



تأثیر روش مصرف، منابع مختلف کودهای آهن بر جذب برخی عناصر کم مصرف و پایداری غشا پلاسمایی سورگوم

صبیره گلشاهی^۱، * احمد غلامعلی زاده آهانگر^۲، نوشین میر^۳ و مریم قربانی^۴

^۱دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه زابل، دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه زابل،

^۲استادیار گروه شیمی، دانشگاه زابل، ^۳مربی گروه علوم خاک، دانشگاه زابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۵

چکیده

سابقه و هدف: اهمیت کشاورزی، با افزایش جمعیت، بیش از هر زمان دیگری برای تمامی جوامع بشری مشخص گردیده است. عنصر آهن یکی از عناصر کم مصرف ضروری برای رشد گیاهان می باشد. در پژوهش حاضر سعی بر آن شده که علاوه بر بررسی غلظت عناصر کم مصرف در ریشه و اندام هوایی گیاه سورگوم، به پایداری غشای پلاسمایی آن در برابر ورود عناصر به درون آن و مقاومت گیاه در برابر تنش وارده به غشای درونی گیاه که این تنش میزان سطوح آهن کاربردی می باشد، توجه گردد. هدف از انجام این پژوهش مقایسه نحوه مصرف منابع آهن و تأثیر متقابل آن با غلظت و نوع کود کاربردی بر غلظت عناصر غذایی کم مصرف و پایداری غشای پلاسمایی گیاه سورگوم می باشد.

مواد و روش ها: به منظور بررسی نحوه مصرف منابع آهن بر خصوصیات گیاه *Sorghum Bicolor* (L.) Moench (سورگوم رقم اسپیدفید)، آزمایشی در شرایط گلخانه به صورت طرح فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل دو سطح آهن (مصرف خاکی: ۰/۲۷۰، ۰/۴۰۵ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک و محلول پاشی: ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم آهن در لیتر همراه با شاهد در دو مرحله) از پنج منبع کودی (کلات آهن، سولفات آهن، نانو آهن سبز (حاوی ۹٪ آهن)، کلات آهن پلیمری، سولفات آهن پلیمری) بود.

یافته ها: تجزیه واریانس داده ها نشان داد که اثرات متقابل سه گانه بر اکثر صفات و اثرات متقابل دو گانه بر مقدار مس ریشه در سطح احتمال ۵٪ معنی دار شدند. در مصرف خاکی ۰/۲۷۰ میلی گرم در کیلوگرم کلات آهن، درصد پایداری غشا پلاسمایی ریشه (۵/۰۶ برابر) و در سطح ۰/۴۰۵ میلی گرم در کیلوگرم، غلظت روی ریشه (۶/۹۹ برابر) در تیمار نانو آهن سبز افزایش معنی داری نسبت به شاهد یافتند. در محلول پاشی منابع آهن در سطح ۰/۲۵ گرم در لیتر میزان کلروفیل کل (۷۵/۹۵٪)، درصد پایداری غشا پلاسمایی برگ (۶/۳۳ برابر) و غلظت آهن در اندام هوایی (۱/۹۹ برابر) به ترتیب در تیمارهای کلات آهن پلیمری، نانو آهن سبز و سولفات آهن پلیمری افزایش معنی دار و روی اندام هوایی (۷۵/۰۵٪) در تیمار کلات آهن کاهش معنی داری نشان دادند. در سطح ۰/۵ گرم در لیتر آهن، غلظت منگنز اندام

* مسئول مکاتبه: a_ahangar2002@yahoo.com

هوایی (۳۰/۶۷) و ریشه (۳۷/۴۶) به ترتیب در تیمارهای کلات آهن پلیمری و کلات آهن کاهش معنی دار و غلظت آهن ریشه گیاه (۴۷/۸۶) در تیمار سولفات آهن پلیمری افزایش معنی داری در مقایسه با شاهد نشان دادند. بیشترین غلظت مس ریشه در محلول پاشی نانو آهن سبز مشاهده شد.

نتیجه گیری: به طور کلی با توجه به نتایج، اثرات منابع آهن بر خصوصیات فیزیولوژیک گیاه سورگوم و درصد پایداری غشا پلاسمایی گیاه، مثبت ارزیابی شد و تأثیر مثبت محلول پاشی تمامی منابع آهن را بر صفات درصد پایداری غشا پلاسمایی ریشه و برگ، کلروفیل کل و غلظت آهن اندام هوایی و ریشه تأیید می کند.

واژه های کلیدی: سورگوم، سولفات آهن پلیمری، کلات آهن، محلول پاشی

مقدمه

با افزایش جمعیت، اهمیت کشاورزی برای تمام جوامع بشری بیش از هر زمان دیگری مشخص شده است. اولین و مهم ترین نیاز هر انسان، به مواد غذایی و عرضه مواد غذایی است که در ارتباط مستقیم و غیرمستقیم با کشاورزی می باشد. آهن عنصری حیاتی برای رشد، گسترش و بقای گیاه می باشد، چرا که برای عملکرد صحیح متابولیک های چندگانه و فرایندهای فیزیولوژیکی ضروری است (۲۵). با این که آهن در پوسته زمین در همه جای آن وجود دارد، حلالیت ترکیبات آهن در بیش تر خاک ها مانع جذب آهن توسط گیاه شده و باعث گسترش علائم کمبود آهن در گیاه می شوند (۳۶). pH بهینه برای رشد مناسب و دریافت بهینه آهن بین ۵/۵ تا ۶/۵ گزارش شده است. بنابراین، pH بیش تر از ۷ می تواند منجر به کمبود آهن شود (۳۲). خاک بیش تر مناطق کشاورزی جهان دارای pH بالا بوده که به تبع آن آهن قابل جذب توسط گیاهان کاهش می یابد (۶۴). یکی از مشکلات خاک های قلیایی که بخش عمده ای از خاک های مناطق خشک و نیمه خشک ایران را تشکیل می دهند کمبود آهن قابل استفاده گیاه می باشد (۳۳).

روش های مختلفی برای رفع کمبود آهن در گیاهان پیشنهاد شده که می توان به مصرف خاکی،

محلول پاشی و یا اختلاط آهن با بذر اشاره کرد (۲۲). کاربرد مفید و مناسب انواع مختلف کودها راه حل اصلی برای اصلاح و نگهداری حاصلخیزی خاک و افزایش تولید محصولات است (۴۹). هم چنین گزارش گردیده است که کاربرد محلول پاشی سولفات آهن و کلات آهن^۱ در مقایسه با کاربرد خاکی این دو کود ماده خشک بیش تری تولید می کند (۲). به طور مشابه، کاربرد برگی و خاکی سولفات آهن مقدار کلروفیل برگ ذرت را افزایش داد (۳). گزارش گردیده که کاربرد برگی نمک آهن میزان کلروفیل a، b و کارتنوئید را در لوبیا سبز^۲ افزایش می دهد (۷). هم چنین کاربرد نانو اکسید آهن بر میزان کلروفیل a، b و کل گیاه گندم در مقایسه با شاهد افزایش معنی داری نشان می دهد (۱۹). گزارش گردیده است که نانو ذرات اکسید آهن فوق مغناطیسی^۳ که وارد گیاه سویا شده و در آن جابجا می شوند، سطوح کلروفیل را بدون ایجاد سمیت عناصر کم مصرف افزایش می دهند (۲۰). پژوهشگران مشاهده کردند با افزایش غلظت نانو آهن، عملکرد و اجزای عملکرد گندم افزایش می یابد (۴). برخی پژوهشگران نیز گزارش کردند که سطح ۵۰ میلی گرم در لیتر نانو اکسید آهن، مقدار

1- FeEDTA

2- French Bean

3- Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles

در طی دوره تنش محسوب شود (۲۹). این روش به‌عنوان یک روش سریع، ارزان و ساده برای ارزیابی پایداری غشاء سلولی در بسیاری از گیاهان مانند: سورگوم (۵۹)، سویا (۳۸)، سیب‌زمینی و گوجه‌فرنگی (۱۰)، گندم (۵۵) و جو (۳۱) مورد استفاده قرار گرفته است. تنش‌های محیطی با تغییر ساختمان غشاء از نظر کمیت و کیفیت اسیدهای چرب و پروتئین‌ها می‌تواند رشد گیاه را تحت‌تأثیر قرار دهند (۳۷). کاهش ضریب پایداری غشاء در شرایط تنش خشکی در زیتون گزارش شده است (۲۶). در پژوهشی دیگر نشان داده شد در محیط آبی خصوصیات جوانه‌زنی بذر گیاه کاج جنگلی کاهش یافته و در مقابل در محیط خاکی پارامترهای یاد شده افزایش یافته‌اند. تخریب غشای سلولی در هر دو محیط افزایش نشان داده است که به‌نظر می‌رسد، در محیط‌های آبی مسمومیت سریع‌تر و شدیدتر از محیط خاکی اتفاق می‌افتد که البته پژوهش‌های آینده برای اثبات این فرضیه الزامی است (۱). چرا که تاکنون، در پژوهش‌های انجام شده (۱۲، ۱۳، ۱۷ و ۱۸) تأثیر کودهای آهن بر غلظت آهن و همچنین عملکرد گیاه متمرکز بوده است و آسیبی که در اثر اعمال این کودها و تنش وارده به گیاه وارد می‌گردد کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. هدف این پژوهش مقایسه نحوه مصرف منابع آهن و تأثیر متقابل آن با غلظت و نوع کود کاربردی بر غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف و پایداری غشای پلاسمایی گیاه سورگوم با کمترین آسیب ممکن بر غشای پلاسمایی در هنگام ورود عناصر غذایی کم‌مصرف به درون گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش در شرایط گلخانه و بر روی گیاه *Sorghum Bicolor* (L.) Moench (سورگوم علوفه‌ای رقم اسپیدفید) به‌صورت طرح فاکتوریل در

کلروفیل برگ گیاه هندوانه را افزایش می‌دهد (۶۳). برخی پژوهش‌ها افزایش مقدار کلروفیل گیاهانی که در برابر نانوآکسید آهن قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهند (۴۸). برخی پژوهشگران بیان داشتند که نانوذرات آهن می‌توانند جایگزین مناسبی برای کودهای آهن سنتی در کشت گیاه بادام‌زمینی باشند (۵۴). در پژوهشی بر روی گیاه *Citrus maxima* (پومیلو) گزارش کردند که مصرف ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانوذرات آهن افزایش معنی‌داری در مقدار کلروفیل برگ، نسبت به شاهد (۲۳/۲ درصد) نشان داد (۲۸). در پژوهش دیگری که توسط گلشاهی و همکاران (۲۰۱۸) انجام گرفت بیان نمودند که با کاربرد نانوآکسید آهن تک‌پاش پلیمری در غلظت ۰/۵ گرم در لیتر درصد پایداری غشای پلاسمایی برگ، غلظت مس، منگنز و آهن در ریشه گیاه سورگوم افزایش معنی‌داری در مقایسه با شاهد نشان داد (۲۴). همچنین در پژوهشی دیگر بیان داشتند که با کاربرد ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر کلروفیل b در تیمار نانوآکسید آهن تک‌پاش، غلظت و جذب آهن در ریشه گیاه در تیمار نانوآکسید آهن تک‌پاش پلیمری افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد نشان دادند (۲۳). در پژوهش حاضر سعی بر آن شده که علاوه بر بررسی غلظت عناصر کم‌مصرف در ریشه و اندام هوایی گیاه، به پایداری غشای پلاسمایی آن در برابر ورود عناصر به درون آن و مقاومت گیاه در برابر تنش وارده به غشای درونی گیاه که میزان سطوح آهن کاربردی می‌باشد، توجه گردد. سالیوان یک روش سریع و کارآمد برای تعیین پایداری غشاء سلولی در سورگوم دانه‌ای را از طریق اندازه‌گیری مقدار نشت الکترولیتی قطعات برگی که در معرض شوک گرمایی قرار گرفته بودند، را ابداع نمود (۵۸). در حقیقت نشت الکترولیتی نیز می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مناسب دیگر از چگونگی آسیب‌های وارده به سلول‌های برگی

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از جمله بافت به روش هیدرومتری (۸)، پ‌هاش در گل اشباع به وسیله پ‌هاش متر (۶۱)، قابلیت هدایت الکتریکی با هدایت سنج الکتریکی (۵۰)، ظرفیت تبادل کاتیونی (۵۱)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (۶۰)، ماده آلی به روش والکلی و بلک (۶۲)، نیتروژن کل به روش کج‌دال (۴۶)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (۴۵)، غلظت آهن خاک با عصاره‌گیر DTPA (۳۵) و قرائت توسط دستگاه جذب اتمی و پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات آمونیوم (۲۷) توسط دستگاه فلیم‌فوتومتر تعیین گردید (جدول ۱).

قالب کاملاً تصادفی در سه تکرار طراحی و اجرا شد. تیمارها شامل دو سطح آهن (مصرف خاکی: ۰/۲۷۰، ۰/۴۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و محلول‌پاشی: ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم آهن در لیتر همراه با شاهد) (۱۳ و ۳۰) از ۵ منبع کودی (کلات آهن (Fe-EDTA)، سولفات آهن (FeSO₄)، نانوآهن سبز (حاوی ۹٪ آهن محلول، تهیه شده به صورت تجاری)، کلات آهن پلیمری و سولفات آهن پلیمری) بودند. خاک مورد استفاده از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری گلخانه آموزشی و تحقیقاتی دانشگاه زابل تهیه و پس از هوا خشک نمودن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برخی از

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه.

Table 1. Some of the physical and chemical characteristics of the studied soil.

Cu	Zn	Mn	Fe	K	P	N	CCE	OM	CEC	EC	pH	بافت خاک Soil Texture
(mg.kg ⁻¹)						(%)	(%)	(%)	(Cmolc ⁺ .kg ⁻¹)	(dS.m ⁻¹)		
0.55	0.5	1.31	2.32	30	12.7	0.12	20.5	0.48	9	1.82	7.77	لوم شنی Sandy Loam

کیلوگرم خاک از منبع سوپرفسفات تریپل و نیتروژن: در دو مرحله یکبار قبل از کشت و دفعه دوم چهار هفته بعد از کشت مجموعاً به مقدار ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع اوره) و همچنین عناصر کم‌مصرف (مس: ۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از سولفات مس، روی: ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از سولفات روی و منگنز: ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از سولفات منگنز) به خاک گلدان‌ها افزوده شد. برای مصرف خاکی کودهای آهن، غلظت‌های موردنظر از هر کود را قبل از کشت با خاک مخلوط کرده و به گلدان‌های سه کیلوگرمی منتقل گردید. تعداد پنج بذر سورگوم در هر گلدان در عمق حدود ۲ تا ۳ سانتی‌متری کشت گردید و گلدان‌ها تا رسیدن به حدود رطوبت ظرفیت مزرعه (۷۵٪) آبیاری شدند.

جهت آماده‌سازی نمونه‌های کلات آهن، مقداری EDTA در آب گرم حاوی محلول سود یک نرمال حل شد. در ظرفی دیگر مقداری سولفات آهن در آب گرم حاوی اسید به‌طور جداگانه حل گردید. این دو محلول را با هم مخلوط شد و به آرامی برای ۱۲ ساعت هم زده شد و سپس با آب مقطر به حجم ۱۰۰۰ میلی‌لیتر رسانده شد (۵۷). برای آماده‌سازی نمونه‌های پلیمری کلات یا نمک آهن از هر نمونه به نسبت ۱:۱ با پلیمر مخلوط گردید.

سه کیلوگرم خاک الک‌شده در کیسه‌های پلاستیکی ریخته شد. قبل از کشت بذرها، با توجه به آزمون خاک و برای جلوگیری از کمبود احتمالی عناصر، عناصر پرمصرف (پتاسیم: ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات پتاسیم، فسفر: ۷۵ میلی‌گرم بر

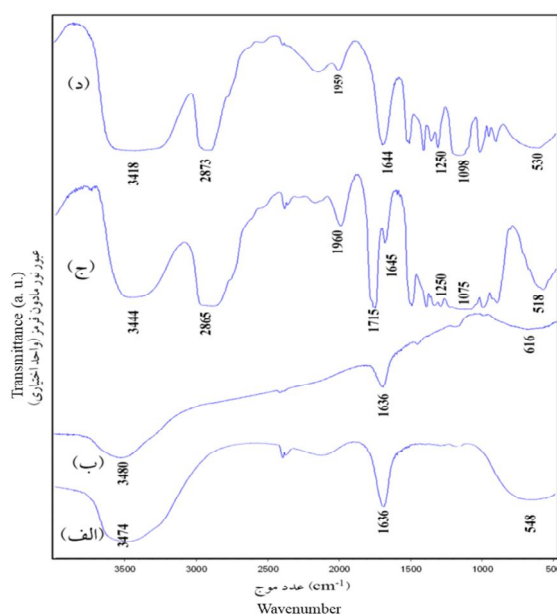
نتایج و بحث

خصوصیات نمونه‌های پلیمری: جهت تأیید وجود پلیمر در محلول دو کود کلات آهن پلیمری و سولفات آهن پلیمری، آنالیز FT-IR بر روی چهار کود تهیه شده در این آزمایش انجام گردید که نتایج این آنالیز برای کودهای سولفات آهن، کلات آهن، سولفات آهن پلیمری و کلات آهن پلیمری به ترتیب در شکل ۱ الف- د نشان داده شده است. آنالیز FT-IR به منظور مشخص کردن گروه‌های عاملی شیمیایی در ترکیبات مختلف به کار می‌رود و اساس آن جذب نور مادون قرمز توسط پیوندهای مولکول‌ها است. هر یک از پیک‌های ظاهر شده در طیف FT-IR مانند اثر انگشت برای هر مولکول منحصر به فرد می‌باشند و گروه‌های عاملی موجود در آن را نشان می‌دهند. پیک‌های موجود در ناحیه تقریبی cm^{-1} ۳۰۰۰ و ۱۶۴۰ در همه نمونه‌های کودی نمایانگر وجود آب در سطح و یا درون ساختار مولکول‌ها است. مولکول‌های پلیمر دارای پیوندهای بلند زنجیر آلکانی می‌باشند که در شکل ۱ ج و د، پیک‌های محدوده cm^{-1} ۲۸۰۰ مربوط به ارتعاش کششی پیوند کربن-هیدروژن (C-H) می‌باشد. ارتعاشات خمشی و قیچی مانند این پیوند در محدوده cm^{-1} ۱۴۵۰-۱۲۹۰ به صورت پیک‌های ظریفی در دو شکل ۱ ج و د ظاهر شده است. پیک‌های ناحیه cm^{-1} ۱۱۰۰-۱۰۶۰ مربوط به پیوند کربن-اکسیژن-کربن (C-O-C) اتری و پیک cm^{-1} ۱۲۵۰ مربوط به کربن-اکسیژن (C-O) الکلی می‌باشد. بنابراین از چهار طیف واضح است که دو کود سولفات آهن و کلات آهن (شکل الف و ب، به ترتیب) فاقد پیک‌های ذکر شده هستند و دو کود سولفات آهن پلیمری و کلات آهن پلیمری (شکل ۱ ج و د، به ترتیب) این پیک‌ها را نشان می‌دهند که بیانگر وجود پلیمر در این دو کود است.

پس از گذشت حدود ۱۰ روز از کشت، تعداد بوته‌ها در هر گلدان به ۳ عدد تقلیل یافت. آبیاری گلدان‌ها در طول دوره رشد با آب مقطر و به صورت وزنی انجام گرفت. محلول‌پاشی منابع آهن در دو مرحله (چهار برگی و دو هفته بعد از محلول‌پاشی اول) انجام شد. دو ماه بعد از کشت، اندام هوایی گیاهان از محل طوقه برداشت و هوا خشک گردید. ریشه‌ها نیز با آب مقطر شسته و به آرامی از خاک جدا شدند. اندام هوایی و ریشه‌ها در داخل آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت خشک گردید (۴۳). سپس نمونه‌ها جهت انجام تجزیه گیاه، آسیاب گردیدند و عصاره گیاهی به روش خاکسترسازی خشک آماده شد (۱۱). غلظت عناصر میکرو (آهن، منگنز، مس و روی) در عصاره‌های گیاهی از طریق دستگاه جذب اتمی شیماتزو مدل AA-670 اندازه‌گیری شد. کلروفیل کل براساس روش آرنون (۵) تعیین گردید. جهت اندازه‌گیری ضریب پایداری غشای پلاسمایی^۱، مقدار ۰/۱ گرم از بافت تر گیاه را توزین و در لوله‌های شیشه‌ای ۱۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه، یکبار به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد (C₂) و بار دیگر در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه (C₁) در حمام آب جوش قرار می‌دهیم. هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد و براساس رابطه ۱ محاسبه گردید (۵۶):

$$PMSI (\%) = (1 - (C_1/C_2)) * 100 \quad (1)$$

داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS 9.4 و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.



شکل ۱- طیف‌های FT-IR مربوط به کودهای الف) سولفات آهن، ب) کلات آهن، ج) سولفات آهن پلیمری و د) کلات آهن پلیمری.
Figure 1. FT-IR spectra related to fertilizers a) Iron sulfate, b) Iron chelate, c) Polymer iron sulfate, and d) Polymer iron chelate.

متقابل دوگانه (به‌جز نحوه مصرف و سطح) و اثرات متقابل سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر میزان پایداری غشا پلاسمایی برگ نشان می‌دهد که میزان پایداری غشا پلاسمایی برگ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۲).

خصوصیات گیاه: نتایج تجزیه واریانس در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثرات ساده و اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطوح آهن بر میزان پایداری غشا پلاسمایی ریشه و کلروفیل کل برگ در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردیده است. با توجه به نتایج تجزیه واریانس، اثرات ساده و اثرات

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثرات متقابل نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر خصوصیات فیزیولوژیکی و کیفی اندام هوایی و ریشه.

Table 2. Analysis of variance interaction between use application, iron sources and level of spraying on Physiological and qualitative characteristics in the shoot and root.

کلروفیل کل Total Chl.	میانگین مربعات Mean Square		درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of variations
	Leaf PMSI	Root PMSI		
39.9320*	440.9955*	465.5317*	1	U ^a
4.1934*	807.2657*	918.6687*	5	F ^b
3.8088*	38.5003*	319.0338*	1	C ^c
7.2962*	1.4365 ^{ns}	769.2349*	1	U*C
5.1520*	371.4026*	1293.1980*	5	U*F
1.9256*	124.1447*	830.9061*	5	C*F
3.2953*	158.5839*	571.0080*	5	U*C*F
0.0256	1.7921	14.4332	48	خطا Error
3.3428	7.2928	14.0224	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

^aنحوه مصرف، ^bمنابع آهن، ^cسطح آهن، *، ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ^{ns} غیرمعنی‌دار.

^aUse Application, ^bIron Sources, ^cIron Level, * and ** denoted significance at the 5 and 1 percent level; ns is not significant.

به تیمار نانواهن سبز می‌باشد که نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته است، اما نسبت به مصرف خاکی کودها تفاوت معنی‌داری نشان نمی‌دهد (جدول ۳). کم‌ترین میزان پایداری غشا پلاسمایی ریشه (۹/۸۷ درصد) در مصرف خاکی نانواهن سبز و در غلظت ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۳). مشخص شده است که تحت شرایط استرس، پلاسما از نخستین اندام‌هایی است که آسیب می‌بیند (۳۴). در نتیجه آسیب به غشاء سلولی، تراوانی افزایش یافته و بدین ترتیب نشت الکترولیتی از سلول باعث پژمردگی گیاه می‌شود (۶).

مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح نشان می‌دهد که بیش‌ترین درصد پایداری غشا پلاسمایی ریشه (کم‌ترین آسیب غشایی) مربوط به غلظت ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم کلات آهن (۸۶/۸۱ درصد) در مصرف خاکی کودها می‌باشد که نسبت به شاهد (۱۴/۳۲ درصد) ۵/۰۶ برابر افزایش معنی‌دار نشان داد (جدول ۳). بعد از کلات آهن، سولفات آهن پلیمری (۵۰/۵۳ درصد) در همین غلظت و نحوه مصرف نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافت (جدول ۳). در مصرف محلول‌پاشی نیز در غلظت ۰/۵ گرم در لیتر بیش‌ترین درصد پایداری غشا پلاسمایی ریشه (۳۸/۴۷ درصد) مربوط

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر پایداری غشا پلاسمایی برگ و ریشه و کلروفیل کل.

Table 3. Comparison of the mean effects of interactions between use application, iron resources and level of spraying on PMSI in shoots and roots and total chlorophyll.

کلروفیل کل total chl. (mg.g ⁻¹ fresh weight)	Leaf PMSI (%)	Root PMSI (%)	منابع آهن Iron sources	سطح آهن Iron levels	نحوه کوددهی Application methods
3.78 ^h	5.76 ⁿ	14.32 ^{fg}	شاهد (Control)	0	خاکی (Soil application)
3.25 ⁱ	16.21 ^j	86.81 ^a	کلات آهن (Iron chelate)	0.270 (mg.kg ⁻¹)	
3.44 ⁱ	19.57 ^{hi}	11.14 ^g	سولفات آهن (Iron sulfate)		
5.16 ^{fg}	28.58 ^{de}	9.87 ^g	نانواهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
2.79 ^j	17.45 ^{ij}	37.37 ^c	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
2.56 ^{jk}	2.47 ^o	50.53 ^b	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
5.55 ^{de}	15.95 ^j	29.68 ^d	کلات آهن (Iron chelate)	0.405 (mg.kg ⁻¹)	
5.65 ^d	20.17 ^{gh}	13.52 ^{fg}	سولفات آهن (Iron sulfate)		
4.97 ^e	28.13 ^{de}	29.42 ^d	نانواهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
2.51 ^k	13.54 ^k	38.87 ^c	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
5.13 ^{fg}	16.23 ^j	20.14 ^{ef}	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
3.94 ^h	5.87 ⁿ	15.19 ^{fg}	شاهد (Control)	0	محلول‌پاشی (Foliar application)
6.87 ^a	8.59 ^{lm}	14.27 ^{fg}	کلات آهن (Iron chelate)	0.25 (gr.L ⁻¹)	
5.57 ^d	8.84 ^l	37.74 ^c	سولفات آهن (Iron sulfate)		
4.97 ^e	43.06 ^a	18.84 ^f	نانواهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
7.09 ^a	22.09 ^{fg}	25.73 ^{de}	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
5.29 ^{ef}	32.98 ^b	28.53 ^d	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
4.90 ^e	27.05 ^e	16.26 ^{fg}	کلات آهن (Iron chelate)	0.5 (gr.L ⁻¹)	
6.27 ^{bc}	10.30 ^l	20.57 ^{ef}	سولفات آهن (Iron sulfate)		
6.53 ^b	24.03 ^f	38.47 ^c	نانواهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
6.08 ^c	29.54 ^{cd}	37.29 ^c	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
5.10 ^{fg}	31.48 ^{bc}	27.35 ^d	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون معنی‌دار نیست (P<0/01).

Means with the same letters in each column are not significantly different (P<0.01).

نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح در جدول ۳ نشان می‌دهد که بیشترین درصد پایداری غشا پلاسمایی برگ (کمترین آسیب غشایی) مربوط به تیمار نانواهن سبز (۴۳/۰۶ درصد) در مصرف محلول‌پاشی کودها در غلظت ۰/۲۵ گرم در لیتر می‌باشد که نسبت به شاهد (۵/۸۷ درصد)، ۶/۳۳ برابر افزایش معنی‌دار نشان داد (جدول ۳). بعد از آن، سولفات آهن پلیمری در مصرف محلول‌پاشی در همین سطح آهن قرار گرفته است (جدول ۳). در مصرف خاکی کودها نیز بیشترین درصد پایداری غشا پلاسمایی برگ (۲۸/۵۸ درصد) مربوط به تیمار نانواهن سبز در غلظت ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد که نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری نشان می‌دهد (جدول ۳). کمترین درصد پایداری غشا پلاسمایی برگ (بیشترین آسیب غشایی) مربوط به مصرف خاکی تیمار سولفات آهن پلیمری (۲/۴۷ درصد) در سطح ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم می‌باشد که نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری یافته است (جدول ۳). اساساً جذب عنصر غذایی به‌وسیله سلول‌های برگ مشابه جذب توسط سلول‌های ریشه است و مرحله اصلی جذب، عبور عنصر غذایی از غشای پلاسمایی است. انتقال آهن از غشای پلاسمایی سلول به احیای Fe^{3+} قبل از ورود به سیتوسول بستگی دارد (۱۲). بنابراین، آهن به‌صورت Fe^{2+} جذب می‌شود (۱۸) و در واقع از یک کانال ویژه در غشای پلاسمایی عبور می‌کند (۱۷). در پژوهشی که همراه با کاربرد منیزیم در کنار منابع آهن انجام شد، آسیب غشایی پلاسمایی برای سطوح آهن و نانواهن پایین بود و کمترین میزان آسیب با ۲۷/۹ درصد در سطح ۰/۲۵ گرم در لیتر نانواهن به همراه منیزیم مشاهده شد (۱۳).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح (جدول ۳) بیشترین میزان کلروفیل کل در مصرف محلول‌پاشی ۰/۲۵ گرم در لیتر تیمار کلات آهن پلیمری (۷/۰۹

میلی‌گرم در گرم) مشاهده شد که نسبت به شاهد (۳/۹۴ میلی‌گرم در گرم) ۷۹/۹۵ درصد افزایش معنی‌داری یافته بود. همچنین بعد از آن در مصرف محلول‌پاشی ۰/۲۵ گرم در لیتر، بیشترین میزان کلروفیل کل در تیمار کلات آهن (۶/۸۷ میلی‌گرم در گرم) مشاهده شد. کمترین میزان کلروفیل کل در مصرف خاکی ۰/۴۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم تیمار کلات آهن پلیمری مشاهده شد که نسبت به شاهد تفاوت معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). نتایج برخی پژوهشگران نیز همراستا با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد به‌طوری‌که با محلول‌پاشی سولفات آهن ۱٪ پلیمری بر روی گیاه انگور افزایش معنی‌داری در مقدار کلروفیل و در نتیجه افزایش سبزی گیاه، نسبت به شاهد را گزارش کردند (۴۷). محلول‌پاشی ۶ گرم در لیتر نانو آهن بیشترین مقدار کلروفیل (45.2 SPAD) را نشان داد، اما هیچ‌گونه تفاوت معنی‌داری بین سایر تیمارهای آهن مشاهده نشد (۴۴).

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ نشان می‌دهد که اثرات ساده و متقابل دوگانه و سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر میزان غلظت آهن و روی در اندام هوایی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید ولی بر میزان غلظت مس اندام هوایی معنی‌دار نبود. با توجه به اثرات ساده (به‌جز نحوه مصرف) و متقابل دوگانه و سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح، میزان غلظت منگنز در اندام هوایی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۴). نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ نشان می‌دهد که اثرات متقابل سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر میزان جذب و محتوای کل عناصر آهن، منگنز و روی در اندام هوایی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید ولی اثرات متقابل دوگانه نحوه مصرف و منابع آهن و همچنین سطح و منابع آهن بر میزان جذب و محتوای کل عنصر مس در اندام هوایی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثرات متقابل نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر غلظت و جذب عناصر میکرو در اندام هوایی.
Table 4. Analysis of variance interaction between use application, iron sources and level of spraying on the concentration and absorption of micronutrients in the shoots.

میانگین مربعات Mean Square				درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of variations
غلظت روی در اندام هوایی Shoot Zn con.	غلظت منگنز در اندام هوایی Shoot Mn con.	غلظت آهن در اندام هوایی Shoot Fe con.	غلظت مس در اندام هوایی Shoot Cu con.		
252.8625*	0.2312 ^{ns}	5892.6368*	0.0006 ^{ns}	1	U ^a
82.1881*	2.8088*	1478.4236*	1.1390 ^{ns}	5	F ^b
241.4503*	1.6320*	837.6324*	0.2016 ^{ns}	1	C ^c
89.9364*	0.8712*	1109.3620*	0.2800 ^{ns}	1	U*C
91.4094*	6.3949*	438.2504*	0.5072 ^{ns}	5	U*F
131.9504*	1.7184*	1106.8197*	0.2866 ^{ns}	5	C*F
93.5101*	0.1678*	371.7833*	0.0529 ^{ns}	5	U*C*F
0.2507	0.0157	0.3578	0.2468	48	خطا Error
4.6251	2.7136	1.5403	24.3598	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

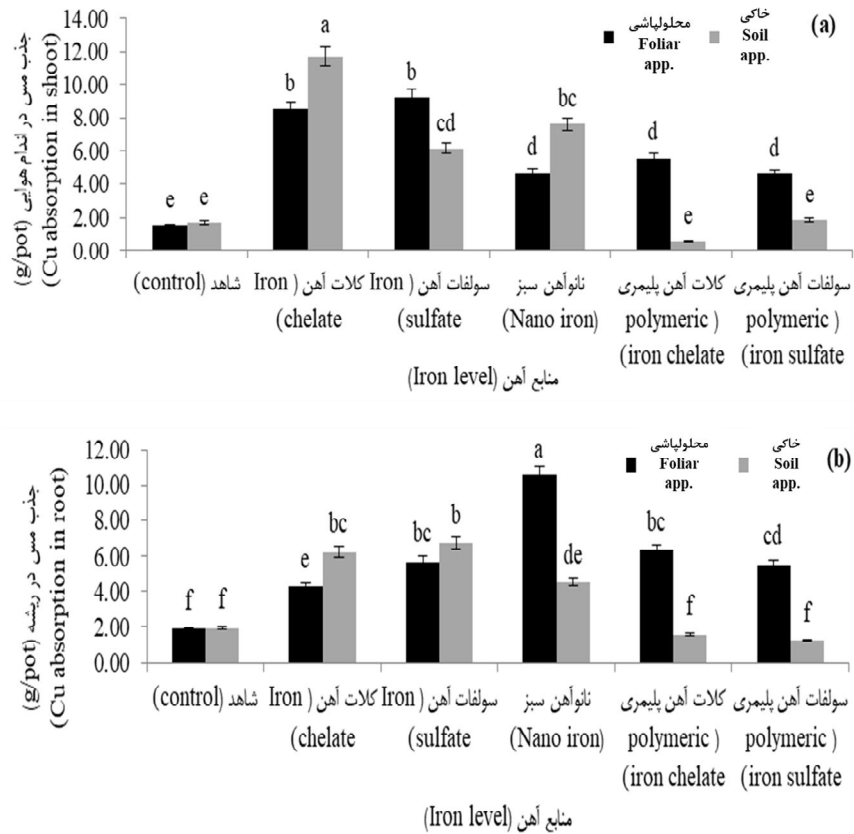
میانگین مربعات Mean Square				درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of variations
جذب روی در اندام هوایی Shoot Zn uptake	جذب منگنز در اندام هوایی Shoot Mn uptake	جذب آهن در اندام هوایی Shoot Fe uptake	جذب مس در اندام هوایی Shoot Cu uptake		
6623.6213*	157.9753*	116073.6501*	10.4196 ^{ns}	1	U ^a
2539.1158*	390.4288*	18501.1928*	126.2049*	5	F ^b
544.9400*	63.0377*	273.1564 ^{ns}	24.1165 ^{ns}	1	C ^c
2786.8089*	4.6157 ^{ns}	377.6668 ^{ns}	7.9800 ^{ns}	1	U*C
2318.6732*	51.5146*	19050.8630*	34.7802*	5	U*F
2675.5444*	38.8047*	8815.8514*	28.3524*	5	C*F
1964.6269*	28.7565*	12614.0732*	4.4743 ^{ns}	5	U*C*F
14.9872	1.1561	84.9592	2.7119	48	خطا Error
13.4436	9.8952	9.4607	22.9848	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

^a نحوه مصرف، ^b منابع آهن، ^c سطح آهن، *، ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ^{ns} غیر معنی دار.

^aUse Application, ^bIron Sources, ^cIron Level, * and ** denoted significance at the 5 and 1 percent level; ns is not significant.

افزایش معنی داری یافتند (شکل ۲a). در ریشه گیاه نیز مصرف خاکی سولفات آهن دومین جایگاه را در مقایسه با شاهد به خود اختصاص داد (شکل ۲b). کمترین میزان جذب و محتوای کل عنصر مس در اندام هوایی و ریشه گیاه نیز به ترتیب در تیمارهای کلات آهن پلیمری (۰/۵۶ گرم در گلدان) و سولفات آهن پلیمری (۱/۲۲ گرم در گلدان) در مصرف خاکی مشاهده شد که نسبت به شاهد تفاوت معنی داری نشان ندادند (شکل ۲a و ۲b).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه نحوه مصرف و منابع آهن (شکل ۲a و ۲b)، بیشترین میزان جذب و محتوای کل عنصر مس در اندام هوایی (۱۱/۷۳ گرم در گلدان) و ریشه (۱۰/۵۴ گرم در گلدان) به ترتیب در مصرف خاکی و محلول پاشی در تیمارهای کلات آهن و نانواهن سبز مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش معنی داری داشتند. بعد از آن دو تیمار سولفات آهن و کلات آهن در مصرف محلول پاشی بیشترین میزان جذب مس را در اندام هوایی گیاه نشان دادند که نسبت به شاهد



شکل ۲- نتایج مقایسه میانگین اثرات دوگانه منابع آهن و نحوه مصرف بر جذب مس در اندام هوایی (a) و ریشه (b).

Figure 2. Comparison of the mean effects of interactions between iron resources and use application on absorption of Cu in shoots (a) and roots (b).

پلی آکریل آمید و پروپن آمید) پتانسیل بالقوه‌ای در افزایش قابلیت دسترسی سایر عناصر غذایی برای گیاه دارند (۴۲). در این آزمایش گلخانه‌ای، گزارش شده است که برخی منابع هیدراته پلیمری، محیطی کوچک درون منطقه ریشه فراهم می‌کنند که سولفات آهن را در مقایسه با کاربرد بدون پلیمر آن به شکل قابل‌دسترس برای گیاه نگه می‌دارد (۴۰). فرض بر این است که گنجاندن کود در یک گروه از پلیمر هیدراته انتشار عناصر غذایی را محدود کرده و واکنش‌های خاک را که ممکن است قابلیت دسترسی عناصر غذایی را برای گیاهان کاهش دهند به تأخیر می‌اندازد (۴۱). استفاده از پلیمرها جهت عرضه عناصر غذایی ممکن است بتواند شرایط دقیق‌تری را برای تأمین نیاز گیاه فراهم آورد، درحالی‌که باید حفاظت از کیفیت محیط زیست و همچنین حفظ منابع طبیعی

با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح در جدول‌های ۵ و ۶، بیش‌ترین غلظت و میزان جذب آهن اندام هوایی به‌ترتیب در تیمارهای سولفات آهن پلیمری (۸۴/۴۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کلات آهن پلیمری (۸۴/۴۲ گرم در گلدان) در سطح ۰/۲۵ گرم در لیتر مصرف محلول‌پاشی مشاهده شد که نسبت به شاهد (به‌ترتیب ۲۸/۲۲ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۲۱/۹۶ گرم در گلدان) ۱/۹۹ و ۱۱/۲۲ برابر افزایش معنی‌داری نشان دادند. همچنین تیمارهای کلات آهن پلیمری (۷۷/۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم) و سولفات آهن پلیمری (۲۴۷/۳۲ گرم در گلدان) نیز در همین سطح محلول‌پاشی، به‌ترتیب بیش‌ترین میزان افزایش معنی‌دار غلظت و جذب آهن در اندام هوایی گیاه را نشان دادند (جدول ۵ و ۶). پلیمرهای هیدروفیلیک

می‌باشد (۱۶ و ۴۲). با توجه به جدول ۶، میزان محتوای جذب آهن در سطح ۰/۴۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم مصرف خاکی در تیمار کلات آهن معادل میزان ۹۷/۹۶ گرم در گلدان می‌باشد که نسبت به شاهد افزایش قابل توجهی یافته است و با توجه به این افزایش، کاهش غلظت آهن در اندام هوایی گیاه با در نظر گرفتن اثر رقت قابل توجیه می‌باشد. اما کم‌ترین میزان جذب آهن در اندام هوایی مربوط به سطح ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مصرف خاکی در تیمار کلات آهن پلیمری (۱۷/۳۷ گرم در گلدان) می‌باشد که تفاوت معنی‌داری با شاهد ندارد (جدول ۶).

لحاظ گردد (۴۰). یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج کار سایر پژوهشگران نیز هم‌خوانی دارد به طوری که محلول‌پاشی گندم با کود آهن باعث افزایش معنی‌دار مقدار آهن دانه گندم گردید (۶۵).

کم‌ترین غلظت آهن اندام هوایی مربوط به سطح ۰/۴۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم مصرف خاکی در تیمار کلات آهن (۱۷/۳۶ میلی‌گرم کیلوگرم) بود که نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری یافت (جدول ۵). این کاهش غلظت آهن می‌تواند مربوط به افزایش ناگهانی رشد اندام هوایی گیاه (از ۰/۷۱ به ۵/۶۳ گرم در گلدان رسیده) باشد که توسط اثر رقت قابل توجیه

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر غلظت آهن، منگنز و روی در اندام هوایی.

Table 5. Comparison of the mean effects of interactions between use application, iron resources and level of spraying on concentration of Fe, Mn and Zn in shoots.

Zn	Mn	Fe	منابع آهن Iron sources	سطح آهن Iron levels	نحوه کوددهی Application methods
mg.kg ⁻¹					
9.27 ^{efgh}	4.21 ^{gh}	27.27 ^l	شاهد (Control)	0	خاکی (Soil application)
9.09 ^{efgh}	4.26 ^{gh}	39.00 ^g	کلات آهن (Iron chelate)	0.270 (mg.kg ⁻¹)	
8.91 ^{efgh}	3.79 ⁱ	20.79 ⁿ	سولفات آهن (Iron sulfate)		
8.77 ^{fgh}	5.73 ^b	31.42 ^j	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
10.88 ^d	5.47 ^c	37.63 ^h	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
11.05 ^d	6.21 ^a	20.21 ⁿ	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
9.71 ^{ef}	3.42 ^j	17.36 ^p	کلات آهن (Iron chelate)	0.405 (mg.kg ⁻¹)	
6.95 ^{jk}	3.26 ⁱ	18.68 ^o	سولفات آهن (Iron sulfate)		
7.43 ^{jk}	3.79 ⁱ	24.63 ^m	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
7.78 ^{ji}	5.73 ^b	25.58 ^m	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
8.62 ^{hi}	6.16 ^a	66.63 ^c	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
8.74 ^{gh}	4.63 ^{ef}	28.22 ^{kl}	شاهد (Control)	0	محلول‌پاشی (Foliar application)
6.75 ^k	4.42 ^{fg}	28.89 ^k	کلات آهن (Iron chelate)	0.25 (gr.L ⁻¹)	
13.41 ^b	4.52 ^f	31.58 ^j	سولفات آهن (Iron sulfate)		
10.99 ^d	5.21 ^d	33.00 ⁱ	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
15.30 ^a	4.16 ^h	77.52 ^b	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
8.68 ^h	4.58 ^{ef}	84.42 ^a	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
12.56 ^c	5.05 ^d	39.36 ^g	کلات آهن (Iron chelate)	0.5 (gr.L ⁻¹)	
9.67 ^{efg}	4.79 ^e	58.94 ^e	سولفات آهن (Iron sulfate)		
9.84 ^e	6.21 ^a	60.94 ^d	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
8.34 ^{hi}	3.21 ^j	44.58 ^f	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
9.05 ^{efgh}	3.79 ⁱ	58.31 ^e	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون معنی‌دار نیست (P<۰/۰۱).

Means with the same letters in each column are not significantly different (P<0.01).

نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح در جدول‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهد کم‌ترین میزان غلظت و جذب منگنز در اندام هوایی به ترتیب در مصرف محلول‌پاشی و خاکی منابع آهن در سطوح ۰/۵ گرم در لیتر و ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم تیمار کلات آهن پلیمری (۳/۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۱/۰۷ گرم در گلدان) مشاهده گردید که نسبت به شاهد ۳۰/۶۷ و ۶۶/۰۳ درصد کاهش معنی‌داری یافته‌اند. در پژوهشی که توسط برخی از پژوهشگران بر روی گیاه سویا صورت گرفته است کوددهی آهن مقدار منگنز برگ گیاه سویا را کاهش داد به طوری که این کاهش منگنز در ارتباط با کاهش رشد سویا بود (۵۲). در پژوهشی دیگر نیز کاهش مقدار منگنز در اندام هوایی گیاه سورگوم علوفه‌ای با کوددهی تیمارهای آهن گزارش گردیده است (۲۴). نتایج سایر پژوهشگران نیز هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد (۲۴ و ۵۲).

بیش‌ترین غلظت و جذب منگنز در اندام هوایی به ترتیب در مصرف خاکی و محلول‌پاشی تیمارهای سولفات آهن پلیمری (۶/۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) و کلات آهن (۲۴/۰۶ گرم در گلدان) در سطوح آهن ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۰/۵ گرم در لیتر می‌باشد که نسبت به شاهد (۴/۲۱ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۲/۹۰ گرم در گلدان) ۴۷/۵۰ درصد و ۷/۳ برابر افزایش معنی‌دار یافته‌اند (جدول‌های ۵ و ۶). سایر پژوهشگران نیز نتایجی مشابه با نتایج پژوهش حاضر گزارش کردند (۱۵). بیش‌ترین میزان عنصر منگنز در اندام هوایی گیاه کاهو در واریته آیس‌برگ^۱ و تیمار نانوکلات آهن مشاهده شد که این میزان عنصر منگنز در برگ‌ها به طور معنی‌داری تحت تأثیر واریته گیاه و برهمکنش آن‌ها با منابع آهن قرار گرفته است (۵۳).

بیش‌ترین غلظت و جذب روی در اندام هوایی با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح (جدول‌های ۵ و ۶)

در تیمارهای کلات آهن پلیمری (به ترتیب ۱۵/۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۱۲۲/۶ گرم در گلدان) در سطح ۰/۲۵ گرم در لیتر در مصرف محلول‌پاشی مشاهده شد که به ترتیب نسبت به شاهد (۸/۷۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۶/۷۵ گرم در گلدان) ۷۵/۰۵ درصد و ۱۷/۱۶ برابر افزایش معنی‌دار نشان دادند. در بین منابع آهن که به صورت خاکی مصرف گردیدند بیش‌ترین میزان غلظت و جذب روی در اندام هوایی به ترتیب در تیمارهای سولفات آهن پلیمری و کلات آهن در سطوح آهن ۰/۲۷۰ و ۰/۴۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده گردید (جدول‌های ۵ و ۶). پژوهشگران نشان دادند که میزان عناصر روی و آهن برگ‌ها توسط واریته گیاه و برهمکنش آن‌ها با منابع آهن به طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار گرفته‌اند و بیش‌ترین میزان عنصر روی در اندام هوایی گیاه کاهو در واریته آیس‌برگ و تیمار نانوکلات آهن مشاهده گردید (۵۳). این نتایج هم‌راستا با یافته‌های پژوهش حاضر می‌باشد.

کم‌ترین غلظت روی (۶/۷۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) در اندام هوایی گیاه در مصرف محلول‌پاشی مربوط به تیمار کلات آهن و در سطح ۰/۲۵ گرم در لیتر مشاهده شد که نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۵). این کاهش احتمالاً به دلیل افزایش رشد اندام هوایی گیاه نسبت به شاهد (از ۰/۷۱ به ۲/۱۸ گرم در گلدان) می‌باشد (۲۳). با توجه به جدول ۶، میزان محتوای جذب عنصر روی در سطح ۰/۲۵ گرم در لیتر، در مصرف محلول‌پاشی در تیمار کلات آهن معادل میزان ۱۴/۸۳ گرم در گلدان می‌باشد که نسبت به شاهد افزایش یافته است و با توجه به این افزایش در میزان جذب کل عنصر روی، کاهش در غلظت روی اندام هوایی گیاه با در نظر گرفتن اثر رقت قابل توجهی می‌باشد. اما کم‌ترین میزان جذب روی در اندام هوایی مربوط به سطح ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مصرف خاکی در تیمار کلات آهن پلیمری (۲/۱۲ گرم در گلدان) می‌باشد که تفاوت

احتمالاً به دلیل اثر رقت بوده که با افزایش رشد و همچنین اثر آنتاگونیسمی جذب بالای آهن نسبت به جذب روی و منگنز توسط گیاه در ارتباط می‌باشد (۴۲). براساس نتایج تجزیه واریانس اثرات ساده و متقابل دوگانه و سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح، غلظت مس اندام هوایی گیاه سورگوم تفاوت معنی‌داری نشان نداد (جدول ۴).

معنی‌داری با شاهد ندارد (جدول ۶). گزارش گردیده است زمانی که منحصراً از FeEDDHA استفاده می‌گردد غلظت روی در برگ و میوه درخت نارنگی کاهش می‌یابد (۶۶). پژوهشگران بیان داشتند که جذب منگنز و روی در تمامی تیمارهای سولفات آهن پلیمری^۱ مشابه هست تنها در تیمار FeEDDHA میزان جذب منگنز و روی از همه کم‌تر می‌باشد که

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر جذب عناصر آهن، منگنز و روی در اندام هوایی.

Table 6. Comparison of the mean effects of interactions between use application, iron resources and level of spraying in absorption of Fe, Mn and Zn of micronutrients in shoots.

Zn	Mn	Fe	منابع آهن Iron sources	سطح آهن Iron levels	نحوه کوددهی Application methods
g.pot ⁻¹					
5.89 ^{kl}	3.15 ^j	21.57 ^{lm}	شاهد (Control)	0	خاکری (Soil application)
33.59 ^e	15.70 ^d	143.67 ^e	کلات آهن (Iron chelate)	0.270 (mg.kg ⁻¹)	
19.36 ^{ghi}	8.23 ⁱ	45.18 ^k	سولفات آهن (Iron sulfate)		
27.95 ^{ef}	18.26 ^{bc}	100.05 ^g	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
2.12 ^l	1.07 ^k	17.37 ^{lm}	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
4.75 ^{kl}	2.66 ^{jk}	28.59 ^l	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
54.80 ^d	19.28 ^b	97.96 ^{gh}	کلات آهن (Iron chelate)	0.405 (mg.kg ⁻¹)	
25.90 ^{fg}	12.19 ^{fg}	69.76 ^{ij}	سولفات آهن (Iron sulfate)		
32.47 ^{ef}	16.56 ^{cd}	107.63 ^{fg}	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
5.14 ^{kl}	3.79 ^j	26.91 ^{lm}	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
11.84 ^{jk}	8.45 ⁱ	27.74 ^l	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
6.75 ^{kl}	2.90 ^{jk}	21.96 ^{lm}	شاهد (Control)	0	مخول‌پاشی (Foliar application)
14.83 ^{ij}	11.05 ^{gh}	63.24 ^l	کلات آهن (Iron chelate)	0.25 (gr.L ⁻¹)	
88.24 ^b	18.06 ^{bc}	119.06 ^f	سولفات آهن (Iron sulfate)		
27.86 ^{ef}	15.74 ^d	83.65 ^{hi}	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
122.26 ^a	11.12 ^{gh}	268.43 ^a	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
25.41 ^{fgh}	11.10 ^{gh}	247.32 ^b	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
68.41 ^c	24.06 ^a	214.24 ^c	کلات آهن (Iron chelate)	0.5 (gr.L ⁻¹)	
28.84 ^{ef}	13.49 ^{ef}	175.70 ^d	سولفات آهن (Iron sulfate)		
27.99 ^{ef}	14.81 ^{de}	173.19 ^d	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)		
18.75 ^{hi}	9.34 ^{hi}	100.18 ^g	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
25.73 ^{fg}	13.00 ^{efg}	165.61 ^d	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون معنی‌دار نیست ($P < 0.01$).

Means with the same letters in each column are not significantly different ($P < 0.01$).

غلظت مس در ریشه معنی‌دار گردید (جدول ۷). نتایج تجزیه واریانس در جدول ۷ نشان می‌دهد که اثرات متقابل سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر میزان جذب و محتوای کل عناصر آهن، منگنز و روی در ریشه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردیده است ولی اثرات متقابل دوگانه نحوه مصرف و منابع آهن و هم‌چنین سطح و منابع آهن بر میزان جذب و محتوای کل عنصر مس در ریشه در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود.

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۷ نشان می‌دهد که اثرات ساده و اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر میزان غلظت آهن و روی در ریشه در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید. هم‌چنین غلظت منگنز در ریشه نیز در سطح احتمال ۵ درصد در اثرات ساده (به‌جز نحوه مصرف) و اثرات دوگانه (به‌جز نحوه مصرف و سطح) معنی‌دار شد (جدول ۷). نتایج تجزیه واریانس اثرات ساده نحوه مصرف و اثرات متقابل دوگانه نحوه مصرف و منابع آهن نیز در سطح احتمال ۵ درصد بر میزان

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس اثرات متقابل نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر غلظت و جذب عناصر میکرو در ریشه.

Table 7. Analysis of variance interaction between use application, iron sources and level of spraying on the concentration and absorption of micronutrients in the roots.

میانگین مربعات Mean Square				درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of variations
غلظت روی در ریشه Root Zn con.	غلظت منگنز در ریشه Root Mn con.	غلظت آهن در ریشه Root Fe con.	غلظت مس در ریشه Root Cu con.		
275.9683*	7.8540 ^{ns}	40981.9364*	11.8179*	1	U ^a
1064.4255*	164.6635*	36150.2002*	0.2262 ^{ns}	5	F ^b
68.2501*	95.6805*	42678.7328*	1.5458 ^{ns}	1	C ^c
699.7540*	35.7012 ^{ns}	103934.5627*	0.0415 ^{ns}	1	U*C
1339.0009*	115.0681*	61503.1366*	4.0247*	5	U*F
958.3280*	27.8543*	95576.6733*	1.1713 ^{ns}	5	C*F
461.4778*	102.4125*	136267.0684*	0.6914 ^{ns}	5	U*C*F
0.2498	3.3709	0.329	0.2543	48	خطا Error
3.1199	7.8756	0.0827	17.5746	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

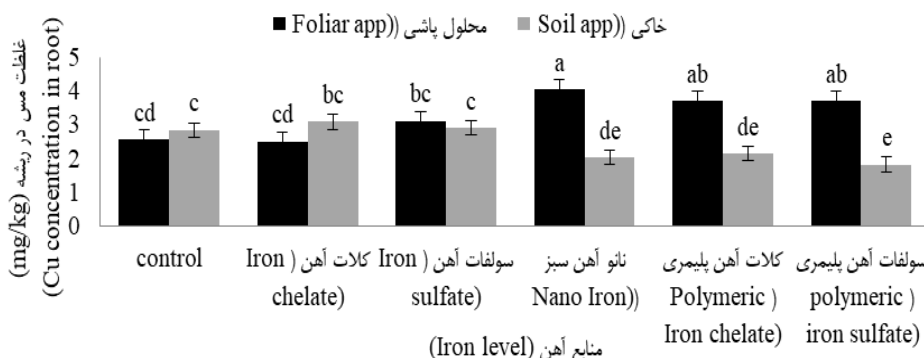
میانگین مربعات Mean Square				درجه آزادی Degrees of freedom	منابع تغییرات Sources of variations
جذب روی در ریشه Root Zn uptake	جذب منگنز در ریشه Root Mn uptake	جذب آهن در ریشه Root Fe uptake	جذب مس در ریشه Root Cu uptake		
97.9766 ^{ns}	802.0012*	632158.29*	72.9430*	1	U ^a
7495.1257*	3661.0389*	3150670.75*	49.5891*	5	F ^b
367.4308*	5.6672 ^{ns}	24797.27 ^{ns}	1.3420 ^{ns}	1	C ^c
2264.5328*	145.0672 ^{ns}	371276.37*	0.0177 ^{ns}	1	U*C
4936.4174*	1503.1168*	1116779.92*	34.6512*	5	U*F
5929.5226*	471.1856*	448718.43*	12.8765*	5	C*F
3547.0004*	387.7157*	255647.72*	3.4370 ^{ns}	5	U*C*F
9.9398	10.1966	7507.87	0.8455	48	خطا Error
10.7072	8.8407	7.9936	19.5451	-	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)

^a نحوه مصرف، ^b منابع آهن، ^c سطح آهن، *، ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ^{ns} غیرمعنی‌دار.

^aUse Application, ^bIron Sources, ^cIron Level, * and ** denoted significance at the 5 and 1 percent level; ns is not significant.

تیمار کلات آهن دیده شد. این نتایج با نتایج بروسچات و موره (۲۰۰۴) همخوانی دارد. آنها نشان دادند که همواره کلات‌های FeEDDHA و FeEDTA مقدار مس برگ گل‌های جعفری آفریقایی را افزایش می‌دهند، اما سایر منابع آهن اثر ثابت و منسجمی بر روی مقدار مس برگ نداشتند (۹). کم‌ترین میزان غلظت مس در ریشه گیاه در تیمار سولفات آهن پلیمری (۱/۸۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) در مصرف خاکی مشاهده شد که نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری یافته است (شکل ۳).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه نحوه مصرف و منابع آهن (شکل ۳)، بیش‌ترین غلظت مس در ریشه (۴/۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) به‌صورت محلول‌پاشی در تیمار نانوآهن سبز مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته است. بعد از آن دو تیمار کلات آهن پلیمری و سولفات آهن پلیمری در مصرف محلول‌پاشی بیش‌ترین میزان مس را در ریشه گیاه نشان دادند که نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته‌اند (شکل ۳). در مصرف خاکی نیز بیش‌ترین افزایش مقدار مس در

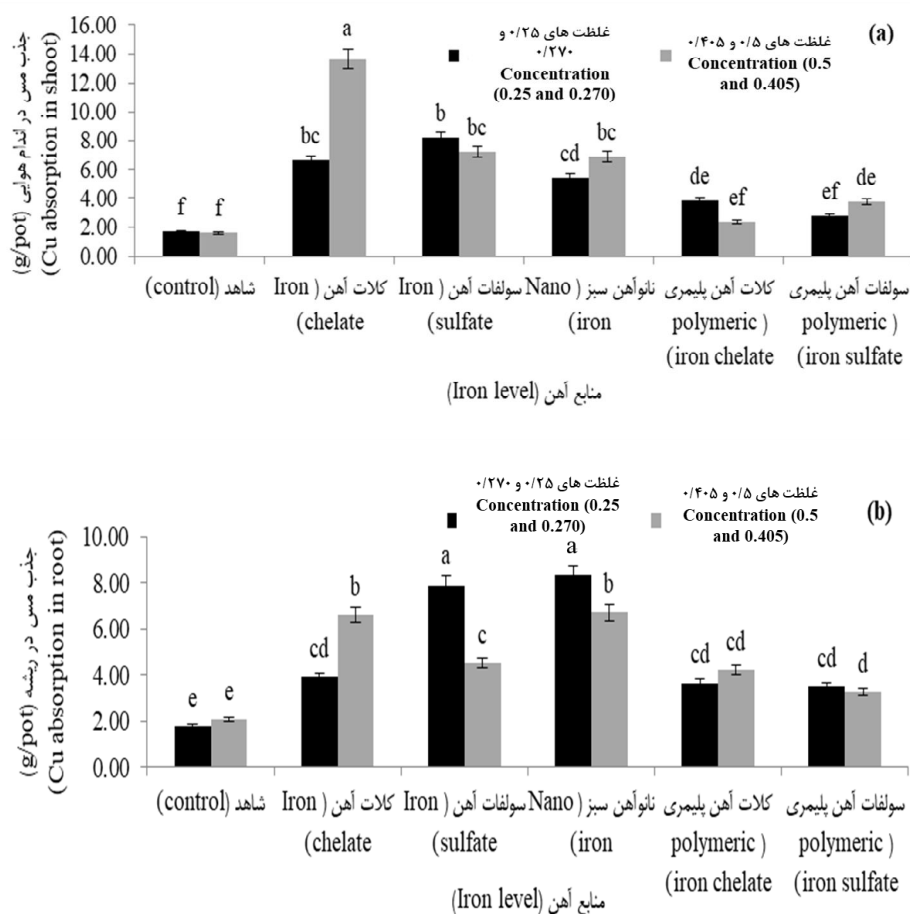


شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین اثرات دوگانه منابع آهن و نحوه مصرف بر غلظت مس ریشه.

Figure 3. Comparison of the mean effects of interactions between iron resources and use application of spraying on concentration of Cu in roots.

بیش‌ترین میزان جذب مس را در اندام هوایی گیاه نشان داد که نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته است (شکل ۴a). در ریشه گیاه نیز سطوح پایین تیمار سولفات آهن دومین جایگاه را در مقایسه با شاهد به خود اختصاص داده است (شکل ۴b). کم‌ترین میزان جذب و محتوای کل عنصر مس در اندام هوایی و ریشه گیاه نیز در تیمار شاهد مشاهده شد (شکل ۴a و ۴b).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه غلظت و منابع آهن (شکل ۴a و ۴b)، بیش‌ترین میزان جذب و محتوای کل عنصر مس در اندام هوایی (۱۳/۶۲ گرم در گلدان) و ریشه (۸/۳۵ گرم در گلدان) به‌ترتیب در سطوح بالا (غلظت‌های ۰/۵ و ۰/۴۰۵) و سطوح پایین (غلظت‌های ۰/۲۵ و ۰/۲۷۰) در تیمارهای کلات آهن و نانوآهن سبز مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته‌اند. بعد از آن تیمار سولفات آهن در سطوح پایین



شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین اثرات دوگانه غلظت و منابع آهن بر جذب مس در اندام هوایی (a) و ریشه (b).

Figure 4. Comparison of the mean effects of interactions between iron resources and Concentration on absorption of Cu in shoots (a) and roots (b).

می‌دهد. هم‌چنین در مصرف خاکی تیمارهای کلات آهن پلیمری و کلات آهن نیز در سطوح ۰/۲۷۰ و ۰/۴۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم، به‌ترتیب بیش‌ترین غلظت و جذب آهن در ریشه نسبت به شاهد مشاهده شد. برخی پژوهشگران گزارش کردند که کاربرد کلات آهن سبب افزایش غلظت و جذب کل آهن در ۱۲ ژنوتیپ گیاه سویا می‌شود (۲۱).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه در جدول‌های ۸ و ۹، بیش‌ترین غلظت و جذب آهن در ریشه (به‌ترتیب ۹۰۹/۸۹ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۲۲۰۹/۹۸ گرم در گلدان) در سطح آهن ۰/۵ گرم در لیتر محلول‌پاشی، به‌ترتیب در تیمارهای سولفات آهن پلیمری و نانو آهن سبز نسبت به شاهد (به‌ترتیب ۶۷۷/۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۵۵۰/۵۱ گرم در گلدان) می‌باشد که افزایش معنی‌داری را نشان

جدول ۸- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر غلظت آهن، منگنز و روی در ریشه.

Table 8. Comparison of the mean effects of interactions between use application, iron resources and level of spraying on concentration of Fe, Mn and Zn in roots.

Zn	Mn	Fe	منابع آهن Iron sources	سطح آهن Iron levels	نحوه کوددهی Application methods	
mg.kg ⁻¹						
7.23 ^k	19.90 ^{fg}	676.60 ^{no}	شاهد (Control)	0	خاکی (Soil application)	
9.32 ^j	20.15 ^{fgh}	476.79 ^r	کلات آهن (Iron chelate)	0.270 (mg.kg ⁻¹)		
21.71 ^e	26.31 ^{cd}	745.68 ^k	سولفات آهن (Iron sulfate)			
9.56 ^{gh}	26.68 ^{cd}	823.31 ^g	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)			
10.15 ^g	26.94 ^{cd}	863.21 ^c	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)			
4.52 ^{nm}	20.58 ^{fgh}	352.73 ^v	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)			
5.85 ^l	28.05 ^{bc}	845.42 ^e	کلات آهن (Iron chelate)			0.405 (mg.kg ⁻¹)
7.78 ^{ik}	18.26 ^{hi}	667.26 ^p	سولفات آهن (Iron sulfate)			
57.83 ^a	19.05 ^{ghi}	599.10 ^q	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)			
3.91 ⁿ	21.26 ^{efgh}	461.36 ^s	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)			
4.94 ^m	28.52 ^{bc}	851.73 ^d	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)			
6.89 ^k	19.94 ^{fg}	677.15 ⁿ	شاهد (Control)	0	محلول پاشی (Foliar application)	
45.98 ^b	22.79 ^{ef}	798.21 ⁱ	کلات آهن (Iron chelate)	0.25 (gr.L ⁻¹)		
28.24 ^c	24.31 ^{de}	753.31 ^j	سولفات آهن (Iron sulfate)			
12.41 ^f	27.94 ^{bc}	844.31 ^f	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)			
8.51 ^{ji}	19.00 ^{ghi}	735.21 ^l	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)			
10.36 ^g	39.00 ^a	871.73 ^b	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)			
36.43 ^d	12.47 ^j	384.84 ^u	کلات آهن (Iron chelate)			0.5 (gr.L ⁻¹)
9.23 ^{hi}	16.58 ⁱ	448.00 ^t	سولفات آهن (Iron sulfate)			
10.47 ^g	28.31 ^{bc}	812.94 ^h	نانو آهن سبز (Nano iron, 9% Fe)			
10.30 ^g	22.36 ^{efg}	700.05 ^m	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)			
9.84 ^{gh}	31.05 ^b	909.89 ^a	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)			

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون معنی‌دار نیست ($P < 0.01$).

Means with the same letters in each column are not significantly different ($P < 0.01$).

آن، غلظت آهن در گیاه را بهبود می‌بخشد. بخشی از این بهبود ناشی از جذب آسان‌تر و سریع‌تر آهن توسط اندام‌ها در روش محلول‌پاشی در مقایسه با روش خاکی کاربرد آن می‌باشد (۳۹). در پژوهشی دیگر، به‌طور قابل‌توجهی، مقدار جذب آهن در سطح آهن ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نانوذرات اکسید آهن نسبت به ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر این نانوذرات کم‌تر می‌باشد، که نشان‌دهنده این احتمال است که نانوذرات اکسید آهن

کم‌ترین غلظت و جذب آهن در ریشه نیز در تیمارهای سولفات آهن پلیمری (به‌ترتیب ۳۵۲/۷۳ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۶۶/۶۸ گرم در گلدان) در مصرف خاکی منابع آهن در سطح آهن ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده گردید که نسبت به شاهد ۴۷/۸۶ و ۸۵/۴۵ درصد کاهش معنی‌دار یافته است (جدول‌های ۸ و ۹). گزارش شده که کاربرد آهن به‌صورت محلول‌پاشی در مقایسه با کاربرد خاکی

در غلظت‌های بالا می‌توانند به راحتی تشکیل خوشه دهند و سبب بسته شدن خلل و فرج دیواره سلولی در گیاه شوند (۴۸)، که مقدار جذب نانوذرات را کاهش می‌دهد (۲۸).

کم‌ترین غلظت منگنز در ریشه در مصرف محلول‌پاشی کلات آهن (۱۲/۴۷ میلی‌گرم در کیلوگرم) در سطح آهن ۰/۵ گرم در لیتر مشاهده گردید که نسبت به شاهد (۱۹/۹۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) ۳۷/۴۶ درصد کاهش معنی‌دار یافت (جدول ۸). دلیل کاهش غلظت منگنز می‌تواند مربوط به افزایش ناگهانی رشد (افزایش وزن خشک ریشه از ۰/۵۱ در شاهد به ۲/۳۵ گرم در گلدان در تیمار کلات آهن) در ریشه گیاه باشد که توسط اثر رقت قابل‌توجهی می‌باشد (۱۶ و ۴۲). با توجه به جدول ۹، میزان محتوای جذب عنصر منگنز در مصرف محلول‌پاشی کلات آهن در سطح آهن ۰/۵ گرم در لیتر معادل ۲۹/۲۸ گرم در گلدان مشاهده گردید که نسبت به شاهد (۱۵/۸۵ گرم در گلدان) افزایش معنی‌داری یافت و با توجه به این‌که افزایش در میزان جذب کل عنصر منگنز، کاهش در غلظت منگنز ریشه گیاه را تأیید می‌کند می‌توان با در نظر گرفتن اثر رقت این کاهش غلظت منگنز را در ریشه گیاه توجیه کرد. اما کم‌ترین میزان جذب منگنز در ریشه در مصرف خاکی سولفات آهن پلیمری (۳/۹۰ گرم در گلدان) در سطح آهن ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده گردید که نسبت به شاهد (۹/۵۶ گرم در گلدان) ۵۹/۲۰ درصد کاهش معنی‌دار یافت (جدول ۹).

با توجه به مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح در جدول‌های ۸ و ۹، نتایج نشان می‌دهد که بیشترین غلظت و جذب

منگنز در ریشه (به‌ترتیب ۳۹/۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۷۶/۹۶ گرم در گلدان) به‌ترتیب در سطح آهن ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم در لیتر محلول‌پاشی مربوط به تیمارهای سولفات آهن پلیمری و نانوآهن سبز نسبت به شاهد (۱۹/۹۴ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۱۵/۸۵ گرم در گلدان) می‌باشد که افزایش معنی‌داری را نشان می‌دهد. در پژوهشی، محلول‌پاشی آهن و منگنز سبب افزایش غلظت پتاسیم، آهن و منگنز در اندام هوایی گندم شد (۱۴).

با توجه به نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه‌گانه (جدول‌های ۸ و ۹)، بیش‌ترین غلظت و جذب روی در ریشه گیاه مربوط به مصرف خاکی منابع آهن در تیمارهای نانوآهن سبز (به‌ترتیب ۵۷/۸۳ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۱۷۶/۴۲ گرم در گلدان) مربوط به سطح آهن ۰/۴۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که نسبت به شاهد (۷/۲۳ میلی‌گرم در کیلوگرم و ۲/۸۶ گرم در گلدان) ۶۰/۶۸ برابر افزایش معنی‌دار نشان دادند. محلول‌پاشی منابع آهن، غلظت روی در برگ گیاه توت‌فرنگی را به‌طور معنی‌داری افزایش می‌دهد و این افزایش احتمالاً به‌دلیل افزایش رشد و متابولیسم گیاه می‌باشد (۱۵). کم‌ترین غلظت روی در ریشه در تیمار کلات آهن پلیمری (۳/۹۱ میلی‌گرم در کیلوگرم) در مصرف خاکی در سطح آهن ۰/۴۰۵ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری نشان داد (جدول ۸). کم‌ترین میزان جذب روی در ریشه در تیمار سولفات آهن پلیمری در مصرف خاکی در سطح آهن ۰/۲۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری نسبت به شاهد نشان نداد (جدول ۹).

جدول ۹- نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل سه گانه نحوه مصرف، منابع آهن و سطح بر جذب عناصر آهن، منگنز و روی در ریشه.

Table 9. Comparison of the mean effects of interactions between use application, iron resources and level of spraying in absorption of Fe, Mn and Zn of micronutrients in roots.

Zn	Mn	Fe	منابع آهن Iron sources	سطح آهن Iron levels	نحوه کوددهی Application methods
g.pot ⁻¹					
2.86 ^{ij}	9.56 ^l	458.30 ^{ij}	شاهد (Control)	0	شکلی (Soil application)
15.98 ^{fg}	38.70 ^f	915.44 ^g	کلات آهن (Iron chelate)	0.270 (mg.kg ⁻¹)	
75.32 ^c	62.51 ^c	1770.65 ^b	سولفات آهن (Iron sulfate)		
19.47 ^f	54.36 ^{de}	1677.90 ^{bc}	نانو آهن سبزی (Nano iron, 9% Fe)		
7.13 ^{hi}	18.91 ^{ij}	605.55 ^{hi}	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
0.86 ^j	3.90 ^m	66.68 ^k	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
12.29 ^{gh}	58.94 ^{cd}	1777.06 ^b	کلات آهن (Iron chelate)	0.405 (mg.kg ⁻¹)	
17.32 ^{fg}	40.61 ^f	1483.01 ^{de}	سولفات آهن (Iron sulfate)		
176.42 ^a	49.56 ^c	1557.99 ^{cde}	نانو آهن سبزی (Nano iron, 9% Fe)		
2.96 ^{ij}	16.00 ^{jk}	346.74 ^j	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
5.01 ^{ij}	28.84 ^{gh}	860.69 ^g	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
5.07 ^{ij}	15.85 ^k	550.51 ^{hi}	شاهد (Control)	0	محلول پاشی (Foliar application)
58.49 ^d	23.82 ^{hi}	833.75 ^g	کلات آهن (Iron chelate)	0.25 (gr.L ⁻¹)	
80.75 ^b	51.32 ^c	1591.34 ^{cd}	سولفات آهن (Iron sulfate)		
31.19 ^e	70.23 ^b	2122.58 ^a	نانو آهن سبزی (Nano iron, 9% Fe)		
14.31 ^{fg}	31.97 ^g	1238.07 ^f	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
16.81 ^{fg}	63.27 ^c	1414.39 ^e	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		
85.57 ^b	29.28 ^{gh}	904.17 ^g	کلات آهن (Iron chelate)	0.5 (gr.L ⁻¹)	
13.52 ^g	24.22 ^{hi}	652.80 ^h	سولفات آهن (Iron sulfate)		
28.45 ^c	76.96 ^a	2209.98 ^a	نانو آهن سبزی (Nano iron, 9% Fe)		
17.80 ^{fg}	38.66 ^f	1210.72 ^f	کلات آهن پلیمری (Polymeric iron chelate)		
13.15 ^g	41.55 ^f	1218.32 ^f	سولفات آهن پلیمری (Polymeric iron sulfate)		

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون معنی‌دار نیست (P<0.01).

Means with the same letters in each column are not significantly different (P<0.01).

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی در این پژوهش، اثرات منابع آهن بر خصوصیات فیزیولوژیک گیاه سورگوم و پایداری غشای پلاسمایی گیاه مورد ارزیابی قرار گرفت. منابع آهن شامل کلات آهن، سولفات آهن، نانو آهن سبزی، کلات آهن پلیمری و سولفات آهن پلیمری مورد آزمایش قرار گرفتند و نتایج، تأثیر مثبت محلول‌پاشی تمامی منابع آهن را بر صفات پایداری غشا پلاسمایی ریشه و برگ، کلروفیل کل و غلظت آهن اندام هوایی و ریشه تأیید می‌کند. نتایج این پژوهش برای

بررسی‌های بیشتر در راستای استفاده از پلیمرها در فناوری‌های نوظهور همچون نانو و بیو، در جهت بهبود رشد گیاه مؤثر می‌باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش با استفاده از اعتبارات گرنت پژوهشی به شماره UOZ-GR-9517-20 دانشگاه زابل به انجام رسیده است. بدین وسیله از معاونت محترم پژوهش و فن‌آوری دانشگاه زابل سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

1. Akbari, R.H., Bayramzadeh, V., Davoodi, M.H., Tohidloo, Gh., Ghadiri, M., Haghverdi, K., and Akbari, H. 2013. Effects of iron nanoparticles on seed germination characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in the soil and aqueous medium. Natural Ecosystems of Iran. 3: 2. 51-58. (In Persian)
2. Al-Kanhan, F.R., and Abdullah, A.N. 2008. Effect of inorganic chelated iron fertilizers on growth and yield components of corn (*Zea mays* L.). Journal of Agriculture and Environmental Sciences. Alexandria University, Egypt. 7: 3. 195-206.
3. Amanullah, M.M., Archana, J., Manoharan, S., and Subramanian, K.S. 2012. Influence of iron and AM inoculation on metabolically active iron, chlorophyll content and yield of hybrid maize in calcareous soil. J. Agron. 11: 1. 27-30.
4. Armin, M., Akbari, S., and Mashhadi, S. 2014. Effect of time and concentration of nano-Fe foliar application on yield and yield components of wheat. Inter. J. Biosci. 4: 9. 69-75.
5. Arnon, D.I. 1949. Copper Enzymes in Isolated Chloroplast, Polyphenol Oxidase in *Beta vulgaris*. J. Plant Physiol. 24: 1-75.
6. Blume, A., and Ebercon, A. 1981. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. Crop Science. 27: 43-47.
7. Borowski, E., and Michalek, S. 2011. The effect of foliar fertilization of French bean with iron salts and urea on some physiological processes in plants relative to iron uptake and translocation in leaves. Acta scientiarum Polonorum Hortorum Cultus. 10: 2. 183-193.
8. Bouyoucos, C.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agron. J. 54: 464-465.
9. Broschat, T.K., and Moore, K.K. 2004. Phytotoxicity of several iron fertilizers and their effects on Fe, Mn, Zn, Cu and P content of African Marigolds and Zonal Geraniums. Horticultural Science. 39: 3. 595-598.
10. Chen, H.H., Shen, Z.Y., and Li, P.H. 1982. Adaptability of crop plants to high temperature stress. Crop Science. 22: 719-725.
11. Cottenie, A. 1980. Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendation. FAO Soils Bulletin. 38: 70-73.
12. Crowley, D.E., Wang, Y.C., Reid, C.P.P., and Szaniszlo, P.J. 1991. Mechanisms of iron acquisition from siderophores by microorganisms and plants. P 213-232, In: Chen, Y., and Y. Hadar. (eds.), Iron Nutrition and Interactions in Plants. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
13. Delfani, M., Baradarn Firouzabadi, M., Farrokhi, N., and Makarian, H. 2014. Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers. Communications in Soil Science and Plant Analysis. 45: 4. 530-540.
14. El-Fouly, M.M., Mobarak, Z.M., and Salama, Z.A. 2011. Micronutrients (Fe, Mn, Zn) foliar spray for increasing salinity tolerance in wheat *Triticum aestivum* L. Afric. J. Plant Sci. 5: 314-322.
15. Erdal, E., Kepenek, K., and Kizilgoz, I. 2004. Effect of Foliar Iron Applications at Different Growth Stages on Iron and Some Nutrient Concentrations in Strawberry Cultivars. Turk J. Agric. For. 28: 421-427.
16. Feil, B., Moser, S.B., Jampatong, S., and Stamp, P. 2005. Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by preanthesis drought and rate of nitrogen fertilization. Crop Science. 45: 516-523.
17. Fox, T.C., and Guerinot, M.L. 1998. Molecular biology of cation transport in plants. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. 49: 669-696.
18. Fox, T.C., Shaff, J.E., Grusak, M.A., Norvell, W.A., Chen, Y., Chaney, R.L., and Kochian, L.V. 1996. Direct measurement of ⁵⁹Fe labeled Fe²⁺ influx in roots of pea using a chelator buffer system to control free Fe in solution. Plant Physiology. 111: 93-100.

19. Ghafari, H., and Razmjoo, J. 2013. Effect of foliar application of nano-iron oxidase, iron chelate and iron sulphate rates on yield and quality of Wheat. *Inter. J. Agron. Plant Prod.* 4: 11. 2997-3003.
20. Ghafariyan, M.H., Malakouti, M.J., Dadpour, M.R., Stroeve, P., and Mahmoudi, M. 2013. Effects of Magnetite Nanoparticles on Soybean Chlorophyll. *Environmental Science and Technology.* 47: 10645-10652.
21. Ghasemi-Fasaei, R., Ronaghi, A., Maftoun, M., Karimian, N., and Soltanpour, P.N. 2003. Influence of FeEDDHA on iron-manganese interaction in soybean genotypes in calcareous soil. *J. Plant Nutr.* 26: 1815-1823.
22. Godsey, R.J., and Johnson, B. 2001. Seed treatment, seeding rate, and cultivar effects on iron deficiency chlorosis of soybean. *J. Plant Nutr.* 4: 8. 1255-1268.
23. Golshahi, S., Ahangar, A.Gh., Mir, N., and Ghorbani, M. 2017. The effect of foliar application of iron sources on growth parameters, iron concentration and activity of some enzymes of sorghum. *J. Water Soil.* 31: 5. 1467-1480. (In Persian)
24. Golshahi, S., Ahangar, A.Gh., Mir, N., and Ghorbani, M. 2018. A comparison of the use of different sources of nanoscale iron particles on the concentration of micronutrients and plasma membrane stability in sorghum. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 18: 1. 236-252.
25. Grillet, L., Mari, S., and Schmidt, W. 2014. Iron in seeds loading pathways and subcellular localization. *Frontiers in Plant Science.* 4: 535-547.
26. Guerfel, M., Baccouri, O., Boujnah, D., Chaibi, W., and Zarrouk, M. 2009. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*, 119: 257-263.
27. Helmke, P.A., and Sparks, D.L. 1996. Lithium, sodium, potassium, cesium, and rubidium. P. 551-574, In: D.L. Sparks, (ed.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods and processes.* Madison: Soil Science Society of America, Madison, WI.
28. Hu, J., Guo, H., Li, J., Gan, Q., Wang, Y., and Xing, B. 2017. Comparative impacts of iron oxide nanoparticles and ferric ions on the growth of *Citrus maxima*. *Environmental Pollution.* 221: 199-208.
29. Inze, D., and Montagu, M.V. 1995. Oxidative stress in plants. *Current Opinion in Biotechnology.* 6: 153-158.
30. Jokar, L., Ronaghi, A., Karimian, N., and Ghasemi-Fasaei, R. 2015. Effects of different Fe levels from Fe-nano-chelate and Fe-EDDHA sources on growth and some nutrients concentrations in cowpea in a calcareous soil. *J. Sci. Technol. Greenhouse Cul.* 6: 2. 9-19. (In Persian)
31. Kocheva, K., Lambrev, P., Georgiev, G., Goltsev, V., and Karabaliev, M. 2004. Evaluation of chlorophyll fluorescence and membrane injury in the leaves of barley cultivars under osmotic stress. *Bioelectrochemis.* 63: 121-124.
32. Korcak, R.F. 1987. Iron Deficiency Chlorosis. *Horticultural Reviews.* 9: 133-186.
33. Ksouri, R., Debez, A., Mahmoudi, H., Ouerghi, Z., Gharsalli, M., and Lachaa, M. 2007. Genotypic variability within Tunisian grapevine varieties (*Vitis vinifera* L.) facing bicarbonate-induced iron deficiency. *Plant Physiology and Biochemistry.* 45: 315-322.
34. Levitt, J. 1980. Responses of plants to environmental stress: Water, Radiation, Salt and Other Stresses, Vol. II, Academic Press, New York, Pp: 3-211.
35. Lindsay, W.L., and Norvell, W.A. 1978. Development of DTPA Soil test for Zinc, Iron, Manganese and Copper. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 42: 421-428.
36. Lucena, J.J. 2006. Synthetic iron chelates to correct iron deficiency in plants. P 103-128, In: L.L. Barton and J. Abadía (eds.), *Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms.* Springer, Dordrecht.
37. Majidi Heravan, E. 1994. Resistant physiological mechanism to environmental limited. In: *Proceeding of the 3rd crop production science. Iranian Crop Science Congress.* (In Persian)

38. Martineau, J.R., Specht, J.E. Williams, J.H., and Sullivan, C.Y. 1979. Temperature tolerance in soybeans. I. Evaluation of a technique for assessing cellular membrane thermostability. *Crop Science*. 19: 75-78.
39. Masonic, A., Evacoli, A., and Mavoti, M. 1996. Spectral of leaves deficient in iron sulphur, magnesium and manganese. *Agron. J.* 88:6.937-943.
40. Mikkelsen, R.L. 1994. Using hydrophilic polymers to control nutrient release. *Fertilizer Research*. 38: 53-59.
41. Mikkelsen, R.L. 1995. Using hydrophilic polymers to improve uptake of manganese fertilizers by soybeans. *Fertilizer Research*. 41: 87-92.
42. Mortvedt, J.J., Mikkelsen, R.L., and Behel, A.D.Jr. 1992. Grain sorghum response to granular formulations of iron sources and hydrophilic polymers. *J. Plant Nutr.* 15: 1913-1926.
43. Motsara, M.R., and Roy, R.N. 2008. Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy, 219p.
44. Nadi, E., Aynehband, A., and Mojaddam, M. 2013. Effect of nano-iron chelate fertilizer on grain yield, protein percent and chlorophyll content of Faba Bean (*Vicia faba* L.). *Inter. J. Biosci.* 3: 9. 267-272.
45. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., and Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circular 939, US Gov. Printing Office, Washington, DC.
46. Page, A.L., Miller, R.H., and Keeney, D.R. 1982. Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI.
47. Reed, D.W.M., Lyons, Jr.C.G., and McEachern, G.R. 1988. Field evaluation of inorganic and chelated iron fertilizers as foliar sprays and soil application. *J. Plant Nutr.* 11: 6-11. 1369-1378.
48. Ren, H., Liu, L., Liu, C., He, S., Huang, J., Li, J., and Gu, N. 2011. Physiological investigation of magnetic iron oxide nanoparticles towards Chinese mung bean. *J. Biomed. Nanotechnol.* 7: 677-684.
49. Rezaeei, M., Daneshvar, M., and Shirani, A.H. 2014. Effect of iron nano chelated fertilizers foliar application on three wheat cultivars in Khorramabad climatic conditions. *Sci. J. Crop Sci.* 3: 2. 9-16.
50. Rhoades, J.D. 1982. Soluble salts. P 167-179, In: A.L. Page, (ed.), Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties. Monograph Number 9 (Second Edition). American Society of Agronomy, Madison, WI.
51. Rible, J.M., and Quick, J. 1960. Method S-3.1. In: Water, soil and plant tissue, tentative methods of analysis for diagnostic purposes. Davis, University of California Agricultural Experiment Service. Mimeographed Report.
52. Roomizadeh, S., and Karimian, N. 1996. Manganese-iron relationship in soybean grown in calcareous soils. *J. Plant Nutr.* 19: 397-406.
53. Roosta, H.R., Jalali, M., and Vakili Shahrabaki, S.M.A. 2015. Effect of Nano Fe-Chelate, Fe-EDDHA and FeSO₄ on Vegetative Growth, Physiological Parameters and Some Nutrient Elements Concentrations of Four Varieties of Lettuce (*Lactuca sativa* L.) In NFT System. *J. Plant Nutr.* 38: 14. 2176-2184.
54. Rui, M., Ma, C., Hao, Y., Guo, J., Rui, Y., Tang, X., Zhao, Q., Fan, X., Zhang, Z., Hou, T., and Zhu, S. 2016. Iron oxide nanoparticles as a potential iron fertilizer for peanut (*Arachis hypogaea*). *Frontiers Plant Science*. 7: 815-825.
55. Saadalla, M.M., Shanahan, J.F., and Quick, J.S. 1990. Heat tolerance in winter wheat. *Crop Science*. 30: 1243-1247.
56. Sairam, R.K., and Srivastava, G.C. 2001. Water stress tolerance of wheat *Triticum aestivum* L.: Variation in hydrogen peroxide accumulation and antioxidant activity in tolerant and susceptible genotype. *J. Agron. Crop Sci.* 186: 63-70.
57. Steiner, A.A., and Winden, H.V. 1970. Recipe for Ferric Salts of Ethylenediaminetetraacetic Acid. *Plant Physiology*. 46: 862-863.

58. Sullivan, C.Y. 1972. Mechanism of heat and drought resistance in grain sorghum and method of measurement. P 247-246, In: N.G.P. Rao, and L.R. House (eds.), Sorghum in seventies. Oxford and IBH publishing company, New Delhi.
59. Sullivan, C.Y., and Ross, W.M. 1979. Selecting for drought and heat resistance in grain sorghum. P 263-281, In: H., Mussel, and R.C. Staples (eds.), Stress physiology in crop plants. John Wiely and Sons, New York.
60. U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Alkaline-earth carbonates by gravimetric loss of carbon dioxide. P. 105-106, In: L.A. Richards, (ed.), Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agric. Handbook. 60. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
61. U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. pH reading of saturated soil paste. P 102-103, In: L.A. Richards, (ed.), Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agricultural Handbook 60. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
62. Walkley, A., and Black, I.A. 1934. Chromic acid titration for determination of soil organic matter. Soil Science. 63: 251.
63. Wang, Y., Hu, J., Dai, Z., Li, J., and Huang, J. 2016. In vitro assessment of physiological changes of watermelon (*Citrullus lanatus*) upon iron oxide nanoparticles exposure. Plant Physiology and Biochemistry. 108: 353-360.
64. Welch, R.M., Allaway, W.H., House, W.A., and Kubota, J. 1991. Geographic distribution of trace element problems. P 31-57, In: J.J. Mortvedt, F.R. Cox, L.M. Shuman, and R.M. Welch (eds.), Micronutrients in Agriculture. 2nd ed, Soil Science Society American Inc. Madison, WI.
65. Zeidan, M.S., Mohamed, M.F., and Hamouda, H.A. 2010. Effect of foliar fertilization of Fe, Mn and Zn on wheat yield and quality in low sandy soils fertility. World J. Agric. Sci. 6: 6. 696-699.
66. Zhang, Y., Hu, C.X., Tan, Q.L., Zheng, C.S., Gui, H.P., Zeng, W.N., Sun, X.C., and Zhao, X.H. 2014. Plant nutrition status, yield and quality of satsuma mandarin (*Citrus unshiu Marc.*) under soil application of Fe-EDDHA and combination with zinc and manganese in calcareous soil. Scientia Horticulturae. 174: 46-53.



The Effect of application methods, concentration and Fe sources on the amount of some microelements and the stability of the plasma membrane of Sorghum

S. Golshahi¹, *A. Gholamalizadeh Ahangar², N. Mir³ and M. Ghorbani⁴

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, University of Zabol,

²Associate Prof., Dept. of Soil Science, University of Zabol,

³Assistant Prof., Dept. of Chemistry, University of Zabol,

⁴Instructor, Dept. of Soil Science, University of Zabol

Received: 11.24.2018; Accepted: 05.15.2019

Abstract

Background and Objectives: The importance of agriculture has been revealed for all human societies more than ever before as the population grows. Iron (Fe) element is one of the vital elements for plant growth and its presence is essential for plant metabolism and physiological processes of the plant. In the present study, we tried to study the stability of plasma membrane against the entry of the elements into it and the resistance of the plant to the stresses on the inner membrane of the plant, which is the amount of applied Fe levels in addition to studying the concentration of microelements in the root and shoot of the plant. The purpose of this study is to compare Fe resources intake and its interaction with the concentration and type of applied fertilizer on the concentration of microelements and the stability of the plasma membrane of the sorghum plant.

Materials and Methods: A greenhouse experiment was conducted as a factorial design in a completely randomized design with three replications in the educational greenhouse of Zabol University in order to studying the use of Iron sources on the characteristics of Sorghum plant (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench. Var. Speed feed). The treatments consisted of two Iron levels (soil application: 0.270, 0.405 mg per kg of soil and spraying: 0.25 and 0.5 g of Fe per liter, along with control) from five type of fertilizer (Iron chelate, ferrous sulphate, Green nano Fe (include 9% Fe), Polymeric Iron chelate, Polymeric ferrous sulphate).

Results: The results of analysis of variance of data showed that the triple interaction of all traits (except for the Cu of shoot that had no significant difference) and the dual interaction effects of Cu in the root of the plant have been statistically significant at the 5% probability level. The percentage of PMSI of the root (5.06 times) in the soil application of 0.270 mg.kg⁻¹ Iron chelate and the concentration of Zn of the root (6.99 times) at the level of 0.405 mg.kg⁻¹ in Green nano Fe (include 9% Fe) treatment were significantly higher than control. The total chlorophyll content (75.95%), the percentage of leaf PMSI (6.33 times) and Fe concentration in the shoot (1.99 times) had significant increase in the Polymeric Iron chelate, Green nano Fe and Polymeric ferrous sulphate respectively and the concentration of Zn in the shoots showed significant decrease (75.05%) in Iron chelate treatment in the spraying of iron sources at a level of 0.25 g.L⁻¹. The concentration of Mn was significantly decreased in the shoot (30.67%) and in the root (37.46%) in Polymeric Iron chelate and Iron chelate respectively and the concentration of Fe in the root (47.86%) showed significant increase in polymeric ferrous sulfate treatment compared to control at the level of 0.5 g.L⁻¹. According to the results, the highest concentrations of Cu in the root were observed in the green nano spray application.

* Corresponding Author; Email: a_ahangar2002@yahoo.com

Conclusion: In general, according to the results, the effects of Fe sources on the physiological characteristics of sorghum and plant PMSI were evaluated positive and confirms the positive effect of the spraying of all Fe sources on the traits of PMSI root and leaf, total chlorophyll and Fe concentration in the shoot and root.

Keywords: Iron chelate, Polymeric ferrous sulfate, Sorghum, Spraying

