

تأثیر محلول پاشی منابع آهن بر پارامترهای رشد، غلظت آهن و فعالیت برخی آنزیم‌های گیاه

سورگوم

سبیره گلشاهی^۱ - احمد غلامعلی زاده آهنگر^{۲*} - نوشین میر^۳ - مریم قربانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۷

چکیده

به منظور بررسی اثر محلول پاشی منابع مختلف آهن بر پارامترهای رشد، غلظت و جذب آهن و فعالیت آنزیمی در گیاه سورگوم رقم اسپیدفید (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench)، آزمایشی در شرایط گلخانه در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل دو سطح آهن (۰/۲۵ و ۰/۵ گرم آهن در لیتر همراه با شاهد (C)) از نه منبع کودی آهن (کلات آهن (F1)، سولفات آهن (F2)، نانوآکسید آهن (F3)، نانوآکسید آهن تک‌پاش (F4)، نانو آهن سبز (تجاری) (F5)، کلات آهن پلیمری (F6)، سولفات آهن پلیمری (F7)، نانوآکسید آهن پلیمری (F8) و نانوآکسید آهن تک‌پاش پلیمری (F9)) بود. با توجه به نتایج پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول پاشی، در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر، کلروفیل b در تیمار نانوآکسید آهن تک‌پاش، غلظت و جذب آهن در اندام هوایی به ترتیب در تیمارهای سولفات آهن پلیمری و کلات آهن پلیمری، غلظت و جذب آهن در ریشه در تیمار نانوآکسید آهن تک‌پاش پلیمری و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار کلات آهن افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد نشان دادند. در سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر، وزن خشک اندام هوایی در تیمار کلات آهن، وزن خشک ریشه و آنزیم کاتالاز در تیمار نانو آهن سبز، کلروفیل a در تیمار کلات آهن پلیمری و آنزیم گایاکول پراکسیداز در تیمار نانوآکسید آهن تک‌پاش افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد یافتند. همچنین پیامدهای ساده منابع آهن نشان داد که بیشترین مقدار کارتنوئید در تیمار کلات آهن پلیمری دیده شد.

واژه‌های کلیدی: آسکوربات پراکسیداز، سولفات آهن پلیمری، نانوآکسید آهن تک‌پاش، وزن خشک اندام هوایی و ریشه

مقدمه

اندام‌های گیاه است و به همین علت نشانه‌های کمبود آهن بیشتر در برگ‌های جوان ظاهر می‌شوند و این در حالی است که برگ‌های پیرتر سالم‌تر به نظر می‌آیند و آهن فقط از طریق آوند چوبی به سلول‌های برگ جوان می‌رسد (۲۷). کمبود آهن منجر به زرد برگی (۲۶)، کاهش فتوسنتز و غلظت کلروفیل (۲۲)، کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه (۵۹)، تغییر غلظت و محتوای آهن (۲۶) و محدود شدن فعالیت آنزیم‌هایی همانند پراکسیداز و کاتالاز (۲۱ و ۴۲) می‌شود. این صفات ارتباط بسیار نزدیکی با عملکرد گیاهان زراعی دارند.

روش‌های مختلفی برای رفع کمبود آهن در گیاهان پیشنهاد شده که می‌توان به مصرف خاکی، محلول پاشی و یا اختلاط آهن با بذر اشاره کرد (۱۶). مصرف کودهای معدنی آهن‌دار برای رفع کمبود مؤثر واقع نشده و به سرعت به ترکیبات نامحلول و غیرقابل جذب در خاک تبدیل می‌شوند ولی محلول پاشی با کلات‌های آهن باعث جذب بهتر آهن و توزیع سریع‌تر آن در اندام‌های گیاهی و نقاط مصرف می‌شود (۱۱). مصرف برگی آهن (سولفات آهن یا کلات‌های آهن) روشی معمول در کشاورزی می‌باشد، بویژه در خاک‌هایی که با کمبود آهن

با افزایش جمعیت، اهمیت کشاورزی برای تمام جوامع بشری بیش از هر زمان دیگری مشخص شده است. اولین و مهم‌ترین نیاز هر انسان، به مواد غذایی و عرضه مواد غذایی است که در ارتباط مستقیم و غیرمستقیم با کشاورزی می‌باشد. آهن عنصری حیاتی برای رشد، گسترش و بقای گیاه می‌باشد، چراکه برای عملکرد صحیح متابولیک‌های چندانگانه و فرآیندهای فیزیولوژیکی ضروری است (۱۷). با اینکه آهن در سرتاسر پوسته زمین وجود دارد، اما مشکلات حلالیت ترکیب‌های آهن در خاک‌ها، مانع جذب آهن توسط گیاه شده و علائم کمبود آهن در گیاه گسترش می‌یابد (۲۵). آهن فاقد قدرت تحرک در

۱، ۲، ۴ - به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و مربی گروه خاکشناسی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

* - نویسنده مسئول: (Email: ahangar@uoz.ac.ir)

۳ - استادیار گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زابل

مواد و روش‌ها

این آزمایش در شرایط گلخانه و بر روی گیاه سورگوم علوفه‌ای رقم اسپیدفید (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench) در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با ۹ تیمار مختلف کودی آهن شامل کلات آهن (F1)، سولفات آهن (F2)، نانو اکسید آهن (F3)، نانو اکسید آهن تک‌پاش (F4)، نانو آهن سبز (F5)، کلات آهن پلیمری (F6)، سولفات آهن پلیمری (F7)، نانو اکسید آهن پلیمری (F8) و نانو اکسید آهن تک‌پاش پلیمری (F9) با سطوح آهن ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم آهن خالص در لیتر همراه با شاهد (C) (۱۲) در سه تکرار طراحی و اجرا شد. 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 ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از جمله بافت به روش هیدرومتری (۷)، پهاش در گل اشباع به وسیله پهاش‌متر (۵۵)، قابلیت هدایت الکتریکی با هدایت‌سنج الکتریکی (۴۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جانشین کردن کاتیون‌های قابل تبادل با یون سدیم با استفاده از استات سدیم در pH=۷ و سپس جایگزین نمودن یون‌های سدیم با آمونیوم و اندازه‌گیری با دستگاه فلیم‌فتمتر (۵۳)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (۵۴)، ماده آلی به روش والکی و بلک (۵۷)، نیتروژن کل به روش کج‌لدال (۴۱)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (۴۰)، غلظت آهن فراهم خاک با DTPA عصاره‌گیری (۲۴) و توسط دستگاه جذب اتمی قرائت گردید و پتاسیم عصاره‌گیری شده با استات آمونیوم (۱۸) توسط دستگاه فلیم‌فتمتر تعیین گردید (جدول ۱).

سه کیلوگرم خاک الک شده در کیسه‌های پلاستیکی ریخته شد. قبل از کشت بذرها، با توجه به آزمون خاک و برای جلوگیری از کمبود احتمالی عناصر ماکرو، ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک در دو مرحله، ۷۵ میلی‌گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک و ۷۵ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک به گلدان‌ها افزوده شد. پس از چند روز که رطوبت خاک داخل کیسه‌ها به حد مناسبی رسید، خاک کیسه‌ها کاملاً مخلوط 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 زراعی آبیاری شدند. 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

همراه هستند (۱۳). کاربرد مفید و مناسب انواع مختلف کودها راه‌حل اصلی برای اصلاح و نگهداری حاصلخیزی خاک و افزایش تولید محصولات است (۴۵).

بروس‌چات و موره (۸) با کاربرد سولفات آهن و فرسولفات سولفات آمونیوم مشاهده کردند که غلظت آهن در گیاه همیشه بهار آفریقایی (*Tagetes Erecta*) افزایش و وزن خشک آن کاهش یافت. برووسکی و مایکلک (۶) گزارش کردند که کاربرد برگی نمک آهن مقدار کلروفیل a، b و کاروتنوئید لویبا سبز^۱ را افزایش می‌دهد. شیخ بوغلو و همکاران (۵۲) نشان دادند که کاربرد نانو ذرات اکسید آهن عملکرد سویا را افزایش می‌دهد. غفاری و رزمجو (۱۵) گزارش کردند کاربرد نانو اکسید آهن بر مقدار کلروفیل a، b و کل گیاه گندم در مقایسه با شاهد افزایش معنی‌داری نشان دادند. آرمین و همکاران (۲) مشاهده کردند با افزایش غلظت نانو آهن، عملکرد و اجزای عملکرد گندم افزایش می‌یابد. هر چند که در حال حاضر، ساز و کار مشخصی برای سمیت نانو ذرات در گیاهان وجود ندارد (۳۸)، اما بررسی‌های به عمل آمده در رابطه با مواد نانو ساختار یا نانو مقیاس به عنوان حامل کودی یا ناقل کنترل‌کننده رهاسازی به منظور ایجاد کودهای هوشمند بوده است. فن‌آوری نانو منشاء امیدواری‌های بسیاری در جهت عبور از محدودیت‌های تکنیکی موجود بر سر راه آزادسازی آرام و کنترل شده عناصر کودها شده است (۱۰). برخی پژوهش‌ها پیامد مثبت نانو ذرات آهن را بر روی گیاهان گزارش کردند (۱). لی و همکاران (۲۳) و رن و همکاران (۴۴) مشاهده کردند که نانو ذرات آهن می‌توانند از لحاظ فیزیولوژیکی، جوانه‌زنی بذر، رشد ریشه و مقدار کلروفیل را در گیاهان هندوانه و لوبیای مونگ^۲ افزایش دهند، اما طی این روند تنش اکسیداتیو به گیاهان القا می‌گردد. وانگ و همکاران (۵۸) گزارش کردند که سطح ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو اکسید آهن، مقدار کلروفیل برگ گیاه هندوانه را افزایش می‌دهد. برخی پژوهش‌ها افزایش مقدار کلروفیل گیاهانی که در برابر نانو اکسید آهن قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهند (۴۴). روی و همکاران (۴۷) بیان داشتند که نانو ذرات آهن می‌توانند جایگزین مناسبی برای کودهای آهن سنتی در کشت گیاه بادام زمینی باشند. هو و همکاران (۲۰) در تحقیقی بر روی گیاه *Citrus maxima* گزارش کردند که مصرف ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات آهن افزایش معنی‌داری در مقدار کلروفیل برگ، نسبت به شاهد (۲۳/۲ درصد) نشان داد. هدف از این پژوهش مقایسه اثر محلول‌پاشی منابع مختلف آهن بر پارامترهای رشد، غلظت و جذب آهن و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات و گایاکول پراکسیداز بر روی گیاه سورگوم علوفه‌ای جهت یافتن بهترین ترکیب کودی آهن می‌باشد.

1- French Bean

2- Mung Bean

نمونه‌ها جهت انجام تجزیه گیاه آسیاب و عصاره گیاهی به روش خاکسترسازی خشک آماده شد (۹).

مدت ۴۸ ساعت خشک گردید (۳۵). سپس وزن خشک اندام هوایی و ریشه‌ها با استفاده از ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم دیجیتالی تعیین و

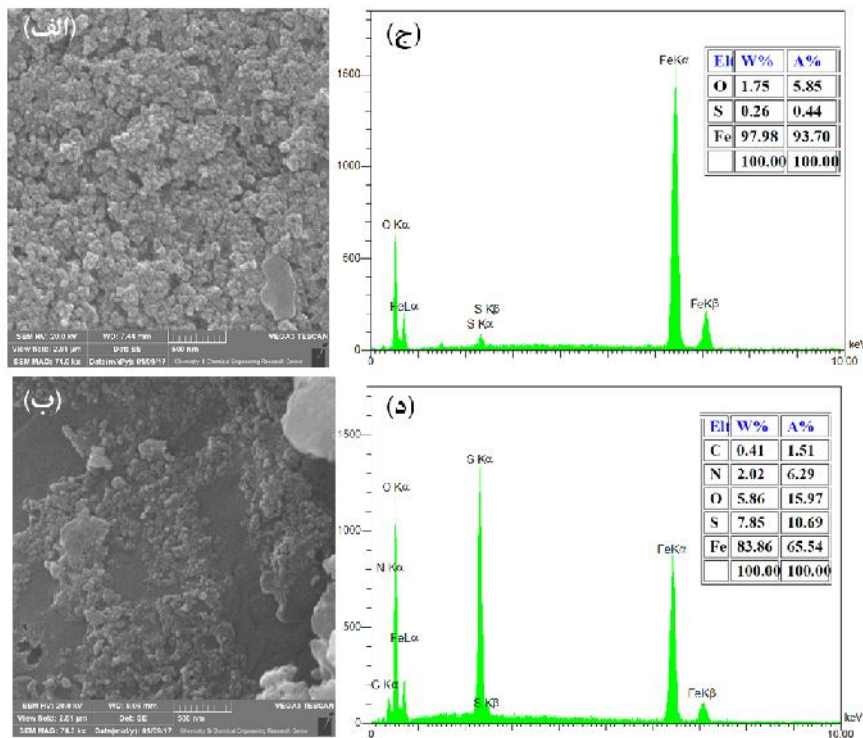
جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

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

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

و آنزیم آسکوربات پراکسیداز براساس روش ناکانو و اسدا (۳۷) مورد سنجش قرار گرفت و در نهایت فعالیت آنزیمی بر حسب واحد (Unit=U) در گرم بر وزن تر بیان گردید. داده‌های آزمایش با استفاده از نرم افزارهای آماری SAS 9.4 و Excel و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد انجام شد.

مقدار کلروفیل a، b و کارتنوئید، بر اساس روش آرنون (۳) تعیین گردید. جهت محاسبه و ارزیابی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز، تعدادی برگ کاملاً جوان و گسترده برداشت شد. برگ‌ها داخل پاکت قرار گرفتند و در ظروف عایق که کف آن از یخ پوشیده شده بود قرار دادند و سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل گردید. فعالیت آنزیم کاتالاز براساس روش بیرز و سایزر (۴)، آنزیم گایاکول پراکسیداز براساس روش همدا و کلین (۱۹)



شکل ۱- تصاویر SEM و EDX (الف) و (ب) نانواکسید آهن (F3) و نانواکسید آهن تک‌پاش (F4)

Figure 1- SEM and EDX images (a) and (b) Iron oxide nanoparticles (F3) and Monodisperse iron oxide nanoparticles (F4)

شکل ۱ مورفولوژی و ترکیب عنصری نانوذرات تهیه شده را نشان می‌دهد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانواکسید آهن (F3) و نانواکسید آهن تک‌پاش (F4) به ترتیب در شکل ۱ الف و

نتایج و بحث

مورفولوژی و ترکیب عنصری نانوذرات

شاخص‌های رشدی سورگوم

نتایج تجزیه واریانس پیامدهای ساده و متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول‌پاشی نشان می‌دهد که غلظت آهن اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال ۱ درصد و جذب آهن ریشه و آنزیم کاتالاز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). اثرات ساده منابع آهن و اثرات متقابل دوگانه سطح و منابع آهن نشان می‌دهد که وزن خشک اندام هوایی و ریشه، کلروفیل a و b برگ، جذب آهن اندام هوایی و آنزیم‌های گایاکول و آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). میزان محتوای کارتنوئید برگ نیز در سطح احتمال ۵ درصد در اثرات ساده منابع آهن معنی‌دار گردید (جدول ۲).

ب نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه F3 که بدون حضور هیچ سورفکتانت و یا پلیمری تهیه شده است به میزان بیشتری نسبت به نمونه F4 تجمع یافته است. در حقیقت همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، نانوذرات در میان مواد سورفکتانت که در حین تهیه به محلول اضافه شده‌اند قرار دارند و این موجب جدایی بیشتر نانوذرات از یکدیگر می‌شود. هر چه نانوذرات بیشتر به صورت تک‌پاش باشند احتمال اینکه بتوانند از روزه‌های برگ وارد گیاه شوند بیشتر است. از طرفی افزودن پلیمر به این نانوذرات سبب می‌شود تا حلالیت نانوذرات بیشتر شده و راحتتر به گیاه وارد شوند. شکل ۱ ج و د به ترتیب آنالیز EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) نانوذرات F3 و F4 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در نمونه F4 علاوه بر آهن و اکسیژن، کربن نیز وجود دارد که به وجود سورفکتانت در میان نانوذرات دلالت دارد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثرات متقابل منابع آهن و سطح محلول‌پاشی بر برخی پارامترهای رشد، غلظت و جذب آهن در اندام هوایی و ریشه و فعالیت آنزیم‌های برگ

Table 2- Analysis of variance interaction between iron and level of spraying on some growth parameters, concentration and absorption of iron in the shoot and root and leaf enzyme activity

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean Square					
		وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	کلروفیل a	کلروفیل b	کارتنوئید	غلظت آهن در اندام هوایی
		Dry weight of shoot	Dry weight of root	Chl. a	Chl. b	Carotenoid	Iron Con. in Shoot
C ^a	1	0.0707ns	0.0866ns	0.0487ns	0.2653ns	0.0960ns	65.9611**
F ^b	9	4.6195*	1.7682*	1.2724*	3.2515*	0.2790*	1139.9126**
C*F	9	3.2281*	0.8102*	0.0464*	1.5689*	0.0486ns	608.3000**
Error	40	0.0502	0.0489	0.0362	0.1016	0.0221	0.2864
C.V. (%)	-	8.1430	12.7817	7.0469	16.5579	16.9214	1.2433

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean Square					
		جذب آهن در اندام هوایی	غلظت آهن در ریشه	جذب آهن در ریشه	گایاکول	آسکوربات	کاتالاز
		Iron absorption in shoot	Iron con. in root	Iron absorption in root	GPOX	APX	CAT
C ^a	1	264.5580ns	172904.3538**	1394310.75*	0.0000ns	0.0005ns	0.0000*
F ^b	9	17155.5808*	93076.7315**	1453765.54*	0.0000*	0.0004*	0.0000*
C*F	9	14275.6744*	67921.1812**	620250.62*	0.0000*	0.0001*	0.0000*
Error	40	82.1200	0.313	20698.67	0.0000	0.0000	0.0000
C.V. (%)	-	7.3600	0.0786	11.6454	17.5531	13.0092	6.9734

^a سطح آهن، ^b منابع آهن، *، ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns غیر معنی‌دار

^a Iron Level, ^b Iron Sources, * and ** denoted significance at the 5 and 1 percent level; ns is not significant

(جدول ۳). با افزایش غلظت آهن از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر علاوه بر تیمار F1، تیمارهای F4 (۳/۹۷ گرم در گلدان) و F9 (۳/۸۰ گرم در گلدان) نیز از لحاظ آماری افزایش معنی‌داری یافته‌اند (جدول ۳). با توجه به قطر نانوذرات انتظار می‌رود سرعت جذب، انتقال و تجمع ذرات نانو بسیار بیشتر از ذرات معمول باشد. بالا بودن کارایی جذب و سطح مخصوص نانوذرات در مقایسه با ذرات معمول، اثرگذاری بیشتر این ذرات را می‌تواند توجیه کند (۳۳).

مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول پاشی نشان می‌دهد که بیشترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به غلظت ۰/۵ گرم آهن در لیتر تیمار F1 (۵/۴۴ گرم در گلدان) می‌باشد که نسبت به شاهد (۰/۷۱ گرم در گلدان) با کمترین وزن خشک اندام هوایی ۸۶/۹۵ درصد افزایش معنی‌دار نشان داد (جدول ۳). در غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر نیز به ترتیب تیمارهای F2، F3 و F6 افزایش معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد نشان دادند

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول پاشی بر برخی پارامترهای رشد در اندام هوایی و ریشه گیاه
 Table 3- Comparison of the mean effects of interactions iron resources and level of spraying on some growth parameters in shoots and roots of the plant

تیمار Treatment		وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	کلروفیل a	کلروفیل b
سطوح آهن (g.L ⁻¹)	منابع آهن	Dry weight of shoot	Dry weight of root	Chlo. a	Chlo. b
Iron levels	Iron sources	(g.Pot ⁻¹)	(g.Pot ⁻¹)	(mg.g ⁻¹ fresh weight)	(mg.g ⁻¹ fresh weight)
0.25	شاهد (C)	0.71 ⁱ	0.56 ^g	2.31 ^{gh}	0.94 ^{gh}
	F1	2.18 ^{fg}	1.04 ^f	3.14 ^{ab}	2.83 ^b
	F2	3.77 ^{bc}	2.11 ^{bc}	3.00 ^{abc}	1.57 ^{ef}
	F3	3.70 ^{bc}	2.46 ^{ab}	3.07 ^{abc}	2.23 ^{cd}
	F4	2.08 ^{gh}	1.48 ^{de}	2.79 ^{bcd}	3.99 ^a
	F5	2.53 ^{ef}	2.51 ^{ab}	2.77 ^{bcd}	1.64 ^{def}
	F6	3.46 ^c	1.68 ^{de}	3.02 ^{abc}	2.87 ^b
	F7	2.93 ^{de}	1.62 ^{de}	2.65 ^{def}	1.96 ^{cde}
	F8	2.01 ^{gh}	1.55 ^{de}	1.55 ⁱ	0.69 ^h
0.5	F9	2.36 ^{fg}	2.66 ^a	2.42 ^{fgh}	1.18 ^{fgh}
	F1	5.44 ^a	2.35 ^{ab}	2.86 ^{abc}	1.28 ^{fgh}
	F2	2.98 ^d	1.45 ^{de}	3.07 ^{abc}	1.96 ^{cde}
	F3	2.76 ^{de}	1.51 ^{de}	3.09 ^{ab}	3.03 ^b
	F4	3.97 ^b	2.34 ^{ab}	2.71 ^{cde}	2.47 ^{bc}
	F5	2.84 ^{de}	2.72 ^a	3.04 ^{abc}	2.52 ^{bc}
	F6	2.25 ^{fg}	1.73 ^{cde}	3.20 ^a	1.74 ^{def}
	F7	2.84 ^{de}	1.34 ^{ef}	2.83 ^{abc}	1.39 ^{efg}
	F8	1.72 ^h	1.04 ^f	1.76 ⁱ	0.91 ^{gh}
F9	3.80 ^{bc}	1.79 ^{cd}	2.57 ^{efg}	2.47 ^{bc}	

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)

گزارش کردند.

بیشترین مقدار کلروفیل b در تیمار F4 در غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر (۳/۹۹ میلی‌گرم بر گرم) مشاهده شد که نسبت به شاهد (۰/۹۴ میلی‌گرم بر گرم) و سایر تیمارها در همین سطح آهن، افزایش معنی‌داری داشت. اگرچه کمترین مقدار کلروفیل b نیز در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در تیمار F8 (۰/۶۹ میلی‌گرم بر گرم) مشاهده گردید ولی نسبت به شاهد (۰/۹۴ میلی‌گرم بر گرم) این کاهش معنی‌دار نبود (جدول ۳). با محلول پاشی نانوکلات آهن به واسطه افزایش رشد سبزینه‌ای، بهبود کلروفیل‌سازی گیاه و افزایش ظرفیت و فرایند فتوسنتزی، اندام‌های زایشی بیشتری ساخته شده و سهم دریافتی مواد پرورده آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه ضمن افزایش اجزای عملکرد و عملکرد دانه، عملکرد روغن و عملکرد پروتئین افزوده می‌شود (۳۳). ماسونیک و همکاران (۲۸) در ایتالیا اثر کمبود آهن را بر گیاهان آفتابگردان، ذرت، گندم و جو بررسی و مشاهده کردند که کمبود آهن موجب کاهش کلروفیل شده در نتیجه عملکرد و ماده خشک گیاه را نیز کاهش می‌دهد.

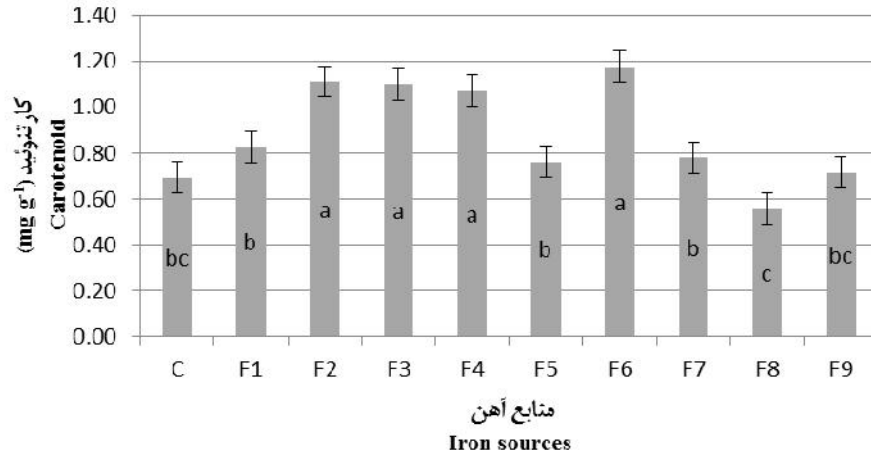
نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده منابع آهن بر مقدار کارتنوئید برگ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار کارتنوئید برگ در تیمار F6 مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته است (شکل ۲). با توجه به شکل ۲، بعد از آن بیشترین مقدار کارتنوئید به ترتیب در تیمارهای F2، F3 و F4 دیده شد که نسبت به شاهد این افزایش،

بیشترین وزن خشک ریشه ریشه ۲/۷۲ گرم در گلدان) مربوط به غلظت ۰/۵ گرم آهن در لیتر F5 می‌باشد که نسبت به شاهد با کمترین وزن خشک ریشه (۰/۵۶ گرم در گلدان) ۷۹/۴۱ درصد افزایش معنی‌دار نشان می‌دهد (جدول ۳). در غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر، تمامی تیمارهای آهن نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته‌اند. با افزایش غلظت از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر، وزن خشک ریشه در تیمارهای F1 و F4 افزایش معنی‌داری یافته بودند (جدول ۳).

بیشترین مقدار کلروفیل a در تیمار F6 در غلظت ۰/۵ گرم آهن در لیتر (۳/۲۰ میلی‌گرم بر گرم) مشاهده شد که نسبت به شاهد (۲/۳۱ میلی‌گرم بر گرم) ۲۷/۸۱ درصد افزایش معنی‌داری داشت. همچنین، در غلظت ۰/۵ گرم آهن در لیتر، علاوه بر F6، تیمارهای F2، F3 و F5 نیز بر افزایش مقدار کلروفیل a نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشتند (جدول ۳). در غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر در بین تیمارها به جز F8 از لحاظ آماری در مقدار کلروفیل a، هیچگونه تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). با افزایش غلظت آهن از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر، کلروفیل a در تیمارهای F2، F3، F5، F6، F7 و F8 و F9 افزایش یافت. نتایج رید و همکاران (۴۳) نیز هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد به طوری که با محلول پاشی سولفات آهن ۱ درصد پلیمری بر روی گیاه انگور افزایش معنی‌داری در مقدار کلروفیل، و در نتیجه افزایش سبزی گیاه، نسبت به شاهد را

بیشترین مقدار کارتنوئید در برگ گیاه آفتابگردان به ترتیب در مصرف محلول پاشی (۰/۸۵ میلی گرم بر گرم) و مصرف حاکی (۰/۸۳ میلی گرم بر گرم) تیمار آهن Nano Fe-EDTA مشاهده شد که نسبت به شاهد در حد زیادی افزایش معنی دار یافته بود.

معنی دار بود اما این تیمارها نسبت به یکدیگر تفاوت معنی داری نداشتند و در یک سطح آماری قرار گرفته بودند. کمترین مقدار کارتنوئید برگ در تیمار F8 مشاهده شد که تفاوت معنی داری با شاهد نداشت (شکل ۲). شهرکی زاد و همکاران (۵۰) نیز بیان داشتند که



شکل ۲- پیامد ساده منابع آهن بر مقدار کارتنوئید برگ

Figure 2- The simple effects of iron resources on the amount of the leaf carotenoid

گزارش کردند که بیشترین و کمترین غلظت آهن در گیاه لوبیا به ترتیب در محلول پاشی ۴ گرم در لیتر نانوکلات آهن و شاهد مشاهده شد.

نتایج مقایسه میانگین‌های پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول پاشی (جدول ۴) حاکی از آن است که بیشترین جذب آهن در اندام هوایی مربوط به تیمار F6 (۲۶۸/۴۳) با غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر نسبت به شاهد (۲۰/۳۶) با کمترین جذب آهن می‌باشد که ۱۳/۲ برابر افزایش معنی داری نشان داد، که مربوط به غلظت بالای آهن در اندام هوایی (۷۷/۵۲ میلی گرم بر کیلوگرم) و وزن خشک اندام هوایی (۳/۴۶ گرم در گلدان) این تیمار می‌باشد (جدول ۳). نتایج تحقیق حاضر همراستا با نتایج شایلس و همکاران (۵۱) می‌باشد، آن‌ها گزارش دادند که غلظت آهن در جوانه زنی لوبیا با کاربرد نانوذرات معلق در مقایسه با کاربرد بدون نانوذرات افزایش پیدا کرد، حضور این عناصر در گیاهان اسپری شده با نانوذرات معلق که در محلول هوکلند نگهداری می‌شدند یافت شد که اینطور به نظر می‌رسد که اسپری نانوذرات می‌تواند باعث جذب نانوذرات از طریق برگ و انتقال آن‌ها در گیاه شود.

غلظت و جذب آهن در گیاه

نتایج تجزیه واریانس پیامدهای متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول پاشی نشان می‌دهد که غلظت آهن اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال ۱ درصد و جذب آهن ریشه و اندام هوایی در سطح احتمال ۵ درصد افزایش معنی داری نشان دادند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول پاشی نشان داد که بیشترین غلظت آهن در اندام هوایی مربوط به تیمار F7 (۸۴/۴۲ میلی گرم بر کیلوگرم) در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر می‌باشد که نسبت به شاهد ۳ برابر افزایش معنی دار یافته است، و در همین سطح آهن، تیمار F6 با غلظت ۷۷/۵۲ میلی گرم بر کیلوگرم بیشترین افزایش معنی دار را بعد از F7 نسبت به سایر تیمارها داشت (جدول ۴). با افزایش سطح تیمارها از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر، غلظت آهن اندام هوایی در گیاه سورگوم از تیمارهای F1، F2، F3، F4، F5 و F8 افزایش معنی داری نشان دادند. سالارپور و همکاران (۴۸) بیان داشتند که بیشترین غلظت آهن در گیاه شاهی مربوط به تیمار ۴/۵ گرم کلات آهن به همراه محلول پاشی (۸/۵۷ میلی گرم بر کیلوگرم) بدست آمد که در مقایسه با شاهد افزایش معنی داری یافته بود. کمترین مقدار غلظت آهن در اندام هوایی مربوط به تیمار شاهد (۲۸/۷۹ میلی گرم بر کیلوگرم) بود (جدول ۴). نادری و همکاران (۳۶)

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل دو گانه منابع آهن و سطح محلول پاشی بر غلظت و جذب آهن در اندام هوایی و ریشه سورگوم
Table 4- Comparison of the mean effects of intractions iron resources and level of spraying on concentration and absorption of iron in shoots and roots of Sorghum

تیمار Treatment		جذب آهن در اندام هوایی		جذب آهن در ریشه	
سطوح آهن (g.L ⁻¹) Iron levels	منابع آهن Iron sources	غلظت آهن در اندام هوایی Iron Con. in Shoot (mg.kg ⁻¹)	غلظت آهن در اندام هوایی Iron absorption in shoot	غلظت آهن در ریشه Iron con. in root (mg.kg ⁻¹)	جذب آهن در ریشه Iron absorption in root
0.25	شاهد (C)	28.79 ^l	20.36 ^m	677.15 ^m	380.60 ^{gh}
	F1	28.89 ^l	63.24 ^{kl}	798.21 ^h	833.80 ^{ef}
	F2	31.58 ^k	119.06 ^f	753.31 ^j	1591.30 ^c
	F3	31.42 ^k	116.41 ^f	662.00 ⁿ	1625.50 ^c
	F4	31.00 ^k	64.52 ^{kl}	460.42 ^q	683.00 ^{efg}
	F5	33.00 ^j	83.65 ^{ij}	844.31 ^d	2122.60 ^b
	F6	77.52 ^b	268.43 ^a	735.21 ^k	1238.10 ^d
	F7	84.42 ^a	247.32 ^b	871.73 ^c	1414.40 ^{cd}
	F8	35.52 ⁱ	71.44 ^{jk}	841.42 ^e	1301.70 ^d
	F9	44.79 ^e	105.84 ^{fgh}	1007.94 ^a	2687.70 ^a
0.5	F1	39.36 ^g	214.24 ^c	384.84 ^s	904.20 ^{ef}
	F2	58.94 ^d	175.70 ^d	448.00 ^f	652.80 ^{fg}
	F3	35.73 ⁱ	98.79 ^{hi}	793.10 ^j	1198.30 ^d
	F4	37.15 ^h	147.39 ^e	517.79 ^p	1210.40 ^d
	F5	60.94 ^c	173.19 ^d	812.94 ^f	2210.00 ^b
	F6	44.58 ^e	100.18 ^{gh}	700.05 ^l	1210.70 ^d
	F7	58.31 ^d	165.61 ^d	909.89 ^b	1218.30 ^d
	F8	40.89 ^f	70.55 ^{jk}	810.47 ^g	848.20 ^{ef}
		F9	36.63 ^h	139.32 ^e	524.63 ^o

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)

F1 در سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر می‌باشد که نسبت به شاهد (۶۷۷/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) ۷۵/۹۶ درصد کاهش معنی‌داری یافته است. این کاهش با افزایش مقدار کود آهن، می‌تواند ناشی از اثر رقت باشد، چرا که با افزایش وزن خشک (جدول ۳) معمولاً غلظت عناصر به دلیل اثر رقت کاهش می‌یابد.

بیشترین جذب آهن در ریشه مربوط به تیمار ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر F9 (۲۶۸۷/۷) می‌باشد که بیشترین غلظت آهن را دارا می‌باشد و نسبت به سایر تیمارها افزایش معنی‌داری یافته است (جدول ۴). کمترین مقدار جذب آهن مربوط به شاهد (۳۸۰/۶) می‌باشد که کمترین وزن خشک ریشه را دارا می‌باشد (جدول ۳).

وطنی و همکاران (۵۶) گزارش کردند که کاربرد نانوکودهای کلات آهن در گیاه اسفناج پیامدهای مثبتی بر تجمع آهن داشت. محمدی‌پور و همکاران (۳۲) گزارش کردند که بیشترین غلظت آهن در گل سوسن به مقدار ۷۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در محلول پاشی برگی سولفات آهن بدست آمد و پس از آن محلول پاشی نانوکود آهن با ۴۷۵/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم رتبه بعدی را در غلظت آهن به خود اختصاص داد.

فعالیت برخی آنزیمها در گیاه

نتایج تجزیه واریانس پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح

مورتوت و همکاران (۳۴) بیان داشتند که پلیمرهای آب‌دوست پتانسیل بالقوه‌ای در افزایش قابلیت دسترسی سایر عناصر غذایی برای گیاه دارند. برای مثال، وقتی پلیمر پلی‌آکریل‌آمید در محلول حاوی سولفات آهن، آبدار می‌شود، ژل حاصل یک منبع غذایی عالی در خاک‌هایی با قابلیت دسترسی محدود آهن می‌باشد. جذب آهن توسط دانه‌های سورگوم زمانی که سولفات آهن با پلیمر پیوندی پلی‌آکریل‌آمید به‌عنوان کود مورد استفاده قرار گرفت، در مقایسه با کاربرد تنهای سولفات آهن دو برابر گردید. 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 (۳۰). استفاده از پلیمرها جهت عرضه عناصر غذایی ممکن است بتواند شرایط دقیق‌تری را برای تأمین نیاز گیاه فراهم آورد، درحالی‌که بایستی حفاظت از کیفیت محیط زیست و همچنین حفظ منابع طبیعی لحاظ گردد (۲۹).

نتایج مقایسه میانگین پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول پاشی بر غلظت آهن در ریشه (جدول ۴) نشان می‌دهد که بیشترین مقدار غلظت آهن در ریشه (۱۰۰۷/۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مربوط به تیمار F9 در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر می‌باشد که نسبت به سایر تیمارها افزایش معنی‌داری یافته است، و کمترین مقدار غلظت آهن در ریشه (۳۸۴/۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مربوط به تیمار

با کمبود آهن در نخود (*Cicer arietinum* L.) گزارش کردند. ننووا و استویانوو (۳۹) گزارش کردند که شدت کمبود آهن نتیجه فعالیت پایین پراکسیداز، کاتالاز و نیترات ردوکتاز در ذرت (*Zea mays* L.) است.

کاربرد دو تیمار F1 و F4 در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر نیز بر افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز تأثیر مثبتی داشت اما این تأثیر معنی‌دار نبود. با افزایش سطح آهن از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر F5 و F7 افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز را نشان دادند (جدول ۵). معاونی (۳۱) گزارش نمود که غلظت کاتالاز در تیمار ۰/۰۳ درصد نانو آهن در گیاه سورگوم حداکثر افزایش را نشان داد. احتمالاً این افزایش به علت توانایی گیاه در ذخیره‌سازی بیشتر آهن آزاد شده از نانو آهن می‌باشد و بهترین سازوکار جذب آهن از سمت ریشه به ساقه رخ داده بود (۳۱).

محلول‌پاشی نشان می‌دهد که آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات و گایاکول پراکسیداز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده‌اند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول‌پاشی داده‌ها برای آنزیم کاتالاز در جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت مربوط به سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر تیمار F5 (۰/۱۶۰ واحد در گرم بر وزن تر) می‌باشد که نسبت به شاهد ۳۱/۲۵ درصد افزایش معنی‌داری یافته است. با توجه به جدول ۵ کمترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز (۰/۰۵۶ واحد در گرم بر وزن تر) مربوط به تیمارهای F3 و F9 در سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر می‌باشد که نسبت به شاهد ۹۶/۴۲ درصد کاهش معنی‌داری یافته است. احتمالاً این کاهش در فعالیت آنزیم کاتالاز، می‌تواند به دلیل اثر رقت (۱۴) که مربوط به افزایش رشد در اندام هوایی گیاه است (جدول ۳) باشد. کائور و همکاران (۲۱) وابستگی محدود فعالیت پراکسیداز و کاتالاز را

جدول ۵- مقایسه میانگین پیامدهای متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول‌پاشی بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز در برگ

Table 5- Comparison of the mean effects of interactions iron resources and level of spraying on Enzyme activities; Catalase (CAT), Ascorbate peroxidase (APX) and Guaiacol peroxidase (GPOX) in leaves of Sorghum

تیمار Treatment		(Unit.Fresh W ⁻¹) GPOX	(Unit.Fresh W ⁻¹) APX	(Unit.Fresh W ⁻¹) CAT
سطوح آهن (g.L ⁻¹) Iron levels	منابع آهن Iron sources			
0.25	شاهد (C)	0.0063 ^h	0.060 ^{bc}	0.0110 ^c
	F1	0.0080 ^{fgh}	0.076 ^a	0.0120 ^b
	F2	0.0093 ^{cdef}	0.032 ^h	0.0103 ^c
	F3	0.0035 ⁱ	0.054 ^{bcd}	0.0106 ^c
	F4	0.0100 ^{bcde}	0.040 ^{efgh}	0.0126 ^b
	F5	0.0096 ^{cdef}	0.044 ^{defgh}	0.0110 ^c
	F6	0.0066 ^{gh}	0.047 ^{cdef}	0.0063 ^{gh}
	F7	0.0116 ^{ab}	0.046 ^{def}	0.0063 ^{gh}
	F8	0.0090 ^{def}	0.052 ^{bcde}	0.0063 ^{gh}
0.5	F9	0.0110 ^{abc}	0.049 ^{bcdef}	0.0090 ^d
	F1	0.0040 ⁱ	0.060 ^{bc}	0.0076 ^{ef}
	F2	0.0090 ^{def}	0.061 ^b	0.0063 ^{fg}
	F3	0.0103 ^{bcd}	0.054 ^{bcd}	0.0056 ^h
	F4	0.0123 ^a	0.053 ^{bcd}	0.0060 ^h
	F5	0.0110 ^{abc}	0.045 ^{defg}	0.0160 ^a
	F6	0.0090 ^{def}	0.037 ^{gh}	0.0070 ^{fg}
	F7	0.0080 ^{fgh}	0.033 ^{gh}	0.0080 ^e
	F8	0.0100 ^{bcde}	0.048 ^{bcdef}	0.0060 ^h
F9	0.0083 ^{efg}	0.044 ^{defgh}	0.0056 ^h	

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)

۰/۲۵ گرم آهن در لیتر در تیمار F2 (۰/۰۳۲ واحد در گرم بر وزن تر) مشاهده گردید که نسبت به شاهد ۸۷/۵ درصد کاهش معنی‌داری یافت. به نظر می‌رسد به دلیل افزایش وزن خشک گیاه، فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از اثر رقت (۳۴) باشد چراکه با افزایش وزن خشک (جدول ۳) معمولاً غلظت عناصر (غلظت آهن اندام هوایی) (جدول ۴) به دلیل اثر رقت کاهش

مقایسه میانگین پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول‌پاشی بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت این آنزیم مربوط به سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر تیمار F1 (۰/۰۷۶ واحد در گرم بر وزن تر) می‌باشد که نسبت به شاهد (۰/۰۶۰ واحد در گرم بر وزن تر) ۲۱/۰۵ درصد افزایش معنی‌داری یافته است. کمترین مقدار فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در سطح

گایاکول پراکسیداز علاوه بر تیمار F4، در تیمارهای F3 و F6 نیز افزایش معنی داری یافتند (جدول ۵). رانی یری و همکاران (۴۲) توقف فعالیت پراکسیداز را در آفتابگردان دارای کمبود آهن مشاهده کردند. کمبود آهن، همواره موجب از بین رفتن کلروفیل و تخریب ساختمان کلروپلاست و کاهش فعالیت آنزیم‌های اکسیداز نظیر کاتالاز و پراکسیداز می‌گردد (۶۰).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول پاشی نشان می‌دهد محلول پاشی در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر صفات کلروفیل b در تیمار F4، غلظت و جذب آهن در اندام هوایی به ترتیب در تیمارهای F7 و F6، غلظت و جذب آهن در ریشه در تیمار F9 و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار F1 افزایش معنی داری نسبت به شاهد نشان دادند که با افزایش سطح آهن این تیمارها، صفات فوق کاهش معنی داری یافتند. اما در سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر، وزن خشک اندام هوایی در تیمار F1، وزن خشک ریشه و آنزیم کاتالاز در تیمار F5، کلروفیل a در تیمار F6 و آنزیم گایاکول پراکسیداز در تیمار F4 افزایش معنی داری نسبت به شاهد یافتند. پیامدهای ساده منابع آهن بر مقدار کارتنوئید برگ نشان داد که بیشترین مقدار کارتنوئید در تیمار F6 مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش معنی داری یافته است. پژوهش‌های زراعی دقیق در نظر گرفته شده برای تعیین بهای فن‌آوری پلیمر در بهبود باز یافت عناصر غذایی در شرایط گوناگون کشاورزی مورد نیاز است. تیمارهای پلیمری بکار رفته در پژوهش حاضر نیاز به تحقیق بیشتر داشته و تنها به نتایج پژوهش‌های گلخانه‌ای نباید اکتفا کرد، و تحقیقات بیشتر در این زمینه در سطح گلخانه و مزرعه توصیه می‌گردد.

یافته و در نتیجه باعث کاهش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز گردیده است. بیش بود بسیاری از فلزات سنگین از جمله آهن در داخل سلول ممکن است سبب تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن مثل سوپراکسید و هیدروکسیل و نیز ایجاد پراکسید هیدروژن بیشتر شود (۵). کاتالازها و پراکسیدازها از جمله آنزیم‌هایی به شمار می‌آیند که نقش بسیار مهمی در پاسخ به تنش غیرزیستی دارند. افزایش غلظت آهن در گیاهان موجب ایجاد سمیت آهن و تولید انواع اکسیژن‌های فعال می‌شود که تنش اکسیداتیو را در گیاه القاء می‌کند. در شرایط طبیعی پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های آزاد اکسیژن در بخش‌های مختلف یاخته‌های گیاهان ایجاد می‌شود (۵).

مقایسه میانگین پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول پاشی بر آنزیم گایاکول پراکسیداز در جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت این آنزیم مربوط به سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر تیمار F4 (۰/۱۲۳) واحد در گرم بر وزن تر) می‌باشد که نسبت به شاهد (۰/۰۶۳) واحد در گرم بر وزن تر) ۴۸/۷۸ درصد افزایش معنی داری یافته است. در بررسی اثر آهن در گیاهان دارای ارزش دارویی بر روی گیاه (*Bacops monnieri* L.) استفاده از آهن سبب افزایش فعالیت پراکسیداز در ریشه و کاهش فعالیت پراکسیداز در برگ‌ها شد و محتوی آسکوربات هم در ریشه و هم در برگ در مقایسه با شاهد افزایش نشان داد (۴۹). کمترین مقدار فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر در تیمار F3 (۰/۰۳۵) واحد در گرم بر وزن تر) مشاهده گردید که نسبت به شاهد (۰/۰۶۳) واحد در گرم بر وزن تر) ۸۰ درصد کاهش معنی داری یافت. دلیل کاهش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز می‌تواند مربوط به افزایش ناگهانی رشد اندام هوایی گیاه باشد که توسط اثر رقت قابل توجیه می‌باشد و توسط محققین دیگر گزارش شده است (۱۴ و ۳۴). با افزایش سطح آهن از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر، فعالیت آنزیم

منابع

- Alidoust D., and Isoda A. 2014. Phytotoxicity assessment of γ -Fe₂O₃ nanoparticles on root elongation and growth of rice plant. Environmental Earth Sciences, 71:5173-5182.
- 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. International Journal of Biosciences, 4(9):69-75.
- Arnon D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplast, polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. Journal of Plant Physiology, 24:1-75.
- Beers G.R., and Sizer I.V. 1952. A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase. Biological Chemistry, 195:133-140.
- Bhattacharjee S. 2005. Reactive oxygen species and oxidative stress, senescence and signal transduction in plants. Current Science, 89:1113-1121.
- 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.
- Bouyoucos C.J. 1997. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. Agronomy Journal, 54:464-465.

- 8- 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.
- 9- Cottenie A. 1980. Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendation. FAO Soils Bull, 38: 70-73.
- 10- Cui H.C., Sun Q., Liu J., and Gu W. 2006. Applications of Nanotechnology in Agrochemical Formulation. p. 1-6. Perspective, Challenges and Strategies, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing, China.
- 11- Datirli R.B., Apparao B.J., and Laware S.L. 2012. Application of amino acid chelated micronutrient for enhancing growth and productivity in chili (*Capsicum annum* L.). Plant Sciences Feed, 2(6): 100-106.
- 12- 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.
- 13- Fang Y., Wang L., Xin Z., Zhao L.Y., An X.X., and Hu Q.H. 2008. Effect of foliar application of zinc, selenium, and iron fertilizers on nutrients concentration and yield of rice grain in China. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56:2079-2084.
- 14- 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.
- 15- 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. International Journal of Agronomy and Plant Production, 4(11): 2997-3003.
- 16- Godsey R.J., and Johnson B. 2001. Seed treatment, seeding rate, and cultivar effects on iron deficiency chlorosis of soybean. Journal of Plant Nutrition, 24(8): 1255-1268.
- 17- Grillet L., Mari S., and Schmidt W. 2014. Iron in seeds loading pathways and subcellular localization. Frontiers in Plant Science, 4:535.
- 18- 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.
- 19- Hemedá H.M., and Kélin B.P. 1990. Effects of naturally occurring antioxidants on peroxidase activity of vegetables extracts. Journal of Food Science, 55: 184-185.
- 20- 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.
- 21- Kaur N.P., Takkar P.N., and Nayyar V.K. 1984. Catalase, peroxidase, and chlorophyll relationship to yield and iron deficiency chlorosis in Cicer genotypes. Journal of Plant Nutrition, 7:1213-1220.
- 22- 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.
- 23- Li J., Chang P., Huang J., Wang Y., Yuan H., and Ren H. 2013. Physiological effects of magnetic iron oxide nanoparticles towards watermelon. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 13:5561-5567.
- 24- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of American Journal, 42: 421-428.
- 25- Lucena J.J. 2006. Synthetic iron chelates to correct iron deficiency in plants. p. 103-128. In L.L. Barton and J. Abadía (ed.) Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms, Springer: Dordrecht.
- 26- Mahmoudi H., Ksouri R., Gharsalli M., and Lachaal M. 2005. Differences in responses to iron deficiency between two legumes: Lentil (*Lens culinaris*) and chickpea (*Cicer arietinum*). Journal of Plant Physiology, 162(11):1237-1245.
- 27- Marschner H., Romheld V., and Kissel M. 1995. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron. Journal of Plant Nutrition, 9:695-713.
- 28- Masonic A., Evacoli A., and Mavoti M. 1996. Spectral of leaves deficient in iron sulphur, magnesium and manganese. Agronomy Journal, 88(6):937-943.
- 29- Mikkelsen R.L. 1994. Using hydrophilic polymers to control nutrient release. Fertilizer Research, 38: 53-59 .
- 30- Mikkelsen R.L. 1995. Using hydrophilic polymers to improve uptake of manganese fertilizers by soybeans. Fertilizer Research, 41: 87-92.
- 31- Moaveni P. 2014. Study the priming of nano iron on biochemical traits of Sorghum (*Sorghum Bicolor* L.). Data Management Association (DAMA) International, 3(2):102-108.
- 32- Mohamadipoor R., Sedaghathoor S., and Mahboub Khomami A. 2013. Effect of application of iron fertilizers in two methods 'foliar and soil application' on growth characteristics of Spathyphyllum illusion. Iranian Journal of Horticultural Science and Technology, 3(1):232-240.
- 33- Monica R.C., and Cremonini R. 2009. Nanoparticles and higher plants. Caryologia, 62: 161-165.
- 34- Mortvedt J.J., Mikkelsen R.L., and Behel A.D.Jr. 1992. Grain sorghum response to granular formulations of iron

- sources and hydrophilic polymers. *Journal of Plant Nutrition*, 15: 1913-1926.
- 35- Motsara M.R., and Roy R.N. 2008. Plant analysis. p. 80. In *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
 - 36- Nadi E., Ayneband 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.). *International Journal of Biosciences*, 3(9): 267-272.
 - 37- Nakano Y., and Asada K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascarbate specific peroxidases in spinach chloroplasts. *Plant cell physiology*, 22: 867-880.
 - 38- Navarro E., Piccapietra F., Wagner B., Marconi F., Kaegi R., Odzak N., Sigg L., and Behra R. 2008. Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environmental Science and Technology*, American Chemical Society, 42(32): 8959-8964.
 - 39- Nenova V., and Stoyanov I. 1995. Physiological and biochemical changes in young maize plants under iron deficiency. Catalase, peroxidase, and nitrate reductase activities in leaves. *Journal of Plant Nutrition*, 18: 2081-2091.
 - 40- 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.
 - 41- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. ASA and SSSSA. Madison, WI.
 - 42- Ranieri A., Castagna A., Baldan B., and Soldatini G.F. 2001. Iron deficiency differently affects peroxidase isoforms in sunflower. *Journal of Experimental Botany*, 52: 25-35.
 - 43- 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. *Journal of Plant Nutrition*, 11(6-11):1369-1378.
 - 44- 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. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 7: 677-684.
 - 45- 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. *Scientific Journal of Crop Science*, 3(2): 9-16.
 - 46- Rhoades J.D. 1982. Soluble salts. p. 167-179. In: A.L. Page et al. (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. Chemical and microbiological properties. Monograph Number 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
 - 47- 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.
 - 48- Salarpour O., Parsa S., Sayyari M.H., and Jami Alahmadi M. 2013. Effect of Nano-iron Chelates on Growth, Peroxidase Enzyme Activity and Oil Essence of Cress (*Lepidium sativum* L.). *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4: 3583-3589.
 - 49- Sinha S., and Saxena R. 2006. Effect of iron on lipid peroxidation, and enzymatic and non-enzymatic antioxidant and bacoside- A content in medicinal plant *Bacopa monnieri* L. *Chemosphere*, 62(8): 134-135.
 - 50- Shahrakizad M., Gholamalizadeh Ahangar A., and Mir N. 2015. EDTA-Coated Fe₃O₄ nanoparticles: a novel biocompatible fertilizer for improving agronomic traits of sunflower (*Helianthus Annuus*). *Journal of Nanostructures*, 5: 117-127.
 - 51- Shailesh K.D., Pramod M., Rajashri K., and Anand K. 2013. Effect of nanoparticles suspension on the growth of Mung (*Vigna radiata*) seedlings by foliar spray method. *Nanotechnology Development*, 3:e1. 1-5.
 - 52- Sheykhbaglou R., Sedghi M., Tajbakhsh shishevan M., and Sharifi S.R. 2010. Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Scientia Biologicae*, 2:112-113.
 - 53- Toth S.J., and Prince A.L. 1949. Estimation of cation exchange capacity and exchangeable Ca, K and Na contents of soils by flamephotometric techniques. *Soil Science*, 67:439-445.
 - 54- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Alkaline-earth carbonates by gravimetric loss of carbon dioxide. p. 105. 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.
 - 55- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. pH reading of saturated soil paste. p. 102. 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.
 - 56- Vattani H., Keshavarz N., and Baghaei N. 2012. Effect of sprayed Soluble different levels of iron chelate Nano fertilizer on nutrient uptake efficiency in two varieties of spinach (Varamin88 and Virofly). *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(S): 2651-2656.
 - 57- Walkley A., and Black I.A. 1934. Chromic acid titration for determination of soil organic matter. *Soil Science*, 63:251.
 - 58- 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.
 - 59- Yousefi S., Rabhi M., Abdelly C., and Gharsalli M. 2009. Iron deficiency tolerance traits in wild (*Hordeum maritimum*) and cultivated barley (*Hordeum vulgare*). *Comptes Rendus Biologies*, 332(6): 523-533.

- 60- Zuo Y., and Zhang F. 2011. Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops. *Plant and Soil*, 339: 83-93.



The Effect of Foliar Application of Iron Sources on Growth Parameters, Iron Concentration and Activity of Some Enzymes of Sorghum

S. Golshahi¹- A. Gholamalizadeh Ahangar^{2*}- N. Mir³- M. Ghorbani⁴

Received: 23-05-2017

Accepted: 09-10-2017

Introduction: First and the most important requirement of human being is food and food supply, which is directly, or indirectly associated with agriculture. Iron is a critical element for the growth, expansion and survival of the plant, since multiple metabolic and a physiological process is essential for the proper functioning. Agricultural areas in the world have a high pH in soil, which in turn decreases iron absorption by plants. Iron deficiency depending on many soil and environmental factors as well as plant genetic that in turns can decrease the yield and product quality. One method of overcome iron deficiency in plants is foliar application. A foliar application of iron fertilizer in agriculture is the common practice, especially in soils that accompanied with iron deficiency. The proper use of various types of fertilizers is the main solution to improve and maintaining soil fertility and increase crop production. The objective of this study is to evaluate the effect of foliar application of iron sources on growth parameters, concentration and absorption of iron in shoot and root and enzymes activity of catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX) and guaiacol peroxidase (GPOX) on forage sorghum plant to determine the best combination of iron fertilizer.

Materials and Methods: An experiment was conducted in a completely randomized design with factorial arrangement and three replications in greenhouse condition on forage sorghum (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench) varieties of speed feed. The treatments included two levels of iron (0.25 and 0.5 g Fe.L⁻¹ with Control (C)) from nine iron sources (Iron chelate (F1), Iron sulfate (F2), Iron oxide nanoparticles (F3), Monodisperse iron oxide nanoparticles (F4), Green nano iron (F5), Polymeric iron chelate (F6), Polymeric iron sulfate (F7), Polymeric iron oxide nanoparticles (F8) and Polymeric monodisperse iron oxide nanoparticles (F9)). The soil was obtained from educational and research greenhouses of Zabol university and after air drying and sieving passing 2 mm, some physical and chemical characteristics of soil such as texture, pH, electrical conductivity, cations exchange capacity, calcium carbonate equivalent, organic matter, total nitrogen contents, available P contents, available K contents and available Fe contents was measurement. Spraying of iron resources performed in two stages (4 leaf and the two weeks after first spraying). After two months of planting, the shoot cut from the surface of the soil and roots of the plants collected. Some parameters such as shoot and root dry weight, chlorophyll a, b and carotenoids, iron concentration in shoot and root, iron absorption in shoot and root, and activity of the enzyme (catalase, ascorbate peroxidase, guaiacol peroxidase) was measured. The experimental data examined using Excel and SAS 9.4 statistical software and the averages were compared using Duncan's Multiple Range Tests at 0.01 and 0.05 significance level.

Results: Results analysis of variance indicated that the interaction effects between iron resources and iron level on the dry weight of shoots and roots, chlorophyll a and b, iron absorption in shoots and roots, enzymes guaiacol peroxidase. Ascorbate peroxidase and catalase were significant at the level of 5 percent and iron concentrations in shoots and roots were significant at the level of 1 percent. The carotenoid content in leaves in the simple effects of iron resources was significant at the level of 5 percent. According to the results, foliar application of treatments on dry weight of shoots and roots, Fe concentration and Fe absorption by shoots and roots, chlorophyll a, b and the enzyme activity of APX, GPOX in addition CAT were significantly increased compared to Control. Foliar application at 0.25 g Fe.L⁻¹, chlorophyll b in the treatment of monodisperse iron oxide nanoparticles, Fe concentration and Fe absorption in the shoots in treatments of polymeric iron sulfate and polymeric iron chelate, respectively. Fe concentration and Fe absorption in the roots in treatment of polymeric monodisperse iron oxide nanoparticles and APX activity in iron chelate treatment increased significantly compared to control. At level of 0.5 g Fe.L⁻¹, dry weight of shoots in the treatment of iron chelate, dry weight of roots and CAT enzyme in the treatment of green nano iron, chlorophyll a in the treatment of polymeric iron chelate and GPOX enzyme in the treatment of monodisperse iron oxide nanoparticles were compared with the

1, 2 and 4- Former M.Sc. Student, Associate Professor and Instructor in Soil Science, Soil and Water Engineering Faculty, University of Zabol, Respectively

(*- Corresponding Author Email: ahangar@uoz.ac.ir)

3- Assistant Professor in Chemistry, Department of Chemistry, University of Zabol, Zabol, Iran

control increased significantly. The simple effects of iron sources indicated that the highest level of carotenoids observed in the foliar application of polymeric iron chelate.

Keywords: Ascorbate peroxidase, Dry weight of shoot and root, Monodisperse iron oxide nanoparticles, Polymeric iron sulfate

تأثیر محلول‌پاشی منابع آهن بر پارامترهای رشد، غلظت آهن و فعالیت برخی آنزیم‌های گیاه

سورگوم

صبیره گلشاهی^۱ - احمد غلامعلی زاده آهنگر^{۲*} - نوشین میر^۳ - مریم قربانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۱۷

چکیده

به منظور بررسی اثر محلول‌پاشی منابع مختلف آهن بر پارامترهای رشد، غلظت و جذب آهن و فعالیت آنزیمی در گیاه سورگوم رقم اسپیدفید (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench)، آزمایشی در شرایط گلخانه در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل در سه تکرار اجرا شد. تیمارها شامل دو سطح آهن (۰/۲۵ و ۰/۵ گرم آهن در لیتر همراه با شاهد (C)) از نه منبع کودی آهن (کلات آهن (F1)، سولفات آهن (F2)، نانوآکسید آهن (F3)، نانوآکسید آهن تک‌پاش (F4)، نانو آهن سبز (تجاری) (F5)، کلات آهن پلیمری (F6)، سولفات آهن پلیمری (F7)، نانوآکسید آهن پلیمری (F8) و نانوآکسید آهن تک‌پاش پلیمری (F9)) بود. با توجه به نتایج پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول‌پاشی، در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر، کلروفیل b در تیمار نانوآکسید آهن تک‌پاش، غلظت و جذب آهن در اندام هوایی به ترتیب در تیمارهای سولفات آهن پلیمری و کلات آهن پلیمری، غلظت و جذب آهن در ریشه در تیمار نانوآکسید آهن تک‌پاش پلیمری و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار کلات آهن افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد نشان دادند. در سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر، وزن خشک اندام هوایی در تیمار کلات آهن، وزن خشک ریشه و آنزیم کاتالاز در تیمار نانو آهن سبز، کلروفیل a در تیمار کلات آهن پلیمری و آنزیم گایاکول پراکسیداز در تیمار نانوآکسید آهن تک‌پاش افزایش معنی‌داری نسبت به شاهد یافتند. همچنین پیامدهای ساده منابع آهن نشان داد که بیشترین مقدار کارتنوئید در تیمار کلات آهن پلیمری دیده شد.

واژه‌های کلیدی: آسکوربات پراکسیداز، سولفات آهن پلیمری، نانوآکسید آهن تک‌پاش، وزن خشک اندام هوایی و ریشه

مقدمه

اندام‌های گیاه است و به همین علت نشانه‌های کمبود آهن بیشتر در برگ‌های جوان ظاهر می‌شوند و این در حالی است که برگ‌های پیرتر سالم‌تر به نظر می‌آیند و آهن فقط از طریق آوند چوبی به سلول‌های برگ جوان می‌رسد (۲۷). کمبود آهن منجر به زرد برگی (۲۶)، کاهش فتوسنتز و غلظت کلروفیل (۲۲)، کاهش وزن خشک اندام هوایی و ریشه (۵۹)، تغییر غلظت و محتوای آهن (۲۶) و محدود شدن فعالیت آنزیم‌هایی همانند پراکسیداز و کاتالاز (۲۱ و ۴۲) می‌شود. این صفات ارتباط بسیار نزدیکی با عملکرد گیاهان زراعی دارند.

روش‌های مختلفی برای رفع کمبود آهن در گیاهان پیشنهاد شده که می‌توان به مصرف خاکی، محلول‌پاشی و یا اختلاط آهن با بذر اشاره کرد (۱۶). مصرف کودهای معدنی آهن‌دار برای رفع کمبود مؤثر واقع نشده و به سرعت به ترکیبات نامحلول و غیرقابل جذب در خاک تبدیل می‌شوند ولی محلول‌پاشی با کلات‌های آهن باعث جذب بهتر آهن و توزیع سریع‌تر آن در اندام‌های گیاهی و نقاط مصرف می‌شود (۱۱). مصرف برگ‌های آهن (سولفات آهن یا کلات‌های آهن) روشی معمول در کشاورزی می‌باشد، بویژه در خاک‌هایی که با کمبود آهن

با افزایش جمعیت، اهمیت کشاورزی برای تمام جوامع بشری بیش از هر زمان دیگری مشخص شده است. اولین و مهم‌ترین نیاز هر انسان، به مواد غذایی و عرضه مواد غذایی است که در ارتباط مستقیم و غیرمستقیم با کشاورزی می‌باشد. آهن عنصری حیاتی برای رشد، گسترش و بقای گیاه می‌باشد، چراکه برای عملکرد صحیح متابولیک‌های چندانگانه و فرآیندهای فیزیولوژیکی ضروری است (۱۷). با اینکه آهن در سرتاسر پوسته زمین وجود دارد، اما مشکلات حلالیت ترکیب‌های آهن در خاک‌ها، مانع جذب آهن توسط گیاه شده و علائم کمبود آهن در گیاه گسترش می‌یابد (۲۵). آهن فاقد قدرت تحرک در

۱، ۲ و ۴ - به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و مربی گروه خاکشناسی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

* - نویسنده مسئول: (Email: ahangar@uoz.ac.ir)

۳ - استادیار گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زابل

مواد و روش‌ها

این آزمایش در شرایط گلخانه و بر روی گیاه سورگوم علوفه‌ای رقم اسپیدفید (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench) در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با ۹ تیمار مختلف کودی آهن شامل کلات آهن (F1)، سولفات آهن (F2)، نانو اکسید آهن (F3)، نانو اکسید آهن تک‌پاش (F4)، نانو آهن سبز (F5)، کلات آهن پلیمری (F6)، سولفات آهن پلیمری (F7)، نانو اکسید آهن پلیمری (F8) و نانو اکسید آهن تک‌پاش پلیمری (F9) با سطوح آهن ۰/۲۵ و ۰/۵ گرم آهن خالص در لیتر همراه با شاهد (C) (۱۲) در سه تکرار طراحی و اجرا شد. 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 ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از جمله بافت به روش هیدرومتری (۷)، پهاش در گل اشباع به وسیله پهاش‌متر (۵۵)، قابلیت هدایت الکتریکی با هدایت‌سنج الکتریکی (۴۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش جانشین کردن کاتیون‌های قابل تبادل با یون سدیم با استفاده از اساتات سدیم در pH=۷ و سپس جایگزین نمودن یون‌های سدیم با آمونیوم و اندازه‌گیری با دستگاه فلیم‌فتمتر (۵۳)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (۵۴)، ماده آلی به روش والکی و بلک (۵۷)، نیتروژن کل به روش کجلدال (۴۱)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (۴۰)، غلظت آهن فراهم خاک با DTPA عصاره‌گیری (۲۴) و توسط دستگاه جذب اتمی قرائت گردید و پتاسیم عصاره‌گیری شده با اساتات آمونیوم (۱۸) توسط دستگاه فلیم‌فتمتر تعیین گردید (جدول ۱).

سه کیلوگرم خاک الک شده در کیسه‌های پلاستیکی ریخته شد. قبل از کشت بذرها، با توجه به آزمون خاک و برای جلوگیری از کمبود احتمالی عناصر ماکرو، ۱۵۰ میلی‌گرم نیتروژن بر کیلوگرم خاک در دو مرحله، ۷۵ میلی‌گرم پتاسیم بر کیلوگرم خاک و ۷۵ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک به گلدان‌ها افزوده شد. پس از چند روز که رطوبت خاک داخل کیسه‌ها به حد مناسبی رسید، خاک کیسه‌ها کاملاً مخلوط 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 زراعی آبیاری شدند. 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

همراه هستند (۱۳). کاربرد مفید و مناسب انواع مختلف کودها راه‌حل اصلی برای اصلاح و نگهداری حاصلخیزی خاک و افزایش تولید محصولات است (۴۵).

بروس‌چات و موره (۸) با کاربرد سولفات آهن و فرسولفات سولفات آمونیوم مشاهده کردند که غلظت آهن در گیاه همیشه بهار آفریقایی (*Tagetes Erecta*) افزایش و وزن خشک آن کاهش یافت. برووسکی و مایکلک (۶) گزارش کردند که کاربرد برگی نمک آهن مقدار کلروفیل a، b و کاروتنوئید لویبا سبز^۱ را افزایش می‌دهد. شیخ بوغلو و همکاران (۵۲) نشان دادند که کاربرد نانو ذرات اکسید آهن عملکرد سویا را افزایش می‌دهد. غفاری و رزمجو (۱۵) گزارش کردند کاربرد نانو اکسید آهن بر مقدار کلروفیل a، b و کل گیاه گندم در مقایسه با شاهد افزایش معنی‌داری نشان دادند. آرمین و همکاران (۲) مشاهده کردند با افزایش غلظت نانو آهن، عملکرد و اجزای عملکرد گندم افزایش می‌یابد. هر چند که در حال حاضر، ساز و کار مشخصی برای سمیت نانو ذرات در گیاهان وجود ندارد (۳۸)، اما بررسی‌های به عمل آمده در رابطه با مواد نانو ساختار یا نانو مقیاس به عنوان حامل کودی یا ناقل کنترل‌کننده رهاسازی به منظور ایجاد کودهای هوشمند بوده است. فن‌آوری نانو منشاء امیدواری‌های بسیاری در جهت عبور از محدودیت‌های تکنیکی موجود بر سر راه آزادسازی آرام و کنترل شده عناصر کودها شده است (۱۰). برخی پژوهش‌ها پیامد مثبت نانو ذرات آهن را بر روی گیاهان گزارش کردند (۱). لی و همکاران (۲۳) و رن و همکاران (۴۴) مشاهده کردند که نانو ذرات آهن می‌توانند از لحاظ فیزیولوژیکی، جوانه‌زنی بذر، رشد ریشه و مقدار کلروفیل را در گیاهان هندوانه و لوبیای مونگ^۲ افزایش دهند، اما طی این روند تنش اکسیداتیو به گیاهان القا می‌گردد. وانگ و همکاران (۵۸) گزارش کردند که سطح ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو اکسید آهن، مقدار کلروفیل برگ گیاه هندوانه را افزایش می‌دهد. برخی پژوهش‌ها افزایش مقدار کلروفیل گیاهانی که در برابر نانو اکسید آهن قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهند (۴۴). روی و همکاران (۴۷) بیان داشتند که نانو ذرات آهن می‌توانند جایگزین مناسبی برای کودهای آهن سنتی در کشت گیاه بادام زمینی باشند. هو و همکاران (۲۰) در تحقیقی بر روی گیاه *Citrus maxima* گزارش کردند که مصرف ۵۰ میلی‌گرم در لیتر نانو ذرات آهن افزایش معنی‌داری در مقدار کلروفیل برگ، نسبت به شاهد (۲۳/۲ درصد) نشان داد. هدف از این پژوهش مقایسه اثر محلول‌پاشی منابع مختلف آهن بر پارامترهای رشد، غلظت و جذب آهن و فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات و گایاکول پراکسیداز بر روی گیاه سورگوم علوفه‌ای جهت یافتن بهترین ترکیب کودی آهن می‌باشد.

1- French Bean

2- Mung Bean

نمونه‌ها جهت انجام تجزیه گیاه آسیاب و عصاره گیاهی به روش خاکسترسازی خشک آماده شد (۹).

مدت ۴۸ ساعت خشک گردید (۳۵). سپس وزن خشک اندام هوایی و ریشه‌ها با استفاده از ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم دیجیتالی تعیین و

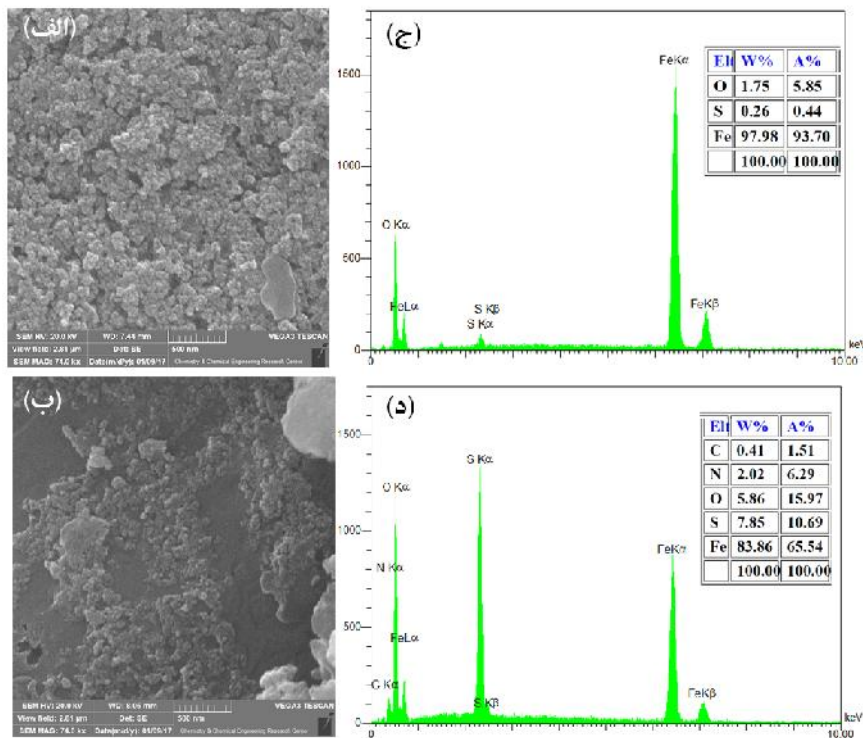
جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

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

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

و آنزیم آسکوربات پراکسیداز براساس روش ناکانو و اسدا (۳۷) مورد سنجش قرار گرفت و در نهایت فعالیت آنزیمی بر حسب واحد (Unit=U) در گرم بر وزن تر بیان گردید. داده‌های آزمایش با استفاده از نرم افزارهای آماری SAS 9.4 و Excel و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد انجام شد.

مقدار کلروفیل a، b و کارتنوئید، بر اساس روش آرنون (۳) تعیین گردید. جهت محاسبه و ارزیابی فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز، تعدادی برگ کاملاً جوان و گسترده برداشت شد. برگ‌ها داخل پاکت قرار گرفتند و در ظروف عایق که کف آن از یخ پوشیده شده بود قرار دادند و سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل گردید. فعالیت آنزیم کاتالاز براساس روش بیرز و سایزر (۴)، آنزیم گایاکول پراکسیداز براساس روش همدا و کلین (۱۹)



شکل ۱- تصاویر SEM و EDX (الف) و (ب) نانواکسید آهن (F3) و نانواکسید آهن تک‌پاش (F4)

Figure 1- SEM and EDX images (a) and (b) Iron oxide nanoparticles (F3) and Monodisperse iron oxide nanoparticles (F4)

شکل ۱ مورفولوژی و ترکیب عنصری نانوذرات تهیه شده را نشان می‌دهد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانواکسید آهن (F3) و نانواکسید آهن تک‌پاش (F4) به ترتیب در شکل ۱الف و

نتایج و بحث

مورفولوژی و ترکیب عنصری نانوذرات

شاخص‌های رشدی سورگوم

نتایج تجزیه واریانس پیامدهای ساده و متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول‌پاشی نشان می‌دهد که غلظت آهن اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال ۱ درصد و جذب آهن ریشه و آنزیم کاتالاز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). اثرات ساده منابع آهن و اثرات متقابل دوگانه سطح و منابع آهن نشان می‌دهد که وزن خشک اندام هوایی و ریشه، کلروفیل a و b برگ، جذب آهن اندام هوایی و آنزیم‌های گایاکول و آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۲). میزان محتوای کارتنوئید برگ نیز در سطح احتمال ۵ درصد در اثرات ساده منابع آهن معنی‌دار گردید (جدول ۲).

ب نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، نمونه F3 که بدون حضور هیچ سورفکتانت و یا پلیمری تهیه شده است به میزان بیشتری نسبت به نمونه F4 تجمع یافته است. در حقیقت همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، نانوذرات در میان مواد سورفکتانت که در حین تهیه به محلول اضافه شده‌اند قرار دارند و این موجب جدایی بیشتر نانوذرات از یکدیگر می‌شود. هر چه نانوذرات بیشتر به صورت تک‌پاش باشند احتمال اینکه بتوانند از روزه‌های برگ وارد گیاه شوند بیشتر است. از طرفی افزودن پلیمر به این نانوذرات سبب می‌شود تا حلالیت نانوذرات بیشتر شده و راحت‌تر به گیاه وارد شوند. شکل ۱ ج و د به ترتیب آنالیز EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) نانوذرات F3 و F4 را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در نمونه F4 علاوه بر آهن و اکسیژن، کربن نیز وجود دارد که به وجود سورفکتانت در میان نانوذرات دلالت دارد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثرات متقابل منابع آهن و سطح محلول‌پاشی بر برخی پارامترهای رشد، غلظت و جذب آهن در اندام هوایی و ریشه و فعالیت آنزیم‌های برگ

Table 2- Analysis of variance interaction between iron and level of spraying on some growth parameters, concentration and absorption of iron in the shoot and root and leaf enzyme activity

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean Square					
		وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	کلروفیل a	کلروفیل b	کارتنوئید	غلظت آهن در اندام هوایی
		Dry weight of shoot	Dry weight of root	Chl. a	Chl. b	Carotenoid	Iron Con. in Shoot
C ^a	1	0.0707ns	0.0866ns	0.0487ns	0.2653ns	0.0960ns	65.9611**
F ^b	9	4.6195*	1.7682*	1.2724*	3.2515*	0.2790*	1139.9126**
C*F	9	3.2281*	0.8102*	0.0464*	1.5689*	0.0486ns	608.3000**
Error	40	0.0502	0.0489	0.0362	0.1016	0.0221	0.2864
C.V. (%)	-	8.1430	12.7817	7.0469	16.5579	16.9214	1.2433

منابع تغییرات SOV	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean Square					
		جذب آهن در اندام هوایی	غلظت آهن در ریشه	جذب آهن در ریشه	گایاکول	آسکوربات	کاتالاز
		Iron absorption in shoot	Iron con. in root	Iron absorption in root	GPOX	APX	CAT
C ^a	1	264.5580ns	172904.3538**	1394310.75*	0.0000ns	0.0005ns	0.0000*
F ^b	9	17155.5808*	93076.7315**	1453765.54*	0.0000*	0.0004*	0.0000*
C*F	9	14275.6744*	67921.1812**	620250.62*	0.0000*	0.0001*	0.0000*
Error	40	82.1200	0.313	20698.67	0.0000	0.0000	0.0000
C.V. (%)	-	7.3600	0.0786	11.6454	17.5531	13.0092	6.9734

^a سطح آهن، ^b منابع آهن، *، ** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و ns غیر معنی‌دار

^a Iron Level, ^b Iron Sources, * and ** denoted significance at the 5 and 1 percent level; ns is not significant

(جدول ۳). با افزایش غلظت آهن از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر علاوه بر تیمار F1، تیمارهای F4 (۳/۹۷ گرم در گلدان) و F9 (۳/۸۰ گرم در گلدان) نیز از لحاظ آماری افزایش معنی‌داری یافته‌اند (جدول ۳). با توجه به قطر نانوذرات انتظار می‌رود سرعت جذب، انتقال و تجمع ذرات نانو بسیار بیشتر از ذرات معمول باشد. بالا بودن کارایی جذب و سطح مخصوص نانوذرات در مقایسه با ذرات معمول، اثرگذاری بیشتر این ذرات را می‌تواند توجیه کند (۳۳).

مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول‌پاشی نشان می‌دهد که بیشترین وزن خشک اندام هوایی مربوط به غلظت ۰/۵ گرم آهن در لیتر تیمار F1 (۵/۴۴ گرم در گلدان) می‌باشد که نسبت به شاهد (۰/۷۱ گرم در گلدان) با کمترین وزن خشک اندام هوایی ۸۶/۹۵ درصد افزایش معنی‌دار نشان داد (جدول ۳). در غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر نیز به ترتیب تیمارهای F2، F3 و F6 افزایش معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی نسبت به شاهد نشان دادند

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول پاشی بر برخی پارامترهای رشد در اندام هوایی و ریشه گیاه
Table 3- Comparison of the mean effects of interactions iron resources and level of spraying on some growth parameters in shoots and roots of the plant

تیمار Treatment		وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک ریشه	کلروفیل a	کلروفیل b
سطوح آهن (g.L ⁻¹)	منابع آهن	Dry weight of shoot (g.Pot ⁻¹)	Dry weight of root (g.Pot ⁻¹)	Chlo. a (mg.g ⁻¹ fresh weight)	Chlo. b (mg.g ⁻¹ fresh weight)
Iron levels	Iron sources				
0.25	شاهد (C)	0.71 ⁱ	0.56 ^g	2.31 ^{gh}	0.94 ^{gh}
	F1	2.18 ^{fg}	1.04 ^f	3.14 ^{ab}	2.83 ^b
	F2	3.77 ^{bc}	2.11 ^{bc}	3.00 ^{abc}	1.57 ^{ef}
	F3	3.70 ^{bc}	2.46 ^{ab}	3.07 ^{abc}	2.23 ^{cd}
	F4	2.08 ^{gh}	1.48 ^{de}	2.79 ^{bcd}	3.99 ^a
	F5	2.53 ^{ef}	2.51 ^{ab}	2.77 ^{bcd}	1.64 ^{def}
	F6	3.46 ^c	1.68 ^{de}	3.02 ^{abc}	2.87 ^b
	F7	2.93 ^{de}	1.62 ^{de}	2.65 ^{def}	1.96 ^{cde}
	F8	2.01 ^{gh}	1.55 ^{de}	1.55 ⁱ	0.69 ^h
0.5	F9	2.36 ^{fg}	2.66 ^a	2.42 ^{fgh}	1.18 ^{fgh}
	F1	5.44 ^a	2.35 ^{ab}	2.86 ^{abc}	1.28 ^{fgh}
	F2	2.98 ^d	1.45 ^{de}	3.07 ^{abc}	1.96 ^{cde}
	F3	2.76 ^{de}	1.51 ^{de}	3.09 ^{ab}	3.03 ^b
	F4	3.97 ^b	2.34 ^{ab}	2.71 ^{cde}	2.47 ^{bc}
	F5	2.84 ^{de}	2.72 ^a	3.04 ^{abc}	2.52 ^{bc}
	F6	2.25 ^{fg}	1.73 ^{cde}	3.20 ^a	1.74 ^{def}
	F7	2.84 ^{de}	1.34 ^{ef}	2.83 ^{abc}	1.39 ^{efg}
	F8	1.72 ^h	1.04 ^f	1.76 ⁱ	0.91 ^{gh}
F9	3.80 ^{bc}	1.79 ^{cd}	2.57 ^{efg}	2.47 ^{bc}	

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)

گزارش کردند.

بیشترین مقدار کلروفیل b در تیمار F4 در غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر (۳/۹۹ میلی‌گرم بر گرم) مشاهده شد که نسبت به شاهد (۰/۹۴ میلی‌گرم بر گرم) و سایر تیمارها در همین سطح آهن، افزایش معنی‌داری داشت. اگرچه کمترین مقدار کلروفیل b نیز در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در تیمار F8 (۰/۶۹ میلی‌گرم بر گرم) مشاهده گردید ولی نسبت به شاهد (۰/۹۴ میلی‌گرم بر گرم) این کاهش معنی‌دار نبود (جدول ۳). با محلول پاشی نانوکلات آهن به واسطه افزایش رشد سبزینه‌ای، بهبود کلروفیل‌سازی گیاه و افزایش ظرفیت و فرایند فتوسنتزی، اندام‌های زایشی بیشتری ساخته شده و سهم دریافتی مواد پرورده آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه ضمن افزایش اجزای عملکرد و عملکرد دانه، عملکرد روغن و عملکرد پروتئین افزوده می‌شود (۳۳). ماسونیک و همکاران (۲۸) در ایتالیا اثر کمبود آهن را بر گیاهان آفتابگردان، ذرت، گندم و جو بررسی و مشاهده کردند که کمبود آهن موجب کاهش کلروفیل شده در نتیجه عملکرد و ماده خشک گیاه را نیز کاهش می‌دهد.

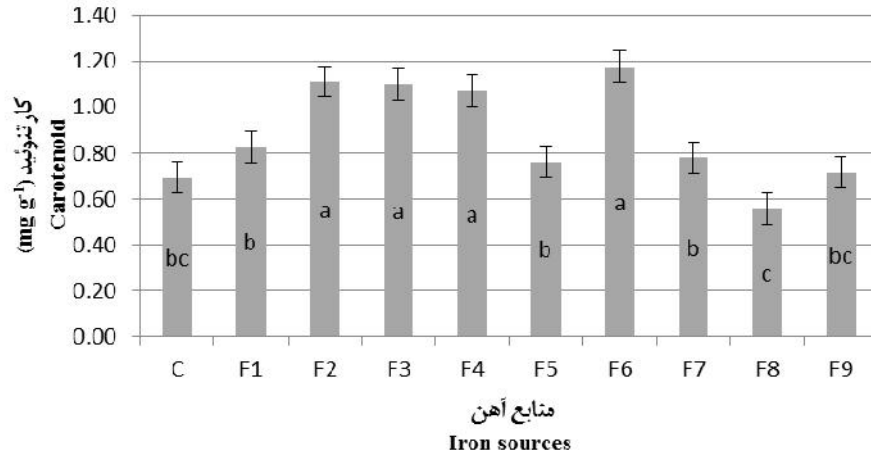
نتایج مقایسه میانگین اثرات ساده منابع آهن بر مقدار کارتنوئید برگ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار کارتنوئید برگ در تیمار F6 مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته است (شکل ۲). با توجه به شکل ۲، بعد از آن بیشترین مقدار کارتنوئید به ترتیب در تیمارهای F2، F3 و F4 دیده شد که نسبت به شاهد این افزایش،

بیشترین وزن خشک ریشه ریشه ۲/۷۲ گرم در گلدان) مربوط به غلظت ۰/۵ گرم آهن در لیتر F5 می‌باشد که نسبت به شاهد با کمترین وزن خشک ریشه (۰/۵۶ گرم در گلدان) ۷۹/۴۱ درصد افزایش معنی‌دار نشان می‌دهد (جدول ۳). در غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر، تمامی تیمارهای آهن نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافته‌اند. با افزایش غلظت از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر، وزن خشک ریشه در تیمارهای F1 و F4 افزایش معنی‌داری یافته بودند (جدول ۳).

بیشترین مقدار کلروفیل a در تیمار F6 در غلظت ۰/۵ گرم آهن در لیتر (۳/۲۰ میلی‌گرم بر گرم) مشاهده شد که نسبت به شاهد (۲/۳۱ میلی‌گرم بر گرم) ۲۷/۸۱ درصد افزایش معنی‌داری داشت. همچنین، در غلظت ۰/۵ گرم آهن در لیتر، علاوه بر F6، تیمارهای F2، F3 و F5 نیز بر افزایش مقدار کلروفیل a نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشتند (جدول ۳). در غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر در بین تیمارها به جز F8 از لحاظ آماری در مقدار کلروفیل a، هیچگونه تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۳). با افزایش غلظت آهن از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر، کلروفیل a در تیمارهای F2، F3، F5، F6، F7 و F8 و F9 افزایش یافت. نتایج رید و همکاران (۴۳) نیز هم‌راستا با نتایج پژوهش حاضر می‌باشد به طوری که با محلول پاشی سولفات آهن ۱ درصد پلیمری بر روی گیاه انگور افزایش معنی‌داری در مقدار کلروفیل، و در نتیجه افزایش سبزی گیاه، نسبت به شاهد را

بیشترین مقدار کارتنوئید در برگ گیاه آفتابگردان به ترتیب در مصرف محلول پاشی (۰/۸۵ میلی گرم بر گرم) و مصرف حاکی (۰/۸۳ میلی گرم بر گرم) تیمار آهن Nano Fe-EDTA مشاهده شد که نسبت به شاهد در حد زیادی افزایش معنی دار یافته بود.

معنی دار بود اما این تیمارها نسبت به یکدیگر تفاوت معنی داری نداشتند و در یک سطح آماری قرار گرفته بودند. کمترین مقدار کارتنوئید برگ در تیمار F8 مشاهده شد که تفاوت معنی داری با شاهد نداشت (شکل ۲). شهرکی زاد و همکاران (۵۰) نیز بیان داشتند که



شکل ۲- پیامد ساده منابع آهن بر مقدار کارتنوئید برگ

Figure 2- The simple effects of iron resources on the amount of the leaf carotenoid

گزارش کردند که بیشترین و کمترین غلظت آهن در گیاه لوبیا به ترتیب در محلول پاشی ۴ گرم در لیتر نانوکلات آهن و شاهد مشاهده شد.

نتایج مقایسه میانگین‌های پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول پاشی (جدول ۴) حاکی از آن است که بیشترین جذب آهن در اندام هوایی مربوط به تیمار F6 (۲۶۸/۴۳) با غلظت ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر نسبت به شاهد (۲۰/۳۶) با کمترین جذب آهن می‌باشد که ۱۳/۲ برابر افزایش معنی داری نشان داد، که مربوط به غلظت بالای آهن در اندام هوایی (۷۷/۵۲ میلی گرم بر کیلوگرم) و وزن خشک اندام هوایی (۳/۴۶ گرم در گلدان) این تیمار می‌باشد (جدول ۳). نتایج تحقیق حاضر هم‌راستا با نتایج شایلس و همکاران (۵۱) می‌باشد، آن‌ها گزارش دادند که غلظت آهن در جوانه‌زنی لوبیا با کاربرد نانوذرات معلق در مقایسه با کاربرد بدون نانوذرات افزایش پیدا کرد، حضور این عناصر در گیاهان اسپری شده با نانوذرات معلق که در محلول هوکلند نگهداری می‌شدند یافت شد که اینطور به نظر می‌رسد که اسپری نانوذرات می‌تواند باعث جذب نانوذرات از طریق برگ و انتقال آن‌ها در گیاه شود.

غلظت و جذب آهن در گیاه

نتایج تجزیه واریانس پیامدهای متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول پاشی نشان می‌دهد که غلظت آهن اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال ۱ درصد و جذب آهن ریشه و اندام هوایی در سطح احتمال ۵ درصد افزایش معنی داری نشان دادند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول پاشی نشان داد که بیشترین غلظت آهن در اندام هوایی مربوط به تیمار F7 (۸۴/۴۲ میلی گرم بر کیلوگرم) در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر می‌باشد که نسبت به شاهد ۳ برابر افزایش معنی دار یافته است، و در همین سطح آهن، تیمار F6 با غلظت ۷۷/۵۲ میلی گرم بر کیلوگرم بیشترین افزایش معنی دار را بعد از F7 نسبت به سایر تیمارها داشت (جدول ۴). با افزایش سطح تیمارها از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر، غلظت آهن اندام هوایی در گیاه سورگوم از تیمارهای F1، F2، F3، F4، F5 و F8 افزایش معنی داری نشان دادند. سالارپور و همکاران (۴۸) بیان داشتند که بیشترین غلظت آهن در گیاه شاهی مربوط به تیمار ۴/۵ گرم کلات آهن به همراه محلول پاشی (۸/۵۷ میلی گرم بر کیلوگرم) بدست آمد که در مقایسه با شاهد افزایش معنی داری یافته بود. کمترین مقدار غلظت آهن در اندام هوایی مربوط به تیمار شاهد (۲۸/۷۹ میلی گرم بر کیلوگرم) بود (جدول ۴). نادری و همکاران (۳۶)

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل دو گانه منابع آهن و سطح محلول پاشی بر غلظت و جذب آهن در اندام هوایی و ریشه سورگوم
 Table 4- Comparison of the mean effects of intractions iron resources and level of spraying on concentration and absorption of iron in shoots and roots of Sorghum

تیمار Treatment		جذب آهن در اندام هوایی		جذب آهن در ریشه	
سطوح آهن (g.L ⁻¹) Iron levels	منابع آهن Iron sources	غلظت آهن در اندام هوایی Iron Con. in Shoot (mg.kg ⁻¹)	غلظت آهن در اندام هوایی Iron absorption in shoot	غلظت آهن در ریشه Iron con. in root (mg.kg ⁻¹)	جذب آهن در ریشه Iron absorption in root
0.25	شاهد (C)	28.79 ^l	20.36 ^m	677.15 ^m	380.60 ^{gh}
	F1	28.89 ^l	63.24 ^{kl}	798.21 ^h	833.80 ^{ef}
	F2	31.58 ^k	119.06 ^f	753.31 ^j	1591.30 ^c
	F3	31.42 ^k	116.41 ^f	662.00 ⁿ	1625.50 ^c
	F4	31.00 ^k	64.52 ^{kl}	460.42 ^q	683.00 ^{efg}
	F5	33.00 ^j	83.65 ^{ij}	844.31 ^d	2122.60 ^b
	F6	77.52 ^b	268.43 ^a	735.21 ^k	1238.10 ^d
	F7	84.42 ^a	247.32 ^b	871.73 ^c	1414.40 ^{cd}
	F8	35.52 ⁱ	71.44 ^{jk}	841.42 ^e	1301.70 ^d
	F9	44.79 ^e	105.84 ^{fgh}	1007.94 ^a	2687.70 ^a
0.5	F1	39.36 ^g	214.24 ^c	384.84 ^s	904.20 ^{ef}
	F2	58.94 ^d	175.70 ^d	448.00 ^f	652.80 ^{fg}
	F3	35.73 ⁱ	98.79 ^{hi}	793.10 ^j	1198.30 ^d
	F4	37.15 ^h	147.39 ^e	517.79 ^p	1210.40 ^d
	F5	60.94 ^c	173.19 ^d	812.94 ^f	2210.00 ^b
	F6	44.58 ^e	100.18 ^{gh}	700.05 ^l	1210.70 ^d
	F7	58.31 ^d	165.61 ^d	909.89 ^b	1218.30 ^d
	F8	40.89 ^f	70.55 ^{jk}	810.47 ^g	848.20 ^{ef}
		F9	36.63 ^h	139.32 ^e	524.63 ^o

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)

F1 در سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر می‌باشد که نسبت به شاهد (۶۷۷/۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) ۷۵/۹۶ درصد کاهش معنی‌داری یافته است. این کاهش با افزایش مقدار کود آهن، می‌تواند ناشی از اثر رقت باشد، چرا که با افزایش وزن خشک (جدول ۳) معمولاً غلظت عناصر به دلیل اثر رقت کاهش می‌یابد.

بیشترین جذب آهن در ریشه مربوط به تیمار ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر F9 (۲۶۸۷/۷) می‌باشد که بیشترین غلظت آهن را دارا می‌باشد و نسبت به سایر تیمارها افزایش معنی‌داری یافته است (جدول ۴). کمترین مقدار جذب آهن مربوط به شاهد (۳۸۰/۶) می‌باشد که کمترین وزن خشک ریشه را دارا می‌باشد (جدول ۳).

وطنی و همکاران (۵۶) گزارش کردند که کاربرد نانوکودهای کلات آهن در گیاه اسفناج پیامدهای مثبتی بر تجمع آهن داشت. محمدی‌پور و همکاران (۳۲) گزارش کردند که بیشترین غلظت آهن در گل سوسن به مقدار ۷۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در محلول پاشی برگی سولفات آهن بدست آمد و پس از آن محلول پاشی نانوکود آهن با ۴۷۵/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم رتبه بعدی را در غلظت آهن به خود اختصاص داد.

فعالیت برخی آنزیمها در گیاه

نتایج تجزیه واریانس پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح

مورتوت و همکاران (۳۴) بیان داشتند که پلیمرهای آب‌دوست پتانسیل بالقوه‌ای در افزایش قابلیت دسترسی سایر عناصر غذایی برای گیاه دارند. برای مثال، وقتی پلیمر پلی‌آکریل‌آمید در محلول حاوی سولفات آهن، آبدار می‌شود، ژل حاصل یک منبع غذایی عالی در خاک‌هایی با قابلیت دسترسی محدود آهن می‌باشد. جذب آهن توسط دانه‌های سورگوم زمانی که سولفات آهن با پلیمر پیوندی پلی‌آکریل‌آمید به‌عنوان کود مورد استفاده قرار گرفت، در مقایسه با کاربرد تنهای سولفات آهن دو برابر گردید. 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 (۳۰). استفاده از پلیمرها جهت عرضه عناصر غذایی ممکن است بتواند شرایط دقیق‌تری را برای تأمین نیاز گیاه فراهم آورد، درحالی‌که بایستی حفاظت از کیفیت محیط زیست و همچنین حفظ منابع طبیعی لحاظ گردد (۲۹).

نتایج مقایسه میانگین پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول پاشی بر غلظت آهن در ریشه (جدول ۴) نشان می‌دهد که بیشترین مقدار غلظت آهن در ریشه (۱۰۰۷/۹۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مربوط به تیمار F9 در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر می‌باشد که نسبت به سایر تیمارها افزایش معنی‌داری یافته است، و کمترین مقدار غلظت آهن در ریشه (۳۸۴/۸۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مربوط به تیمار

با کمبود آهن در نخود (*Cicer arietinum* L.) گزارش کردند. ننووا و استویانوو (۳۹) گزارش کردند که شدت کمبود آهن نتیجه فعالیت پایین پراکسیداز، کاتالاز و نیترات ردوکتاز در ذرت (*Zea mays* L.) است.

کاربرد دو تیمار F1 و F4 در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر نیز بر افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز تأثیر مثبتی داشت اما این تأثیر معنی‌دار نبود. با افزایش سطح آهن از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر F5 و F7 افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز را نشان دادند (جدول ۵). معاونی (۳۱) گزارش نمود که غلظت کاتالاز در تیمار ۰/۰۳ درصد نانو آهن در گیاه سورگوم حداکثر افزایش را نشان داد. احتمالاً این افزایش به علت توانایی گیاه در ذخیره‌سازی بیشتر آهن آزاد شده از نانو آهن می‌باشد و بهترین سازوکار جذب آهن از سمت ریشه به ساقه رخ داده بود (۳۱).

محلول‌پاشی نشان می‌دهد که آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات و گایاکول پراکسیداز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شده‌اند (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول‌پاشی داده‌ها برای آنزیم کاتالاز در جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت مربوط به سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر تیمار F5 (۰/۱۶۰ واحد در گرم بر وزن تر) می‌باشد که نسبت به شاهد ۳۱/۲۵ درصد افزایش معنی‌داری یافته است. با توجه به جدول ۵ کمترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز (۰/۰۵۶ واحد در گرم بر وزن تر) مربوط به تیمارهای F3 و F9 در سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر می‌باشد که نسبت به شاهد ۹۶/۴۲ درصد کاهش معنی‌داری یافته است. احتمالاً این کاهش در فعالیت آنزیم کاتالاز، می‌تواند به دلیل اثر رقت (۱۴) که مربوط به افزایش رشد در اندام هوایی گیاه است (جدول ۳) باشد. کائور و همکاران (۲۱) وابستگی محدود فعالیت پراکسیداز و کاتالاز را

جدول ۵- مقایسه میانگین پیامدهای متقابل دوگانه منابع آهن و سطح محلول‌پاشی بر فعالیت آنزیم‌های کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز و گایاکول پراکسیداز در برگ

Table 5- Comparison of the mean effects of interactions iron resources and level of spraying on Enzyme activities; Catalase (CAT), Ascorbate peroxidase (APX) and Guaiacol peroxidase (GPOX) in leaves of Sorghum

تیمار Treatment		(Unit.Fresh W ⁻¹) GPOX	(Unit.Fresh W ⁻¹) APX	(Unit.Fresh W ⁻¹) CAT
سطوح آهن (g.L ⁻¹) Iron levels	منابع آهن Iron sources			
0.25	شاهد (C)	0.0063 ^h	0.060 ^{bc}	0.0110 ^c
	F1	0.0080 ^{fgh}	0.076 ^a	0.0120 ^b
	F2	0.0093 ^{cdef}	0.032 ^h	0.0103 ^c
	F3	0.0035 ⁱ	0.054 ^{bcd}	0.0106 ^c
	F4	0.0100 ^{bcde}	0.040 ^{efgh}	0.0126 ^b
	F5	0.0096 ^{cdef}	0.044 ^{defgh}	0.0110 ^c
	F6	0.0066 ^{gh}	0.047 ^{cdef}	0.0063 ^{gh}
	F7	0.0116 ^{ab}	0.046 ^{def}	0.0063 ^{gh}
	F8	0.0090 ^{def}	0.052 ^{bcde}	0.0063 ^{gh}
0.5	F9	0.0110 ^{abc}	0.049 ^{bcdef}	0.0090 ^d
	F1	0.0040 ⁱ	0.060 ^{bc}	0.0076 ^{ef}
	F2	0.0090 ^{def}	0.061 ^b	0.0063 ^{fg}
	F3	0.0103 ^{bcd}	0.054 ^{bcd}	0.0056 ^h
	F4	0.0123 ^a	0.053 ^{bcd}	0.0060 ^h
	F5	0.0110 ^{abc}	0.045 ^{defg}	0.0160 ^a
	F6	0.0090 ^{def}	0.037 ^{gh}	0.0070 ^{fg}
	F7	0.0080 ^{fgh}	0.033 ^{gh}	0.0080 ^e
	F8	0.0100 ^{bcde}	0.048 ^{bcdef}	0.0060 ^h
F9	0.0083 ^{efg}	0.044 ^{defgh}	0.0056 ^h	

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)

۰/۲۵ گرم آهن در لیتر در تیمار F2 (۰/۰۳۲ واحد در گرم بر وزن تر) مشاهده گردید که نسبت به شاهد ۸۷/۵ درصد کاهش معنی‌داری یافت. به نظر می‌رسد به دلیل افزایش وزن خشک گیاه، فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از اثر رقت (۳۴) باشد چراکه با افزایش وزن خشک (جدول ۳) معمولاً غلظت عناصر (غلظت آهن اندام هوایی) (جدول ۴) به دلیل اثر رقت کاهش

مقایسه میانگین پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول‌پاشی بر فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت این آنزیم مربوط به سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر تیمار F1 (۰/۰۷۶ واحد در گرم بر وزن تر) می‌باشد که نسبت به شاهد (۰/۰۶۰ واحد در گرم بر وزن تر) ۲۱/۰۵ درصد افزایش معنی‌داری یافته است. کمترین مقدار فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در سطح

گایاکول پراکسیداز علاوه بر تیمار F4، در تیمارهای F3 و F6 نیز افزایش معنی داری یافتند (جدول ۵). رانی پری و همکاران (۴۲) توقف فعالیت پراکسیداز را در آفتابگردان دارای کمبود آهن مشاهده کردند. کمبود آهن، همواره موجب از بین رفتن کلروفیل و تخریب ساختمان کلروپلاست و کاهش فعالیت آنزیم‌های اکسیداز نظیر کاتالاز و پراکسیداز می‌گردد (۶۰).

نتیجه‌گیری کلی

نتایج پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول پاشی نشان می‌دهد محلول پاشی در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر صفات کلروفیل b در تیمار F4، غلظت و جذب آهن در اندام هوایی به ترتیب در تیمارهای F7 و F6، غلظت و جذب آهن در ریشه در تیمار F9 و فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز در تیمار F1 افزایش معنی داری نسبت به شاهد نشان دادند که با افزایش سطح آهن این تیمارها، صفات فوق کاهش معنی داری یافتند. اما در سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر، وزن خشک اندام هوایی در تیمار F1، وزن خشک ریشه و آنزیم کاتالاز در تیمار F5، کلروفیل a در تیمار F6 و آنزیم گایاکول پراکسیداز در تیمار F4 افزایش معنی داری نسبت به شاهد یافتند. پیامدهای ساده منابع آهن بر مقدار کارتنوئید برگ نشان داد که بیشترین مقدار کارتنوئید در تیمار F6 مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش معنی داری یافته است. پژوهش‌های زراعی دقیق در نظر گرفته شده برای تعیین بهای فن‌آوری پلیمر در بهبود باز یافت عناصر غذایی در شرایط گوناگون کشاورزی مورد نیاز است. تیمارهای پلیمری بکار رفته در پژوهش حاضر نیاز به تحقیق بیشتر داشته و تنها به نتایج پژوهش‌های گلخانه‌ای نباید اکتفا کرد، و تحقیقات بیشتر در این زمینه در سطح گلخانه و مزرعه توصیه می‌گردد.

یافته و در نتیجه باعث کاهش فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز گردیده است. بیش بود بسیاری از فلزات سنگین از جمله آهن در داخل سلول ممکن است سبب تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن مثل سوپراکسید و هیدروکسیل و نیز ایجاد پراکسید هیدروژن بیشتر شود (۵). کاتالازها و پراکسیدازها از جمله آنزیم‌هایی به شمار می‌آیند که نقش بسیار مهمی در پاسخ به تنش غیرزیستی دارند. افزایش غلظت آهن در گیاهان موجب ایجاد سمیت آهن و تولید انواع اکسیژن‌های فعال می‌شود که تنش اکسیداتیو را در گیاه القاء می‌کند. در شرایط طبیعی پراکسید هیدروژن و رادیکال‌های آزاد اکسیژن در بخش‌های مختلف یاخته‌های گیاهان ایجاد می‌شود (۵).

مقایسه میانگین پیامدهای متقابل منابع آهن و سطح محلول پاشی بر آنزیم گایاکول پراکسیداز در جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین فعالیت این آنزیم مربوط به سطح ۰/۵ گرم آهن در لیتر تیمار F4 (۰/۱۲۳) واحد در گرم بر وزن تر) می‌باشد که نسبت به شاهد (۰/۰۶۳) واحد در گرم بر وزن تر) ۴۸/۷۸ درصد افزایش معنی داری یافته است. در بررسی اثر آهن در گیاهان دارای ارزش دارویی بر روی گیاه (*Bacops monnieri* L.) استفاده از آهن سبب افزایش فعالیت پراکسیداز در ریشه و کاهش فعالیت پراکسیداز در برگ‌ها شد و محتوی آسکوربات هم در ریشه و هم در برگ در مقایسه با شاهد افزایش نشان داد (۴۹). کمترین مقدار فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز در سطح ۰/۲۵ گرم آهن در لیتر تیمار F3 (۰/۰۳۵) واحد در گرم بر وزن تر) مشاهده گردید که نسبت به شاهد (۰/۰۶۳) واحد در گرم بر وزن تر) ۸۰ درصد کاهش معنی داری یافت. دلیل کاهش فعالیت آنزیم گایاکول پراکسیداز می‌تواند مربوط به افزایش ناگهانی رشد اندام هوایی گیاه باشد که توسط اثر رقت قابل توجیه می‌باشد و توسط محققین دیگر گزارش شده است (۱۴ و ۳۴). با افزایش سطح آهن از ۰/۲۵ به ۰/۵ گرم آهن در لیتر، فعالیت آنزیم

منابع

- Alidoust D., and Isoda A. 2014. Phytotoxicity assessment of γ -Fe₂O₃ nanoparticles on root elongation and growth of rice plant. *Environmental Earth Sciences*, 71:5173-5182.
- 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. *International Journal of Biosciences*, 4(9):69-75.
- Arnon D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplast, polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*. *Journal of Plant Physiology*, 24:1-75.
- Beers G.R., and Sizer I.V. 1952. A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase. *Biological Chemistry*, 195:133-140.
- Bhattacharjee S. 2005. Reactive oxygen species and oxidative stress, senescence and signal transduction in plants. *Current Science*, 89:1113-1121.
- 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.
- Bouyoucos C.J. 1997. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal*, 54:464-465.

- 8- 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.
- 9- Cottenie A. 1980. Soil and plant testing as a basis of fertilizer recommendation. *FAO Soils Bull*, 38: 70-73.
- 10- Cui H.C., Sun Q., Liu J., and Gu W. 2006. Applications of Nanotechnology in Agrochemical Formulation. p. 1-6. Perspective, Challenges and Strategies, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing, China.
- 11- Datil R.B., Apparao B.J., and Laware S.L. 2012. Application of amino acid chelated micronutrient for enhancing growth and productivity in chili (*Capsicum annum* L.). *Plant Sciences Feed*, 2(6): 100-106.
- 12- 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.
- 13- Fang Y., Wang L., Xin Z., Zhao L.Y., An X.X., and Hu Q.H. 2008. Effect of foliar application of zinc, selenium, and iron fertilizers on nutrients concentration and yield of rice grain in China. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56:2079-2084.
- 14- 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.
- 15- 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. *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4(11): 2997-3003.
- 16- Godsey R.J., and Johnson B. 2001. Seed treatment, seeding rate, and cultivar effects on iron deficiency chlorosis of soybean. *Journal of Plant Nutrition*, 24(8): 1255-1268.
- 17- Grillet L., Mari S., and Schmidt W. 2014. Iron in seeds loading pathways and subcellular localization. *Frontiers in Plant Science*, 4:535.
- 18- 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.
- 19- Hemeda H.M., and Kelin B.P. 1990. Effects of naturally occurring antioxidants on peroxidase activity of vegetables extracts. *Journal of Food Science*, 55: 184-185.
- 20- 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.
- 21- Kaur N.P., Takkar P.N., and Nayyar V.K. 1984. Catalase, peroxidase, and chlorophyll relationship to yield and iron deficiency chlorosis in Cicer genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 7:1213-1220.
- 22- 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.
- 23- Li J., Chang P., Huang J., Wang Y., Yuan H., and Ren H. 2013. Physiological effects of magnetic iron oxide nanoparticles towards watermelon. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 13:5561-5567.
- 24- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42: 421-428.
- 25- Lucena J.J. 2006. Synthetic iron chelates to correct iron deficiency in plants. p. 103-128. In L.L. Barton and J. Abadía (ed.) *Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms*, Springer: Dordrecht.
- 26- Mahmoudi H., Ksouri R., Gharsalli M., and Lachaal M. 2005. Differences in responses to iron deficiency between two legumes: Lentil (*Lens culinaris*) and chickpea (*Cicer arietinum*). *Journal of Plant Physiology*, 162(11):1237-1245.
- 27- Marschner H., Romheld V., and Kissel M. 1995. Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron. *Journal of Plant Nutrition*, 9:695-713.
- 28- Masonic A., Evacoli A., and Mavoti M. 1996. Spectral of leaves deficient in iron sulphur, magnesium and manganese. *Agronomy Journal*, 88(6):937-943.
- 29- Mikkelsen R.L. 1994. Using hydrophilic polymers to control nutrient release. *Fertilizer Research*, 38: 53-59 .
- 30- Mikkelsen R.L. 1995. Using hydrophilic polymers to improve uptake of manganese fertilizers by soybeans. *Fertilizer Research*, 41: 87-92.
- 31- Moaveni P. 2014. Study the priming of nano iron on biochemical traits of Sorghum (*Sorghum Bicolor* L.). *Data Management Association (DAMA) International*, 3(2):102-108.
- 32- Mohamadipoor R., Sedaghathoor S., and Mahboub Khomami A. 2013. Effect of application of iron fertilizers in two methods 'foliar and soil application' on growth characteristics of Spathyphyllum illusion. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology*, 3(1):232-240.
- 33- Monica R.C., and Cremonini R. 2009. Nanoparticles and higher plants. *Caryologia*, 62: 161-165.
- 34- Mortvedt J.J., Mikkelsen R.L., and Behel A.D.Jr. 1992. Grain sorghum response to granular formulations of iron

- sources and hydrophilic polymers. *Journal of Plant Nutrition*, 15: 1913-1926.
- 35- Motsara M.R., and Roy R.N. 2008. Plant analysis. p. 80. In *Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- 36- 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.). *International Journal of Biosciences*, 3(9): 267-272.
- 37- Nakano Y., and Asada K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascarbate specific peroxidases in spinach chloroplasts. *Plant cell physiology*, 22: 867-880.
- 38- Navarro E., Piccapietra F., Wagner B., Marconi F., Kaegi R., Odzak N., Sigg L., and Behra R. 2008. Toxicity of silver nanoparticles to *Chlamydomonas reinhardtii*. *Environmental Science and Technology*, American Chemical Society, 42(32): 8959-8964.
- 39- Nenova V., and Stoyanov I. 1995. Physiological and biochemical changes in young maize plants under iron deficiency. Catalase, peroxidase, and nitrate reductase activities in leaves. *Journal of Plant Nutrition*, 18: 2081-2091.
- 40- 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.
- 41- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. ASA and SSSSA. Madison, WI.
- 42- Ranieri A., Castagna A., Baldan B., and Soldatini G.F. 2001. Iron deficiency differently affects peroxidase isoforms in sunflower. *Journal of Experimental Botany*, 52: 25-35.
- 43- 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. *Journal of Plant Nutrition*, 11(6-11):1369-1378.
- 44- 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. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, 7: 677-684.
- 45- 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. *Scientific Journal of Crop Science*, 3(2): 9-16.
- 46- Rhoades J.D. 1982. Soluble salts. p. 167-179. In: A.L. Page et al. (ed.) *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. Chemical and microbiological properties. Monograph Number 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 47- 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.
- 48- Salarpour O., Parsa S., Sayyari M.H., and Jami Alahmadi M. 2013. Effect of Nano-iron Chelates on Growth, Peroxidase Enzyme Activity and Oil Essence of Cress (*Lepidium sativum* L.). *International Journal of Agronomy and Plant Production*, 4: 3583-3589.
- 49- Sinha S., and Saxena R. 2006. Effect of iron on lipid peroxidation, and enzymatic and non-enzymatic antioxidant and bacoside- A content in medicinal plant *Bacopa monnieri* L. *Chemosphere*, 62(8): 134-135.
- 50- Shahrakizad M., Gholamalizadeh Ahangar A., and Mir N. 2015. EDTA-Coated Fe₃O₄ nanoparticles: a novel biocompatible fertilizer for improving agronomic traits of sunflower (*Helianthus Annuus*). *Journal of Nanostructures*, 5: 117-127.
- 51- Shailesh K.D., Pramod M., Rajashri K., and Anand K. 2013. Effect of nanoparticles suspension on the growth of Mung (*Vigna radiata*) seedlings by foliar spray method. *Nanotechnology Development*, 3:e1. 1-5.
- 52- Sheykhbaglou R., Sedghi M., Tajbakhsh shishevan M., and Sharifi S.R. 2010. Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Notulae Scientia Biologicae*, 2:112-113.
- 53- Toth S.J., and Prince A.L. 1949. Estimation of cation exchange capacity and exchangeable Ca, K and Na contents of soils by flamephotometric techniques. *Soil Science*, 67:439-445.
- 54- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. Alkaline-earth carbonates by gravimetric loss of carbon dioxide. p. 105. 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.
- 55- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. pH reading of saturated soil paste. p. 102. 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.
- 56- Vattani H., Keshavarz N., and Baghaei N. 2012. Effect of sprayed Soluble different levels of iron chelate Nano fertilizer on nutrient uptake efficiency in two varieties of spinach (Varamin88 and Virofly). *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(S): 2651-2656.
- 57- Walkley A., and Black I.A. 1934. Chromic acid titration for determination of soil organic matter. *Soil Science*, 63:251.
- 58- 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.
- 59- Yousefi S., Rabhi M., Abdelli C., and Gharsalli M. 2009. Iron deficiency tolerance traits in wild (*Hordeum maritimum*) and cultivated barley (*Hordeum vulgare*). *Comptes Rendus Biologies*, 332(6): 523-533.

- 60- Zuo Y., and Zhang F. 2011. Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops. *Plant and Soil*, 339: 83-93.



The Effect of Foliar Application of Iron Sources on Growth Parameters, Iron Concentration and Activity of Some Enzymes of Sorghum

S. Golshahi¹- A. Gholamalizadeh Ahangar^{2*}- N. Mir³- M. Ghorbani⁴

Received: 23-05-2017

Accepted: 09-10-2017

Introduction: First and the most important requirement of human being is food and food supply, which is directly, or indirectly associated with agriculture. Iron is a critical element for the growth, expansion and survival of the plant, since multiple metabolic and a physiological process is essential for the proper functioning. Agricultural areas in the world have a high pH in soil, which in turn decreases iron absorption by plants. Iron deficiency depending on many soil and environmental factors as well as plant genetic that in turns can decrease the yield and product quality. One method of overcome iron deficiency in plants is foliar application. A foliar application of iron fertilizer in agriculture is the common practice, especially in soils that accompanied with iron deficiency. The proper use of various types of fertilizers is the main solution to improve and maintaining soil fertility and increase crop production. The objective of this study is to evaluate the effect of foliar application of iron sources on growth parameters, concentration and absorption of iron in shoot and root and enzymes activity of catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX) and guaiacol peroxidase (GPOX) on forage sorghum plant to determine the best combination of iron fertilizer.

Materials and Methods: An experiment was conducted in a completely randomized design with factorial arrangement and three replications in greenhouse condition on forage sorghum (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench) varieties of speed feed. The treatments included two levels of iron (0.25 and 0.5 g Fe.L⁻¹ with Control (C)) from nine iron sources (Iron chelate (F1), Iron sulfate (F2), Iron oxide nanoparticles (F3), Monodisperse iron oxide nanoparticles (F4), Green nano iron (F5), Polymeric iron chelate (F6), Polymeric iron sulfate (F7), Polymeric iron oxide nanoparticles (F8) and Polymeric monodisperse iron oxide nanoparticles (F9)). The soil was obtained from educational and research greenhouses of Zabol university and after air drying and sieving passing 2 mm, some physical and chemical characteristics of soil such as texture, pH, electrical conductivity, cations exchange capacity, calcium carbonate equivalent, organic matter, total nitrogen contents, available P contents, available K contents and available Fe contents was measurement. Spraying of iron resources performed in two stages (4 leaf and the two weeks after first spraying). After two months of planting, the shoot cut from the surface of the soil and roots of the plants collected. Some parameters such as shoot and root dry weight, chlorophyll a, b and carotenoids, iron concentration in shoot and root, iron absorption in shoot and root, and activity of the enzyme (catalase, ascorbate peroxidase, guaiacol peroxidase) was measured. The experimental data examined using Excel and SAS 9.4 statistical software and the averages were compared using Duncan's Multiple Range Tests at 0.01 and 0.05 significance level.

Results: Results analysis of variance indicated that the interaction effects between iron resources and iron level on the dry weight of shoots and roots, chlorophyll a and b, iron absorption in shoots and roots, enzymes guaiacol peroxidase. Ascorbate peroxidase and catalase were significant at the level of 5 percent and iron concentrations in shoots and roots were significant at the level of 1 percent. The carotenoid content in leaves in the simple effects of iron resources was significant at the level of 5 percent. According to the results, foliar application of treatments on dry weight of shoots and roots, Fe concentration and Fe absorption by shoots and roots, chlorophyll a, b and the enzyme activity of APX, GPOX in addition CAT were significantly increased compared to Control. Foliar application at 0.25 g Fe.L⁻¹, chlorophyll b in the treatment of monodisperse iron oxide nanoparticles, Fe concentration and Fe absorption in the shoots in treatments of polymeric iron sulfate and polymeric iron chelate, respectively. Fe concentration and Fe absorption in the roots in treatment of polymeric monodisperse iron oxide nanoparticles and APX activity in iron chelate treatment increased significantly compared to control. At level of 0.5 g Fe.L⁻¹, dry weight of shoots in the treatment of iron chelate, dry weight of roots and CAT enzyme in the treatment of green nano iron, chlorophyll a in the treatment of polymeric iron chelate and GPOX enzyme in the treatment of monodisperse iron oxide nanoparticles were compared with the

1, 2 and 4- Former M.Sc. Student, Associate Professor and Instructor in Soil Science, Soil and Water Engineering Faculty, University of Zabol, Respectively

(*)- Corresponding Author Email: ahangar@uoz.ac.ir)

3- Assistant Professor in Chemistry, Department of Chemistry, University of Zabol, Zabol, Iran

control increased significantly. The simple effects of iron sources indicated that the highest level of carotenoids observed in the foliar application of polymeric iron chelate.

Keywords: Ascorbate peroxidase, Dry weight of shoot and root, Monodisperse iron oxide nanoparticles, Polymeric iron sulfate