بررسی اثربخشی محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن و روی بر رشد و عملکرد محصول ذرت

نیلوفر میرزابابایی

گروه علوم ومهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

پست الکترونیکی: Niloufar.mb@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۸

DOI; 10.30470/jsp.2026.735731

چکیده

کاربرد کودهای آهن و روی کلات‌شده با ترکیبات طبیعی، راهکاری سازگار با محیط زیست، کم‌هزینه و با اثربخشی سریع برای رفع کمبود این عناصر در خاک‌های آهکی ایران است. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن و روی بر رشد ذرت دانه‌ای (رقم سینگل کراس ۷۰۱) در کرج اجرا شد. تیمارها شامل ۱- شاهد، ۲ و ۳- لیگنوسولفونات آهن (۳ و ٦ میلی‌گرم در لیتر)، ٤ و ٥ - لیگنوسولفونات روی (۳ و ٦ میلی‌گرم در لیتر) و ٦- کاربرد توأم آهن و روی (هرکدام ۳ میلی‌گرم در لیتر) بودند. نتایج نشان داد که اثر تیمارها بر تمامی صفات به‌جز طول بلال و غلظت منگنز و مس دانه معنی‌دار بود. بیشترین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک با ۱۵/۷ و ۷/۵ درصد افزایش نسبت به شاهد در تیمار توأم آهن و روی به‌دست آمد. بیشترین غلظت آهن دانه (۸۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار آهن ٦ میلی‌گرم در لیتر و بیشترین غلظت روی دانه (٥٦ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار روی ٦ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد. هم‌چنین، بالاترین درصد پروتئین دانه در تیمار توأم آهن و روی حاصل گردید. به‌طور کلی، محلول‌پاشی ذرت با آهن و روی موجب افزایش عملکرد دانه و بهبود کیفیت آن می‌شود.

واژه های کلیدی: ریزمغذی، شاخص برداشت، عملکرد ذرت، کاربرد برگی

Studying the effectiveness of foliar spraying of iron and zinc lignosulfonate on corn crop growth and yield

N. Mirzababaei

Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran
Email: Niloufar.mb@znu.ac.ir
Received: -January 2026 Accepted: February 2026
DOI; 10.30470/jsp.2026.735731

Abstract
The application of iron and zinc fertilizers chelated with natural compounds is an environmentally friendly, low-cost, and fast-acting solution for addressing micronutrient deficiencies in the calcareous soils of Iran. This study aimed to evaluate the effect of foliar application of iron and zinc lignosulfonate on the growth of maize (single cross 701 cultivar) in Karaj. The experiment included six treatments: 1-control, 2, 3- iron lignosulfonate (3 and 6 mg L^{-1}), 4, 5- zinc lignosulfonate (3 and 6 mg/L), and 6- a combined application of both elements (each at 3 mg L^{-1}). The results showed that foliar treatments significantly affected all measured traits except ear length and grain manganese and copper concentrations. Traits such as number of rows per ear, harvest index, and grain protein content were significant at the 5% probability level, while other traits were significant at the 1% level. The highest grain yield and biological yield were obtained from the combined treatment, with increases of 15.7% and 7.5%, respectively, compared to the control. The maximum grain iron concentration (82 mg/kg) was recorded in the 6 mg/L iron treatment, and the highest grain zinc concentration (56 mg/kg) was observed in the 6 mg/L zinc treatment. The combined application also resulted in the highest grain protein percentage. Overall, foliar spraying of maize with iron and zinc fertilizers effectively enhances grain yield and improves nutritional quality.
Keywords: corn yield, foliar application, harvest index, micronutrient

مقدمه

اهمیت کوددهی عناصر کم مصرف در تولید محصولات کشاورزی به‌طور پیوسته در حال افزایش است و عمدتاً به‌دلیل معرفی ارقام پرمحصول با نیازهای بالاتر به عناصر غذایی و جذب گسترده مواد مغذی از خاک می‌باشد. هم‌زمان، در بسیاری از خاک‌های آهکی ایران غلظت پایینی از عناصر کم مصرف وجود دارد که این موضوع همراه با افزایش عملکرد محصولات، منجر به کاهش تدریجی غلظت این عناصر منجر می‌شود. در نتیجه، کاهش محتوای عناصر کم مصرف در گیاهان بر ارزش تغذیه‌ای آن‌ها برای مصارف خوراک دام و تغذیه انسان تأثیر منفی می‌گذارد. سطح مناسب عاصر کم مصرف برای عملکرد صحیح فاز نوری فتوسنتز، تثبیت نیتروژن، متابولیسم کربوهیدرات‌ها و محافظت در برابر تنش اکسیداتیو ناشی از عوامل مختلف تنش‌زای محیطی ضروری است. هنگامی که شرایط خاکی قابلیت دسترسی به عناصر غذایی را محدود می‌کند، محلول‌پاشی برگی کودها می‌تواند کمبود عناصر را اصلاح کرده و رشد گیاه و ارزش تغذیه‌ای آن را بهبود بخشند (Januszkiewicz et al., 2025). بهبود کمی و کیفی ذرت در شرایط مزرعه مستلزم به‌کارگیری ترکیبات آلی و معدنی گوناگون است. در این راستا، شناخت نیازهای تغذیه‌ای گیاه و تدوین برنامه غذایی مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. طراحی یک رژیم بهینه که افزون بر افزایش حداکثری عملکرد، کیفیت محصول و سلامت منابع آب و خاک را نیز مد نظر قرار دهد، گامی مؤثر در تحقق کشاورزی پایدار محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های تغذیه گیاه در خاک‌های ایران، بالا بودن pH به‌دلیل حضور لایه‌های آهکی در نیمرخ خاک است. این پدیده موجب کاهش قابلیت جذب عناصر ریزمغذی همچون آهن، روی، مس و منگنز می‌گردد. کمبود آهن و روی در چنین شرایطی، نه‌تنها ناشی از غلظت پایین این عناصر در مواد مادری است، بلکه افزایش pH محلول خاک، جذب آن‌ها را با اختلال مواجه می‌سازد و در نهایت به افت کمّی و کیفی محصولاتی چون ذرت می‌انجامد (González-Caballo et al., 2022).

رایج‌ترین شیوه تأمین عناصر غذایی، کاربرد خاکی آن‌ها و جذب از طریق سیستم ریشه‌ای است. با وجود این، گیاهان عالی قادر به جذب عناصر از مسیر روزنه‌ها و کوتیکول برگ نیز هستند. با این حال، در نظام‌های کشاورزی متراکم و پرمحصول، محلول‌پاشی به‌تنهایی نمی‌تواند تمام نیازهای تغذیه‌ای گیاه را پوشش دهد. افزون بر این، کاربرد برگی با محدودیت‌هایی همچون ناکافی بودن سطح برگ در برخی مراحل رشدی، آبشویی توسط باران، بروز سوختگی ناشی از غلظت‌های بالای محلول و تحمیل هزینه‌های اضافی همراه است (Fageria et al., 2009). با وجود این کاستی‌ها، در شرایط خاص، محلول‌پاشی کارآمدترین روش برای اصلاح کمبودهای تغذیه‌ای به‌شمار می‌رود. برای نمونه، در خاک‌های آهکی، رفع کمبود آهن و روی از طریق برگ‌افشانی محلول‌های حاوی این عناصر مؤثرتر از مصرف خاکی آن‌ها عمل می‌کند. افزون بر این، کاهش حجم کود مصرفی در روش برگی، هزینه‌ها را کاهش داده و در صورت تلفیق با سمپاشی، صرفه اقتصادی بیشتری به همراه دارد (Girma et al., 2007). همچنین، به‌دلیل آسیب کمتر به منابع آب و خاکی، این روش در چارچوب کشاورزی پایدار با استقبال بیشتری روبه‌رو شده است (Souri, 2015).

پژوهش‌های گسترده‌ای به بررسی تأثیر محلول‌پاشی منابع کلاته آهن و روی بر گیاهان اختصاص یافته است (Payandeh and Mojaddam, 2021; Naserizadeh et al., 2025; Jan et al., 2020). شواهد نشان می‌دهد که عوامل کلات‌کننده، بازدهی مصرف کودهای شیمیایی را در سامانه‌های زراعی بهبود می‌بخشند (Niu et al., 2021). در دهه‌های اخیر، ترکیبات کلاته متنوعی به‌منظور افزایش جذب عناصر کم‌مصرف به‌ویژه آهن، تولید و عرضه شده‌اند (Kari et al., 1995; Souri, 2015). این عوامل که عمدتاً مولکول‌هایی آلی هستند، با دربرگرفتن

یون‌های فلزی، جذب آن‌ها از طریق ریشه یا برگ و انتقال درون‌گیاهی را تسهیل می‌کنند. از این‌رو، سازوکار جذب و انتقال کودهای کلاته می‌تواند با منابع ساده معدنی نظیر سولفات‌ها و اکسیدها تفاوت چشمگیری داشته باشد (Souri, 2015). اگرچه بار خنثی این ترکیبات احتمال جذب بهتر آن‌ها را در مقایسه با منابع سولفاتی که دارای بار مثبت هستند افزایش می‌دهد، اما اندازه بزرگ مولکول‌های کلاته ممکن است فرایند جذب را با دشواری مواجه سازد.

کلات‌های سنتزی روی نظیر Zn-EDTA از پرمصرف‌ترین منابع کودی برای مقابله با کمبود روی در محصولات زراعی به شمار می‌روند. با وجود کارایی بالای این ترکیبات (Alloway, 2008)، هزینه قابل توجه آن‌ها دامنه کاربردشان را به کشت‌های تجاری پُر بازده محدود کرده است. از سوی دیگر، پایداری بالای این عوامل کلات‌کننده در محیط زیست و تجزیه‌ناپذیری آن‌ها، زمینه‌ساز تحرک و انتقال روی و سایر فلزات به لایه‌های زیرین خاک و حتی آب‌های زیرزمینی می‌شود (Álvarez et al., 2003). در این میان، کمپلکس‌های آلی طبیعی روی مانند لیگنوسولفونات روی (Zn-Lignosulfonate) که محصول فرعی فرایند سولفیت در صنایع خمیر کاغذ هستند، به‌عنوان جایگزینی اقتصادی‌تر و زیست‌تخریب‌پذیرتر مطرح شده‌اند. حضور گروه‌های عاملی سولفونیک اسید در ساختار لیگنین، سبب محلولیت این پلیمرها در آب می‌گردد. بنا بر آمار، در سال ۲۰۱۵ بالغ بر ۲۵ درصد از کودهای روی فروخته‌شده در بازار اسپانیا بر پایه لیگنوسولفونات فرموله شده بودند (Sánchez Jiménez and Lucena, 2015). قوانین اتحادیه اروپا نه‌تنها کاربرد این ترکیبات را به‌صورت محلول‌پاشی مجاز می‌داند، بلکه اخیراً مصرف خاکی آن‌ها را نیز به‌رسمیت شناخته است. مطالعات متعدد در شرایط هیدروپونیک، خاکی و محلول‌پاشی، کارایی قابل قبول این کمپلکس‌ها را تأیید کرده‌اند (Álvarez-Fernández et al., 2007; Martín-Ortiz et al., 2009; Benedicto et al., 2011).

این دو عنصر با هم‌افزایی خود، فرآیندهای حیاتی گیاه را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشند. آهن با نقش مستقیم در ساخت کلروفیل و انتقال الکترون در فتوسنتز، و روی با فعال‌سازی آنزیم‌های کلیدی مانند کربنیک انیدراز، کارایی فتوسنتز و تولید مواد آلی را افزایش می‌دهند. از سوی دیگر، این عناصر از طریق مکانیسم‌هایی نظیر تغییر معماری ریشه (افزایش سطح جذب)، ترشح ترکیبات کلات‌کننده (افزایش قابلیت دسترسی عناصر در خاک) و تنظیم بیان ژن‌های انتقال‌دهنده، جذب یکدیگر و سایر مواد غذایی را تسهیل می‌کنند. نتیجه نهایی این فرآیندهای هماهنگ، بهبود رشد رویشی، افزایش اجزای عملکرد (تعداد غلاف، دانه و وزن هزار دانه) و در نهایت، افزایش قابل توجه عملکرد کمی و کیفی محصول می‌باشد (Denre et al, 2025).

با وجود پیشینه پژوهشی قابل توجه در این حوزه، ارزیابی مقایسه‌ای تأثیر محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن و لیگنوسولفونات روی بر شاخص‌های رشدی، عملکرد دانه و کیفیت محصول در ذرت، همچنان نیازمند بررسی‌های تکمیلی است. از آنجا که در زراعت ذرت دانه‌ای، کمیت و کیفیت دانه به‌عنوان اهداف نهایی تولید مطرح هستند، شناخت دقیق اثرات این دو منبع کلاتی طبیعی بر صفات یاد شده ضروری به‌نظر می‌رسد. از این‌رو، پژوهش پیشِرو با هدف واکاوی اثرات محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن و روی بر ویژگی‌های کمّی و کیفی دانه ذرت و مقایسه کارایی این دو ترکیب طراحی و اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در در مزرعه تحقیقاتی شرکت دانش بنیان نهاده گستر نیام واقع در شهرستان چهارباغ کرج به وسعت پنج هکتار با مختصات ۳۵.۸۳۲۴۵۸ و ۵۰.۸۵۹۷۲۳ انجام شد. برای مشخص شدن خواص

فیزیکی و شیمیائی خاک، پیش از اجرای آزمایش از عمق ۰-۳۰ سانتیمتری خاک تعداد پنج نمونه از نقاط مختلف زمین برداشت شد و در آزمایشگاه خاکشناسی مورد آنالیز قرار گرفت. نتایج آنالیز خاک در جدول ۱ دیده می‌شود.

جدول ۱. برخی ویژگی های شیمیایی و فیزیک خاک مورد استفاده در این پژوهش

ویژگی	روش اندازه‌گیری	مقدار
نیتروژن کل (total N)	کجلدال	۹۸۵ mg kg^{-1}
فسفر قابل جذب (P ava)	اولسن	۱۳/٤ mg kg^{-1}
پتاسیم قابل جذب (K ava)	استات آمونیوم	۱۹٦ mg kg^{-1}
آهن قابل جذب (Fe ava)	DTPA	۷/٤۲ mg kg^{-1}
روی قابل جذب (Zn ava)	DTPA	۰/٦۳ mg kg^{-1}
منگنز قابل جذب (Mn ava)	DTPA	۷/۲۱ mg kg^{-1}
مس قابل جذب (Cu ava)	DTPA	۰/۹۷ mg kg^{-1}
کربن آلی (OC)	والکلی بلک	۹/٤ g kg^{-1}
EC	عصاره گل اشباع	۱/۳۸ dS m^{-1}
pH	گل اشباع	۷/۳۲
کربنات کلسیم معادل (CCE)	تیتراسیون	۱۲۹ g kg^{-1}
بافت (texture)	هیدرومتری	لوم شنی
بور قابل جذب (B ava)	آب داغ	۰/۸۳ mg kg^{-1}

طرح آماری و تیمارها

برای بررسی اثر محلول‌پاشی بر رشد و عملکرد دانه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۱، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ٦ تیمار و سه تکرار و ۱۸ کرت در مزرعه اجرا شد که تیمارهای آزمایش به شرح زیر بود.

تیمار	ترکیب
T1	شاهد (بدون محلول‌پاشی)
T2	محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن (۳ میلی‌گرم در لیتر)
T3	محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن (٦ میلی‌گرم در لیتر)
T4	محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی (۳ میلی‌گرم در لیتر)
T5	محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی (۳ میلی‌گرم در لیتر)
T6	محلول‌پاشی همزمان هر دو عنصر (۳ میلی‌گرم در لیتر)

انتخاب غلظت‌ها با هدف صرفه‌اقتصادی در مقیاس مزرعه، امکان مقایسه‌پذیری تیمارها و جلوگیری از بروز برگ‌سوزی صورت گرفت، کود مایع اولیه لیگنوسولفونات حاوی ٦ درصد جرمی-حجمی آهن و روی از شرکت معتبر اسپانیایی تهیه و برای تأیید صحت غلظت‌های درج‌شده روی برچسب، نمونه کودها به آزمایشگاه همکار مؤسسه خاک و آب ارسال و پس از آنالیز، غلظت‌های اعلام‌شده تأیید گردید و هر کرت آزمایشی به طول ۸ متر و عرض ۳/۵ متر شامل ٤ ردیف کاشت با فاصله ۷۵ سانتی‌متر از یکدیگر بود.

کشت بذر و اعمال تیمارها

پیش از انجام عملیات کاشت، زمین برای آماده‌سازی نخست آبیاری شد و به محض رسیدن رطوبت به حد ظرفیت زراعی، شخم تا ژرفای ۳۰ سانتی‌متری انجام گرفت. به‌منظور شکستن کلوخه‌ها و نرم‌سازی سطح خاک، یک نوبت دیسک زده شد و برای تسطیح کرت‌ها نیز از ماله استفاده شد. بر پایه نتایج آزمون خاک و توصیه کارشناسان، مقدار کودهای پایه به‌جز آهن و روی تعیین و همزمان با شخم به خاک اضافه شد که شامل ۱۲۰ کیلوگرم اوره، ٤۰ کیلوگرم فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل، ۲۵۰ کیلوگرم گوگرد و ۱۰ تن کود دامی تازه در هکتار بود. سپس کرت‌بندی با فاصله سه متر میان کرت‌ها برای جلوگیری از اثرات جانبی تیمارها انجام و بذرها به‌صورت دستی کشت شدند. در هر پشته سه عدد بذر قرار داده شد تا سبز شدن با اطمینان

بیشتری صورت گیرد و پس از استقرار گیاهچه‌ها در مرحله چهار تا پنج برگی، یک بوته در هر کپه حفظ شد. تاریخ کشت مطابق با نظر کارشناسان، اول اردیبهشت و نخستین آبیاری روز بعد انجام پذیرفت. تمامی آبیاری‌ها با روش سیفونی و به‌صورت نشتی در جویچه‌های کف‌پشته انجام شد و یک ساعت پس از قطع زه‌آب، مسیر ورودی آب کرت بسته می‌شد. بر اساس عرف منطقه، فاصله آبیاری هر نه روز یک بار و هدایت الکتریکی آب ۵۲۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر بود. چند روز پس از سبز شدن، بوته‌های ازدست‌رفته با عملیات واکاری جایگزین شدند تا تراکم نهایی معادل ۵۰۰۰ بوته در هکتار با فواصل یکنواخت حاصل شود. کوددهی دیگر کودها شامل ۱۵۰ کیلوگرم اوره و ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار در دو نوبت به‌صورت تزریقی در مخزن ۵۰ لیتری همراه با آبیاری به تمام کرت‌ها اعمال گردید. برگ‌پاشی با لیگنوسولفونات آهن و روی بر اساس تیمارهای تعیین‌شده، در دو مرحله رشد شامل مرحله هشت‌برگی و مرحله ظهور کامل اندام‌های گیاهی انجام شد که هر دو مرحله متناسب با اوج نیاز گیاه به این عناصر انتخاب شده بودند.

برداشت و نمونه برداری از گیاهان

عملیات برداشت نهایی پس از تکامل فیزیولوژیک دانه‌ها و ظهور لایه تیره رنگ در ناحیه اتصال دانه به محور بلال، مطابق با معیارهای استاندارد (Salazar et al., 2025)، در تاریخ ۳۰ مرداد انجام گرفت. در این مرحله، بوته‌های ذرت از ارتفاع یک سانتی‌متری بالای سطح خاک قطع شدند. شاخص‌های مورد ارزیابی شامل عملکرد زیست‌توده، عملکرد دانه (بر اساس رطوبت ۱۴ درصد)، طول و وزن بلال، وزن چوب بلال، شمار ردیف‌های دانه در هر بلال، تعداد دانه در هر ردیف و وزن هزار دانه بود. به‌منظور اندازه‌گیری این صفات، از هر کرت آزمایشی تعداد ۸ بوته به‌صورت تصادفی و با در نظر گرفتن حاشیه‌های کناری انتخاب و از سطح خاک برداشت شدند. پیش از برداشت، ارتفاع کل بوته از سطح زمین نیز ثبت گردید. شاخص برداشت نیز بر اساس نسبت عملکرد دانه به عملکرد زیست‌توده کل و با استفاده از فرمول استاندارد محاسبه شد.

$$HI = GY/BY * 100 \quad \text{رابطه۱}$$

در این رابطه، GY عملکرد دانه و BY نیز عملکرد بیولوژیکی نامیده می‌شود.

به‌منظور ارزیابی اثر تیمارهای اعمال‌شده بر فرایند فتوسنتز گیاهان، میزان کلروفیل برگ‌ها توسط دستگاه کلروفیل‌سنج مدل CM-200 اندازه‌گیری شد. این اندازه‌گیری‌ها سه روز پس از هر نوبت محلول‌پاشی انجام و میانگین حاصل از دو مرحله به‌عنوان مقدار نهایی ثبت گردید. در هر کرت آزمایشی، ده بوته به‌طور تصادفی انتخاب و غلظت کلروفیل آن‌ها تعیین شد. همچنین برای سنجش شاخص‌های کیفی دانه، نمونه‌ای تصادفی از دانه‌های بلال تهیه و میزان پروتئین، آهن، روی، مس و منگنز در آن‌ها اندازه‌گیری شد. بدین منظور نمونه‌ها ابتدا در آون خشک و سپس توسط آسیاب به پودر یکنواخت تبدیل شدند. درصد پروتئین دانه از طریق تعیین نیتروژن کل به روش کجلدال محاسبه گردید (Kalra, 1997). جهت اندازه‌گیری غلظت عناصر کم مصرف، پودر گیاه با روش هضم خشک هضم شد و عصاره نهایی توسط دستگاه جذب اتمی با شعله قرائت شد (Paech and Tracey, 2013). کلیه داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SAS مورد تجزیه واریانس قرار گرفت و برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

در جدول ۲، نتایج حاصل از تجزیه واریانس تیمارهای گوناگون محلول‌پاشی آهن و روی به همراه تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های کمی و کیفی دانه ذرت ارائه شده است. مطابق یافته‌های این جدول، اثر تیمارهای اعمال‌شده بر تمامی صفات اندازه‌گیری شده به استثنا طول بلال و غلظت مس و منگنز دانه از نظر آماری معنی‌دار بود.

به‌طوری که صفاتی چون تعداد ردیف دانه در بلال، شاخص برداشت و درصد پروتئین دانه در سطح احتمال پنج درصد و سایر ویژگی‌ها در سطح یک درصد تفاوت معنی‌داری را میان تیمارها نشان دادند.

جدول ۲- جدول تجزیه واریانس تأثیر برگ‌پاشی آهن و روی در تیمارهای مختلف بر برخی ویژگی‌های کمی و کیفی ذرت

منبع تغییر	درجه آزادی	عملکرد بیولوژیک	عملکرد دانه	ارتفاع بوته	شاخص برداشت	وزن بلال	طول بلال	تعداد ردیف در بلال
بلوک	۲	۷/۱٤^{ns}	٥/۱٦^{ns}	۲۸/۱۲^{ns}	۰/۰٤^{ns}	۲۲/۱۰^{ns}	۰/۲۱^{ns}	۰/۲۲^{ns}
تیمار	٥	۱٥۹٦۳۸۱**	۱۲۱۰۲۱۸**	۲٥۰۱**	٦٥/۷*	٤۹۳۱**	۱/۱۷^{ns}	٤/۷۸*
خطا	۱۰	۳۷٦٥۰	٤۸۲٤۳	۳۳/۱	۰/۱۷	۲۸/۲	۱/۷۳	۰/۲٦
CV	-	۱۲/۱۲	۱٤/٥۲	۱۳/۳۰	۱۰/٥۷	۸/۲۲	۷/٤۱	٦/۹۸

ادامه جدول ۲-

منبع تغییر	درجه آزادی	تعداد دانه در ردیف	وزن هزار دانه	درصد پروتئین	آهن دانه	روی دانه	منگنز دانه	مس دانه
بلوک	۲	۹/۲۷^{ns}	٤/۲۸^{ns}	۱/۰۲^{ns}	۰/۰٥^{ns}	۰/۹۳^{ns}	۰/۳۲^{ns}	۰/۰٤^{ns}
تیمار	٥	۳۰۲٥**	۳۱۱۲**	۲۸/۱*	٥٤٥۲**	۳۲۲۱**	۱/۲۸^{ns}	۰/۳۲^{ns}
خطا	۱۰	۱/٤۱	۱۰/٦۳	۱/۱۲	۰/۱٤	۱/۳۸	۰/٥۳	۰/۳۱
CV	-	۸/۳۸	۱۳/٥٦	۹/٤۲	۸/٤۷	۷/٤٦	۱۰/۲۱	٥/٤۲

^{ns}،*،** به ترتیب: غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد بر اساس آزمون LSD (سطح احتمال پنج درصد)
CV: ضریب تغییرات

نتایج مربوط به اثر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های کمی رشد ذرت از جمله عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، ارتفاع بوته و شاخص برداشت در جدول ۳ ارائه شده است. طبق یافته‌ها، بالاترین میزان عملکرد دانه متعلق به تیمار شماره شش بود که نسبت به گروه شاهد ۱۵/۷ درصد افزایش نشان داد. این تیمار شامل کاربرد همزمان آهن و روی با غلظت سه میلی‌گرم در لیتر از طریق برگ‌پاشی بود. پس از آن، تیمارهای چهار و پنج که در آنها برگ‌پاشی با لیگنوسولفونات روی انجام گرفته بود، با ۱۲ درصد افزایش در رتبه بعدی قرار گرفتند. همچنین نتایج نشان داد که برگ‌پاشی با لیگنوسولفونات آهن به‌تنهایی سبب افزایش ۱۱ درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد شد، اما به‌نظر می‌رسد تأثیر روی در این زمینه بارزتر بوده است. این یافته‌ها همسو با نتایج برخی از تحقیقات پیشین است. برای نمونه، غفاری ملایری و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که محلول‌پاشی با آهن و روی عملکرد دانه را بهبود می‌بخشد و در این میان، اثر روی بیشتر از آهن بوده است. در مطالعه خلیلی محله و رشدی (Khalili Mahalleh and Roshdi, 2008) نیز برگ‌پاشی با عناصر ریزمغذی آهن، روی و منگنز منجر به افزایش ۳٤/۳ درصدی عملکرد دانه ذرت رقم ٤۰۷ در مقایسه با شاهد شد و همانند پژوهش حاضر، تأثیر روی چشمگیرتر از آهن بود. همچنین در آن بررسی، کاربرد توأم آهن و روی مؤثرترین تیمار در افزایش عملکرد دانه گزارش شد. از سوی دیگر، گودرز و همکاران (Goudarz et al., 2014) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که اگرچه میان تأثیر مجزای آهن و روی بر عملکرد دانه تفاوت معنی‌داری وجود نداشت، اما ترکیب این دو عنصر برتری معنی‌داری نسبت به کاربرد هر یک به‌تنهایی داشت.

یکی از دلایل اصلی اثربخشی بیشتر روی در مقایسه با آهن، به غلظت پایین‌تر شکل قابل جذب آن در خاک آزمایش برمی‌گردد. با در نظر گرفتن حد بحرانی روی و آهن برای ذرت به ترتیب ۱/۲ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (Khoshgoftarmansh et al., 2012) و با استناد به جدول ۱، چنین برمی‌آید که میزان روی قابل جذب در

فاصله بیشتری از آستانه بحرانی قرار داشته و بنابراین این عنصر در خاک مورد مطالعه، محدودیت بیشتری نسبت به آهن داشته است. به‌همین دلیل، کاربرد روی افزایش محسوس‌تری در عملکرد دانه به همراه داشته است. پژوهش‌های متعدد نیز روی را به‌عنوان محدودکننده‌ترین ریزمغذی در سطح جهانی معرفی کرده‌اند (Denre et al, 2025; Khoshgoftarmansh et al., 2012).

در زمینه عملکرد بیولوژیک، بیشترین میزان مربوط به تیمارهای شش بود که در آن کاربرد توأم آهن و روی افزایش ۷/۵ درصدی را نسبت به شاهد رقم زد. همچنین برگ‌پاشی جداگانه لیگنوسولفونات روی و آهن نیز با ٤/۷ درصد افزایش در مقایسه با شاهد، اثر معنی‌داری نشان داد. در این میان، تأثیر لیگنوسولفونات آهن بر عملکرد بیولوژیک اندکی بیش از روی بود که این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نبود. روی در سنتز پروتئین، هورمون اکسین و آنزیم‌های دخیل در تولید نشاسته نقش داشته و بهبود کیفیت دانه و افزایش لقاح را سبب می‌شود، در حالی که آهن عمدتاً در ساخت کلروفیل و تقویت فتوسنتز مؤثر است (Rout and Sahoo, 2015). بنابراین، آهن رشد رویشی و روی رشد زایشی را تقویت می‌کند و تلفیق هر دو عنصر از راه اثر هم‌افزایی، به توسعه همه‌جانبه گیاه یاری می‌رساند.

بر اساس نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲)، تأثیر برگ‌پاشی آهن و روی بر شاخص برداشت در سطح پنج درصد معنی‌دار بود، هرچند اثر لیگنوسولفونات آهن به‌تنهایی از نظر آماری معنی‌دار نشد. بیشترین میانگین شاخص برداشت با ۲۳/٦ درصد به تیمار مصرف همزمان آهن و روی تعلق داشت که با تیمارهای چهار و پنج تفاوت معنی‌داری نشان نداد. هرچند کاربرد لیگنوسولفونات آهن به‌تنهایی نسبت به شاهد افزایشی جزئی در شاخص برداشت ایجاد کرد، اما این تفاوت از لحاظ آماری تأیید نشد. به‌طور کلی، مصرف خاکی و برگی آهن و روی عملکرد بیولوژیک و دانه را افزایش می‌دهد، ولی در این میان تأثیر مثبت روی در افزایش تولید دانه بارزتر بوده و بهبود بیشتری در شاخص برداشت ایجاد کرده است.

بررسی ارتفاع بوته در تیمارهای مختلف نشان داد که کاربرد همزمان لیگنوسولفونات آهن و روی بیشترین اثر را بر افزایش این صفت داشته و آن را ۱۳/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش داده است. غلظت‌های مختلف لیگنوسولفونات آهن تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع داشت و با افزایش غلظت آن، ارتفاع بوته نیز افزایش یافت، در حالی که تغییر غلظت لیگنوسولفونات روی تفاوت معنی‌داری در این شاخص ایجاد نکرد. به‌طور کلی، تأثیر برگ‌پاشی لیگنوسولفونات روی بر ارتفاع بوته بیش از آهن بود.

جدول ۳- تأثیر محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی و آهن بر عملکرد ذرت

تیمار	عملکرد بیولوژیکی (تن بر هکتار)	عملکرد دانه (کیلوگرم بر هکتار)	شاخص برداشت -	ارتفاع بوته سانتی‌متر
T1	۳۷/۰٤^{cd}	۷۳۱۹^{d}	۲۱/۳^{cd}	۲۲۰^{d}
T2	۳۸/۳۰^{b}	۷۸۸٦^{c}	۲۳/۸^{cd}	۲٤۱^{b}
T3	۳۸/۷۸^{b}	۷۹٦۱^{bc}	۲۲/۳^{bc}	۲۳۲^{c}
T4	۳۷/٤٦^{bcd}	۸۱۸۳^{b}	۲۳/۵^{a}	۲۳۱^{c}
T5	۳۷/۹۲^{bc}	۸۲۲۷^{b}	۲۳/۳^{ab}	۲۳۱^{c}
T6	۳۹/۸۱^{a}	۸٤۷۱^{a}	۲۳/٦^{ab}	۲٤۹^{a}

T1: شاهد (بدون محلول‌پاشی)، T2: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن (۳ میلی‌گرم در لیتر)، T3: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن (٦ میلی‌گرم در لیتر)، T4: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی (۳ میلی‌گرم در لیتر)، T5: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی (۳ میلی‌گرم در لیتر)، T6: محلول‌پاشی همزمان هر دو عنصر (۳ میلی‌گرم در لیتر)، داده‌های با حروف مشابه در داخل هر ستون اختلاف آماری در سطح احتمال ۵ درصد نشان ندادند.

نتایج حاصل از بررسی تأثیر تیمارهای مختلف بر ویژگی‌های کمی مؤثر در عملکرد دانه (شامل تعداد ردیف در بلال، تعداد دانه در هر ردیف، وزن بلال، طول بلال و وزن هزار دانه) در جدول ٤ ارائه شده است. تیمارها تأثیر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر افزایش وزن هزار دانه داشتند. بالاترین مقدار این صفت با ٣٦٢ گرم و افزایش ۹/۳ درصدی نسبت به شاهد، در تیمار شماره ٦ (محلول‌پاشی همزمان لیگنوسولفونات آهن و روی با غلظت سه میلی‌گرم در لیتر) به دست آمد. تیمارهای چهار و پنج (شامل برگ‌پاشی لیگنوسولفونات روی با غلظت‌های سه و شش میلی‌گرم در لیتر) در رتبه بعدی قرار گرفتند و کاربرد لیگنوسولفونات آهن به‌تنهایی نیز وزن هزار دانه را نسبت به شاهد افزایش داد. مطابق با گزارش کومار و همکاران (Kumar et al., 2019)، مصرف توأم آهن و روی به‌طور معنی‌داری باعث افزایش محتوای کربوهیدرات‌های کل، نشاسته، ایندول استیک اسید، کلروفیل و پروتئین دانه می‌شود که این عوامل در نهایت به افزایش وزن دانه منجر می‌گردند.

از نظر تعداد دانه در ردیف، بیشینه مقدار با ٤٠ دانه مربوط به تیمار شش و کمترین آن با ۲۷ دانه متعلق به تیمار شاهد بود. تیمارهای دو، چهار و پنج تفاوت معنی‌داری از این لحاظ نداشتند و به‌طور کلی تأثیر روی در این شاخص بیشتر از آهن ارزیابی شد. یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج گودرز و همکاران (Goudarz et al., 2014) که افزایش وزن هزار دانه و تعداد دانه در ردیف را در پی برگ‌پاشی آهن و روی گزارش کردند، همخوانی دارد، هرچند در پژوهش مذکور تفاوت معنی‌داری بین تأثیر دو عنصر مشاهده نشد. غفاری ملایری و همکاران (Ghaffari Malayeri et al., 2012) نیز بهبود این دو صفت را در اثر محلول‌پاشی آهن و روی تأیید کرده‌اند. همچنین تأثیر تیمارها بر تعداد ردیف در بلال در سطح پنج درصد معنی‌دار بود و تیمار شش با میانگین ١٤/٨٧ ردیف بالاترین مقدار را به خود اختصاص داد. وزن بلال نیز تحت تأثیر تیمارها در سطح یک درصد قرار گرفت و بیشینه آن (٤٠٤ گرم) در تیمار شش مشاهده شد؛ تیمارهای سه، چهار و پنج در رتبه‌های بعدی بودند و کمترین وزن بلال (٣٤١ گرم) به شاهد تعلق داشت. تأثیر لیگنوسولفونات روی بر وزن بلال بیشتر از لیگنوسولفونات آهن بود. با این حال، بر اساس نتایج تجزیه واریانس، اثر تیمارها بر طول بلال از نظر آماری معنی‌دار نبود.

برتری معنی‌دار تیمار محلول‌پاشی همزمان آهن و روی در افزایش وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف و وزن بلال نسبت به کاربرد انفرادی هر یک از این عناصر، نشان‌دهنده اثر همافزایی این دو ریزمغذی در فرآیندهای فیزیولوژیکی مرتبط با پر شدن دانه است. نقش روی در سنتز پروتئین‌ها و هورمون اکسین و مشارکت آهن در ساخت کلروفیل و افزایش کارایی فتوسنتز، از جمله مکانیسم‌هایی هستند که به‌طور مکمل بر بهبود اجزای عملکرد تأثیر می‌گذارند. افزایش محتوای کربوهیدرات‌ها و نشاسته در پی مصرف توأم این عناصر می‌تواند توجیه‌کننده افزایش وزن دانه در این پژوهش باشد. هرچند تأثیر روی بر اکثر صفات کمی بارزتر از آهن بود، اما کاربرد تلفیقی دو عنصر همواره بالاترین مقادیر را به خود اختصاص داد که بر اهمیت تغذیه متعادل در دستیابی به عملکرد مطلوب تأکید دارد. عدم معنی‌داری تغییرات طول بلال در پاسخ به تیمارها می‌تواند بیانگر آن باشد که این صفت بیش از آنکه تحت تأثیر تغذیه برگی قرار گیرد، تحت کنترل عوامل ژنتیکی است. این یافته‌ها با نتایج سایر پژوهش‌ها در زمینه تأثیر مثبت آهن و بر اجزای عملکرد ذرت همخوانی دارد (Asadi et al., 2024; Xia et al., 2019).

این یافته‌ها نشان داد که کاربرد همزمان آهن و روی از طریق برگ‌پاشی، مؤثرترین تیمار در بهبود عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، ارتفاع بوته و شاخص برداشت ذرت بود که این برتری را می‌توان به اثر هم‌افزایی این دو عنصر در فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه نسبت داد.

افزایش ۱۵/۷ درصدی عملکرد دانه در تیمار ترکیبی نسبت به شاهد، در حالی که تیمارهای انفرادی آهن و روی به ترتیب ۱۱ و ۱۲ درصد افزایش نشان دادند، تأییدی بر این هم‌افزایی است. برتری نسبی تأثیر روی بر عملکرد دانه و شاخص برداشت در مقایسه با آهن، می‌تواند ناشی از وضعیت بحرانی‌تر این عنصر در خاک مورد آزمایش باشد، چراکه غلظت روی قابل جذب در فاصله بیشتری از حد بحرانی قرار داشت و بنابراین پاسخ گیاه به کاربرد آن محسوس‌تر بود. در مقابل، تأثیر بیشتر آهن بر عملکرد بیولوژیک و ارتفاع بوته، نقش کلیدی این عنصر در ساخت کلروفیل و شدت بخشیدن به فرآیند فتوسنتز و در نتیجه افزایش رشد رویشی را تأیید می‌کند. این تمایز در عملکرد عناصر، اهمیت شناخت نقش اختصاصی هر ریزمغذی و نیز وضعیت تغذیه‌ای خاک را در طراحی برنامه‌های کودی کارآمد نشان می‌دهد. افزایش معنی‌دار شاخص برداشت تنها در تیمارهای حاوی روی یا ترکیب آهن و روی مشاهده شد که بیانگر سهم مؤثرتر این عنصر در بهبود کارایی انتقال مواد فتوسنتزی به دانه‌هاست. اگرچه کاربرد انفرادی آهن بر شاخص برداشت تأثیر معنی‌داری نداشت، اما حضور آن در تیمار ترکیبی به همراه روی، مقدار این شاخص را افزایش داد که نشان‌دهنده نقش مکمل این دو عنصر در بهبود هر دو بخش رویشی و زایشی گیاه است. در مجموع، نتایج این قسمت از پژوهش بر ضرورت تغذیه متعادل و توجه به اثرات متقابل عناصر در افزایش کمّی و کیفی محصول ذرت تأکید دارد.

یافته‌های جدول ۵ بیانگر تأثیر تیمارهای مختلف بر شاخص‌های کیفی مرتبط با دانه است. بر این اساس، اثر تیمارها بر درصد پروتئین دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. بیشترین میزان پروتئین دانه در تیمار شماره ٦ مشاهده شد که نسبت به شاهد ۵/۹ درصد افزایش نشان داد. تیمارهای سه، چهار و پنج نیز افزایش پروتئین را در پی داشتند، هرچند این افزایش نسبت به شاهد از نظر آماری معنی‌دار نبود. مطابق با یافته‌های برخی محققان (Khalafi et al., 2021; Jarecki et al., 2025) مصرف برخی عناصر ریزمغذی منجر به افزایش پروتئین خام در اندام‌های هوایی و دانه ذرت می‌شود. خلیلی محله و رشدی (Khalili Mahalleh and Roshdi, 2008) نیز گزارش کردند که محلول‌پاشی آهن، روی و منگنز افزایش معنی‌داری در پروتئین خام ذرت سیلویی ایجاد می‌کند. به‌نظر می‌رسد نقش آهن و روی در فعال‌سازی آنزیم‌های دخیل در سنتز پروتئین‌ها، عامل اصلی این افزایش باشد.

جدول ۴- تأثیر محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی و آهن بر فاکتورهای کمی مرتبط با عملکرد دانه ذرت

تیمار	تعداد ردیف در بلال	تعداد دانه در ردیف	وزن بلال	طول چوب بلال	وزن هزار دانه
	–	–	(گرم)	سانتی‌متر	(گرم)
T1	۱۳/۲۲^{bcd}	۲۷^{d}	۳٤۱^{e}	۹۸^{a}	۳۳۱^{d}
T2	۱۳/۳٤^{bcd}	۳۲^{c}	۳٦٤^{c}	۹۷^{a}	۳٤۲^{c}
T3	۱۳/٤۳^{bc}	۳۵^{b}	۳۵۳^{d}	۹٦^{a}	٤۵۸^{c}
T4	۱۳/٤۹^{b}	۳۵^{b}	۳۸۵^{b}	۹۷^{a}	۳٤۳^{bc}
T5	۱۳/۷٤^{bc}	۳٦^{b}	۳۸۸^{b}	۹۸^{a}	۳٤۸^{b}
T6	۱٤/۸۷^{a}	٤۰^{a}	٤۰٤^{a}	۹۸^{a}	۳٦۲^{a}

T1: شاهد (بدون محلول‌پاشی)، T2: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن (۳ میلی‌گرم در لیتر)، T3: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن (٦ میلی‌گرم در لیتر)، T4: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی (۳ میلی‌گرم در لیتر)، T5: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی (۳ میلی‌گرم در لیتر)، T6: محلول‌پاشی همزمان هر دو عنصر (۳ میلی‌گرم در لیتر)، داده‌های با حروف مشابه در داخل هر ستون اختلاف آماری در سطح احتمال ۵ درصد نشان ندادند.

جدول ۵- تأثیر محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی و آهن بر کیفیت دانه ذرت

تیمار	پروتئین دانه	غلظت آهن دانه	غلظت روی دانه	غلظت منگنز دانه	غلظت مس دانه
	درصد	میلی‌گرم بر کیلوگرم			
T1	۸/۴۳^{bc}	۴۳^{cd}	۳۲^{b}	۲۶^{a}	۷/۹^{a}
T2	۸/۸۵^{bc}	۸۲^{ab}	۳۳^{b}	۲۷^{a}	۸/۲^{a}
T3	۸/۹۲^{bc}	۹۳^{a}	۳۵^{b}	۲۶^{a}	۸/۱^{a}
T4	۹/۰۱^{abc}	۴۶^{cd}	۵۴^{a}	۲۸^{a}	۸/۰^{a}
T5	۹/۱۲^{ab}	۴۹^{c}	۵۶^{a}	۲۸^{a}	۸/۱^{a}
T6	۹/۲۳^{a}	۷۷^{b}	۵۳^{a}	۲۹^{a}	۸/۳^{a}

T1: شاهد (بدون محلول‌پاشی)، T2: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن (۳ میلی‌گرم در لیتر)، T3: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات آهن (۶ میلی‌گرم در لیتر)، T4: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی (۳ میلی‌گرم در لیتر)، T5: محلول‌پاشی لیگنوسولفونات روی (۳ میلی‌گرم در لیتر)، T6: محلول‌پاشی همزمان هر دو عنصر (۳ میلی‌گرم در لیتر)، داده‌های با حروف مشابه در داخل هر ستون اختلاف آماری در سطح احتمال ۵ درصد نشان ندادند.

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، کاربرد لیگنوسولفونات آهن تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن دانه داشت. بیشترین میزان آهن دانه به ترتیب در تیمار سه (محلول‌پاشی آهن با غلظت سه در هزار) و تیمار دو (غلظت دو در هزار آهن) مشاهده شد که با سایر تیمارها اختلاف معنی‌دار داشتند. در تیمار شش (محلول‌پاشی همزمان آهن و روی) نیز غلظت آهن دانه نسبت به شاهد افزایش یافت، اما از تیمارهای محلول‌پاشی انفرادی آهن کمتر بود. تیمارهای چهار و پنج که در آنها تنها روی به کار رفته بود، تفاوت معنی‌داری با شاهد از نظر غلظت آهن دانه نداشتند. این یافته‌ها نشان‌دهنده کارایی مناسب منبع لیگنوسولفونات در جذب و انتقال آهن توسط برگ‌های ذرت است. در مقابل، اثر تیمارها بر غلظت روی دانه در سطح یک درصد معنی‌دار بود و بالاترین مقادیر در تیمارهای چهار، پنج و شش (شامل کاربرد لیگنوسولفونات روی به‌تنهایی یا همراه با آهن) به دست آمد. محلول‌پاشی آهن به‌تنهایی تأثیری در افزایش روی دانه نداشت. مشابه با آهن، به‌نظر می‌رسد منبع لیگنوسولفونات در جذب و انتقال روی نیز مؤثر عمل کرده است. همچنین تأثیر تیمارها بر غلظت منگنز و مس دانه معنی‌دار نبود.

افزایش معنی‌دار درصد پروتئین دانه در تیمارهای حاوی آهن و روی، به‌ویژه در کاربرد توأم این دو عنصر، می‌تواند ناشی از نقش کلیدی این ریزمغذی‌ها در فعال‌سازی آنزیم‌های درگیر در مسیرهای بیوشیمیایی سنتز پروتئین باشد. آهن به‌عنوان کوفاکتور آنزیم‌های نیترات ردوکتاز و فریتین و روی به‌عنوان فعال‌کننده آنزیم‌های دخیل در متابولیسم اسیدهای نوکلئیک و پروتئین‌ها، به‌طور مستقیم در فرآیند ترجمه و ساخت پروتئین نقش دارند (Rout and Sahoo, 2015). از سوی دیگر، جذب و انتقال مؤثر آهن و روی از طریق لیگنوسولفونات به‌عنوان یک کلات‌کننده آلی کارآمد، سبب افزایش غلظت این عناصر در دانه شده است. افزایش غلظت آهن و روی در دانه نه‌تنها بر انباشت این عناصر مؤثر است، بلکه از طریق بهبود تغذیه گیاه در مراحل پر شدن دانه، بر کیفیت نهایی محصول می‌افزاید. عدم تغییر معنی‌دار غلظت منگنز و مس در دانه نشان می‌دهد که تیمارهای اعمال‌شده تأثیر اختصاصی بر این عناصر نداشته و احتمالاً مکانیسم‌های جذب و انتقال آنها مستقل از منابع به‌کار رفته عمل کرده است. برتری تأثیر تیمار توأم آهن و روی بر صفات کیفی نسبت به کاربرد انفرادی هر یک، بیانگر اثر هم‌افزایی این دو عنصر در فرآیندهای فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی مرتبط با کیفیت

دانه است. این یافته با گزارش‌های پیشین مبنی بر برتری کاربرد همزمان ریزمغذی‌ها بر مصرف جداگانه آنها همخوانی دارد (Narimani et al., 2010; Rajasekar et al., 2017).

نتیجه‌گیری

بر اساس یافته‌های این پژوهش، برگ‌پاشی توأم آهن و روی با غلظت سه میلی‌گرم بر لیتر به‌عنوان مؤثرترین تیمار در بهبود صفات کمّی و کیفی ذرت شناخته شد که افزایش معنی‌داری در عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، ارتفاع بوته، شاخص برداشت، وزن هزار دانه، تعداد دانه در ردیف، وزن بلال، درصد پروتئین دانه و غلظت عناصر آهن و روی در دانه ایجاد کرد. برتری تأثیر روی بر آهن در اکثر صفات مرتبط با عملکرد دانه و شاخص برداشت، ناشی از محدودیت بیشتر این عنصر در خاک مورد مطالعه بود. در حالی که، نقش آهن در افزایش رشد رویشی و عملکرد بیولوژیک بارزتر ظاهر شد. کارایی بالای منبع لیگنوسولفونات در جذب و انتقال عناصر توسط برگ تأیید گردید و عدم تغییر معنی‌دار غلظت منگنز و مس در دانه، اختصاصی بودن تأثیر تیمارها را نشان داد. اثر هم‌افزایی کاربرد همزمان دو عنصر در بیشتر صفات مورد بررسی مشهود بود و همواره مقادیر بالاتری نسبت به کاربرد انفرادی هر یک ایجاد کرد. عدم تأثیر معنی‌دار تیمارها بر طول بلال بیانگر غلبه عوامل ژنتیکی بر این صفت در مقایسه با تغذیه برگی است. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که تغذیه متعادل و تلفیقی ریزمغذی‌ها با در نظر گرفتن وضعیت بحرانی عناصر در خاک و نقش فیزیولوژیک اختصاصی هر یک، راهبردی مؤثر در دستیابی به عملکرد مطلوب و بهبود کیفیت دانه ذرت محسوب می‌شود.

REFERENCES

Alloway, B.J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition (2th ed.). Brussels: International zinc association (IZA), 136p.

Álvarez, J. M., & Rico, M. I. (2003). Effects of zinc complexes on the distribution of zinc in calcareous soil and zinc uptake by maize. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. *51*, 5760–5767. doi: 10.1021/jf030092m.

Álvarez-Fernández, A., Orera, I., Abadía, J., & Abadía, A. (2007). Determination of synthetic ferric chelates used as fertilizers by liquid chromatography-electrospray/mass spectrometry in agricultural matrices. *Journal of American Society Mass spectrometry*. *18*, 37–47. doi: 10.1016/j.jasms.2006.08.018

Asadi, K., Barani Motlagh, M., Movahedi Naeini, S. A., & Nazari, T. (2024). Effect of Foliar Application of Iron and Zinc Sulfate at Different Growth Stages on Vegetative Growth and Yield Components of Forage Corn (*Zea mays* L.). *Journal of Soil and Plant Interactions-Isfahan University of Technology*, *15*(1), 71-89.

Benedicto, A., Hernandez-Apaolaza, L., Rivas, I., & Lucena, J. J. (2011). Determination of 67Zn distribution in navy bean (Phaseolus vulgaris L.) after foliar application of 67Zn-lignosulfonates using isotope pattern deconvolution. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. *59*, 8829–8838. doi: 10.1021/jf2002574

Denre, M., Shyamrao, I. D., & Kumar, A. (2025). Study on zinc as plant nutrient: A Review. *Journal of Scientific Research and Reports*, *31*(6), 972-999.

Fageria, N., Filho, M.B., Moreira, A., & Guimarães, C. (2009). Foliar fertilization of crop plants. *Journal of plant Nutrition 32*, 1044-1064.

Ghaffari Malayeri, M., Akbari, G. A. and Mohammadzadeh, A. (2012). Response of yield and yield Components of Corn on Soil Use and Foliar Application of Micronutrients. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *10*(2), 368-373. doi: 10.22067/gsc.v10i2.16239

Girma, K., Martin, K., Freeman, K., Mosali, J., Teal, R., Raun, W.R., Moges, S., & Arnall, D. (2007). Determination of optimum rate and growth stage for foliar-applied phosphorus in corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 38*, 1137-1154.

González-Caballo, P., Barrón, V., Torrent, J., Del Campillo, M. C., & Sánchez-Rodríguez, A. R. (2022). Wheat and maize grown on two contrasting zinc-deficient calcareous soils respond differently to soil and foliar application of zinc. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *22*(2), 1718-1731.

Goudarz, H., Kasraei, P., & Zand, B. (2014). Effect of different iron and zinc concentrations on yield and yield components of maize. *Journal of Crop Production Research*, *6*, 49-61.

Jan, B., Bhat, T. A., Sheikh, T. A., Wani, O. A., Bhat, M. A., Nazir, A., & Rashid, A. (2020). Agronomic bio-fortification of rice and maize with iron and zinc: A review. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, *21*(16), 28-37.

Januszkiewicz, R., Kulczycki, G., Sacała, E., & Kabała, C. (2025). Effect of nutrient forms in Foliar Fertilizers on the Growth and Biofortification of Maize on Different Soil Types. *Agronomy*, *15*(6), 1482.

Jarecki, W., Borza, I. M., Rosan, C. A., Domuța, C. G., & Vicas, S. I. (2025). The effect of foliar micronutrient fertilization on yield and nutritional quality of maize grain. *Agronomy*, *15*(8), 1859.

Kalra, Y., 1997. Handbook of reference methods for plant analysis. CRC press, London.

Kari, F.G., Hilger, S., & Canonica, S. (1995). Determination of the reaction quantum yield for the photochemical degradation of Fe (III)-EDTA: Implications for the environmental fate of EDTA in surface waters. *Environmental Science & Technology, 29*, 1008-1017.

Khalafi, A., Mohsenifar, K., Gholami, A., & Barzegari, M. (2021). Corn (*Zea mays* L.) growth, yield and nutritional properties affected by fertilization methods and micronutrient use. *International Journal of Plant Production*, *15*(4), 589-597.

Khalili Mahalleh J., & Roshdi, M. (2008). Effect of foliar application of Micro Nutrients on Quantitative and Qualitative Characteristics of 704 Silage Corn in Khoy. *Seed and Plant Journal, 24*(2), 281-293 (In persian). doi: 10.22092/spij.2017.110804

Khoshgoftarmansh, A. H., Abadi, H. K., Khanmohammadi, Z., Sararoudi, F. A., Barzin, M., & Shahri, A. P. (2012). Critical deficiency level of zinc for corn on calcareous salt-affected soils in central Iran. *Journal of Plant Nutrition*, *35*(12), 1806-1818.

Kumar, D., Patel, K. P., Ramani, V. P., Shukla, A. K., & Meena, R. S. (2019). Management of micronutrients in soil for the nutritional security. In *Nutrient Dynamics for Sustainable Crop Production* (pp. 103-134). Singapore: Springer Singapore.

Martín-Ortiz, D., Hernández-Apaolaza, L., & Gárate, A. (2009). Efficiency of a NPK fertilizer with adhered zinc lignosulfonate as a zinc source for maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. *57*, 9071–9078. doi: 10.1021/jf9017965

Narimani, H., Rahimi, M. M., Ahmadikhah, A., & Vaezi, B. (2010). Study on the effects of foliar spray of micronutrient on yield and yield components of durum wheat. *Archives of Applied Science Research*, *2*(6), 168-176.

Naserizadeh, H., Saeidi, M., & Chaghazardi, H. (2025). Comparison of the effect of common and nanoparticle chelates of iron and zinc on yield and its components in corn. *Crop Science Research in Arid Regions*, *6*(4), 345-362.

Niu, J., Liu, C., Huang, M., Liu, K., & Yan, D. (2021). Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *21*(1), 104-118.

Paech, K., & Tracey, M.V. (2013). Modern Methods of Plant Analysis/Moderne Methoden der Pflanzenanalyse. Springer Science & Business Media.

Payandeh, K., & Mojaddam, M. (2021). Effect of iron and zinc chelates on quantitative characteristics and amount of grain nutrients of corn (*Zea mays* L.) under different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *14*(3), 719-729.

Rajasekar, M., Nandhini, D. U., & Suganthi, S. (2017). Supplementation of mineral nutrients through foliar spray-A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, *6*(3), 2504-2513.

Rout, G. R., & Sahoo, S. (2015). Role of iron in plant growth and metabolism. *Reviews in Agricultural Science*, *3*, 1-24.

Salazar-Vidal, M. N., Draves, M. A., Fitzsimmons, S. L., Traylor, Z. B., & Flint-Garcia, S. (2025). How to harvest and store corn (*Zea mays*). *Cold Spring Harbor Protocols*.

Sánchez Jiménez, S., & Lucena, J. J. (2015). Charaterization of zinc fertilizers, adjustment to the european and spanish regulations (in spanish). *Phytoma, 272*, 47–52.

Souri, M. (2015). Chelates and aminochelates; and their role in plant nutrition, 172. Tehran, Iran: Agriculture Education and Extension Press.

Xia, H., Kong, W., Wang, L., Xue, Y., Liu, W., Zhang, C., & Li, C. (2019). Foliar Zn spraying simultaneously improved concentrations and bioavailability of Zn and Fe in maize grains irrespective of foliar sucrose supply. *Agronomy*, *9*(7), 386.