلکس شده با ترکیبات آلی در محلول خاک، از روند تغییرات کربن آلی محلول خاک (شکل ۳) تبعیت می‌کند. کربن آلی محلول در افزایش حلالیت فلزات در محلول به واسطه تشکیل کمپلکس‌های پایدار کربن آلی-فلز نقش دارد (۴۲).

با توجه به نتایج به دست آمده از مدل ژئوشیمیایی Visual MINTEQ، در میان سه گونه شیمیایی غالب روی، بیشترین غلظت گونه روی محلول، گونه Zn^{2+} بود. به طور کلی براساس نتایج این پژوهش، کاربرد آمینوکلات‌های روی سبب افزایش غلظت تمامی گونه‌های روی در محلول خاک شد. نتایج نشان داد که حدود ۵۳ تا ۵۶ درصد از غلظت کل روی محلول را گونه Zn^{2+} به خود اختصاص داده است (شکل ۹). سایر محققان نیز دریافتند که به طور کلی، روی غالباً به شکل گونه آزاد در محلول خاک یافت می‌شود (۳۸-۴۰). با توجه به نتایج پژوهش حاضر، رهاسازی فلزات از فاز جامد خاک به محلول و الگوی توزیع گونه‌های شیمیایی آنها در محلول به عوامل متعددی از جمله مقدار pH خاک و همچنین غلظت کربن آلی محلول بستگی داشت (شکل ۲ و ۳). از بین پارامترهای شیمیایی رایج اندازه‌گیری شده

(۳۹). بنابراین، غلظت گونه Zn^{2+} بیانگر ظرفیت کمپلکس‌سازی محلول خاک است. با توجه به اینکه، غلظت گونه Zn^{2+} توسط غلظت لیگاندهای آلی و قدرت آن‌ها در محلول کنترل می‌شود؛ فراوانی لیگاند و نوع و استحکام پیوندها در تشکیل کمپلکس، عوامل مهمی در کنترل نسبت گونه‌های محلول روی می‌باشند (۳۹). این نتایج در کاربرد نانو ذرات اکسید روی در آزمایشی مشابه توسط عبدالهی و همکاران (۱۳۹۸) نیز تایید شده است. این پژوهشگران دریافتند که به دنبال کاهش pH خاک و افزایش آزادسازی روی از فاز جامد خاک درصد گونه Zn^{2+} و Zn -DOM در محلول خاک افزایش یافت (۴۰).

بنابراین می‌توان چنین استدلال نمود که کاربرد آمینوکلات‌های روی با افزایش کربن آلی محلول، موجب افزایش گونه Zn -DOM در محلول خاک می‌شود.

غلظت روی محلول نیز دیگر عامل تعیین کننده توزیع گونه‌های شیمیایی روی در محلول خاک است. اثر غلظت روی بر توزیع گونه‌های شیمیایی مختلف آن، مستقیماً با کمیت مکان‌های جذب در خاک مرتبط است (۱۶). هرچه غلظت روی محلول و لیگاندهای کمپلکس روی موجود در محلول بیشتر شود، با توجه به میل ترکیبی زیاد روی به تشکیل فرم‌های پایدار لیگاندهای آلی، روی از فرم آزاد خارج شده و شرایط به نفع تشکیل کمپلکس‌های آلی روی پیش می‌رود.



شکل ۹- نمودار توزیع غلظت گونه‌های غالب روی در محلول خاک.

Figure 9. Distribution diagram of the concentration of dominant Zn species in soil solution.

تأثیر کاربرد کودآبیاری آمینوکلرات‌های روی و سولفات روی بر گونه بندی روی... / مینا عالی پور بابادی و همکاران

در دانه ($P \leq 0.05$) و برگ ($P \leq 0.01$) آفتابگردان
 اثر کاربرد تیمارهای کودی مختلف بر غلظت روی
 در گیاه
 نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد
 که اثر کاربرد تیمارهای کودی مختلف بر غلظت روی

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر غلظت روی دانه و برگ گیاه آفتابگردان.

Table 5. Analysis of variance of the effect of treatments on seed and leaf Zn concentration of sunflower.

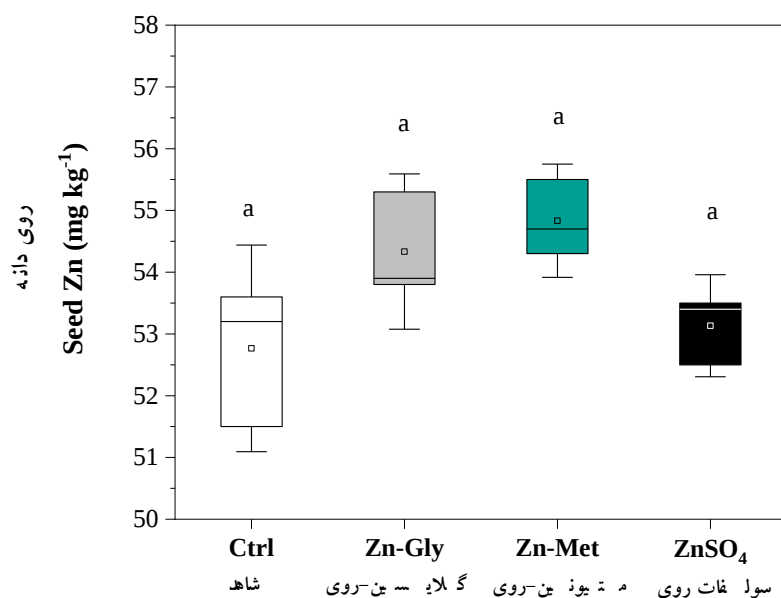
میانگین مربعات Mean squares		درجه آزادی Degree of freedoms	منابع تغییر Sources of variation
روی برگ Leaf Zn	روی دانه Seed Zn		
1.1 ^{ns}	1.5 ^{ns}	2	بلوک Block
25.8 ^{**}	2.8 [*]	3	تیمار Treatment
0.1	0.3	6	خطا Error
2.45	1.10	-	ضریب تغییرات Coefficient of variation

^{ns}, **, * به ترتیب عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد و *، **، ^{ns} nonsignificant and significant at 1% and 5% probability levels, respectively

مختلف بر غلظت روی دانه ($P \leq 0.05$) (جدول ۵)،
 تفاوت میزان افزایش غلظت روی دانه بین تیمارهای
 کودی و تیمار شاهد معنی‌دار نبود (شکل ۱۰).

غلظت روی دانه آفتابگردان

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد
 که علی‌رغم معنی‌دار بودن اثر کاربرد تیمارهای کودی



تیمارهای کودی

Fertilizer treatments

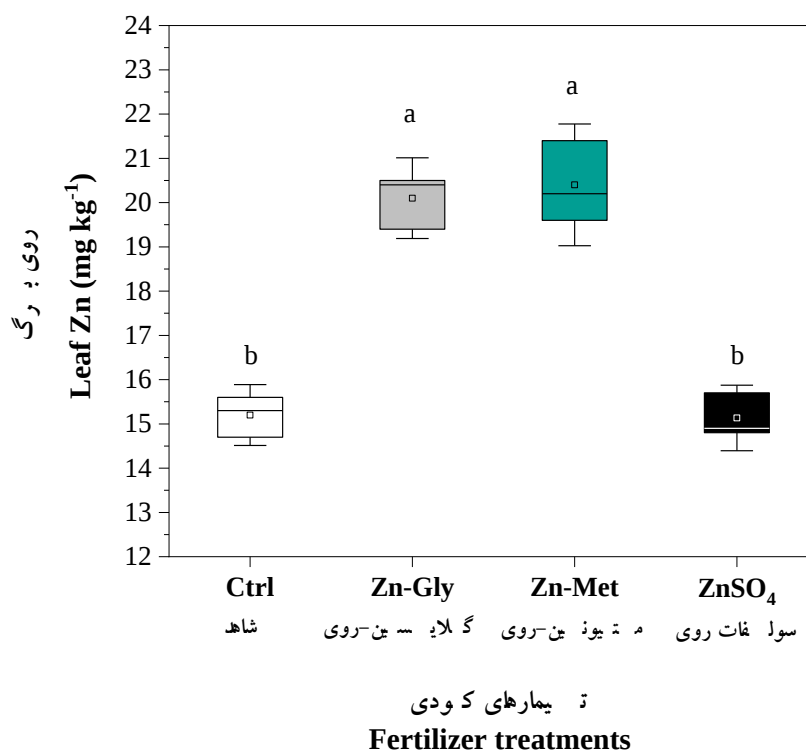
شکل ۱۰- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت روی در دانه گیاه آفتابگردان. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 10. Mean comparisons of the effect of treatments on seed Zn concentration of sunflower. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

غلظت روی برگ آفتابگردان

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی سبب افزایش غلظت روی برگ آفتابگردان نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۱۱). کاربرد کود سولفات روی (به صورت کودآبیاری) تأثیری معنی داری بر غلظت روی برگ نسبت به تیمار شاهد نداشت. در مقابل، آمینوکلات-

های متیونین- روی و گلیسین- روی، به ترتیب سبب افزایش ۳۴/۲ و ۳۲/۳ درصدی میزان روی برگ در مقایسه با تیمار شاهد شدند. با این وجود، تفاوت معنی داری بین تیمارهای آمینوکلات متیونین- روی و گلیسین- روی در افزایش غلظت روی برگ وجود نداشت (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت روی در برگ گیاه آفتابگردان. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 11. Mean comparisons of the effect of treatments on leaf Zn concentration of sunflower. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

از سوی دیگر، روی با تشکیل لیگاند با اسیدهای آمینه حاوی گوگرد در آوند آبکش به دانه گیاه منتقل می‌شود (۴۷، ۴۸). بنابراین، از آنجایی که متیونین یک اسید آمینه حاوی گوگرد است، در انتقال روی در مقایسه با سایر منابع روی موثرتر بوده است. همچنین، ترکیب نیکوتیانامین که از متیونین تولید شده، انتقال روی و آهن را در آوند آبکش فراهم می‌کند (۴۹). بهبود جذب روی توسط گیاهان، به دنبال کاربرد آمینوکلات‌های گلیسین-روی نیز ممکن است به تبدیل سریع گلیسین به آمونیوم، امید و ترکیبات آلیفاتیک نسبت داده شود که بر جذب روی توسط گیاه موثر است (۵۰). بنابراین، آمینوکلات‌های روی را به طور موثر جهت افزایش میزان روی در بخش‌های مختلف گیاه در خاک دارای کمبود روی، می‌توان به کار برد (۸).

آمینوکلات روی به طور کلی موثرتر از کود شیمیایی سولفات روی در افزایش غلظت روی دانه می‌باشد (۴۳). محمدی و خوش گفتارمنش (۲۰۱۴) گزارش دادند که آمینوکلات گلیسین-روی در تأمین روی مورد نیاز گیاه کاهو موثرتر از سولفات روی بوده است (۴۴). در مطالعه دیگری، Akça و همکاران (۲۰۲۲) نشان دادند که کاربرد آمینوکلات متیونین-روی سبب افزایش ۱۹/۹ درصدی غلظت روی در گیاه ذرت نسبت به کود سولفات روی در خاک آهکی شد (۱۳). اسیدهای آمینه با تولید هورمون‌ها و ترکیبات نیتروژنی با وزن مولکولی پایین، سبب تشکیل کمپلکس‌های محلول با روی شده و فراهمی زیستی آن را افزایش می‌دهند (۴۵). همچنین اسیدهای آمینه از طریق گروه‌های عاملی کربوکسیل‌دار، کمپلکس‌های پایداری با روی تشکیل می‌دهند (۴۶).

همبستگی بین گونه‌های شیمیایی روی در بخش محللول خاک با غلظت روی قابل دسترس در خاک و غلظت روی در دانه و برگ گیاه

نتایج همبستگی بین گونه‌های شیمیایی غالب روی در فاز محللول خاک با غلظت روی در بخش‌های مختلف گیاه آفتابگردان و نیز غلظت روی قابل دسترس در خاک در جدول ۶ نشان داده شده است. غلظت روی قابل دسترس خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری با غلظت گونه‌های شیمیایی غالب روی در محللول خاک به ویژه گونه کمپلکس شده با ترکیبات آلی (**۰/۹۲) نشان داد. جالب توجه است که غلظت روی در برگ گیاه آفتابگردان تیمار شده با کودهای آمینوکلات روی و کود سولفات روی، همبستگی مثبت و معنی‌دار قوی با غلظت گونه کمپلکس شده با ترکیبات آلی (**۰/۹۱)، گونه روی آزاد (**۰/۸۳) و گونه سولفات روی (**۰/۸۱) نشان داد. همچنین غلظت روی در دانه نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار

قوی با تمامی گونه‌های شیمیایی غالب روی در محللول خاک به ویژه گونه کمپلکس شده با ترکیبات آلی (**۰/۷۹) داشت (جدول ۶). با توجه به وجود همبستگی بالا و مثبت بین غلظت روی در برگ و دانه آفتابگردان با گونه‌های روی آزاد و کمپلکس شده با ترکیبات آلی در محللول، می‌توان این گونه‌ها را به عنوان گونه‌های قابل دسترس روی در محللول خاک در نظر گرفت. بنابراین، غلظت عناصر ریز مغذی در گیاه نه تنها به مقدار کل غلظت عناصر در خاک، بلکه به گونه‌های حاضر در محللول خاک نیز بستگی دارد، زیرا گونه‌های مختلف نظیر فلزات هیدراته آزاد و کمپلکس‌های لیگاند- فلز می‌توانند به مقادیر متفاوت به وسیله گیاه جذب شوند. عبدالهی و همکاران (۱۳۹۹) نیز با بررسی اثر کاربرد نانوذرات اکسید آهن عامل‌دار و کود شیمیایی سولفات روی بر گونه‌بندی روی در خاک و جذب روی در گندم، به نتایج مشابهی دست یافتند (۵۱).

جدول ۶- ضرایب همبستگی پیرسون بین غلظت گونه‌های غالب روی در فاز محللول خاک با غلظت روی قابل دسترس خاک و غلظت روی در دانه و برگ گیاه آفتابگردان ($P \leq 0.05$).

Table 6. Pearson correlation coefficients between concentration of Zn dominant chemical species in soil solution phase with soil available Zn concentration and seed and leaf Zn concentration of sunflower ($P \leq 0.05$).

Variables	Zn ²⁺	Zn-DOM	ZnSO ₄	Soil available Zn	Seed Zn	Leaf Zn
Zn ²⁺	1					
Zn-DOM	0.97**	1				
ZnSO ₄	0.99**	0.94**	1			
Soil available Zn	0.83**	0.92**	0.80**	1		
Seed Zn	0.74**	0.79**	0.67*	0.78**	1	
Leaf Zn	0.83**	0.91**	0.81**	0.87**	0.69*	1

** و * به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد

** and * significant at 0.01 and 0.05 probability levels, respectively

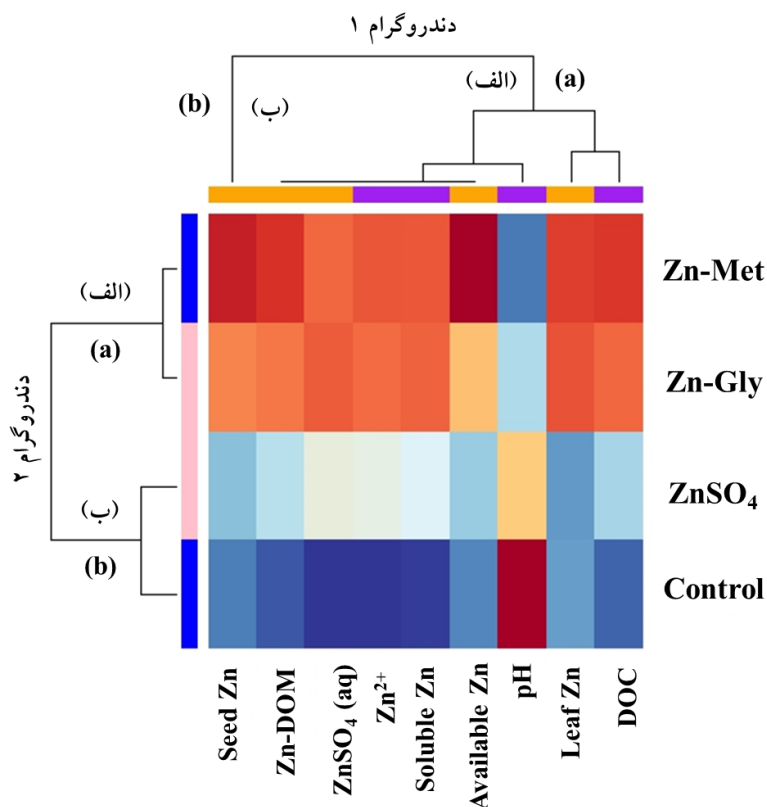
(شکل ۱۲). نقشه حرارتی شامل دو دندروگرام می- باشد: دندروگرام اول در جهت عمودی نشان دهنده غلظت گونه‌های شیمیایی غالب روی در محللول خاک، غلظت روی در برگ و دانه گیاه آفتابگردان،

تجزیه و تحلیل نقشه حرارتی خوشه‌ای سلسله مراتبی (دندروگرام دوگانه)

جهت ارزیابی ارتباط بین تیمارها و متغیرهای مورد مطالعه، نقشه حرارتی خوشه‌ای ترسیم شد

نشان می‌دهد، گروه (الف) مرتبط با تیمارهای آمینوکلات روی بوده، در حالیکه تیمارهای شاهد و کود سولفات روی در گروه (ب) قرار دارند (شکل ۱۲). همانگونه که مشاهده می‌شود، آمینوکلات‌های گلايسين- روی و متيونين- روی در خوشه (الف) دندروگرام ۲ دارای مقادیر بالاتری از متغیرهای مورد مطالعه به جز pH خاک بوده به طوری که به ترتیب بیشترین میزان روی قابل دسترس خاک، روی دانه، گونه روی کمپلکس شده با ترکیبات آلی و کربن آلی محلول خاک برای آمینوکلات متیونین- روی ظاهر شده است. در مقابل بیشترین میزان pH خاک برای تیمار شاهد ثبت گردید (شکل ۱۲).

میزان روی محلول خاک، روی قابل دسترس خاک، کربن آلی محلول و نیز pH خاک بوده و دندروگرام دوم در جهت افقی نشان دهنده تیمارهای کودی مختلف است. دندروگرام ۱ دو گروه اصلی را نشان می‌دهد، گروه (الف) که از دو زیر خوشه تشکیل شده است: اولین زیر خوشه در سمت راست دندروگرام ۱، مرتبط با میزان روی در برگ و کربن آلی محلول خاک بوده و زیر خوشه دیگر مرتبط با pH خاک، روی قابل دسترس خاک، روی محلول خاک و گونه‌های روی آزاد، کمپلکس شده با ترکیبات آلی و سولفات روی در محلول است. گروه (ب) نیز مربوط به میزان روی در دانه گیاه است. دندروگرام ۲ نیز دو گروه عمده را



شکل ۱۲- نقشه حرارتی خوشه‌بندی سلسله مراتبی (دندروگرام دوگانه) مؤلفه‌های مورد مطالعه. نمودار نقشه حرارتی مقدار متغیرها (ستون‌ها) را در هر نوع تیمار کودی (ردیف) توصیف می‌کند. رنگ قرمز تیره و آبی روشن به ترتیب نشان دهنده مقادیر زیاد و کم بوده و طول شاخه‌های دندروگرام نشان‌دهنده فاصله بین متغیرها یا خوشه‌های متغیرها است که از طریق همبستگی پیرسون دو متغیره محاسبه می‌شود.

Figure 12. Heat map of the hierarchical cluster (double dendrogram) analysis of the studied parameters. The heatmap plot describes the relative amount of each variable (columns) within each fertilizer treatment (rows). Dark red and light blue color indicate high and low amount, respectively. The length of the dendrogram branches represents the distance between variables or

clusters of variables calculated from bivariate Pearson correlations.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که گیاه آفتابگردان کشت شده در خاک آهکی با غلظت روی کمتر از حد بحرانی، توانایی استفاده موثر از روی موجود را نداشته و در نتیجه واکنش مثبتی به منابع کودی روی اعمال شده به صورت کودآبیاری نشان داد. کارایی آمینوکلات‌های روی در مقایسه با کود شیمیایی سولفات روی، بیشتر بوده و به طور قابل توجهی غلظت روی در گیاه را افزایش داد. کاربرد آمینوکلات‌های متیونین-روی و گلیسین روی با تاثیر بر کاهش pH خاک، افزایش غلظت روی محلول خاک، روی قابل دسترس خاک و افزایش میزان کربن آلی محلول در خاک، سبب افزایش غلظت گونه‌های Zn^{2+} ، Zn-DOM و $ZnSO_4$ در فاز محلول خاک

آهکی شد. همچنین نتایج نشان داد که بین گونه‌های Zn^{2+} و Zn-DOM با غلظت روی قابل دسترس خاک و نیز غلظت روی در دانه و برگ گیاه آفتابگردان همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود داشت. نتایج مطالعه حاضر، بر پتانسیل استفاده از آمینوکلات‌های روی به ویژه آمینوکلات متیونین-روی به عنوان یک رویکرد پایدار و مؤثر برای بهبود کیفیت تغذیه‌ای گیاه آفتابگردان در مناطق خشک و نیمه خشک که مستعد کمبود روی هستند، تأکید می‌کند. اگرچه، تحقیقات بیشتری جهت تعیین مکانیسم دقیق کارایی آمینوکلات‌های روی در محیط محلول خاک مورد نیاز است.

1. Jalal, A., Júnior, E. F., & Filho, M. C. M. T. (2024). Interaction of Zinc Mineral Nutrition and Plant Growth-Promoting Bacteria in Tropical Agricultural Systems: A review. *Plants*, 13(5), 571. <https://doi.org/10.3390/plants13050571>.
2. Lowe, N. M. (2021). The global challenge of hidden hunger: perspectives from the field. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 80(3), 283–289. <https://doi.org/10.1017/S0029665121000902>.
3. Assunção, A. G. L., Cakmak, I., Clemens, S., González-Guerrero, M., Nawrocki, A., & Thomine, S. (2022). Micronutrient homeostasis in plants for more sustainable agriculture and healthier human nutrition. *Journal of experimental botany*, 73(6), 1789–1799. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac014>.
4. Galindo, F.S., Bellotte, J.L., Santini, J.M., Buzetti, S., Rosa, P.A., Jalal, A., & Teixeira Filho, M.C. (2021). Zinc use efficiency of maize-wheat cropping after inoculation with *Azospirillum brasilense*. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 120, 205 - 221. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10149-2>.
5. Alloway, B.J. (2008). *Zinc in soils and crop nutrition (2nd eds.)*. Brussels/Paris: International Zinc Association/International Fertilizer Industry Organization, 135p.
6. Dhaliwal, S. S., Sharma, V., Shukla, A. K., Verma, V., Kaur, M., Shivay, Y. S., Nisar, S., Gaber, A., Brestic, M., Barek, V., Skalicky, M., Ondrisik, P., & Hossain, A. (2022). Biofortification-A Frontier Novel Approach to Enrich Micronutrients in Field Crops to Encounter the Nutritional Security. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(4), 1340. <https://doi.org/10.3390/molecules27041340>.
7. Li, J., Martin, C., & Fernie, A. (2024). Biofortification's contribution to mitigating micronutrient deficiencies. *Nature food*, 5(1), 19–27. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00905-8>.
8. Zaheer, I. E., Ali, S., Saleem, M. H., Arslan Ashraf, M., Ali, Q., Abbas, Z., Rizwan, M., El-Sheikh, M. A., Alyemeni, M. N., & Wijaya, L. (2020). Zinc-lysine Supplementation Mitigates Oxidative Stress in Rapeseed (*Brassica napus* L.) by Preventing Phytotoxicity of Chromium, When Irrigated with Tannery Wastewater. *Plants (Basel, Switzerland)*, 9(9), 1145. <https://doi.org/10.3390/plants9091145>.
9. Zhao, A., Yang, S., Wang, B., & Tian, X. (2019). Effects of ZnSO₄ and Zn-EDTA applied by broadcasting or by banding on soil Zn fractions and Zn uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.) under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182, 307–317.
10. Mahmoud Soltani, S., Ebadi, A. A., Tajadoditalab Rashti, K., Sartipi, S., & Shakouri Katigari, M. (2024). Foliar spray of glycine-chelated zinc (Zn) and iron (Fe) lowered the effect of macronutrient deficiencies and enhanced rice yield components, yield, and grain biofortification. *Journal of Plant Nutrition*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2378923>.
11. Tavallali, V., & Karimi, S. (2017). Green Synthesized Zinc-Glycine Chelate Enhances Antioxidant Protection of Pistachio under Different Soil Boron Levels. *International Journal of Fruit Science*, 17(4), 423–439. <https://doi.org/10.1080/15538362.2017.1354246>.
12. Ali, S. M., Farrej, M. F. B., Hussain, A., Akram, N. A., Rizwan, M., Wang, X., Maqbool, A., Nafees, M., & Ali, B. (2022). Zinc fortification and alleviation of cadmium stress by application of lysine chelated zinc on different varieties of wheat and rice in cadmium stressed soil. *Chemosphere* 295,133829. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133829>.
13. Akça, H., Danish, S., Younis, U., Babar, S. K., & Taban, S. (2022). Soil and foliar application of zinc-methionine and zinc sulfate effects on growth and micronutrients enrichment in maize

cultivated in lime-rich and poor soils. *Journal of Plant Nutrition*, 45(14), 2158–2169.

<https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2046077>.

14. Souri, M. K., & Hatamian M. (2018). Aminochelates in plant nutrition: a review, *Journal of Plant Nutrition*, 42(1), 67–78. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1549671>.

15. Souri, M. K. (2016). Aminochelate fertilizers: the new approach to the old problem; a review. *Open Agriculture*, 1(1):-118–123.

16. Jacquat, O., Voegelin, A., & Kretzschmar, R. (2009). Soil Properties Controlling Zn Speciation and Fractionation in Contaminated Soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 5256-5272.

17. Manceau, A., C. Tommaseo, S. Rihs, N. Geoffroy, D. Chateigner, M. Schlegel, D. Tisserand, M.A. Marcus, N. Tamura & Z.S. Chen. (2005). Natural speciation of Mn, Ni, and Zn at the micrometer scale in a clayey paddy soil using X-ray fluorescence, absorption, and diffraction. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 4007–4034.

18. Bostick, B.C., Hansel, C.M., Force, M.J., & Fendorf, S. (2001). Seasonal fluctuations in zinc speciation within a contaminated wetland. *Environmental science & technology*, 35 19, 3823-9.

19. Peltier, E., Webb, S.M., & Gaillard, J. (2003). Zinc and lead sequestration in an impacted wetland system. *Advances in Environmental Research*, 8, 103-112.

20. Jebril, N., Boden, R., & Braungardt, C. (2021). The effect of pH, calcium, phosphate and humic acid on cadmium availability and speciation in artificial groundwater. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1879, No. 2, p. 022020). IOP Publishing.

<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1879/2/022020>.

21. Ashmead, S.D., Wheelwright, D.C., Ericson, C., & Pedersen, M. (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>.

22. Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 3—Chemical methods* (P 417–435). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>.

23. 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>.

24. Elfaki, J.T., Gafer, M.O., Sulieman, M.M., & Ali, M.E. (2016). Assessment of Calcimetric and Titrimetric Methods for Calcium Carbonate Estimation of Five Soil Types in Central Sudan. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 04, 120-127.

25. Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (P 403–430). American Society of Agronomy.

26. Bremner, J. M., & Mulvaney, C. S. (1982). Nitrogen-Total. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties* (P 595–624). American Society of Agronomy.

27. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42, 421-428.

28. Mortvedt, J. J. (1985). Plant uptake of heavy metals in zinc fertilizers made from industrial by-products. *Journal of Environmental Quality* 14(3): 424-427.

29. 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.org/10.1080/00103628209367332>.

30. Campbell, C.R., & Plank, C.O. (1998). Preparation of Plant Tissue for Laboratory Analysis. In Y. P. Kalra, *Handbook of*

Reference Methods for Plant Analysis, CRC Press, Taylor and Francis Group, Pp: 37-50.

31. Stephan, C. H., Courchesne, F., Hendershot, W. H., McGrath, S. P., Chaudri, A. M., Sappin-Didier, V., & Sauvé, S. (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>.

32. Rahman, N., & Schoenau, J. (2022). Bioavailability, speciation, and crop responses to copper, zinc, and boron fertilization in South-Central Saskatchewan soil. *Agronomy*, 12(8), 1837.

<https://doi.org/10.3390/agronomy12081837>.

33. Sadeghzadeh, B. (2013). A review of zinc nutrition and plant breeding. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13 (4), 905-927. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162013005000072>.

34. Saleem, M. H., Usman, K., Rizwan, M., Jabri, H. A., & Alsafran, M. (2022). Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1033092>.

35. Mirbolook, A., Rasouli-Sadaghiani, M.H., Sepehr, E., Lakzian, A. & Hakimi, M. (2021). Synthesized Zn(II)-Amino Acid and-Chitosan chelates to increase Zn uptake by Bean (*Phaseolus vulgaris*) Plants. *Journal of Plant Growth Regulation*, 40, 831-847.

36. Doolette, C. L., Read, T. L., Li, C., Scheckel, K. G., Donner, E., Kopittke, P. M., Schjoerring, J. K., & Lombi, E. (2018). Foliar application of zinc sulphate and zinc EDTA to wheat leaves: differences in mobility, distribution, and speciation. *Journal of experimental botany*, 69(18), 4469-4481.

<https://doi.org/10.1093/jxb/ery236>.

37. Niu, J., Liu, C., Huang, M., Liu, K., & Yan, D. (2020). Effects of Foliar Fertilization: a Review of Current Status and Future Perspectives. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 104 - 118.

38. Khoshgoftarmanesh, A.H., Shariatmadari, H., Karimian, N., Kalbasi,

M., & Zee, S.V. (2006). Cadmium and zinc in saline soil solutions and their concentrations in wheat. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 582-589.

39. Pearson, H. B. C., Comber, S. D. W., Braungardt, C. B., Worsfold, P., Stockdale, A., & Lofts, S. (2018). Determination and Prediction of Zinc Speciation in Estuaries. *Environmental Science & Technology*, 52, 14245-14255. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04372>.

40. Abdollahi, A., Norouzi Masir, M., Taghavi Zahedkolaei, M. & Moezzi, A. A. (2020). Effect of Zinc Oxide Nanoparticles on Zinc Chemical Forms Species in Soil Solution Phase and its Correlation with Concentration and Uptake of Zinc in Wheat. *Applied Soil Research*, 7(4), 35-46. [In Persian]

41. Tahervand, S. & Jalali, M. (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.

42. Wang, Z., Shan, X.Q., & Zhang, S. (2002). Comparison between fractionation and bioavailability of trace elements in rhizosphere and bulk soils. *Chemosphere*, 46, 1163-1171.

43. Tabesh, M., Kiani, S., & Khoshgoftarmanesh, A. H. (2020). The effectiveness of seed priming and foliar application of zinc- amino acid chelates in comparison with zinc sulfate on yield and grain nutritional quality of common bean. *Journal of Plant Nutrition*, 43(14), 2106-2116.

<https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1771579>.

44. Mohammadi, P. & Khoshgoftarmanesh, A.H. (2014). The effectiveness of syntheticzinc (Zn)-amino chelates in supplying Zn and alleviating salt-induceddamageson hydroponically grown lettuce. *Scientia Horticulturae*, 172, 117-123.

45. Lönnerdal, B. (2000). Dietary factors influencing zinc absorption. *The Journal of nutrition*, 130(5S Suppl), 1378S-83S. <https://doi.org/10.1093/jn/130.5.1378S>.

46. Ghasemi, S., Khoshgoftarmanesh, A.H., Afyuni, M., & Hadadzadeh, H. (2013).

The effectiveness of foliar applications of synthesized zinc-amino acid chelates in comparison with zinc sulfate to increase yield and grain nutritional quality of wheat. *European Journal of Agronomy*, 45, 68–74.

47. Haydon, M. J., & Cobbett, C. S. (2007). Transporters of ligands for essential metal ions in plants. *New Phytologist*, 174(3), 499–506. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02051.x>.

48. Torrance, J. W., MacArthur, M. W., & Thornton, J. M. (2007). Evolution of binding sites for zinc and calcium ions playing structural roles. *Proteins Structure Function and Bioinformatics*, 71(2), 813–830. <https://doi.org/10.1002/prot.21741>.

49. Waters, B. M., Uauy, C., Dubcovsky, J., & Grusak, M. A. (2009). Wheat (*Triticum aestivum*) NAM proteins regulate the translocation of iron, zinc, and nitrogen

compounds from vegetative tissues to grain. *Journal of experimental botany*, 60(15), 4263–4274. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp257>.

50. Cakmak, I., Kalayci, M., Kaya, Y., Torun, A. A., Aydin, N., Wang, Y., Arisoy, Z., Erdem, H., Yazici, A., Gokmen, O., Ozturk, L., & Horst, W. J. (2010). Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of agricultural and food chemistry*, 58(16), 9092–9102. <https://doi.org/10.1021/jf101197h>.

51. Abdollahi, A., Masir, M.N., Taghavi, M., & Moezzi, A. (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, 87-103. [In Persian].