



(OPEN ACCESS)

The effect of fertigation application of zinc amino chelate 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 in 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. Associate Prof., Dept. of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: m.taghavi@scu.ac.ir

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 01.03.2025

Revised: 04.07.2025

Accepted: 04.12.2025

Keywords:

Amino chelate,
Available Zinc,
Chemical fertilizer,
Dissolved organic carbon,
Sunflower

ABSTRACT

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 amino chelate 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).

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 [$Zn(Gly)_2$] and Zn-methionine [$Zn(Met)_2$] amino chelates ($4 L^{-1}$) 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 amino chelates, especially [$Zn(Met)_2$] significantly reduced soil pH. [$Zn(Gly)_2$] and [$Zn(Met)_2$] amino chelates 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 [Zn (Met)₂] amino chelate treatment. [Zn (Gly)₂] and [Zn (Met)₂] amino chelates and ZnSO₄ fertilizer also significantly increased the concentration of free Zn specie (Zn²⁺) (43.2-76.1%) compared to the control treatment. The results also indicated a strong positive correlation between the concentrations of Zn²⁺ and Zn-DOM species and Zn concentration in plant leaves and seeds.

Conclusion: The results of this study demonstrated that the application of Zn amino chelates 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. 2026. The effect of fertigation application of zinc amino chelate and ZnSO₄ on zinc speciation in soil and its concentration in sunflower. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (4), 63-87.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23146.2174

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 عالی‌پور بابادی^۱، مجتبی نوروزی مصیر^{۲*}، عبدالامیر معزی^۳، افراسیاب راهنما قهفرخی^۴، مهدی تقوی زاهدکلانی^۵

۱. دانشجوی دکتری 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. دانشیار گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: m.taghavi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۳</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۹</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴</p>	<p>سابقه و هدف: روی (Zn) یک عنصر ریزمغذی 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 قابل‌دسترس 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.</p> <p>مواد و روش‌ها: این آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار در شرایط مزرعه انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کودآبیاری 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 قابل‌دسترس در خاک و غلظت روی در برگ و دانه گیاه اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین گونه‌های شیمیایی غالب روی در فاز محلول خاک، از نرم‌افزار ژئوشیمیایی Visual MINTEQ استفاده شد.</p>
<p>واژه‌های کلیدی: آفتابگردان، آمینوکلات، روی قابل دسترس، کربن آلی محلول، کود شیمیایی</p>	

یافته‌ها: نتایج نشان داد که pH خاک، روی محلول خاک، روی قابل‌دسترس در خاک و کربن آلی محلول خاک تحت‌تأثیر تیمارهای آزمایش قرار گرفتند. آمینوکلات‌های روی به ویژه تیمار آمینوکلات متیونین- روی به‌طور معنی‌داری pH خاک را کاهش دادند. آمینوکلات‌های گلیسین- 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 به‌دست آمد. آمینوکلات‌های گلیسین- 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 بیانگر 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: عالی‌پور بابادی، مینا، نوروزی مصیر، مجتبی، معزی، عبدالامیر، راهنما قهفرخی، افراسیاب، تقوی زاهدکلائی، 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، ۱۵ (۴)، ۶۳-۸۷.
DOI: 10.22069/ejsms.2026.23146.2174



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

افزایش جمعیت جهانی، کمبود اراضی قابل کشت و تغییرات آب و هوایی، پیامدهای مخاطره‌آمیزی برای سیستم‌های کشاورزی داشته و امنیت غذایی را تهدید می‌کند (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 تحت‌تأثیر 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 بی‌کربنات‌ها، کمبود گسترده عناصر ریزمغذی، از جمله روی را نشان می‌دهند (۴). زمانی که 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، به‌منظور 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).

اثر بخشی زراعی کودهای روی به ویژگی‌های خاک و نیز ترکیب کود بستگی دارد (۸). کودهای کلات روی می‌توانند مؤثرتر از کودهای معمول در خاک‌های آهکی با pH بالا عمل کنند (۹). در این راستا، استفاده از کودهای نوین مانند آمینوکلات‌ها می‌تواند بسیار کارآمد باشد (۱۰). آمینوکلات‌ها نسل جدیدی از کودها بر پایه 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، ۱۲، ۱۳). آمینوکلات‌ها از واکنش‌های شیمیایی مانند 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 به‌واسطه 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، دارای اهمیت است.

عواملی مانند 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 گونه‌هایی شیمیایی روی در محلول خاک به ندرت امکان‌پذیر است. شناسایی و تعیین کمی گونه‌های روی در خاک نیازمند تکنیک‌های ویژه است. استفاده از مدل‌سازی گونه‌بندی ژئوشیمیایی فلزات، مانند Visual MINTEQ می‌باشد. این مدل‌ها قادر هستند توزیع گونه‌های شیمیایی فلزات مانند روی را از نظر تئوری و به سرعت تخمین بزنند (۲۰).

با استفاده از دستگاه Bruker Avance DRX با 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 زوئیترون 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 $\nu_{st}(-COO^-)$ ، $\nu_{st}(C=O)$ ، $\nu_{st}(-NH_2)$ و $\nu_{st}(C-N)$ 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 $(C=O)$ با کمپلکس مجاور یا با ملکول آب شبکه پیوند هیدروژنی دارند و همچنین پیوند ضعیفی با کمپلکس مجاور حاوی فلز روی تشکیل می‌دهند. به‌طورکلی نتایج بیانگر وجود الگوی جذب مشابهی بین لیگاندهای اسید آمینه همراه با فلز روی در محدوده 4000 تا 400 cm^{-1} می‌باشد. همچنین پیک‌های واضح در محدوده 3500 تا 3400 cm^{-1} برای گروه‌های $-NH_2$ نشان‌دهنده وجود پیوندهای ویدریشنال 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.

با وجود مطالعات صورت گرفته پیرامون شکل‌های شیمیایی مختلف روی در خاک، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تأثیر آمینوکلات‌های روی بر توزیع گونه‌بندی 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 کودآبیاری آمینوکلات‌های روی در خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش‌ها

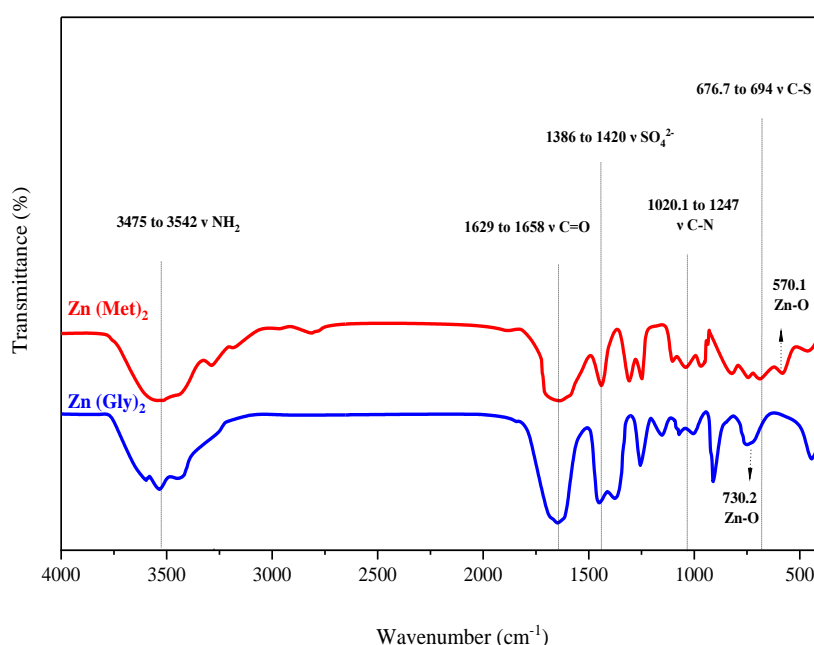
آماده‌سازی آمینوکلات‌های روی: اسیدهای آمینه گلیسین (Glycine) و متیونین (Methionine) با درصد خلوص ۹۹ درصد از شرکت مرک تهیه شده و به عنوان لیگاند به طور جداگانه با نمک سولفات روی ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) با نسبت مولاری ۲ به ۱ مخلوط شدند. مخلوط در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت روی صفحه داغ قرار گرفت و به شدت هم زده شد. سپس آمینوکلات‌های گلیسین- روی $[Zn(Gly)_2]$ و متیونین- روی $[Zn(Met)_2]$ به فرم میکروکریستال پس از شستشو با اتانول ۹۵ درصد و هوا خشک شدن، به دست آمد (۲۱).

مشخصه‌یابی آمینوکلات‌های روی: به منظور تعیین ویژگی‌های ساختاری آمینوکلات‌های روی و تأیید تشکیل کمپلکس بین لیگاند آزاد و فلز روی، طیف‌سنجی مادون قرمز با استفاده از دستگاه FT-IR مدل 8400 Shimadzu در دامنه 4000 تا 400 cm^{-1} 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 $^1H\text{ NMR}$

جدول ۱- ویژگی‌های آمینوکلات‌های روی.

Table 1. Characteristic of Zinc aminochelates.

آمینوکلات Aminochelelate	فرمول ملکولی Molecular formula	وزن ملکولی Molecular weight	به‌دست آمده (محاسبه شده) (%) Found (calculated) (%)			¹ H NMR (400 MHz, D ₂ O)
			C	H	N	
گلایسین- 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))
گلایسین- روی [Zn (Met) ₂]	C ₁₀ H ₂₀ N ₂ O ₄ S ₂ Zn	361.80	32.89 (33.17)	5.62 (5.53)	7.66 (7.74)	



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

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

روی و کود سولفات روی بر گیاه آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) رقم اسکار مورد بررسی قرار گرفت. بذر آفتابگردان از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج تهیه شد. تیمارهای آزمایش شامل آمینوکلات‌های گلایسین- روی و متیونین- روی، کود شیمیایی سولفات روی و تیمار شاهد (بدون کود) بود.

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 سالیانه ۲۱۳ میلی متر صورت گرفت. در این آزمایش تأثیر کودآبیاری آمینوکلات‌های

برای اندازه‌گیری روی قابل‌دسترس از محلول DTPA-TEA (۵ میلی‌مولار) استفاده شد و غلظت روی در عصاره به‌وسیله 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 میلی‌گرم 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.

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 میلی‌متری عبور داده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (۲۲)، هدایت الکتریکی و pH در سوسپانسیون ۲/۵: ۱ خاک: آب، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۲۳)، کربنات کلسیم به روش خشتی‌سازی 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.

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

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 به‌وسیله 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 از استقرار کامل گیاهچه‌ها و در مرحله چهار تا شش

پس از انجام عملیات خاک‌ورزی در مزرعه، کرت‌هایی 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 هم‌جوار، فاصله بین دو کرت مجاور ۱ متر در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج آزمون خاک، مقدار عناصر فسفر قابل‌دسترس و پتاسیم قابل‌استفاده بیش از حدود

سولفات محلول به روش افزودن کلریدباریم و تیتراسیون با EDTA و بیکربنات محلول به روش تیتراسیون با سولفوریک اسید اندازه‌گیری شد (۲۲). روی محلول با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. میزان کربن آلی محلول در عصاره خاک با استفاده از دستگاه TOC Analyzer (Shimadzu مدل TOC-VCPH) اندازه‌گیری شد.

تحلیل‌های آماری: تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار RStudio نسخه (12.1+402, 2023) صورت گرفت. به‌منظور انجام مقایسات میانگین از آزمون چندمرحله‌ای 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 نرم‌افزار SPSS نسخه (27.0.1) برآورد شد. ترسیم نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار OriginPRO نسخه (2024b) انجام شد. جهت ارزیابی ارتباط بین تیمارها و متغیرهای مورد مطالعه، نقشه حرارتی خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی نیز با استفاده از نرم‌افزار 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 معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$) (جدول ۳).

برگی، عملیات تنک انجام شد. تیمارهای کودی شامل آمینوکلات‌های گلاپسین- روی و متیونین- 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 سانتی‌گراد 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 AAnalyst 800) استفاده شد (۲۹، ۳۰).

گونه‌بندی شیمیایی روی: جهت پیش‌بینی گونه‌های شیمیایی روی در فاز محلول خاک پس از اعمال تیمارهای کودی مختلف، از نرم‌افزار Visual MINTEQ (نسخه ۴،۰) استفاده شد (۳۱). مدل‌سازی با استفاده از اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری 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. بدین‌منظور غلظت کلسیم و منیزیم محلول به‌وسیله تیتراسیون با EDTA، سدیم و پتاسیم به‌وسیله دستگاه فلیم فتومتر (Sherwood 410)، کلر محلول به روش تیتراسیون با نیترات نقره ۰/۰۱ نرمال،

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.

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

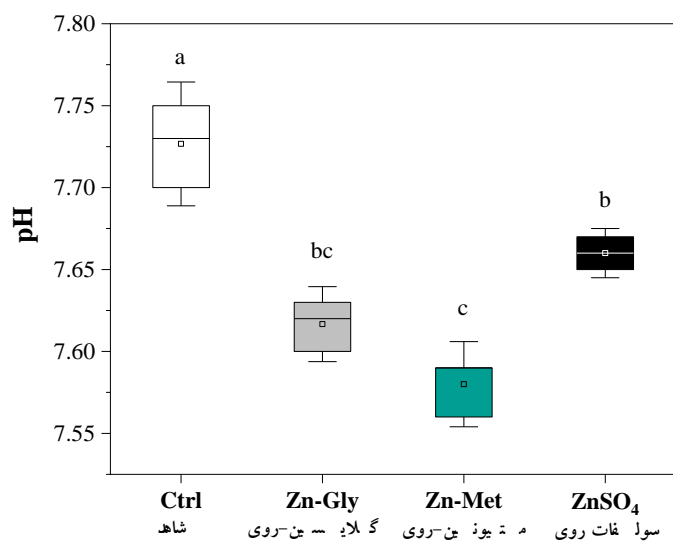
(شکل ۲). تیمار آمینوکلات متیونین- روی بیشترین

تأثیر را بر کاهش pH خاک داشت (شکل ۲).

pH مطابق با نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، کاربرد

آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی، سبب

کاهش معنی دار pH خاک نسبت به تیمار شاهد شدند



تیمارهای کودی

Fertilizer treatments

شکل ۲- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر pH خاک.

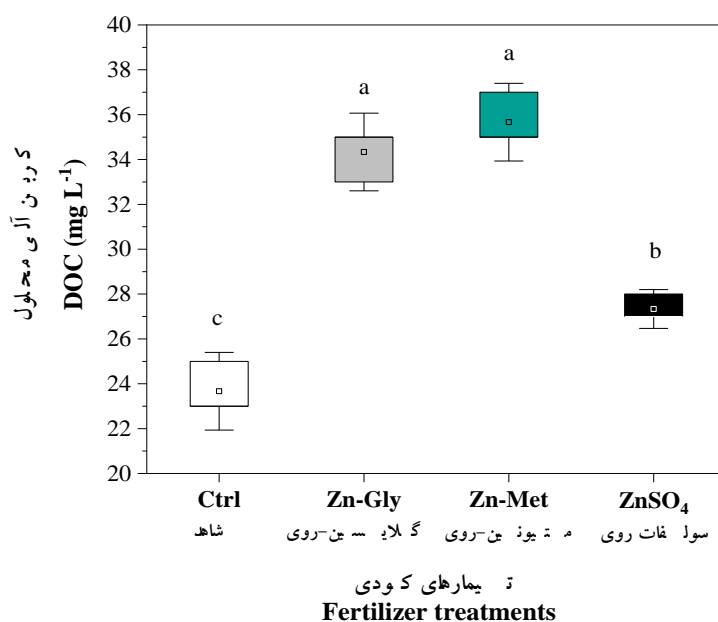
حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 2. Mean comparisons of the effect of treatments on soil pH.

The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

شدند. تیمار آمینوکلات متیونین- روی و کود شیمیایی سولفات روی به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین تأثیر را بر افزایش غلظت کربن آلی محلول داشتند. با این وجود، تفاوت معنی‌داری بین تیمار آمینوکلات متیونین- روی و آمینوکلات گلیسین- روی در افزایش کربن آلی محلول خاک وجود نداشت (شکل ۳).

کربن آلی محلول خاک (DOC): نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی به صورت کودآبیاری، سبب افزایش معنی‌دار غلظت کربن آلی محلول خاک نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۳). تیمارها سبب افزایش ۱۵/۴ تا ۵۰/۷ درصد میزان کربن آلی محلول خاک در مقایسه با تیمار شاهد



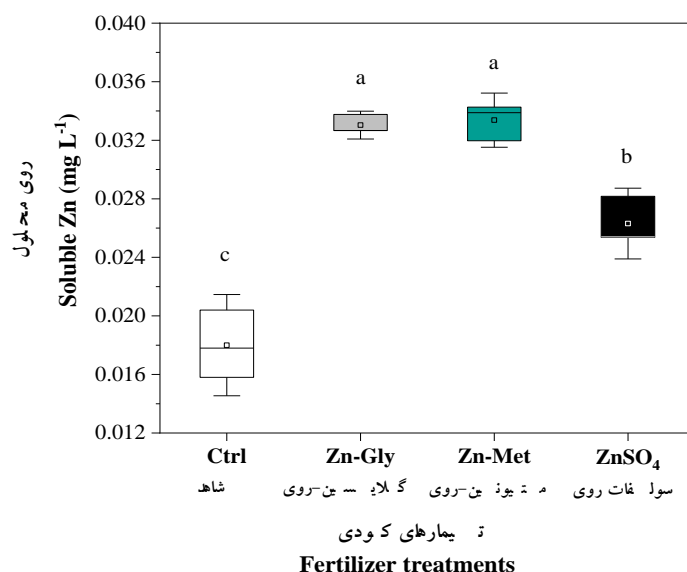
شکل ۳- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر کربن آلی محلول خاک.

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 ($P \leq 0.05$).

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 افزایش ۴۶/۱



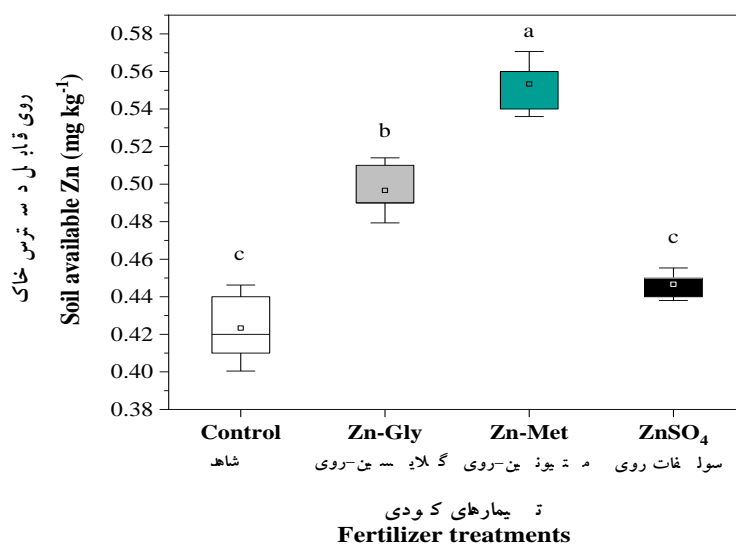
شکل ۴- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت روی محلول خاک.

حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی دار 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 ($P \leq 0.05$).

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

روی قابل دسترس خاک (Available Zn): نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی، سبب افزایش معنی دار غلظت روی قابل دسترس خاک نسبت به تیمار شاهد شدند (شکل ۵). تیمارهای آمینوکلات متیونین- روی و



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 ($P \leq 0.05$).

فرایندهای فیزیولوژیکی گیاه از جمله متابولیسم نیتروژن، اثربخشی بیش‌تری بر زیست‌فراهمی روی نسبت به کود سولفات روی دارد. این افزایش زیست‌فراهمی 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 مورد بررسی قرار گرفت. این سه گونه بیش از ۹۳ درصد کل روی محلول را تشکیل دادند و غلظت سایر گونه‌ها (مانند $Zn(OH)_2(aq)$ و $ZnCl_2(aq)$) ناچیز بود.

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

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 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).

غلظت روی در محلول خاک عمدتاً به pH خاک و غلظت کربن آلی محلول خاک بستگی دارد (شکل ۴). به‌طور کلی، pH خاک و ویژگی‌های کلات‌کنندگی 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 مانند 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، آمینوکلات‌ها دارای پایداری زیاد و سرعت رهاسازی عناصر ریزمغذی 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 مانند کودهای سولفات شده 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، به‌واسطه 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). علاوه‌براین، آمینوکلات روی با تحریک

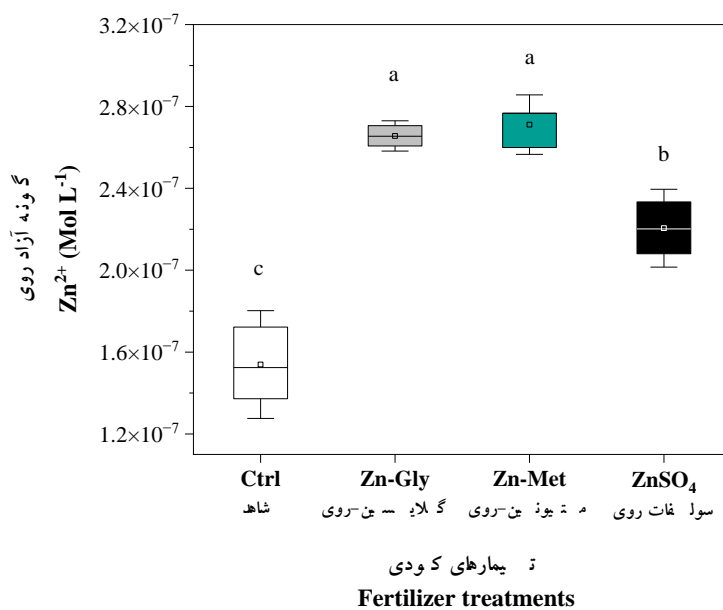
جدول ۴- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر غلظت گونه‌های شیمیایی غالب روی در فاز محلول خاک.

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⁺		
2.9×10 ^{-16ns}	4.2×10 ^{-19ns}	2.0×10 ^{-16ns}	2	بلوک Block
2.9×10 ^{-15**}	1.2×10 ^{-15**}	8.8×10 ^{-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



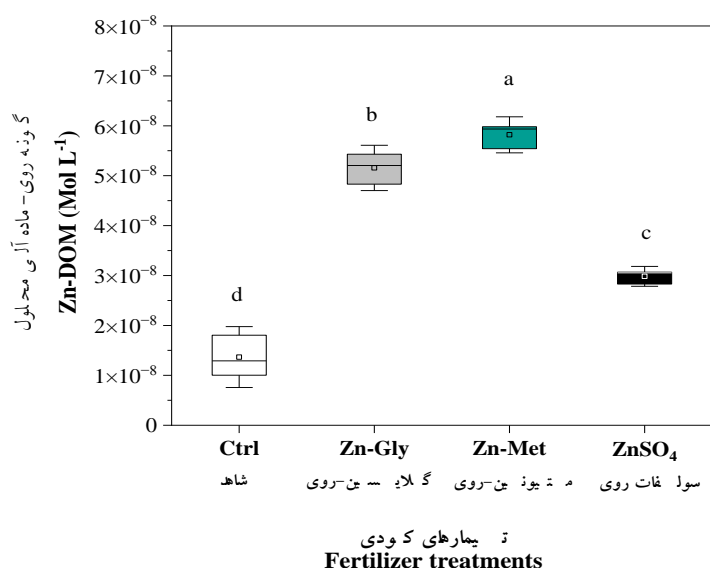
شکل ۶- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت گونه آزاد روی (Zn^{2+}) در فاز محلول خاک.

حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 6. Mean comparisons of the effect of treatments on concentration of Zn²⁺ in soil solution. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

تیمار آمینوکلات متیونین- روی با افزایش بیش از ۴/۴ برابر، بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش غلظت گونه Zn-DOM در محلول خاک در مقایسه با تیمار شاهد داشت (شکل ۷).

گونه کمپلکس شده با ترکیبات آلی (Zn-DOM): نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی، سبب افزایش معنی‌دار غلظت گونه Zn-DOM در محلول خاک نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۷).

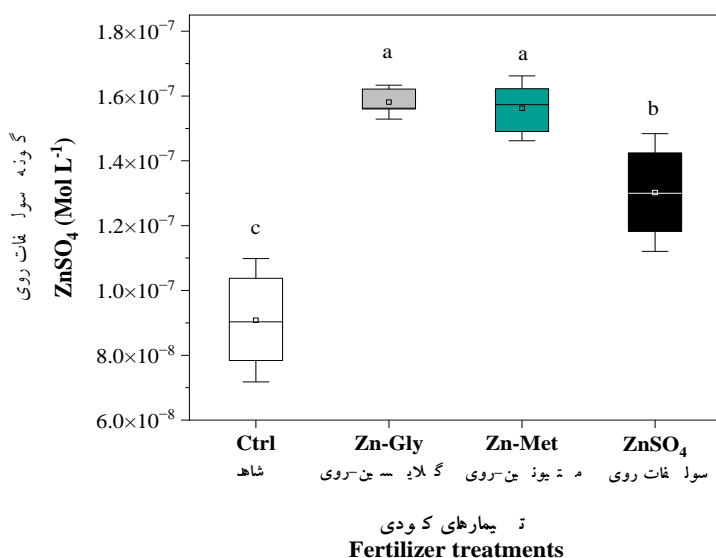


شکل ۷- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت گونه روی کمپلکس شده با ترکیبات آلی (Zn-DOM) در فاز محلول خاک. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

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 ($P \leq 0.05$).

غلظت گونه $ZnSO_4$ در محلول خاک در مقایسه با تیمار شاهد شدند. با این وجود، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای آمینوکلات گلیسین- روی و متیونین- روی در افزایش غلظت گونه $ZnSO_4$ محلول خاک وجود نداشت (شکل ۸).

گونه $ZnSO_4$: نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی و کود سولفات روی، سبب افزایش معنی‌دار غلظت گونه $ZnSO_4$ در محلول خاک نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۸). تیمارها سبب افزایش ۴۳/۳ تا ۷۴/۱ درصد



شکل ۸- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت گونه سولفات روی ($ZnSO_4$) در فاز محلول خاک.

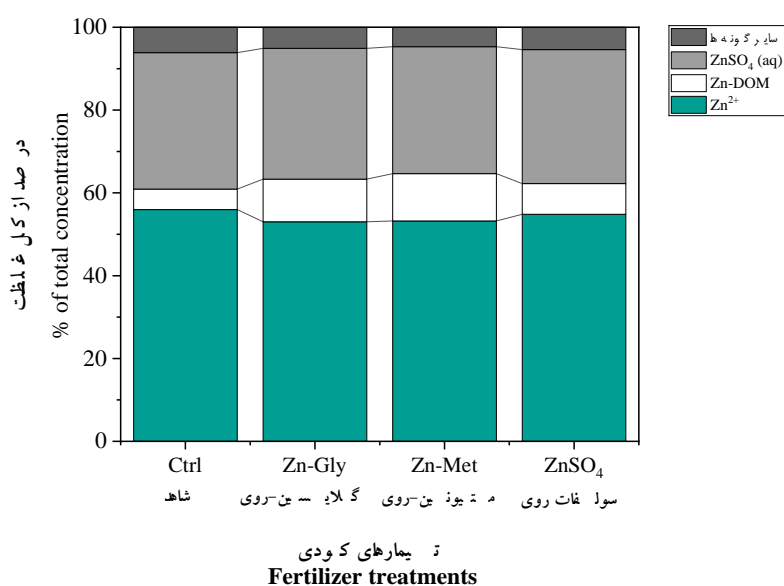
حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار براساس آزمون توکی است ($P \leq 0.05$).

Figure 8. Mean comparisons of the effect of treatments on concentration of $ZnSO_4$ in soil solution. The same letters indicate non-significant difference according to Tukey's test ($P \leq 0.05$).

از روند تغییرات کربن آلی محلول خاک (شکل ۳) پیروی می‌کند. کربن آلی محلول در افزایش حلالیت فلزات در محلول به واسطه تشکیل کمپلکس‌های پایدار کربن آلی - فلز نقش دارد (۴۲). 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 تعیین‌کننده 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 (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 تأیید 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).

با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل ژئوشیمیایی Visual MINTEQ، در میان سه گونه شیمیایی غالب روی، بیش‌ترین غلظت گونه روی محلول، گونه Zn^{2+} بود. به‌طورکلی 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 پژوهش‌گران نیز دریافتند که به‌طورکلی، روی غالباً به شکل گونه آزاد در محلول خاک یافت می‌شود (۳۸، ۳۹، 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 (شکل‌های ۲ و ۳). از بین پارامترهای شیمیایی رایج اندازه‌گیری شده در خاک، pH مهم‌ترین متغیر کنترل‌کننده 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 به‌ویژه در خاک‌های آهکی شده (۱۵) و در نتیجه بر گونه‌بندی و قابلیت دسترسی فلزات تأثیر می‌گذارند. آمینوکلات به عنوان عامل کلات‌کننده 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،



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.

روی در دانه ($P \leq 0.05$) و برگ ($P \leq 0.01$) آفتابگردان
معنی‌دار بود (جدول ۵).

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

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.

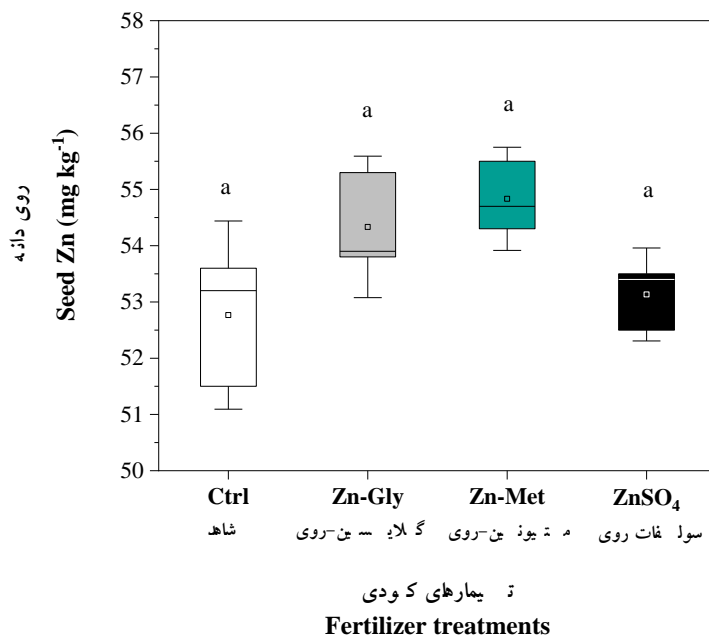
میانگین مربعات Mean squares		درجه آزادی Degree of freedoms	منابع تغییر Sources of variation
روی برگ Leaf Zn	روی دانه Seed Zn		
1.1 ^{ns}	1.5 ^{ns}	2	بلوک Block
25.8 ^{**}	2.8 [*]	3	تیمار Treatment
0.1	0.3	6	خطا Error
2.45	1.10	-	ضریب تغییرات Coefficient of variation

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

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

غلظت روی دانه آفتابگردان: نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که علی‌رغم معنی‌دار بودن اثر کاربرد تیمارهای کودی مختلف بر غلظت روی دانه نبود (شکل ۱۰). تفاوت میزان افزایش غلظت روی دانه بین تیمارهای کودی و تیمار شاهد معنی‌دار نبود (جدول ۵، $P \leq 0.05$).

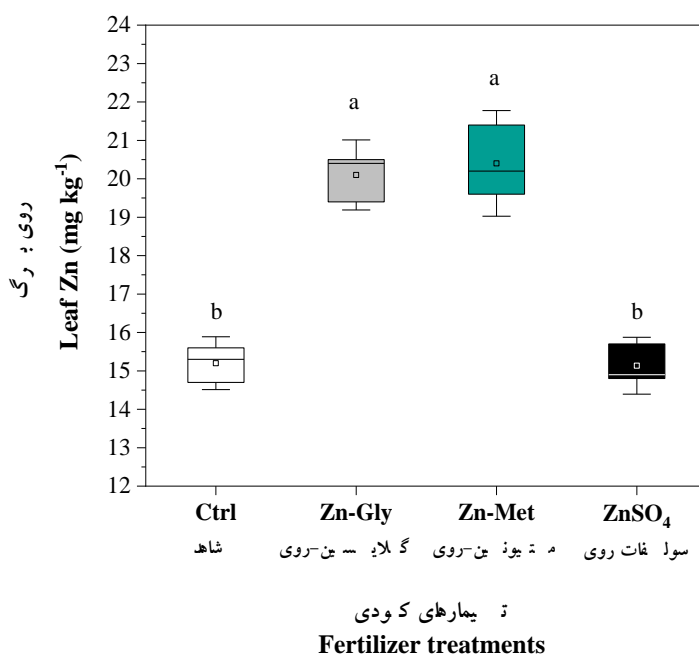
غلظت روی دانه آفتابگردان: نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که علی‌رغم معنی‌دار بودن اثر کاربرد تیمارهای کودی مختلف بر غلظت روی دانه



شکل ۱۰- مقایسه میانگین تأثیر تیمارها بر غلظت روی در دانه گیاه آفتابگردان. حروف همانند بیانگر عدم تفاوت معنی‌دار 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 ($P \leq 0.05$).

روی و گلايسين- روی، به ترتيب سبب افزايش ۳۴/۲ و ۳۲/۳ درصدی میزان روی برگ در تیمار شاهد شدند. با این وجود، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای آمینوکلات متیونین- روی و گلايسين- روی در افزايش غلظت روی برگ وجود نداشت (شکل ۱۱).

غلظت روی برگ آفتابگردان: نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که کاربرد آمینوکلات‌های روی سبب افزايش غلظت روی برگ آفتابگردان نسبت به تیمار شاهد شد (شکل ۱۱). کاربرد کود سولفات روی (به‌صورت کودآبیاری) تأثیری معنی‌داری بر غلظت روی برگ نسبت به تیمار شاهد نداشت. در مقابل، آمینوکلات‌های متیونین-



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 ($P \leq 0.05$).

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 مؤثرتر 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 به‌طور مؤثر جهت افزایش میزان روی در بخش‌های مختلف گیاه در خاک دارای کمبود روی، می‌توان به‌کار برد (۸).

آمینوکلات روی به‌طورکلی مؤثرتر از کود شیمیایی سولفات روی در افزایش غلظت روی دانه می‌باشد (۴۳). محمدی و خوش‌گفتارمنش (۲۰۱۴) گزارش دادند که آمینوکلات گلیسین- روی در تأمین روی مورد نیاز گیاه کاهو مؤثرتر از سولفات روی بوده است (۴۴). در مطالعه دیگری، آکچا 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). از سوی دیگر، روی با تشکیل لیگاند با اسیدهای آمینه

گونه‌های شیمیایی غالب روی در محلول خاک به‌ویژه 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 محلول، می‌توان این گونه‌ها را به عنوان گونه‌های قابل دسترس روی در محلول خاک در نظر گرفت. بنابراین، غلظت عناصر ریزمغذی در گیاه نه تنها به مقدار کل غلظت عناصر در خاک، بلکه به گونه‌های حاضر در محلول خاک نیز بستگی دارد، زیرا گونه‌های مختلف مانند فلزات هیدراته آزاد و کمپلکس‌های لیگاند- فلز می‌توانند به مقادیر متفاوت به‌وسیله 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).

همبستگی بین گونه‌های شیمیایی روی در بخش محلول 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 محلول 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 محلول خاک به‌ویژه 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

جدول ۶- ضرایب همبستگی پیرسون بین غلظت گونه‌های غالب روی در فاز محلول 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

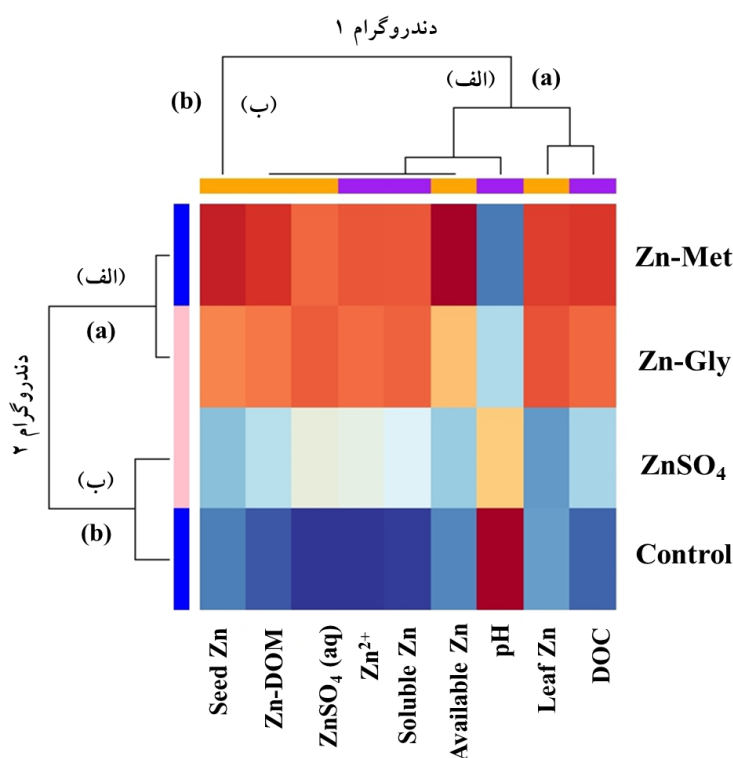
** and * significant at 0.01 and 0.05 probability levels, respectively

دندروگرام می‌باشد: دندروگرام اول در جهت عمودی نشان‌دهنده غلظت گونه‌های شیمیایی غالب روی در محلول خاک، غلظت روی در برگ و دانه گیاه آفتابگردان، میزان روی محلول خاک، روی قابل دسترس

تجزیه و تحلیل نقشه حرارتی خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (دندروگرام دوگانه): جهت ارزیابی ارتباط بین تیمارها و متغیرهای مورد مطالعه، نقشه حرارتی خوشه‌ای ترسیم شد (شکل ۱۲). نقشه حرارتی شامل دو

تیمارهای آمینوکلات روی بوده، در حالی که تیمارهای شاهد و کود سولفات روی در گروه (ب) قرار دارند (شکل ۱۲). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، آمینوکلات‌های گلیسین- روی و متیونین- 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 قابل‌دسترس 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).

خاک، کربن آلی محلول و نیز pH خاک بوده و دندروگرام دوم در جهت نشان‌دهنده تیمارهای کودی مختلف است. دندروگرام ۱ دو گروه اصلی را نشان می‌دهد، گروه (الف) که از دو زیرخوشه تشکیل شده است: اولین زیرخوشه 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 قابل‌دسترس 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 نشان می‌دهد، گروه (الف) مرتبط با



شکل ۱۲- نقشه حرارتی خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (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 نشان‌دهنده مقادیر زیاد و کم بوده و طول شاخه‌های دندروگرام نشان‌دهنده فاصله بین متغیرها یا خوشه‌های متغیرها است که از طریق همبستگی پیرسون دومتغیره 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

Zn-DOM با غلظت روی قابل دسترس خاک و نیز غلظت روی در دانه و برگ گیاه آفتابگردان همبستگی مثبت و معنی داری 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 نیمه‌خشک که مستعد کمبود روی هستند، تأکید می‌کند. اگرچه، پژوهش‌های بیشتری جهت تعیین مکانیسم دقیق کارایی آمینوکلات‌های روی در محیط محلول خاک مورد نیاز است.

سپاسگزاری

بدین وسیله نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز (SCU.AS1401.26962) تشکر و قدردانی می‌نمایند.

نتایج این پژوهش نشان داد که گیاه آفتابگردان کشت شده در خاک آهکی با غلظت روی کم‌تر از حد بحرانی، توانایی استفاده مؤثر 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 به‌طور قابل‌توجهی 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+}

منابع

- 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>.
- 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>.
- 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>.
- 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>.
- Alloway, B. J. (2008). *Zinc in soils and crop nutrition* (2nd eds.). Brussels/Paris: International Zinc Association/International Fertilizer Industry Organization, 135p.
- 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>.
- 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). Aminocheleates 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). Aminocheleate 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., Tommaseo, C., Rihs, S., Geoffroy, N., Chateigner, D., Schlegel, M., Tisserand, D., Marcus, M. A., Tamura, N., & Chen, Z. S. (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 synthetic zinc (Zn)-amino chelates in supplying Zn and alleviating salt-induced damages on hydroponically grown lettuce. *Scientia Horticulturae*, 172, 117-123.
45. Lönnerdal, B. (2000). Dietary factors influencing zinc absorption. *The Journal of nutrition*, 130(5), 1378-83. <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]

