تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۳ | شماره ۱ | فروردین ۱۴۰۱ (ص ۲۱۵-۲۰۵)

https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2022.330307.669070

(مقاله علمی - پژوهشی)

Comparison of Application of Iron Oxide, Sequestrin and Iron Sulfate in the Presence of Manure and Sulfur on Fe Uptake by Soybeans

SEYEDEH FATEMEH MADANIAN[1], REZA KHORASANI[1*], ZAHRA GHESHLAGHI[1]

1. Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashha, Iran,

(Received: Sep. 9, 2021- Revised: Jan. 5, 2022- Accepted: Feb. 5, 2022)

ABSTRACT

The use of iron (Fe) fertilizers is the most effective methods to deal with Fe deficiency in calcareous soils for agricultural purposes .Use of cheaper and available resources has been the focus of researchers. In this study, the effect of different sources of Fe fertilizer on the availability of Fe in soybean in a completely randomized design with factorial arrangement including three factors of different sources of Fe fertilizer (zero, Fe-sequestrin, Fe-sulfate and Fe-oxide with concentrations of 5, 30 and 50 mg of Fe per kg of soil, respectively), decomposed cow manure (0.5 and 1.5% by weight) and elemental sulfur in the presence of Thiobacillus bacteria (zero and 25 mg kg^{-1} and thiobacillus 1.8% of sulfur) in three replications. In 2019, it was studied in the research greenhouse of the Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad.The results showed that concentration and absorption of Fe in shoots in fertilizer treatments was higher than that in the control. Application of iron oxide alone, with manure, with sulfur and application of iron oxide with manure and sulfur could make a significant difference in increasing the concentration and absorption of Fe with other treatments. Use of iron oxide increased iron concentration by 1.24, 1.36 and 1.69 times and Fe uptake by 1.11, 1.28 and 1.73 times compared to sequestrin, iron sulfate and iron oxide treatments in shoots of soybean in the shoots. Application of ferrous sulfate alone did not differ significantly in increasing the concentration and absorption of Fe compared to treatments of ferrous sulfate with manure and with sulfur. In addition, no significant difference was observed between Fe uptake in sequestrin alone and manure. According to the results, to increase the efficiency of iron oxide, it is recommended to use it with manure and sulfur as a suitable alternative.

Keywords: Efficient Iron Plant, Iron Chelate, Iron Mineral Fertilizer, Iron Scrap, Total Plant Iron Content.

*Corresponding Author's Email: khorasani@um.ac.ir

مقایسه کاربرد اکسید آهن، سکوسترین و سولفات آهن در حضور کود دامی و گوگرد بر جذب آهن توسط گیاه سویا

سیده فاطمه مدنیان[۱]، رضا خراسانی[۱*]، زهرا قشلاقی[۱]

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۱۸- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۱/۵- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۱/۱۶)

چکیده

کاربرد کودهای حاوی آهن از مؤثرترین روش‌های مقابله با کمبود آهن در خاک‌های آهکی برای مقاصد کشاورزی می‌باشد. در این راستا استفاده از منابع ارزان‌تر و در دسترس، همواره موردتوجه پژوهشگران بوده است. در این پژوهش اثر منابع مختلف کودی آهن بر فراهمی آهن در گیاه سویا به‌صورت آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل شامل سه فاکتور شامل منابع مختلف کود آهن (صفر، سکوسترین آهن، سولفات آهن و اکسید آهن به ترتیب با غلظت ۵، ۳۰ و ۵۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک)، کود گاوی پوسیده (صفر و ۱/۵٪ وزنی) و گوگرد عنصری در حضور باکتری تیوباسیلوس (صفر و ۲۵ میلی‌گرم گوگرد بر کیلوگرم خاک و تیوباسیلوس ۱/۸٪ مقدار گوگرد) در سه تکرار در سال ۱۳۹۸ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاربرد اکسید آهن، اکسید آهن به همراه کود دامی، اکسید آهن و گوگرد و کاربرد اکسید آهن به همراه کود دامی و گوگرد توانست تفاوت معنی‌داری در افزایش میزان غلظت و جذب آهن با دیگر تیمارهای کودی نشان دهد. مصرف اکسید آهن به ترتیب باعث افزایش ۱/۲۴، ۱/۳۶ و ۱/۶۹ برابری غلظت آهن و ۱/۱۱، ۱/۲۸ و ۱/۷۳ برابری جذب آهن نسبت به تیمارهای سکوسترین، سولفات آهن و اکسید آهن در اندام هوایی گیاه سویا شد. کاربرد سولفات آهن به‌تنهایی تفاوت معنی‌داری در افزایش میزان غلظت و جذب آهن در مقایسه با تیمارهای کاربرد سولفات آهن همراه با کود دامی و همراه با گوگرد نداشت. همچنین بین جذب آهن در تیمار سکوسترین و کاربرد این تیمار کودی همراه با کود دامی تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده برای افزایش کارایی اکسید آهن، به‌عنوان جایگزینی مناسب برای منابع مختلف کود آهن، کاربرد آن همراه با کود دامی و گوگرد توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ضایعات آهن، کلات آهن، کود معدنی آهن، گیاه آهن کارا، میزان آهن کل گیاه.

مقدمه

آهن به‌عنوان فراوان‌ترین عنصر و یکی از عناصر غذایی ضروری در گیاهان شناخته شده است که نقش مهمی در افزایش عملکرد و کیفیت محصولات کشاورزی به‌ویژه گیاهان روغنی از جمله سویا دارد. کمبود این عنصر در گیاهان و در خاک‌های آهکی، موجب بروز اختلال تغذیه‌ای زرد برگی[۱] می‌گردد که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودیت تولید سویا در جهان مطرح است (Wiersma, 2005). مکانیسم گیاهان در چگونگی پاسخ آن‌ها به منابع آهن قابل‌دسترس در خاک‌های آهکی متفاوت است و تابع کارایی آهن در آن‌ها می‌باشد.

گیاه سویا *(Glycine max (L) Merr.)* به‌عنوان یک گیاه دولپه‌ای و حساس به کمبود آهن محسوب می‌شود که بین ارقام و ژنوتیپ‌های مختلف آن تفاوت زیادی در کارایی جذب آهن در شرایط خاک‌های آهکی وجود دارد (waters et al., 2018 و Qiu *et al.*, 2017). تفاوت‌های ژنوتیپی در کارایی جذب آهن در بسیاری از گیاهان، از جمله سویا گزارش شده است (waters *et al.*, 2018; Kocak, 2014) که می‌تواند به دلایل تفاوت در ویژگی‌های مورفولوژیک ریشه، کارآیی مکانیسم جذب آهن، اسیدی کردن محیط ریزوسفر، وجود اسیدهای آلی در تراوش‌های ریشه‌ای و نحوه حرکت و توزیع عناصر غذایی از ریشه به آوندها مربوط باشد (García-Mina *et al.*, 2013).

فرایند جذب آهن در گیاه تحت‌تأثیر مکانیسم‌های گیاهی دخیل در جذب آهن از خاک و مصرف آن در سطح متابولیسم سلولی گیاه است. برخی از مطالعات نشان داده‌اند که گیاهان آهن کارا از طریق ترشح مقادیر زیادی اسیدهای آلی باعث افزایش حلالیت اکسیدهای آهن کم محلول در خاک می‌شوند (waters et al., 2018 و Abadia et., 2004). باتوجه‌به مکانیسم‌های مختلف

* نویسنده مسئول: khorasani@um.ac.ir

۱. Chlorosis

گیاهان در افزایش فرایند جذب آهن از خاک، مشکل زرد برگی در گیاهان کشت شده در خاک‌های آهکی معمولاً با مصرف خاکی کلات‌های مصنوعی آهن فریک (Hasegawa et al., 2011)، نمک-های معدنی (He et al., 2013)، تعدیل مصنوعی PH، مواد اسیدی و اسیدزا، مواد آلی آهن‌دار (Forouhar, 1999 و Shariatmadari, 1990) و کاربرد ارقام گیاهی با کارایی بالا در جذب آهن (Feil and Fosstai, 1995) کنترل می‌شود. اما این روش‌ها به طور کامل نتوانسته‌اند در کاهش اثرات زرد برگی در این خاک‌ها مؤثر باشند (Heidari Kohal et al., 2014 و Abbaspour et al., 2004).

کاربرد مواد معدنی آهن‌دار از جمله ضایعات آهن به همراه مواد آلی در افزایش فراهمی آهن در گیاهان در خاک‌های شنی لومی و لومی آهکی در برخی مطالعات مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات به معدنی شدن (تجزیه مواد آلی در حضور عوامل بیولوژیکی و شیمیایی) مواد آلی و بهبود خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک اشاره شده است (Wang and Qing-Sheng, 2006؛ Oliveira et al., 2002 و Chen et al., 1982). مطالعات نشان می‌دهد، حضور ترکیبات آلی از جمله ترکیبات فنلی، اسیدهای هیومیک و فولویک که میل ترکیبی زیادی با سطح ذرات رس و اکسید فلز دارند با ایجاد کمپلکس‌های مختلف بر روی ذرات معدنی موجود در خاک موجب افزایش فراهمی کاتیون‌های اکسید شده در خاک برای گیاه می‌شود (Au et al., 1999؛ Specht et al., 2000). مطالعات نشان می‌دهد که کاربرد گوگرد با ایجاد فرایند اکسیداسیون - احیا موجب افزایش حلالیت آهن و فراهمی آن برای گیاه می‌شود (Godarzi,2001 و Lindsay, 1974). زمانی که گوگرد تلقیح شده با تیوباسیلوس به خاک اضافه می‌گردد، میکروارگانیسم‌های اکسیدکننده گوگرد سبب اکسایش آن و تولید اسیدسولفوریک می‌شوند و همچنین اسیدیته خاک را به طور موضعی کاهش داده و در نتیجه باعث افزایش حلالیت ترکیبات حاوی آهن و جذب بیش‌تر توسط گیاه می‌گردد (Deluca et al., 1989).

کاهش حلالیت آهن در خاک از یک سو و عدم تولید انبوه کلات‌های آهن در ایران باعث شده است که رفع پدیدهٔ زرد برگی با مصرف کلات‌های آهن وارداتی برای کشاورزان اقتصادی نباشد، چرا که هزینه زیاد این کودها دامنه کاربرد آن را به‌خصوص برای محصولاتی با ارزش افزوده پایین، محدود نموده است (Goos et al., 2004)، همچنین باتوجه‌به اثر کوتاه‌مدت کلات‌های آهن در محیط خاکی، نیاز به تکرار سالیانه آن‌ها، امکان ایجاد اختلال عامل کلات کننده در جذب برخی عناصر (روی، منگنز و غیره) و همچنین مخاطرات زیست‌محیطی آن وجود دارد (Abadia et al., 2004)؛ بنابراین امکان کاربرد ضایعات آهن با وجود بیش از ۷۰ درصد آهن اکسیدی به‌صورت همراه با سایر عوامل بهبود دهندهٔ انحلال آهن در ضایعات و خاک می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در کاربرد این منابع آهن در کشاورزی پیشنهاد گردد.

تا کنون مطالعه‌ای بر روی ضایعات فرآوری شده اکسید آهن در حضور گوگرد و باکتری اکسیدکننده آن (تیوباسیلوس) و همچنین کود دامی در مقایسه با سایر منابع کودی، در یک خاک آهکی و در گیاه سویا رقم کتول انجام نشده است. باتوجه‌به مطالب فوق هدف اصلی این تحقیق مقایسه اثر کود سکوسترین آهن، سولفات آهن و ضایعات حاوی اکسید آهن در رفع زرد برگی ناشی از کمبود آهن در گیاه سویا در شرایط خاک‌های آهکی و بررسی نقش کود گاوی و گوگرد در حضور باکتری تیوباسیلوس بر فراهمی آهن و غلظت آن در اندام‌های گیاه سویا است.

مواد و روش‌ها

باتوجه‌به هدف تحقیق و نیاز داشتن به خاکی با میزان آهن قابل‌استفاده کم، خاک موردنظر در این آزمایش از مزرعه پردیس دانشگاه فردوسی مشهد (طول جغرافیایی E ۵۹° ۳۱′ ۵۲″ و عرض جغرافیایی N ۳۶° ۱۸′ ۳۱″ و ارتفاع ۱۰۳۱ متر) و از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری جمع‌آوری شد. باتوجه‌به نتایج آنالیز خاک و سطح بحرانی آهن قابل‌استفاده (Fe-DTPA) برای اکثر گیاهان در خاک که معادل ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک گزارش شده است (Sims and Johnson, 1991)، خاک مورداستفاده در این آزمایش در شرایط کمبود آهن قرار داشت.

جدول ۱- خصوصیات مهم فیزیکی و شیمیایی خاک مورداستفاده در آزمایش

EC (dS/m)	pH	S (meq/l)	نیتروژن کل (٪)	کربن آلی (٪)	کربنات کلسیم معادل (٪)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Fe-DTPA (mg/kg)
۰/۸۴۹	۷/۶۹	۴/۶	۰/۲	۰/۶۳	۱۹/۳	۸/۹	۲۲۷	۳/۴۹

این آزمایش به‌صورت کشت گلدانی در سال ۱۳۹۸ در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد به اجرا درآمد. آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با سه تکرار در شرایط کنترل شده انجام شد. باتوجه‌به

غلظت آهن کل در منابع آهن مورداستفاده و همچنین آهن قابل‌استفاده در خاک و نیاز گیاه سویا (*Glycine max (L) Merr.*) رقم کتول به آهن، تیمارهای آزمایشی انتخاب گردید. بدین ترتیب اثر سه فاکتور آزمایشی شامل منابع مختلف کود آهن (عدم مصرف کود آهن (Fe_0)، کود سکوسترین آهن با غلظت ۵ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک (۸۳/۳۳ میلی‌گرم کود سکوسترین بر کیلوگرم خاک) (Fe-EDDHA, 6% Fe) (Fe_1)، سولفات آهن با غلظت ۳۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک (۱۴۸/۹۵ میلی‌گرم کود سولفات آهن بر کیلوگرم خاک) ($Feso4.7H_2O$, 20.14% Fe) (Fe_2) و اکسید آهن با غلظت ۵۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک (۵۳/۳۶ میلی‌گرم کود اکسید آهن ضایعاتی بر کیلوگرم خاک) (۹۳/۷٪ آهن کل) (Fe_3)،کود گاوی پوسیده (۹۲۰/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم آهن کل) با غلظت صفر درصد وزنی (Cm_0) و غلظت ۱/۵ درصد وزنی (Cm_1) و گوگرد عنصری پودری (با خلوص ۹۹/۹٪ گوگرد در حضور باکتری تیوباسیلوس با شمارش (10^7 تا 10^8 CFU/g) با غلظت صفر میلی‌گرم گوگرد بر کیلوگرم خاک و تیوباسیلوس ۱/۸٪ گوگرد) (S_0) و غلظت ۲۵ میلی‌گرم گوگرد بر کیلوگرم خاک و تیوباسیلوس ۱/۸٪ گوگرد) (S_1)، در فراهمی آهن در گیاه سویا مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه‌به نتایج آنالیز خاک مورداستفاده (جدول ۱) عناصر غذایی نیتروژن، فسفر و پتاسیم به ترتیب به میزان ۸۰، ۵۰ و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک از منابع اوره، نیترات پتاسیم و $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$ به خاک موردنظر اضافه گردید. در نهایت گلدان‌ها با ۶ کیلوگرم خاک پر شدند. بذرهای گیاه سویا بعد از ضدعفونی شدن در سطح خاک کشت شد و تا زمان جوانه‌زنی بذرها، سطح گلدان هر روز با آب مقطر اسپری شدند و سپس به‌صورت وزنی آبیاری انجام شد. ۷۳ روز بعد از کاشت، گیاهان برداشت و برای انجام سایر آنالیزها مورداستفاده قرار گرفت. پس از برداشت، به مدت ۴۸ ساعت در آون ۷۲ درجه سانتی‌گرادی خشک شدند و سپس وزن خشک نمونه‌ها با ترازوی دیجیتال (AND, GT-300) با دقت ۰/۰۰۱ گرم تعیین شد. غلظت آهن کل در اندام هوایی و ریشه به روش هضم تر (Emami, 1976) با استفاده از دستگاه جذب اتمی (shimadzu, AA-670) اندازه‌گیری شد. تجزیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS 13.0 مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون دانکن در سطح یک درصد و رسم نمودارها نیز توسط نرم‌افزار Sigma Plot 12 صورت گرفت.

نتایج و بحث

کاربرد منابع آهن در افزایش وزن خشک اندام هوایی گیاه سویا

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲)، تأثیر بر همکنش سطوح مختلف آهن، کود دامی و گوگرد بر وزن خشک اندام هوایی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین بر وزن خشک اندام هوایی (شکل ۱) نشان می‌دهد که بیشترین وزن خشک اندام هوایی در تیمار مصرف هم‌زمان سولفات آهن بدون کاربرد کود دامی و همراه با گوگرد، ($Fe_2Cm_0S_1$) با مقدار ۲/۱۵ گرم بر گیاه سویا مشاهده شد. تفاوت معنی‌داری بین این تیمار و تیمار سکوسترین و ماده آلی و گوگرد ($Fe_1Cm_1S_1$) با مقدار ۲/۰۸ گرم بر گیاه سویا مشاهده نشد. وزن خشک اندام هوایی در دو تیمار $Fe_2Cm_0S_1$ و $Fe_1Cm_1S_1$ به ترتیب ۱/۳۵ و ۱/۳۰ برابر نسبت به تیمار کنترل $Fe_0Cm_0S_0$ بیشتر بود. کمترین میزان وزن خشک اندام هوایی در تیمار $Fe_0Cm_1S_1$ با مقدار ۱/۵۹ گرم بر گیاه سویا مشاهده شد.

جدول ۲- تجزیه واریانس اثرهای اصلی و برهم‌کنش فاکتورها در اندام هوایی و ریشه گیاه سویا

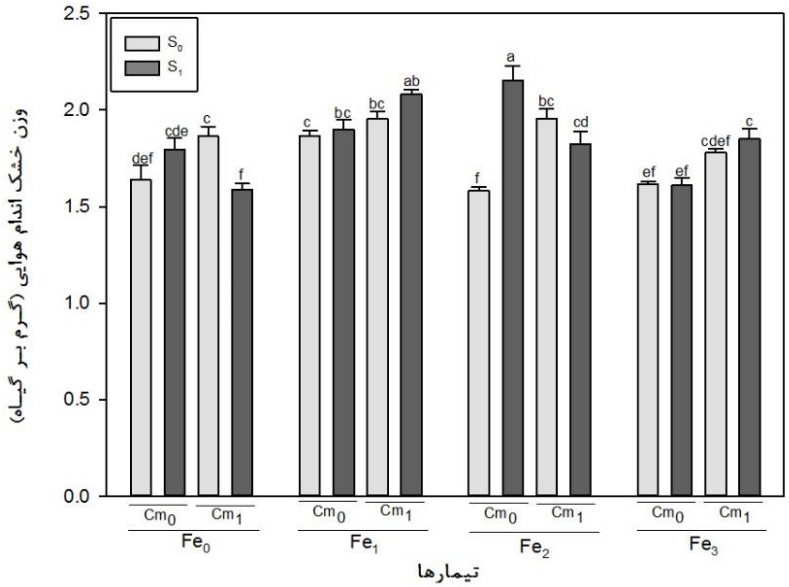
منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		وزن خشک اندام هوایی	غلظت آهن در اندام هوایی	جذب آهن در اندام هوایی	غلظت آهن در ریشه	جذب آهن در ریشه
آهن	۳	۰/۱۵ **	۴۰۳۷۸/۴۰ **	۰/۱۳ **	۴۰۳۸۹/۳۸ **	۰/۰۴ **
آهن*کود دامی	۳	۰/۰۲ **	۳۷۴۶۴/۸۴ **	۰/۱۴ **	۱۹۳۰۲/۶۲ *	۰/۰۰ ns
آهن*گوگرد	۳	۰/۰۴ **	۹۳۳۲/۲۰ **	۰/۰۳ **	۲۳۷۹۱/۴۵ **	۰/۰۰ **
آهن*کود دامی*گوگرد	۳	۰/۱۱ **	۹۲۹۵/۲۵ **	۰/۰۵ **	۶۲۹۵۵/۵۸ **	۰/۰۰ **
خطا	۳۲	۰/۰۰	۲۸/۷۰	۰/۰۰	۴۴۸۴/۷۲	۰/۰۰
ضریب تغییرات	درصد	۰/۱	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۱۳	۰/۲۷

* و ** و ns: به ترتیب در سطح آماری پنج و یک درصد معنی‌دار و عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشد

تأثیر مثبت منابع آهن در افزایش وزن خشک اندام هوایی می‌تواند ناشی از نقش مثبت عناصر کم‌مصرف در فعال‌سازی سیستم‌های آنزیمی و فعالیت‌های متابولیکی گیاه باشد که با افزایش تولید انرژی، سنتز پروتئین و قند منجر به افزایش سطح

برگ و تولید ماده خشک می‌گردید (Reuter et al., 1988). نتایج حاصل هم راستا با نتایج بررسی اثر سولفات آهن بر روی وزن خشک اندام هوایی در گیاه ذرت بود که نشان داد کاربرد منبع سولفات آهن باعث افزایش قابل‌توجهی در میزان ماده خشک شاخساره شده است (Sheikhpour et al., 2013). با کاربرد کلات-های آهن انتقال الکترون فتوسنتزی افزایش می‌یابد که باعث افزایش تثبیت دی‌اکسیدکربن و غلظت نشاسته و کربوهیدرات-های محلول در طول دوره رشد رویشی گیاهان می‌گردد که در نتیجهٔ آن وزن خشک گیاه افزایش می‌یابد (Marschner, 1995).

در تیمار اکسید آهن، مصرف هم زمان گوگرد و کودهای آلی موجب افزایش ۱/۱۴ برابری وزن خشک اندام هوایی نسبت به مصرف گوگرد به‌تنهایی در همین تیمار شد که هم راستا با نتایج پیشین است (Derakhshandehpour, 1999). دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که مصرف گوگرد همراه با کود دامی باعث افزایش اکسیداسیون بیولوژیکی گوگرد در محیط خاک می‌گردد و شرایط را برای گسترش میکروارگانیسم‌ها، تغذیه بهتر و در نتیجه رشد گیاه فراهم کرده و در نهایت موجب افزایش ماده خشک کل و اجزای عملکرد گیاه در این خاک شده است (Karimi et al., 2012). دلیل افزایش چشمگیر وزن خشک اندام هوایی در تیمار سولفات آهن با کاربرد گوگرد ($Fe_2Cm_0S_1$)، مربوط به نقش مثبت گوگرد در بهبود سنتز کلروپلاست‌ها و پروتئین‌ها و افزایش فتوسنتز در گیاه سویا است که هم راستا با نتایج مطالعات پیشین بود (Mishra and Agarwal, 1994).



شکل ۱- اثر سه‌گانه سطوح مختلف آهن، کود دامی و گوگرد بر وزن خشک اندام هوایی گیاه سویا

Fe_0 شاهد، Fe_1 سکوسترین، Fe_2 سولفات آهن، Fe_3 اکسید آهن، Cm_0 بدون کاربرد کود دامی، Cm_1 با کاربرد کود دامی، S_0 بدون کاربرد گوگرد و S_1 با کاربرد گوگرد

کاربرد منابع آهن در افزایش غلظت آهن در گیاه سویا

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲)، تأثیر بر همکنش سطوح مختلف آهن، کود دامی و گوگرد بر غلظت آهن در اندام هوایی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین بر غلظت آهن در اندام هوایی (شکل ۲) نشان می‌دهد که بیشترین میزان غلظت آهن در تیمار اکسید آهن ضایعاتی، کود دامی و گوگرد ($Fe_3Cm_1S_1$) است با مقدار ۵۶۸/۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم که ۳/۳۸ برابر نسبت به تیمار $Fe_0Cm_0S_0$ بیشتر بود و کمترین میزان غلظت آهن در تیمار کنترل ($Fe_0Cm_0S_0$) با مقدار ۱۶۸/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد که هیچ‌گونه علائمی از زرد برگی در این تیمار مشاهده نشد.

ارقام مختلف گیاه سویا در خاک‌های آهکی قابلیت‌های متفاوتی برای رشد و نمو در این خاک‌ها را دارند (waters et al., 2018 و Kocak, 2014) به‌عبارت‌دیگر کارایی استفاده[1] آهن در آن‌ها متفاوت بوده که به دو عامل بستگی دارد: کارایی مصرف[2] که نشان‌دهنده توانایی گیاه در تبدیل مقادیر کم عنصر غذایی جذب شده به عملکرد نسبتاً زیاد است؛ و کارایی جذب[3] که بیانگر توانایی گیاه در استخراج عنصر از خاک، در شرایط کمبود عنصر در خاک می‌باشد (Moll et al., 1982).

طبق منابع موجود، در گیاهان خانوادهٔ لگوم حدود غلظت

1 Use efficiency
2 Utilization efficiency
3 Uptake efficiency

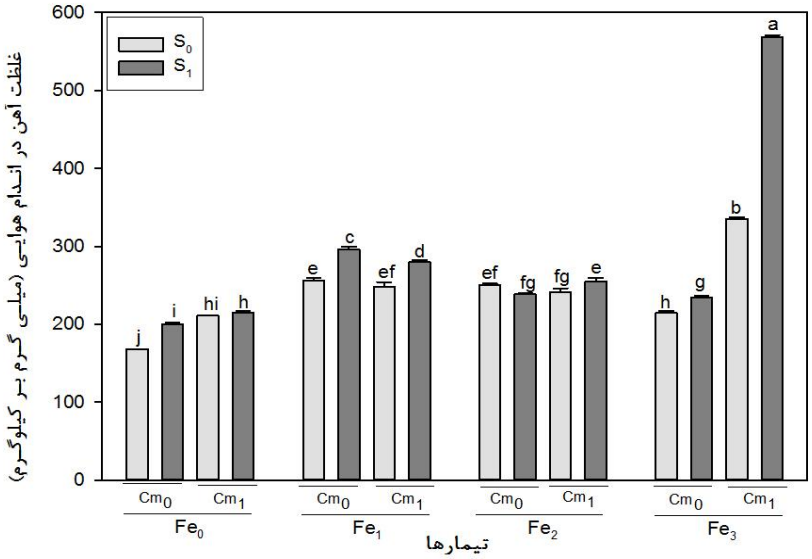
آهن در اندام هوایی گیاه بین ۱۵۴/۵ تا ۴۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Pastor et al., 1995). در مطالعات دیگر سطوح مطلوب آهن در برگ گیاه سویا در محدوده ۵۰ تا ۳۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و سطح بحرانی آهن در گیاه ۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم گزارش شده است (Malakouti and Gheibi, 2000). همچنین در برخی از منابع باتوجه‌به ارقام مختلف سویا و میزان کارایی آن‌ها در جذب آهن از خاک، غلظت آهن برگ در محدوده ۳۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیز گزارش شده است (Mortvedth, 1991; waters et al., 2018). نتایج حاصل از غلظت آهن برگ و اندام هوایی در این پژوهش نیز در محدودهٔ غلظت ارائه شده در مطالعات پیشین است.

باتوجه‌به حدود غلظت آهن در اندام هوایی و ریشه گیاه در این پژوهش و همچنین سایر غلظت عناصر (نتایج نمایش داده نشده است) می‌توان به آهن کارا بودن این رقم سویا اشاره کرد که حتی در شرایط فراهمی کم عنصر آهن در خاک نیز غلظت آهن در گیاه در محدودهٔ غلظت بهینه قرار داشت.

استفاده از مواد آلی همراه با اکسید آهن از طریق ایجاد مکانیسم تبادل لیگاند باعث افزایش حلالیت و بهبود قابلیت دسترسی آهن در گیاه می‌گردد (Gu et al., 1994). که دلیل افزایش غلظت آهن در تیمار اکسید آهن و کاربرد کود دامی می‌تواند به علت کلاته شدن و افزایش حلالیت آهن در اثر واکنش با مواد آلی باشد (Melali and Shariatmadari, 2008). یکی از دلایل کاهش غلظت آهن گیاه در تیمار کلات آهن، کود گاوی و گوگرد ($Fe_1Cm_1S_1$) نسبت به کلات آهن، بدون کود گاوی و همراه با گوگرد ($Fe_1Cm_0S_1$) مربوط به فعالیت میکروبی شدید در خاک و کمپلکس شدن آهن محلول در اثر ورود مواد آلی به خاک است (O'Melia and Tiller, 1993 و Tomba et al., 1998).

کاربرد گوگرد و باکتری تیوباسیلوس در تیمار سولفات آهن ($Fe_2Cm_0S_1$) در افزایش غلظت آهن گیاه در مقایسه با کاربرد سولفات آهن بدون گوگرد همراه با کود دامی ($Fe_2Cm_1S_0$) معنی‌دار نبود که یکی از دلایل آن را می‌توان تا حدودی زیادی به خاصیت بافری خاک و شرایط محیطی از جمله حاصلخیزی خاک و جمعیت کم باکتری‌های اکسیدکننده نسبت داد که بر روی شدت اکسایش گوگرد تأثیر قابل‌توجهی دارد (Qiyamati Yazdi et al., 2009).

غلظت آهن در تیمار اکسید آهن، کود دامی و گوگرد ($Fe_3Cm_1S_1$) به طور چشم‌گیری نسبت به کنترل ($Fe_0Cm_0S_0$) افزایش داشت که دلیل آن را می‌توان به ایجاد شرایط اسیدی شدن در محیط رایزوسفر و افزایش حلالیت هیدروکسیدهای آهن و همچنین غلظت همه گونه‌های یون فریک هیدراته غیرآلی و احتمالاً ایجاد کمپلکس‌های آهن و ماده آلی مربوط دانست؛ وجود چنین کمپلکس‌هایی غلظت آهن کل را در محلول بالا برده و به حلالیت، تحرک و دردسترس‌بودن آن در گیاهان می‌افزاید (Lindsay, 1974). مواد آلی نیز اکسیداسیون گوگرد را تسریع می‌کند و باعث اثر سریع‌تر گوگرد بر واکنش خاک و افزایش دردسترس‌بودن عناصر می‌گردد. نتایج مطالعات پیشین نشان داد که با افزایش مقدار مواد آلی مصرف شده همراه با گوگرد در خاک قابلیت دسترسی عناصر غذایی در خاک افزایش‌یافته است (Malakouti and Rezaei, 2001).



شکل ۲- اثر سه‌گانه سطوح مختلف آهن، کود دامی و گوگرد غلظت آهن در اندام هوایی گیاه

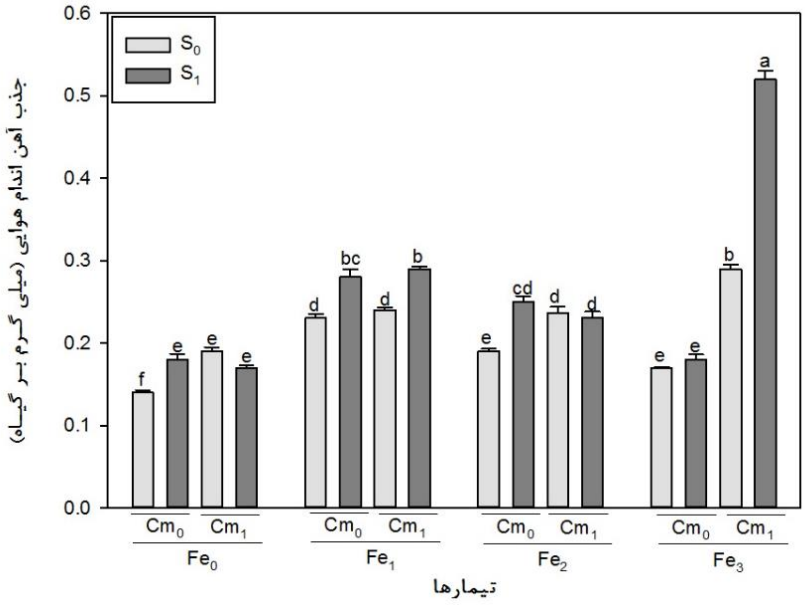
Fe_0 شاهد، Fe_1 سکوستریل، Fe_2 سولفات آهن، Fe_3 اکسید آهن، Cm_0 بدون کاربرد کود دامی، Cm_1 با کاربرد کود دامی، S_0 بدون کاربرد گوگرد و S_1 با کاربرد گوگرد

کاربرد منابع آهن در افزایش جذب آهن در گیاه سویا

طبق نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲)، اثر سه‌گانه تأثیر بر همکنش سطوح مختلف آهن، کود دامی و گوگرد بر جذب آهن در اندام هوایی در سطح یک درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین بر جذب آهن در اندام هوایی (شکل ۳) نشان می‌دهد که بیشترین میزان جذب آهن در تیمار اکسید آهن ضایعاتی، کود دامی و گوگرد ($Fe_3Cm_1S_1$) با مقدار ۰/۵۲ میلی‌گرم بر گیاه سویا می‌باشد که ۳/۷۱ برابر نسبت به تیمار $Fe_0Cm_0S_0$ بود و کمترین میزان غلظت آهن در تیمار کنترل ($Fe_0Cm_0S_0$) با مقدار ۰/۱۴ میلی‌گرم بر گیاه سویا مشاهده شد. روند تغییرات جذب آهن در اندام هوایی مشابه غلظت آهن مشاهده شد؛ همان‌طور که مطالعات پیشین نشان داده است که بین جذب و غلظت آهن در گیاهان استراتژی یک همبستگی معنی‌داری وجود دارد (Lindsay and Schwab, 1982). نتایج مطالعهٔ انجام شده بر روی گیاه ذرت نشان داد که استفاده از سرباره آهن توانست میزان جذب آهن توسط گیاه را افزایش دهد (Wang and Cai, 2006 و Abbaspour et al., 2004). که هم راستا با نتایج این پژوهش بود.

نتایج حاصل از جذب آهن در اندام هوایی گیاه دلالت‌کننده کارایی جذب بالای گیاه سویا رقم کتول می‌باشد که در حقیقت نشان‌دهندهٔ توانایی گیاه در استخراج عنصر آهن از خاک در شرایط کمبود آهن است که گیاه توانسته است با استفاده از مکانیسم‌های احیا و همچنین انحلال آهن محیط رایزوسفر از طریق تراوش‌های ریشه‌ای، کارایی استفاده از آهن را بهبود بخشد که در نتیجه آن مقدار بیشتر وزن خشک در هر واحد آهن جذب شده از خاک، تولید می‌شود.

دلایل تأثیر کاربرد کود دامی همراه با تیمار اکسید آهن در تشدید جذب آهن گیاه در خاک آهکی را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که مواد آلی با تغذیه باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد در خاک موجب افزایش اکسیداسیون بیولوژیکی گوگرد می‌گردد، همچنین مواد آلی حاوی مواد مغذی هستند که به‌تدریج آزاد می‌شوند و در اختیار گیاه قرار می‌گیرند (Wainwright, 1984). همچنین برهم‌کنش مصرف گوگرد و کود آلی در تیمار اکسید آهن ضایعاتی احتمالاً با بیشترین میزان کاهش pH در خاک سبب افزایش جذب آهن و دیگر عناصر کم‌مصرف به میزان قابل‌توجهی گردید (Sabagh et al., 2014).



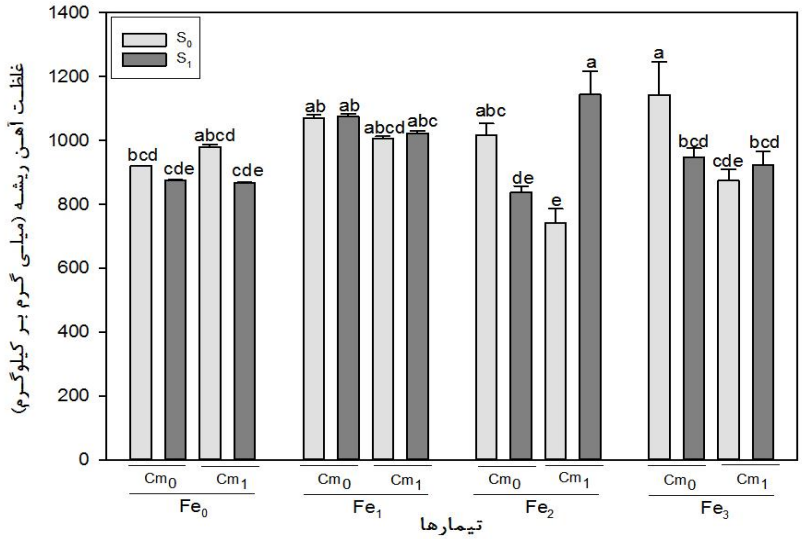
شکل ۳- اثر سه‌گانه سطوح مختلف آهن، کود دامی، گوگرد بر جذب آهن در اندام هوایی گیاه سویا

Fe_0 شاهد، Fe_1 سکوسترین، Fe_2 سولفات آهن، Fe_3 اکسید آهن، Cm_0 بدون کاربرد کود دامی، Cm_1 با کاربرد کود دامی، S_0 بدون کاربرد گوگرد و S_1 با کاربرد گوگرد

کاربرد منابع آهن در افزایش غلظت و جذب آهن در ریشه گیاه سویا

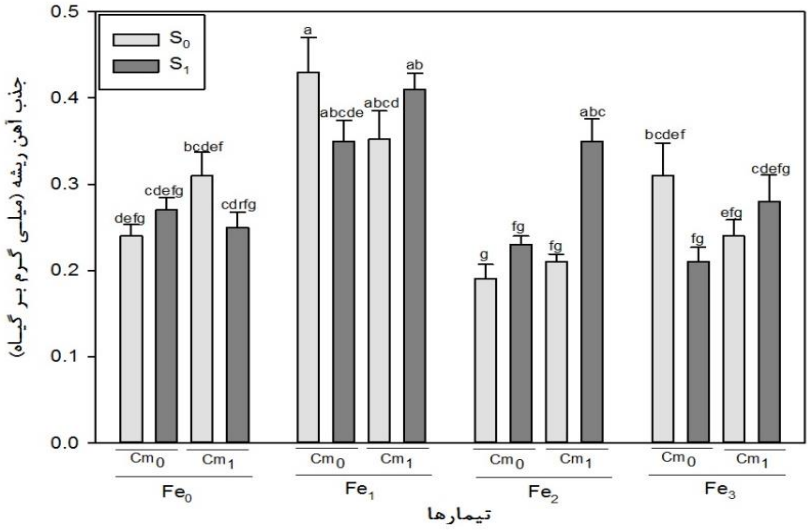
بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) تأثیر بر همکنش سطوح مختلف آهن بر غلظت و جذب آهن در ریشه در سطح یک

درصد معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین بر غلظت آهن در ریشه (شکل ۴) و جذب آهن در ریشه (شکل ۵) نشان می‌دهد که بیشترین میزان غلظت آهن در تیمار سولفات آهن، کود دامی و گوگرد ($Fe_2Cm_1S_1$) با مقدار ۱۱۴۳/۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کاربرد تیمار اکسید آهن به‌تنهایی ($Fe_3Cm_0S_0$) با مقدار ۱۱۴۳/۰۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود و بیشترین میزان جذب آهن در تیمار کاربرد سکوسترین آهن به‌تنهایی ($Fe_1Cm_0S_0$) با مقدار ۰/۴۳ میلی‌گرم بر گیاه سویا ملاحظه شد و کمترین میزان غلظت آهن در تیمار ($Fe_2Cm_1S_0$) با مقدار ۷۴۳/۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین میزان جذب آهن در تیمار ($Fe_2Cm_0S_0$) مقدار ۰/۱۹ میلی‌گرم بر گیاه سویا مشاهده شد. گیاه سویا به‌عنوان گیاه استراتژی یک، تمایل به جذب آهن دوظرفیتی Fe(II) از رایزوسفر دارد (Lucena, 2003). این گیاهان در شرایط کمبود آهن، کارایی استفادهٔ متابولیک از آهن در اندام هوایی و جذب آهن توسط ریشه را افزایش می‌دهند (García-Mina et al., 2013). به‌عبارت‌دیگر، در کمبود آهن، واکنش‌های متابولیکی و فیزیولوژیکی گیاه مانند ترشحات اسیدهای آلی و ترکیبات فنلی با کارایی جذب و استفاده از آهن در گیاه مرتبط است (Mellisho et al., 2011 و Baxter et al., 2008). در این گیاه جذب آهن فرو با ایجاد اثر شاتل[1] و اسیدی کردن منطقه ریشه، کلات کردن آهن و کاهش Fe(III) به Fe(II) در سطح ریشه عمل می‌کند (Hell and Stephan, 2003؛ Lucena, 2003 و Lindsay and Schwab, 1982).



شکل ۴- اثر سه‌گانه سطوح مختلف آهن، کود دامی، گوگرد بر غلظت آهن در ریشه گیاه سویا

Fe_0 شاهد، Fe_1 سکوسترین، Fe_2 سولفات آهن، Fe_3 اکسید آهن، Cm_0 بدون کاربرد کود دامی، Cm_1 با کاربرد کود دامی، S_0 بدون کاربرد گوگرد و S_1 با کاربرد گوگرد



شکل ۵- اثر سه‌گانه سطوح مختلف آهن، کود دامی، گوگرد بر جذب آهن در ریشه گیاه سویا

1 shuttle

Fe_0 شاهد، Fe_1 سکوسترین، Fe_2 سولفات آهن، Fe_3 اکسید آهن، Cm_0 بدون کاربرد کود دامی، Cm_1 با کاربرد کود دامی، S_0 بدون کاربرد گوگرد و S_1 با کاربرد گوگرد

افزایش میزان غلظت آهن ریشه در تیمار سکوسترین آهن نسبت به شاهد ازاین‌جهت قابل توضیح است که شیب انتشار بیشتری ایجاد می‌کند تا در انتقال آهن به ریشه گیاه کمک کند و به‌این‌ترتیب سبب افزایش میانگین غلظت آهن در ریشه سویا نسبت به کنترل گردیده است (Abdel-Mottaleb, 1991). همچنین علت افزایش جذب آهن در تیمارهای آهن همراه با گوگرد را این‌گونه می‌توان بیان کرد که اکسید شدن گوگرد و تولید اسیدسولفوریک در اطراف ریشه، موجب افزایش جذب عناصر غذایی و افزایش جذب عناصر توسط گیاه می‌گردد (Tabatabai, 1986).

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج، کاربرد اکسید آهن و استفاده هم‌زمان آن با کود دامی و گوگرد تفاوت معنی‌داری در افزایش غلظت و جذب آهن با دیگر تیمارهای کودی (سکوسترین و سولفات آهن) و شاهد نشان داد. بین تیمار سولفات آهن و سکوسترین آهن تفاوت معنی‌داری در افزایش وزن خشک اندام هوایی مشاهده نشد. کاربرد سولفات آهن به‌تنهایی یا کاربرد این تیمار کودی همراه با کود دامی و گوگرد، تفاوت معنی‌داری در افزایش میزان غلظت و میزان جذب آهن نداشت. درحالی‌که کاربرد آن با گوگرد موجب افزایش قابل‌توجه جذب آهن اندام هوایی گردید. کاربرد اکسید آهن ضایعاتی به همراه ماده آلی و گوگرد موجب افزایش چشمگیر غلظت و جذب آهن اندام هوایی شد. کاربرد تیمار اکسید آهن به‌تنهایی و سولفات آهن همراه با کود دامی، گوگرد موجب افزایش غلظت آهن در ریشه گیاه شد. همچنین بین کاربرد سکوسترین آهن به‌تنهایی و کاربرد سولفات آهن به‌تنهایی تفاوت چشمگیری در افزایش جذب آهن در ریشه گیاه وجود دارد که حداکثر میزان جذب آهن در تیمار سکوسترین است. کاربرد خاکی سکوسترین آهن سبب افزایش غلظت و جذب آهن اندام هوایی شد. همچنین تیمار ترکیبی آن با کود دامی و گوگرد سبب کاهش علائم زرد برگی و افزایش عملکرد گیاه سویا گردید. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که بهترین نتایج با مصرف اکسید آهن همراه با گوگرد و کود دامی حاصل شد؛ بنابراین باتوجه‌به نتایج برای افزایش کارایی اکسید آهن می‌توان اکسید آهن ضایعاتی را همراه با کود دامی و گوگرد توصیه کرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Abadia, J., Alvarez-Fernandez, A., Rombola, A. D., Sanz, M., Tagliavini, M. and Abadia, A. (2004). Technologies for the Diagnosis and Remediation of Fe Deficiency. *Soil Science and Plant Nutrition*, 50 (7), 965-971.

Abbaspour, A., Kalbasi, M. and Shariatmadari, H. (2004). Effect of steel converter sludge as iron fertilizer and amendment in some calcareous soil, *Journal of Plant Nutrition*, 27(2), 377-394.

Abdel-Mottaleb, M. A., El-Fouly, M. M., Kriem, H. M. and Nofal, O.A. (1991). Response of soybean to micronutrient foliar fertilization of different formulations under different soil conditions. II. Micronutrient content in leaves. *Egyptian journal of Physiological Sciences*. 15, 141-147.

Au, K. K., Penisson, A. C., Yang, S. L. and O'Melia, C. R. (1999). Natural organic matter at oxide/water interfaces: complexation and conformation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 2903–2917.

Baxter, I. R., Vitek, O., Lahner, B., Muthukumar, B., Borghi, M., Morrissey, J., Guerinot, M. L. and Salt, D. E. (2008). The leaf ionome as a multivariable system to detect a plant's physiological status. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 12081–12086.

Chen, Y., Navrot, J. and Barak, P. (1982). Remedy of lime- induced chlorosis with iron-enriched muck. *Journal of Plant Nutrition*, 5, 927-940.

Deluca, T. H., Skogley, E. O. and Engle, R. E. (1989). Band-applied elemental sulfur enhance the phyto availability of phosphorus in alkaline calcareous soils. *Biology and Fertility of Soils*, 7, 346-350.

Derakhshandehpour, A. (1999). Investigation of the effects of compost and sulfur organic fertilizer on increasing soil phosphorus uptake. *Abstract of the articles of the Iranian Soil Science Congress* (6th), Mashhad, Iran. (In Persian)

Emami A. (1976). Methods of Plant Analysis, Technical Bulletin, Soil and Water Research Institute, Iran. No:982. (In Persian)

Feil, B. and Fosstai, D. (1995). Mineral composition of triticale grains as related to grain yield and grain protein. *Crop Sci*ence, 35:1426-1431.

Forouhar, M. (1999). Investigation of the possibility of using iron oxide powder wastes from steel acid washing process as iron fertilizer, *Faculty of Agriculture*, Isfahan University of Technology. (In Persian)

García-Mina, J. M., Bacaicoaa, E., Fuentes, M. and Casanova, E. (2013). Fine regulation of leaf iron use efficiency and iron root uptake under limited iron bioavailability. *Plant Science* 198, 39–45.

Goos, R. J., Johnson, B., Jakson, G. and Hargrove, G. (2004). Greenhouse evalution of controlled release

iron fertilizers for soybean. *Journal of Plant Nutrition*, 27, 43- 55.

Gu, B., Schmitt, J., Chen, Z., Liang L. and McCarthy, J. F. (1994). Adsorption and desorption of natural organic matter on iron oxide: mechanisms and models. *Environmental Science & Technology*, 28(1), 38-46.

Hasegawa, H., Rahman, M. A., Saitou, K., Kobayashi, M. and Okumura, C. (2011). Influence of chelating ligands on bioavailability and mobility of iron in plant growth media and their effect on radish growth. *Environmental and Experimental Botany*, 71, 345-351.

He, W., Shohag, M .J. I., Wei, Y., Feng, Y. and Yang, X. (2013). Iron concentration, bioavailability and nutritional quality of polished rice affected by different forms of foliar iron fertilizer. *Food Chemistry*, 141, 4122-4126.

Heidari Kohal, H., Samar, S. M. and Moez Ardalan, M. (2014). Soil injection of iron sulfate, an inexpensive method for controlling Iron deficiency of fruit trees. *Land Manage Journal.* 2 (2): 151-160. (In Persian with English abstract)

Hell, R. and Stephan, U. W. (2003) Iron uptake, trafficking and homeostasis in plants. *Planta.* 216, 541-551.

Karimi, F., Bahmanyar, M. A. and Shahabi, M. (2012). Improving the content of oil, protein and some yield components of canola in two calcareous soil, consequence the sulfur and cattle manure application. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 22,71-84. (In Persian with English Summary)

Kocak, K. (2014). Evaluation of Iron Deficiency Chlorosis in Soybeans (*Glycine max*). Ph.D. dissertation, Univeristy of Nebraska.

Lindsay, W. L. (1974). Role of chelation in micronutrient availability. In E.W. Carson. ed. The plant root and its enviromentment, University of Virginia.

Lindsay, W. L. (1979). Chemical equilibria in soils. John Wiley and Sons: N.Y. pp. 449.

Lindsay, W. L. and Schwab A. P. (1982). The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *Journal of Plant Nutrition*, 5(4-7), 821840.

Lucena, J. J. (2003). Fe chelates for remediation of Fe chlorosis in strategy I plants. *Journal of Plant Nutr*ition, 26, 1969-1984.

Malakouti, M. J. And Gheibi, M. N. (2000). Determining the critical limit of effective nutrients in soil, plants and fruits in order to increase the quantitative and qualitative yield of strategic drawer products. The second edition with a complete revision. Publication of agricultural education. Iran. (In Persian)

Malakouti, M. J. and Rezaei, H. (2001). The roles of sulphur, calcium and magnesium on the improvement of yield and quality of agricultural products. Ministry of Agriculture. Tehran, Iran. (In Persian)

Marschner, H. (1995). Mineral Nutrition of High Plants. London: Academic Press.

Melali, A. R. and Shariatmadari, H. (2008). Application of Steel Making Slag and Converter Sludge in Farm Manure Enrichment for Corn Nutrition in Greenhouse Conditions. *Journal of Water and Soil Science*, 11, 505-513. (In persian)

Mellisho, C. D., González-Barrio, R., Ferreres, F., Ortuño, M. F., Conejero, W., Torrecillas, A. and Gil-Izquierdo, A.)2011(. Iron deficiency enhances bioactive phenolics in lemon juice. Journal of the Science of Food and Agriculture, 91, 2132–2139.

Mishra, A. K. and Agarwal, H. P. (1994). Effect of sulphur on growth, yield, protein and oil content of soybean. *Journal of Oilseed Research*, 11, 92-102.

Moll, R. H., Kamprath, E. J. and Jackson, W. A. (1982). Analysis and interpretation of factors, which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy*, 74, 562-564

Mortvedth, J. J., Cox, F. R., Shuman, L. M. and Welch, R. M. (1991). Micronutrients in Agriculture. (2th ed). No.4, Book Series, Soil Science Society of America, INC, Madison, WI.

O'Melia, C. R. and Tiller, C. L. (1993). Physicochemical aggregation and deposition in aquatic environments. In: Buffle, J., van Leeuwen, H.P. (Eds.), Environmental Particles, vol. 2. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 353–386.

Oliveira, L. C. A., Rios, R. V. R. A., Fabris, J. D., Garg, V., Sapag, K. and Lago, R. M. (2002). Activated carbon/iron oxide magnetic composites for the adsorption of contaminants in water. *Carbon*, 40(12), 2177-2183.

Pastor, J., Hernandez, A. J., Estalrich, E. and Oliver, S. (1995). Soil Factors and Fe Content In Wild Herbaceous Plants. In Iron Nutrition in Soil and Plants; Abadia, J., Ed.; Springer Science + Business Media: Dordrecht, The Netherlands. pp. 159–166.

Qiu, W, J. Dai, N. Wang, X. Guo, X. Zhang, Y. Zuo. (2017). Effects of Fe-deficient conditions on Fe uptake and utilization in P-efficient soybean, *Plant Physiology et Biochemistry*. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.12.010.-Qiyamati, Yazdi G., Astaraei, A. R. and Zamani, G. R. (2009). The effect of municipal waste compost and sulfur on sugar beet yield and soil chemical properties. *Iranian Journal of Crop Research*, 7(1), 164-155. (In Persian)

Reuter, D. J., Alston, A. M. and McFarlane, J. D. (1988). Occurrence and correction of manganese deficiency in plant: 205-225. In: Graham R.D., Hannam, R.J. and Uren, N.C., (Eds.). Manganese in Soils and Plants. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, the Netherlands, 307p.

Sabagh, H. Khoramivafa, M. Honarmand, S. J. and Beheshti, Al- Agha, A. (2014). Effect of Thiobacillus bacteria, sulfur and manure on the nutrient and pH of soil in garlic *(Allium sativum*). *International Journal of Biosciences*, 5(4), 186-193.

Shariatmadari, H.) 1990(. Investigation of the possibility of using blood powder as iron fertilizer,

Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian)

Sheikhpour, R., Yathribi, J. and Zarei, M. (2013). Effect of levels and type of iron sources, vermicompost, and arbuscular mycorrhizal fungus on growth and uptake of iron in corn in a calcareous soil. Master Thesis, Faculty of Agriculture, Shiraz University. (In Persian)

Sims, J. T. and Johnson, G. V. (1991). Micronutrient soil tests. In (ed.) Micronutrients in agriculture. (2th ed). Soil Science Society of America, Madison, WI.

Specht, C. H., Kumke, M. U. and Frimmel, F. H. (2000). Characterization of NOM adsorption to clay minerals by size exclusion chromatography. *Water Research* 34, 4063–4069.

Tabatabai, M. A. (1986). Sulfur in Agriculture. Am. Soc. Agron. Inc., Madison, Wis., USA.-Terry R. E., Soerensen K. U., Jolley V. and Brown, J. C. (1991). The role of active *Bradyrhizobium japonicum* in iron stress response of soybeans. *Plant Soil* 130, 225–230.

Tomba, E., Szekeres, M., Baranyi L. and Micheli, E. (1998). Surface modification of clay minerals by organic polyions. Colloids Surfaces: A Physicochemical and Engineering Aspects 141, 379–384.

Wainwright, M. (1984). "Sulfur oxidation in soils", *Advance Agronomy*, 37, 349-392.

Wang, X. and Qing-Sheng, C. (2006). Steel Slag as an iron fertilizer for corn growth and soil improvement in a pot experiment. *Pedosphere*, 16(4), 519-524.

Waters, B. M., Amundsen, K. and Graef, G. (2018). Gene Expression Profiling of Iron Deficiency Chlorosis Sensitive and Tolerant Soybean Indicates Key Roles for Phenylpropanoids under Alkalinity Stress. Front. *Plant Science*, 9, 10-21.

Wiersma, J. V. (2005). High rates of Fe-EDDHA and seed iron concentration suggest partial solutions to iron deficiency in soybean. *Agronomy Journal*, 97, 924–934.