

بررسی برهمکنش نیکل و آهن بر جذب آنها توسط گیاه ذرت (*Zea mays L.*) در یک خاک آهکی

عادل ریحانی تبار^{۱*}، منیره عیدی^۲، ندا پاشاپور^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۸/۰۹

چکیده

نیکل یکی از عناصری است که جدیداً به فهرست عناصر ضروری افزوده شده است. این عنصر برای گیاه در غلظت‌های کم ضروری ولی در غلظت‌های زیاد سمی محسوب می‌شود. نظر به اهمیت آهن این پژوهش برای بررسی برهمکنش نیکل و آهن بر غلظت و مقدار جذب نیکل و آهن توسط گیاه ذرت انجام گرفت. برای این منظور آزمایش گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار، در یک خاک آهکی و با تیمارهای نیکل در چهار سطح (۰، ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم از منبع سولفات نیکل) و آهن در پنج سطح (۰، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم به تفکیک از دو منبع سکوسترین آهن و سولفات آهن) با کاشت ذرت انجام گرفت. بعد از ۹۰ روز، گیاهان برداشت و غلظت نیکل و آهن بخش هوایی و ریشه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با افزایش سطوح نیکل مصرفی، غلظت نیکل بخش هوایی به ترتیب ۱۸/۸، ۴۱/۱ و ۹۷/۱ درصد و غلظت نیکل ریشه به ترتیب ۱/۳، ۴/۶ و ۹/۲ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. اما با افزایش سطوح نیکل در خاک، غلظت آهن در بخش هوایی در سطوح ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک به ترتیب ۸/۲۷، ۱۶/۱، ۳۲/۷ درصد نسبت به شاهد و غلظت آهن ریشه در سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک به ترتیب ۸/۷ و ۹/۳ درصد نسبت به شاهد کاهش معنادار نشان داد. همچنین با افزایش سطح آهن مصرفی، فاکتور انتقال نیکل در سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات آهن به ترتیب ۴۴/۸ و ۴۸/۹ درصد و در سطح ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین آهن ۵۵/۱ درصد نسبت به شاهد افزایش معنادار یافت. در نهایت چنین نتیجه‌گیری شد که برهمکنش آهن و نیکل تحت تأثیر منبع آهن قرار گرفت. اثر متقابل نیکل و آهن نیز بر مقدار جذب نیکل و آهن توسط بخش هوایی و ریشه و فاکتور انتقال آهن معنادار بود.

واژه‌های کلیدی: اثر متقابل، سولفات آهن، سولفات نیکل، فاکتور انتقال، گلخانه

۱-دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز (مکاتبه کننده)

۲-دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*پست الکترونیک: areyhani@tabrizu.ac.ir

مقدمه

نیکل از نظر فراوانی، بیست و چهارمین عنصر در پوسته زمین محسوب و یکی از عناصر طبیعی است که به شکل‌های مختلف در محیط زیست، خاک، هوا و آب آشامیدنی و همچنین در گیاهان و حیوانات وجود دارد. مقدار متوسط نیکل کل در خاک ۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و مقدار کل این عنصر در پوسته زمین ۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و نسبت غنی‌شدن نیکل ۰/۲۴ است (Sposito, 1989). این عنصر در پنج حالت اکسایشی ۰، +۱، +۲، +۳ و +۴ در طبیعت وجود دارد. بسته به pH و شرایط اکسایش و احیایی خاک، در مقایسه با سایر حالت‌های اکسایشی، Ni^{2+} به صورت گسترده در محیط حضور دارد. نظر به حضور عنصر نیکل به عنوان کوفاکتور در ساختمان آنزیم اوره‌آز، نیکل در غلظت مناسب در محیط رشد برای گیاهان ضروری است. معمولاً نیکل در بافت‌های گیاهی بسته به دوره رشد در محدوده بین ۰/۱ تا ۱۰ میلی‌گرم در کیلوگرم وزن خشک یافت می‌شود (Gerendas & Macher, 1997). کارکردهای فیزیولوژیکی مهم نیکل در گیاهان علاوه بر سوخت و ساز اوره، رشد زایشی، تثبیت نیتروژن، دخالت در جذب سایر عناصر از جمله آهن، مس و روی می‌باشد. امروزه مشخص شده است که نیکل برای گیاهان به ویژه تغذیه شده با اوره ضروری است و گیاهان دچار کمبود نیکل به علت کاهش فعالیت آنزیم اوره‌آز مقادیر سمی اوره را در نوک برگ‌ها تجمع می‌دهند (Fageria 2009). گیاهان نیکل را به آسانی جذب نموده و نیکل در گیاه متحرک است. بنابراین خطر تجمع بیش از حد نیکل در اندام‌های گیاهی وجود داشته که در این صورت باعث کاهش کیفیت فرآورده‌های گیاهی می‌شود. همچنین جذب مقادیر بیشتر از نیاز نیکل توسط گیاه باعث بروز مسمومیت شده و سمیت گیاهی منجر به سوختگی برگ، رشد ضعیف گیاه، کاهش عملکرد و بروز ناهنجاری‌هایی در متابولیسم گیاهی می‌شود (Yang, 1996). آهن چهارمین عنصر فراوان پوسته زمین می‌باشد. مقدار کل این عنصر در خاک‌ها بین ۱ تا ۲۰ درصد وزنی متغیر و میانگین آن ۴ درصد گزارش شده است. در ایران کمبود آهن، به ویژه در مزارع و باغ‌ها به دلیل آهکی بودن خاک‌ها، کمبود مواد آلی، آبیاری سنتی، حلالیت کم ترکیبات این عنصر در pH بالا، وجود بی‌کربنات در آب‌های آبیاری و مصرف زیاد کود فسفر عمومیت دارد

(Samar et al., 2010). تعادل عناصر غذایی در بافت‌های گیاهی از بحث‌های مهم در علم تغذیه گیاهی بوده و یکی از عوامل مهم برهم زنده این تعادل برهمکنش بین عناصر است. نیکل و آهن دارای بار مثبت بوده و به علت تشابه در سایر ویژگی‌های شیمیایی، رفتار آن‌ها در بسیاری از سیستم‌های خاک-گیاه مشابه است. همچنین برهمکنش‌های مشاهده شده بین آهن و نیکل و ارتباط برخی از علائم سمیت نیکل با کمبود آهن در گیاهان مختلف می‌تواند حاکی از امکان انتقال نیکل در گیاهان از مسیرهای انتقال آهن باشد. از آنجایی که تاکنون وجود حامل‌های اختصاصی در گیاهان برای نیکل گزارش نشده و وجود آن نیز محتمل به نظر نمی‌رسد لذا به‌نظر می‌رسد که نیکل ناقل‌های انتقال دهنده و کیلیت‌کننده‌های آهن را اشغال می‌کند. بنابراین رقابت شدیدی بین آهن و نیکل برای قرار گرفتن در این مواضع می‌توان انتظار داشت. با استفاده از سری ایزوتوپ-ولیمام^۱ که رقابت فلزات در اشغال محل لیگاندها را بیان می‌کند، بروز چنین پدیده‌ای را می‌توان اثبات کرد (Mizuno, 1968). عزیزی و قاسمی (Azizi & Ghasemi, 2010) گزارش کردند که در گیاه *Alyssum inflatum* که انباشتگر نیکل است، در کمبود آهن، نیکل در طی زمان‌های نزدیک به برداشت گیاه به سرعت به بخش‌های هوایی منتقل شده ولی با افزایش غلظت آهن جذب و انتقال نیکل از ریشه به بخش هوایی کمتر شد. کوپیتکه و همکاران (Kupittke et al., 2007) گزارش کردند که $1/4 \mu M$ غلظت Ni^{2+} باعث کاهش ۱۰٪ در وزن نسبی ریشه و ساقه گیاه لوبیا چشم بلبلی شد. سمیت نیکل در لوبیا چشم بلبلی باعث افزایش غلظت آهن در ریشه شد. این تجمع آهن در ریشه‌ها منجر به کاهش انتقال آهن به شاخه‌ها شد. کلروز حاصل از نیکل مازاد به کمبود آهن نسبت داده شد، چون مصرف نمک‌های حاوی آهن رنگ سبز را به گیاهان کلروز شده برگرداند (Mishra & Kar, 1971). میزونو (Mizuno, 1968) نسبت Ni/Fe بخش هوایی را به‌عنوان یک پارامتر خوب برای بیان سمیت Ni معرفی و گزارش کرد که در نسبت‌های کمتر از ۵ عملکرد محصولات کاهش می‌یابد. خالد و تینسلی (Khalid & Tinsley, 1980) نیز گزارش کردند که علائم کلروز با غلظت آهن و نیکل همبستگی ندارد اما نسبت Ni/Fe همبستگی مثبتی با مسمومیت

استفاده شد. عناصر مس و منگنز به میزان ۵ میلی گرم بر کیلوگرم به ترتیب از منابع سولفات مس ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) و سولفات منگنز ($\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) و همچنین نیتروژن به میزان ۱۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم از منبع اوره $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ در سه تقسیط به خاک گلدانها افزوده شدند. چون خاک مورد استفاده کمبود پتاسیم و فسفر قابل جذب نداشت (جدول ۱) لذا این دو عنصر مصرف نشدند (Malakuti et al., 2000). نمونه‌ها هر کدام در شرایط رطوبتی خودشان به مدت ۲ هفته نگه داشته شدند. سپس ۵ عدد بذر ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) در هر گلدان حاوی ۴ کیلوگرم خاک کشت گردید. بعد از یک هفته گیاهان به ۳ عدد در هر گلدان تنک شدند. برای تأمین رطوبت مورد نیاز گیاه، گلدانها روزانه به وسیله توزین با استفاده از آب مقطر آبیاری شدند تا رطوبت خاک نزدیک رطوبت ظرفیت مزرعه باشد. در پایان دوره رشد رویشی، بخش هوایی از محل طوقه قطع و با آب مقطر شستشو داده شد. سپس نمونه‌های گیاهی (بخش هوایی و ریشه) در داخل پاکت‌های کاغذی در درون آون خشک کن نمونه‌های گیاهی منتقل شده و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. بعد از اتمام این مدت، وزن خشک نمونه‌ها با ترازوی دیجیتالی و با دقت $(\pm 0.01 \text{g})$ تعیین گردید. نمونه‌ها پس از خشک شدن با استفاده از آسیاب برقی با تیغه آلومینیومی خرد شدند. در این تحقیق از روش ترسوزانی برای هضم نمونه‌های گیاهی استفاده شد (Waling, 1989). غلظت آهن و نیکل گیاه با دستگاه جذب اتمی مدل (6300-Shimadzu, AA) اندازه‌گیری شد. فاکتور انتقال نیز از نسبت غلظت عنصر در بخش هوایی به غلظت عنصر در ریشه محاسبه شد (Das & Maiti, 2007). آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار و با ۲ فاکتور شامل نیکل در ۴ سطح ۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم نیکل بر کیلوگرم خاک به عنوان فاکتور اول و آهن در ۵ سطح، یعنی صفر و سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی گرم آهن بر کیلوگرم خاک از دو منبع سکوسترین و سولفات آهن به عنوان فاکتور دوم انجام شد. رسم نمودارها با Excel و آنالیز آماری با نرم‌افزار MSTATC و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ انجام شد.

نیکل داشت. اگر نسبت Ni/Fe بیشتر از یک باشد سمیت نیکل و اگر بیشتر از ۲ باشد سوختگی و کلروز شدید ناشی از کمبود آهن را ایجاد می‌کند. هدف از انجام این تحقیق بررسی غلظت و مقدار جذب نیکل و آهن در اثر مصرف توأم این دو عنصر ضروری بر غلظت نیکل و آهن توسط بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در یک خاک آهکی بود.

مواد و روش‌ها

خاک آهکی مورد استفاده از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر به صورت تصادفی و مرکب از مزرعه ذرت کاری شده (با این هدف که میزان نیکل و آهن قابل جذب آن کم باشد تا به-توان تأثیر مصرف توأم این دو عنصر را بهتر مطالعه کرد)، نمونه‌برداری و پس از خشک کردن آن در هوا و مخلوط کردن کامل از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری ۴ زمانه (Gee & Bauder, 1986) و pH و EC در عصاره اشباع خاک (McClean, 1982)، درصد کربن آلی به روش والکی بلک اصلاح شده (Nelson & Sommers, 1982)، کربنات کلسیم معادل با روش خنثی کردن با اسید و تیترا نمودن اسید باقی‌مانده با محلول سود (Allison & Moodie, 1965)، مقدار آهن و نیکل قابل جذب گیاه در خاک با روش Lindsay DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) و رطوبت ظرفیت مزرعه با استفاده از دستگاه صفحه فشاری در مکش ۳۳ کیلو پاسکال اندازه‌گیری شد (Cassel & Nielsen, 1986).

افزودن سطوح نیکل به خاک و کشت گلخانه‌ای

جهت افزایش سطوح نیکل به خاک، از سولفات نیکل ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) در ۴ سطح (۰، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم نیکل بر کیلوگرم خاک) به صورت اسپری کردن به خاک استفاده شد. سپس به خاک، آب مقطر افزوده شد تا به رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای برسد و سه چرخه مرطوب کردن (تا رطوبت FC) و خشک کردن (تا رطوبت هوا خشک) جهت اختلاط کامل نیکل با خاک اعمال شد. در این مدت عمل مخلوط کردن به صورت دستی انجام شد. هر چرخه به مدت ۵ تا ۷ روز به طول انجامید. خاک‌هایی که سطوح نیکل در آنها اعمال شد در گلدان ریخته و آماده کشت شدند. سپس آهن در ۵ سطح (۰، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک) به تفکیک از دو منبع سولفات آهن ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) و سکوسترین آهن (Fe-EDDHA)

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده خاک مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. خاک مورد مطالعه آهکی و دارای بافت متوسط بود. همچنین مشکل شوری به‌عنوان متغیر ثانویه مطرح نبود.

غلظت نیکل بخش هوایی

اثر اصلی نیکل و اثر متقابل نیکل و آهن در سطح احتمال یک درصد بر غلظت نیکل بخش هوایی ذرت معنادار بود، اما اثر اصلی آهن غیرمعنادار شد (جدول ۲). با توجه به اینکه دامنه کفایت نیکل در بخش هوایی گیاهان، از ۰/۱ تا ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک متغیر است (Gerendas & Macher, 1997)، می‌توان نتیجه گرفت که غلظت نیکل بخش هوایی در سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بیشتر از این دامنه قرار گرفته است. بولارد (Bollard, 1983) گزارش کرد که حد بحرانی سمیت نیکل در گونه‌های حساس بیش از ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و برای گونه‌های زراعی با تحمل متوسط، بیشتر از ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است. ایشان همچنین گزارش کردند که تعدادی از گونه‌های سازگار (انباشتگرها) در خاک‌های سرپنتینی^۱ ممکن است حاوی بیش از ۳٪ نیکل در وزن خشک اندام هوایی خود باشند. در این گونه‌ها نسبت بیشتری از نیکل با اسیدهای آلی کمپلکس می‌شود که ممکن است در تحمل آن‌ها دخیل باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گیاه ذرت نسبت به غلظت بالای نیکل تحمل بیشتری دارد. رابی و همکاران (Rabie *et al.*, 1992) گزارش کردند که با افزایش مقدار Ni در خاک، غلظت Ni در بخش هوایی و تجمع آن در گیاهان باقلا، گندم و سورگوم افزایش یافت و افزایش غلظت نیکل در بخش هوایی متناسب با غلظت نیکل در خاک بود.

با افزایش سطوح نیکل مصرفی از صفر به ۱۰۰ میلی‌گرم، در سطح شاهد آهن غلظت نیکل بخش هوایی، از ۲/۸۶ به ۲۲/۷۹، ۲۶/۱۵ و ۲۷/۲۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید؛ به طوری که غلظت نیکل بخش هوایی به ترتیب ۶/۹۷، و ۸/۱۴ و ۸/۵۲ برابر نسبت به سطح صفر افزایش یافت (شکل ۱). در سطح ۱۰ میلی‌گرم نیکل و عدم مصرف آهن، افزایش شدید در غلظت نیکل بخش هوایی رخ داد، اما در سطح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل تغییرات اندک و

غیرمعنادار بود. احتمالاً تأثیر منفی نیکل بر ساختار و عملکرد ریشه باعث کاهش رشد آن و مقاومت گیاه در برابر جذب اضافی آن باعث عدم اختلاف معنادار غلظت نیکل بخش هوایی شده است. با توجه به شکل ۱ بیشترین غلظت نیکل بخش هوایی به میزان ۲۷/۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل و شاهد آهن مشاهده شد که البته با غلظت نیکل بخش هوایی با تیمار ۵۰ میلی‌گرم نیکل و ۱۰ میلی‌گرم آهن (سولفات آهن) و همچنین با تیمار ۵۰ میلی‌گرم نیکل و شاهد آهن اختلاف معنادار نداشت و کمترین آن به میزان ۲/۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد نیکل و شاهد آهن حاصل شد که البته این مقدار نیکل با تیمار شاهد نیکل و ۱۰ میلی‌گرم آهن (سولفات آهن) اختلاف معنادار نداشتند.

غلظت نیکل ریشه ذرت

اثرات اصلی نیکل و آهن و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر غلظت نیکل ریشه ذرت معنادار بود (جدول ۲). با افزایش سطوح نیکل در خاک، غلظت نیکل در ریشه به طور معناداری افزایش یافت. نتایج اثر متقابل نشان داد که با افزایش سطوح آهن مصرفی از منبع سولفات آهن، غلظت نیکل ریشه به طور معنادار (نسبت به شاهد) کاهش یافت. مقایسه میانگین اثر متقابل (شکل ۲) نشان داد که با افزایش سطوح نیکل، غلظت نیکل ریشه در حضور ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن از هر دو منبع افزایش یافت؛ به طوری که این افزایش معنادار در سطح ۵۰ میلی‌گرم نیکل به ترتیب ۶/۳۶، ۱۶/۰۹ برابر و در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل به ترتیب ۳/۰۷، ۵/۵۳ برابر نسبت به شاهد بود. با توجه به شکل ۲ بیشترین غلظت نیکل ریشه به میزان ۱۸۸۰/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل و ۱۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین آهن مشاهده شد که با تمام تیمارها اختلاف معنادار داشت و کمترین آن به میزان ۱۰۶/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد نیکل و ۱۰ میلی‌گرم آهن از منبع سولفات آهن حاصل شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1- Selected physical and chemical properties of the studied soil Texture

Ni*	*Fe	pH _e	EC _e	FC	Organic carbon	CaCO ₃	Silt	Clay	Sand	Texture
0.61	3.6	8.1	0.68	19	0.94	7.2	26	25	49	SCL

*Available

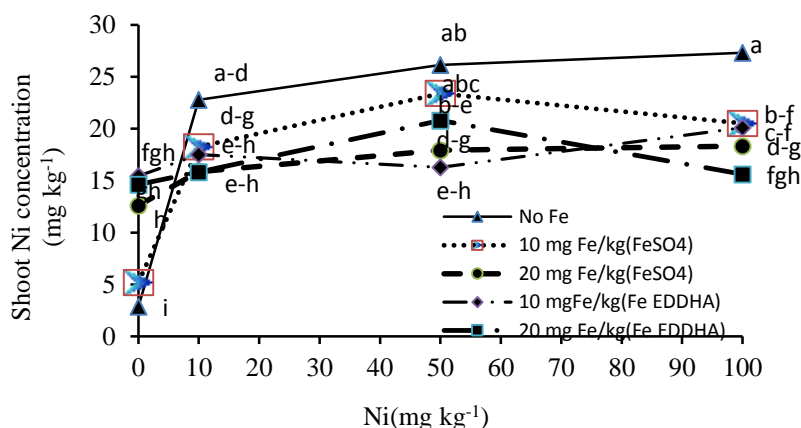
ادامه جدول ۱ Table 1. Continue

*Ni	*Zn	*Cu	*Mn	*Fe	*K	*P
(mg kg ⁻¹)						
0.60	1.4	0.9	2.1	3.6	719	33.5

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر نیکل و آهن بر غلظت، مقدار جذب نیکل در بخش هوایی و ریشه و فاکتور انتقال نیکل

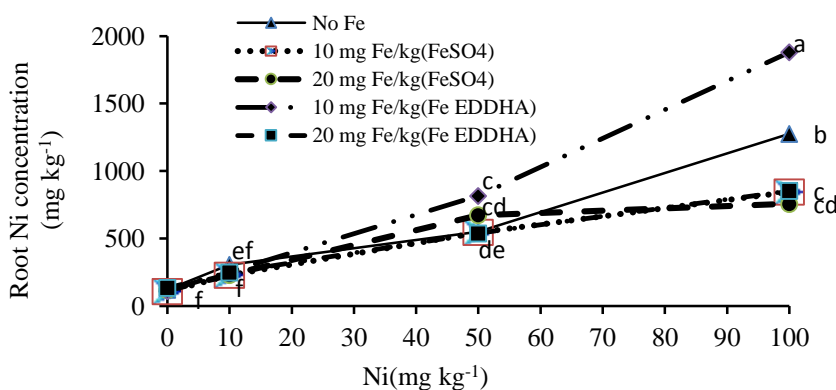
Table 2. Analysis of variance effects of Ni and Fe on shoot and root concentration, uptake and translocation factor of Ni

Source of error	df	MS				
		Shoot Ni concentration	Shoot Ni content	Root Ni concentration	Root Ni content	Translocation factor
(Ni)	3	360.53**	1106.4**	35890305.55**	2601086.5**	**0.049
(Fe)	4	17.2 ^{ns}	2911.47**	214393.18**	317368.67**	0.001**
(Ni×Fe)	12	64.03**	4038**	145282.74**	229958.62**	0.001**
(Error)	38	7.007	623.12	6088.13	75577.65	0.00036
CV		15.33	20.76	14.09	49.72	28.8

^{ns}, ** and * are non-significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively

شکل ۱- مقایسه میانگین‌های غلظت نیکل بخش هوایی برای اثر متقابل نیکل و آهن

Figure 1. Mean Comparisons of the shoot Ni concentration for Ni × Fe interaction



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های غلظت نیکل ریشه برای اثر متقابل نیکل و آهن

Figure 2. Mean Comparisons of the root Ni concentration for Ni × Fe interaction

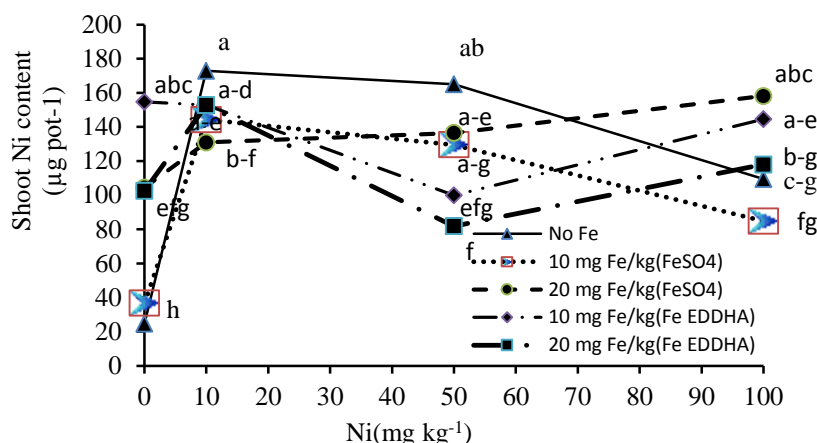
مقدار جذب نیکل توسط بخش هوایی ذرت

اطلاعات مرتبط با مقدار عناصر در طی یک فصل زراعی به مدیریت حاصلخیزی خاک برای گیاه بعدی و در مورد آلاینده‌ها مثل نیکل به مدیریت پالایش خاک کمک می‌کند. تجزیه واریانس نشان داد که اثر اصلی نیکل و آهن و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر مقدار جذب نیکل بخش هوایی معنادار بود (جدول ۲). با توجه به این که، میزان جذب از حاصلضرب وزن خشک در غلظت محاسبه می‌شود، افزایش مقدار جذب نیکل بخش هوایی در سطح ۱۰ میلی‌گرم را می‌توان به افزایش ماده خشک نسبت داد. همچنین با افزایش سطوح آهن، مقدار جذب نیکل بخش هوایی در سطح ۱۰ میلی‌گرم آهن (سکوسترین آهن) به ترتیب ۱۶/۳ و ۳/۶ درصد نسبت به شاهد کاهش ولی در سطح ۲۰ میلی‌گرم آهن (سولفات آهن) و ۱۰ میلی‌گرم آهن (سکوسترین آهن) ۱۶/۸ و ۱۲/۱ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد. جذب نیکل با افزایش سطوح آهن مصرفی به رغم کاهش غلظت آن افزایش یافت. دلیل آن می‌تواند تأثیر مثبت آهن بر وزن خشک ذرت باشد. شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش سطوح آهن از صفر به ۲۰ میلی‌گرم، مقدار نیکل بخش هوایی به استثنای سطوح صفر و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل کاهش یافت. اما با افزایش سطوح نیکل، در سطح شاهد آهن، مقدار نیکل بخش هوایی از $(\mu\text{g pot}^{-1})$ ۲۴/۷ به ۱۷۳، ۱۶۵/۱ و $(\mu\text{g pot}^{-1})$ ۱۰۹/۵ به ترتیب در سطوح شاهد، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ نیکل رسید؛ به طوری که با افزایش سطح نیکل از صفر به ۱۰، ۶ برابر افزایش معنادار مشاهده شد، در حالی که در سطح شاهد آهن با افزایش نیکل از ۵۰ به ۱۰۰ میلی‌گرم، مقدار نیکل بخش هوایی، ۳۳/۶ درصد کاهش معنادار داشت.

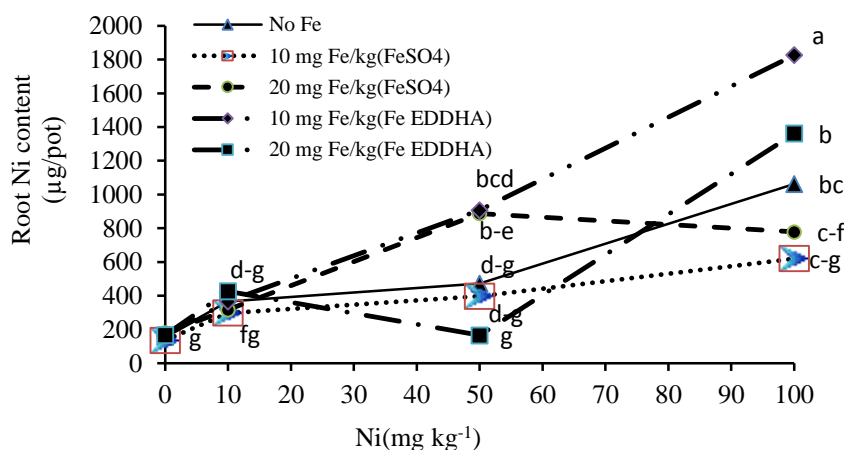
مقدار جذب نیکل ریشه

اثر اصلی نیکل و اثر متقابل نیکل و آهن در سطح احتمال یک درصد و اثر اصلی آهن در سطح احتمال پنج درصد بر

مقدار نیکل ریشه ذرت معنادار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین‌ها (شکل ۴) نشان داد که بیشترین مقدار نیکل ریشه در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک و کمترین مقدار در سطح شاهد نیکل بود و با افزایش سطوح نیکل در خاک، مقدار جذب نیکل توسط ریشه ذرت از $(\mu\text{g pot}^{-1})$ ۱۵۹ در سطح شاهد نیکل به $(\mu\text{g pot}^{-1})$ ۵۶۰ در سطح ۱۰ میلی‌گرم نیکل، $(\mu\text{g pot}^{-1})$ ۱۱۲۴ در سطح ۵۰ میلی‌گرم نیکل و $(\mu\text{g pot}^{-1})$ ۱۱۲۴ در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک رسید. همچنین با افزایش سطوح آهن، مقدار جذب نیکل در سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن از منبع سولفات آهن و ۲۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین آهن از لحاظ آماری نسبت به شاهد معنادار نشد، در حالی که در سطح ۱۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین ۵۸/۴ درصد نسبت به شاهد افزایش مشاهده شد. دلیل این افزایش را می‌توان به افزایش غلظت نیکل ریشه در اثر مصرف نیکل نسبت داد. اما با مقایسه منابع آهن مشاهده می‌شود که مقدار نیکل ریشه در سطوح ۱۰ و ۲۰ آهن از منبع سکوسترین نسبت به سطوح متناظر از سولفات آهن به ترتیب ۱/۶ برابر افزایش و ۳/۳ درصد کاهش یافته است. این افزایش و کاهش مقدار نیکل ریشه را می‌توان به ترتیب به بهبود رشد ریشه و کاهش غلظت نیکل ریشه به ترتیب در اثر مصرف ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن (سکوسترین آهن) نسبت داد. با توجه به شکل ۴ بیشترین مقدار نیکل ریشه به میزان $(\mu\text{g pot}^{-1})$ ۱۸۲۷ در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل و ۱۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین آهن مشاهده شد که حدود سه برابر بیشتر از مقدار جذب نیکل ریشه در همین سطح نیکل و آهن ولی از منبع سولفات آهن بود که مؤید تقویت جذب نیکل توسط بنیان سکوسترین در مقایسه با سولفات می‌باشد که مستلزم توجه به این امر به ویژه در خاک‌های آلوده به نیکل می‌باشد (Samar et al., 2010).



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های مقدار نیکل بخش هوایی برای اثر متقابل سطح نیکل و آهن
Figure 3. Mean Comparisons of the shoot Ni uptake for Ni × Fe interaction

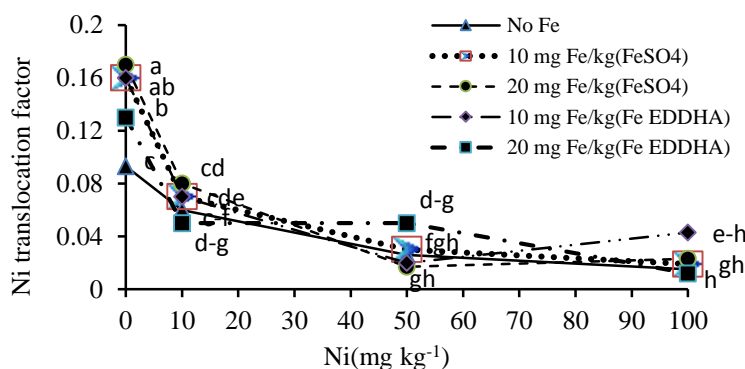


شکل ۴- مقایسه میانگین‌های مقدار نیکل ریشه برای اثر متقابل سطح نیکل و آهن
Figure 4. Mean Comparisons of the root Ni uptake for Ni × Fe interaction

فاکتور انتقال نیکل

توسط گیاهان، اثرات سمی کمتری روی تاج دارند (Fageria, 2009). سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2004) جذب نیکل در ریشه و اندام‌های هوایی نخود فرنگی در محلول غذایی را مطالعه و گزارش نمودند که در نخود فرنگی مقدار تجمع نیکل در ریشه‌ها بیشتر از اندام هوایی بود. در تمام سطوح آهن با افزایش نیکل از صفر به سطح ۱۰ میلی‌گرم نیکل کاهش شدید در فاکتور انتقال نیکل مشاهده شد و از آن به بعد تغییرات تقریباً مشابه شد. لذا در این آزمایش سطح ۱۰ میلی‌گرم نیکل به عنوان سطح واکنش سریع ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ شناخته شد (شکل ۵). با افزایش سطوح آهن (از هر دو منبع آهن)، فاکتور انتقال نیکل افزایش یافت.

اثرات اصلی نیکل و آهن و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد بر فاکتور انتقال نیکل ریشه ذرت معنادار بود (جدول ۲). در شرایط این آزمایش مقادیر عددی فاکتور انتقال نیکل در گیاه ذرت کمتر از یک بود، پس ذرت نیکل را بیشتر در ریشه تجمع داد (شکل ۵). ثانیاً با افزایش سطوح نیکل، فاکتور انتقال نیکل از عدد ۰/۱۴ در سطح شاهد به ۰/۰۶ و ۰/۰۲۹ و ۰/۰۲۲ به ترتیب در سطوح ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک کاهش معنادار یافت. یعنی با افزایش سطوح نیکل در خاک، گیاه ذرت تمایلی به انتقال نیکل به بخش هوایی نداشت. معمولاً در گیاهان، جهت مقابله با اثرات مضر فلزات سنگین جذب شده در ریشه تجمع می‌یابند. حفظ مقدار بیشتر نیکل در ریشه‌ها به این مفهوم است که سازوکارهای اعمال شده



شکل ۵- مقایسه میانگین‌های فاکتور انتقال نیکل برای اثر متقابل نیکل و آهن

Figure 5. Mean Comparisons of the Ni translocation factor for Ni x Fe interaction

شرایط کمبود ملاپم تا متوسط آهن، مصرف خاکی کیلیت آهن (Fe-EDDHA) در سویا سبب کاهش علایم کمبود در گیاه در اوایل دوره رشد شد، اما تأثیر معنا-داری بر عملکرد و غلظت آهن دانه نداشت. اختلاف نتایج به‌دست‌آمده از تأثیر کوددهی آهن بر گیاه، می‌تواند به دلایل متعددی باشد. از جمله تفاوت در ویژگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی خاک مانند جمعیت و ماهیت جامعه میکروبی که بر تجزیه زیستی کلات مصرفی مؤثر هستند. جنس و گونه گیاه، شرایط رشد گیاه به ویژه دما و نور مهم هستند. البته عامل نور علاوه بر تأثیر بر تجزیه نوری کلات به ویژه در شرایط گلخانه، بر میزان رشد گیاه و در نتیجه بر میزان نیاز گیاه به آهن به شدت مؤثر است. سطوح آهن مصرفی، کیفیت کود مصرفی، رقابت عناصری نظیر کلسیم با آهن بر سر ترکیب شدن با کلات، مصرف یا عدم مصرف سایر عناصر به ویژه مس که می‌تواند ضمن خارج کردن آهن از کمپلکس کلات جایگزین آن شده و باعث رسوب و تأثیر اندک کلات آهن مصرفی شود، همگی در کارایی کلات مصرفی مؤثرند (Wiersma J.V. 2007).

غلظت آهن بخش هوایی

غلظت کافی یا حد کفایت آهن در بافت ذرت، در مرحله ۳۰ تا ۴۵ روز پس از سبز شدن در کل تاج ذرت متغیر و از ۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک گزارش شده است (Fageria, 2009). لذا در شرایط این آزمایش فقط در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک، غلظت آهن در بخش هوایی ذرت کمتر از حد کفایت بود. اثر اصلی نیکل در سطح احتمال پنج درصد و اثر اصلی آهن و اثر متقابل نیکل و آهن در سطح احتمال یک درصد بر غلظت آهن بخش هوایی ذرت معنادار بود (جدول ۳). با مقایسه منابع آهن مشاهده شد که غلظت آهن بخش هوایی، در سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین آهن، نسبت به سطوح ۱۰ و ۲۰ آهن از منبع سولفات آهن به ترتیب ۵/۲۶ و ۳/۹۶ درصد بیشتر است، اما این اختلاف از لحاظ آماری معنادار نشد. علت این موضوع را می‌توان این چنین توضیح داد که حلالیت سولفات آهن در خاک در pH بالاتر از ۵/۵ کاهش می‌یابد، در مقابل Fe-EDDHA می‌تواند حلالیت آهن را در دامنه‌های وسیعی از pH حفظ کند، که منجر به افزایش غلظت آهن می‌شود. ویرسما (Wiersma, 2007) گزارش کرد که در

جدول ۳- تجزیه واریانس تأثیر نیکل و آهن بر غلظت و مقدار جذب آهن در بخش هوایی و ریشه ذرت و فاکتور انتقال آن

Table 3. Analysis of variance effects of Ni and Fe on shoot and root concentration and Fe uptake and Fe translocation factor.

Source of error	df	mean square				
		Shoot Fe concentration	Shoot Fe content	Root Fe concentration	Root Fe content	Translocation factor
(Ni)	3	68.6*	53743.6**	72148.49**	2.8**	0.00013**
(Fe)	4	74.83**	31714.47**	133691.47**	0.5*	0.00025**
(Ni×Fe)	12	127.87**	17722.87**	29546.38*	0.41*	0.00016**
(Error)	38	13.61	5635.76	15212.58	0.19	0.0002
CV	-	6.59	18.74	8.91	27.64	11.45

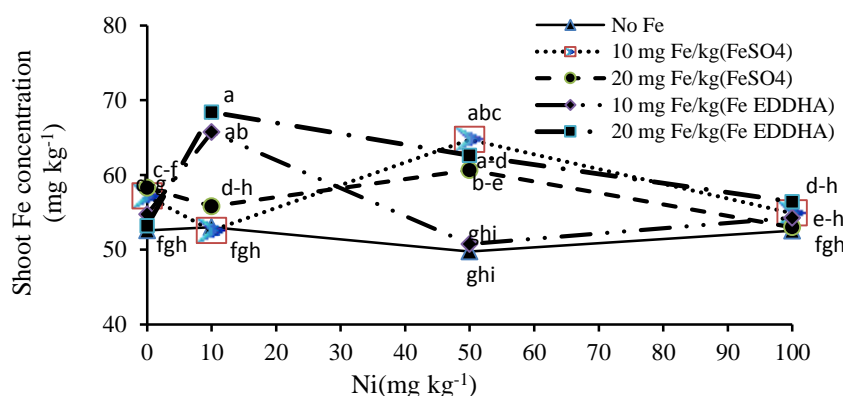
ns, ** and * are non-significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively

میلی گرم نیکل و سطح شاهد آهن و سطح ۱۰ میلی گرم آهن از منبع سکوسترین و همچنین در تیمار سطح ۵۰ میلی گرم نیکل و سطح شاهد آهن مشاهده شد.

غلظت آهن ریشه

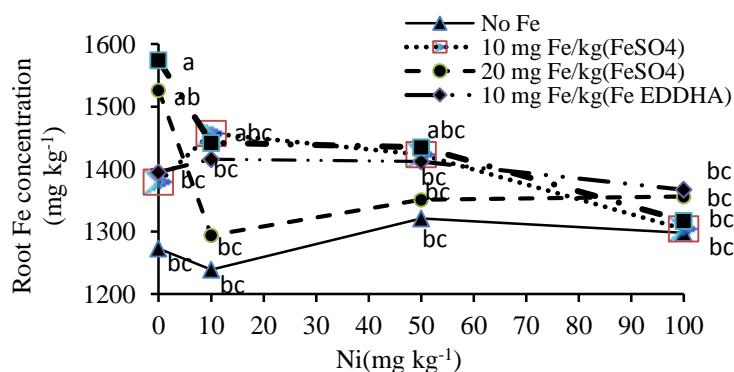
تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی نیکل و آهن در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر غلظت آهن ریشه معنادار بود (جدول ۳). شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش سطوح نیکل، غلظت آهن ریشه در سطح ۲۰ میلی گرم آهن از منبع سکوسترین و ۱۰۰ میلی گرم نیکل ۱۶/۵ درصد معنادار نسبت به سطح شاهد نیکل کاهش یافت. علت این مسئله را می‌توان چنین توضیح داد که نیکل در غلظت‌های زیاد و آلاینده خاک جایگزین آهن موجود در کمپلکس سکوسترین آهن شده و کیلیت پایداری با سکوسترین ایجاد می‌کند، بنابراین مانع جذب آهن شده و در نتیجه باعث کاهش غلظت آهن ریشه می‌شود.

شکل ۶ نشان می‌دهد که با کاربرد ۲۰ میلی گرم آهن از منبع سکوسترین آهن، در حضور ۱۰ و ۵۰ میلی گرم نیکل، غلظت آهن بخش هوایی به ترتیب ۲۸/۵ و ۱۷/۶ درصد نسبت به سطح صفر نیکل افزایش معنادار یافت و در حضور ۱۰۰ میلی گرم نیکل، این افزایش از نظر آماری غیرمعنادار شد. با کاهش ماده خشک بخش هوایی گیاه ذرت در حضور ۵۰ و ۱۰۰ میلی گرم نیکل، این افزایش غلظت را می‌توان با اثر تغلیظ توجیه کرد. همچنین با افزایش سطوح نیکل از صفر به ۱۰ میلی گرم، غلظت آهن بخش هوایی در حضور ۱۰ میلی گرم آهن (سکوسترین آهن) ۲۰ درصد نسبت به سطح شاهد نیکل افزایش معنادار یافت. در شرایط این آزمایش و در سطح شاهد آهن، نیکل نتوانست غلظت آهن بخش‌هوائی را به طور معنادار تغییر دهد، اما با مصرف آهن به ویژه از منبع سکوسترین تأثیر نیکل آشکار شده و از سطح ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم به بعد باعث کاهش غلظت آهن شد. البته لازم به ذکر است که کلروز ناشی از کمبود آهن در تیمارهای سطح ۱۰۰



شکل ۶- مقایسه میانگین‌های غلظت آهن بخش‌هوائی برای اثر متقابل نیکل و آهن

Figure 6. Mean Comparisons of the shoot Fe concentration for Ni × Fe interaction



شکل ۷- مقایسه میانگین‌های غلظت آهن ریشه برای اثر متقابل نیکل و آهن

Figure 7. Mean Comparisons of the root Fe concentration for Ni × Fe interaction

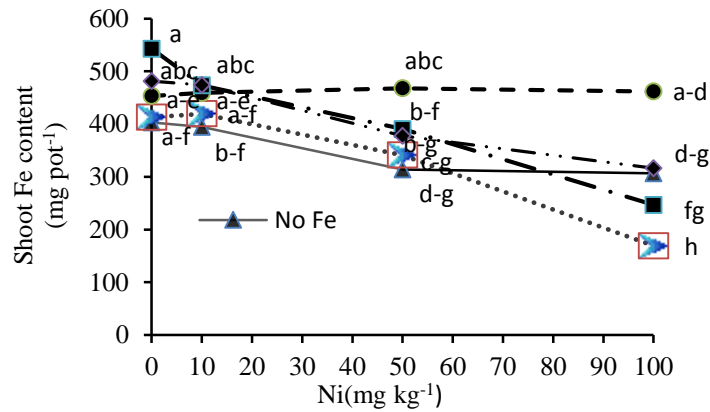
مقدار جذب آهن بخش هوایی

تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی نیکل و آهن و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک درصد تأثیر معناداری بر مقدار جذب آهن بخش هوایی داشتند (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها (شکل ۸) نشان داد که با افزایش سطوح نیکل مصرفی در خاک از صفر به ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مقدار جذب آهن بخش هوایی ذرت کاهش یافت؛ به طوری که در سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک به ترتیب ۲۶/۵ و ۳۳/۱ درصد نسبت به شاهد کاهش معنادار مشاهده شد. با توجه به کاهش ماده خشک تولیدی بر اثر مصرف ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل، این نتیجه قابل انتظار بود و نشان می‌دهد که نیکل از جذب آهن توسط ذرت جلوگیری کرده است. رابطه نیکل با آهن در منابع تا حدودی شناخته شده است و معمولاً کلروز حاصل از زیاده نیکل در محیط رشد گیاهان زراعی به کمبود آهن نسبت داده می‌شود و حتی برخی محققان توصیه به مصرف کودهای آهن در این مواقع نموده‌اند (Mishra & Kar, 1971). همچنین با افزایش سطوح آهن، مقدار جذب آهن بخش هوایی نسبت به شاهد افزایش یافت، اما این افزایش در سطوح ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک از منبع سولفات آهن معنادار نبود که با توجه به واکنش‌های شناخته شده رسوب سولفات آهن در خاک‌های آهکی قابل توجیه است. میشر و کار (Mishra & Kar, 1971) گزارش کردند که کلروز در نسبت نیکل به آهن بیشتر از ۶، شدید و معمولاً در نسبت‌های کمتر از ۱ قابل چشم‌پوشی است. کاهش رشد ریشه و تغییر تمامیت غشای پلاسمایی از طریق پراکسایشی چربی از اثرات سمیت نیکل عنوان شده است (Fageria, 2009). شکل ۸ نشان می‌دهد که مقدار آهن بخش هوایی در سطح ۱۰ میلی‌گرم آهن از منبع سولفات آهن با افزایش سطوح نیکل از ۱۰ به ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم به ترتیب ۱۸/۶۸ و ۵۰/۴ درصد کاهش معنادار داشت. همچنین کاهش ۳۶/۸ درصدی در مقدار جذب آهن بخش هوایی با افزایش سطح نیکل از ۵۰ به ۱۰۰ و در حضور ۲۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین مشاهده شد. چون نیکل به صورت کاتیون دوبار مثبت (Ni^{2+}) جذب می‌

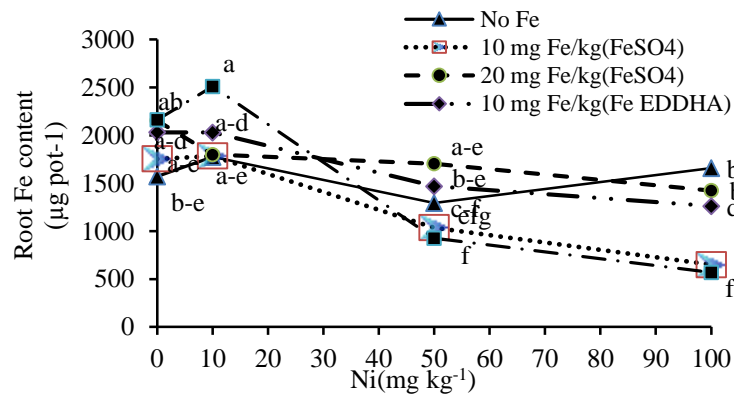
شود لذا با سایر کاتیونها از جمله Fe^{2+} رقابت می‌کند. ممکن است شعاع مشابه یونی دلیل رقابت نیکل با آهن و مس و روی باشد. فاجریا (۲۰۰۹) گزارش کرد که با افزایش غلظت نیکل در محلول غذایی از ۱ تا ۱۰۰ میکرومول جذب آهن کاهش یافت.

مقدار جذب آهن ریشه

در این آزمایش اثر اصلی نیکل در سطح احتمال یک درصد و اثر اصلی آهن و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال پنج درصد بر مقدار جذب آهن ریشه ذرت معنادار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین‌ها (شکل ۹) نشان داد که با افزایش سطوح نیکل، مقدار جذب آهن ریشه از $1/935$ ($mg\ pot^{-1}$) در سطح شاهد نیکل به $1/98$ ($mg\ pot^{-1}$) در سطح ۱۰ میلی‌گرم نیکل، $1/166$ (pot^{-1}) در سطح ۵۰ میلی‌گرم نیکل و به $1/156$ (pot^{-1}) در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک رسید؛ به طوری که مقدار جذب آهن ریشه در سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل به ترتیب ۳۹/۷ و ۴۰/۲ درصد نسبت به شاهد نیکل کاهش معنادار یافت. شکل ۹ نشان می‌دهد که مقدار جذب آهن ریشه با افزایش سطوح نیکل از ۱۰ به ۵۰ میلی‌گرم و در سطح ۲۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین، ۱/۲۲ برابر کاهش معنادار داشت. افزایش ماده خشک ریشه در سطح ۱۰ میلی‌گرم نیکل و کاهش غلظت آهن ریشه در سطوح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل به ترتیب می‌توانند دلیل نتایج مشاهده شده باشند. مقدار آهن ریشه در صورت عدم مصرف آهن ۴۰/۱ درصد نسبت به سطح شاهد نیکل کاهش معنادار داشت. با توجه به شکل ۹ مقدار آهن ریشه در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل و شاهد آهن حدود سه برابر بیشتر از مقدار آهن ریشه در همان تیمار و سطح ۲۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین است که این مفهوم مؤید کمک سکوسترین به جذب بیشتر نیکل توسط ریشه است. شاید این یافته در انتخاب نوع کود آهن در خاک‌های آلوده به نیکل مفید باشد. البته مشابه همین مفهوم در مورد جذب نیکل هم مشاهده شد.



شکل ۸- مقایسه میانگین‌های مقدار آهن بخش هوایی برای اثر متقابل نیکل و آهن
Figure 8. Mean comparisons of the shoot Fe uptake for Ni × Fe interaction

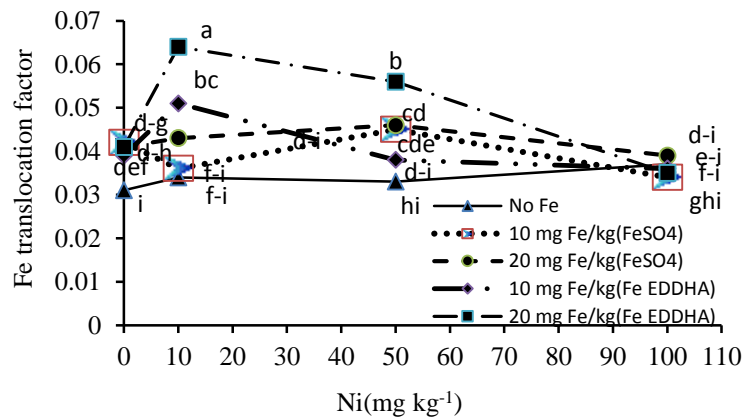


شکل ۹- مقایسه میانگین‌های مقدار آهن ریشه برای اثر متقابل نیکل و آهن
Figure 9. Mean comparisons of the root Fe uptake for Ni × Fe interaction

خاک از صفر به ۱۰ میلی‌گرم، ۳۰/۷۷ درصد افزایش معنادار یافت. توجه به شکل ۱۰ بیشترین فاکتور انتقال آهن به میزان ۰/۰۶۵ در تیمار ۱۰ میلی‌گرم نیکل و ۲۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین آهن و کمترین فاکتور انتقال آهن ریشه به میزان ۰/۰۲۱ در تیمار ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل و شاهد آهن حاصل شد.

فاکتور انتقال آهن

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که با افزایش سطوح نیکل، فاکتور انتقال آهن در سطح ۲۰ میلی‌گرم آهن از منبع سکوسترین آهن نسبت به شاهد ابتدا در سطوح ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل به ترتیب ۵۶ و ۳۶ درصد افزایش و سپس در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل به طور معنادار ۱۴ درصد کاهش یافت. فاکتور انتقال آهن با افزایش سطوح نیکل



شکل ۱۰- مقایسه میانگین‌های فاکتور انتقال آهن برای اثر متقابل نیکل و آهن
Figure 10. Mean comparisons of the Fe translocation factor for Ni × Fe interaction

نتیجه‌گیری کلی

مطابق انتظار حضور نیکل در خاک باعث افزایش غلظت و مقدار جذب نیکل در بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت و کاهش غلظت و مقدار جذب آهن در بخش هوایی و ریشه شد. با افزایش مقدار آهن مصرفی، غلظت و مقدار جذب نیکل در بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت کاهش یافت. همچنین سکوسترین آهن نسبت به سولفات آهن باعث افزایش بیشتر پارامترهای رشد گیاه ذرت شد. اما یافته مهم این تحقیق آن بود که نیکل مصرفی در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، وقتی منبع آهن سکوسترین بود باعث کاهش حدود ۳ برابری جذب آهن شد که این نتیجه می‌تواند در خاک‌های آلوده به نیکل جالب توجه باشد. به این طریق که در این خاک‌ها

مصرف سکوسترین آهن توصیه نمی‌شود و پیشنهاد می‌شود که مصرف حاکی سولفات آهن با برگپاشی سکوسترین آهن مورد مقایسه قرار گیرد. این موضوع یافته جدید این مقاله بوده که ممکن است در تحقیقات گیاه پالایی خاک‌های آلوده به نیکل برای محققان دیگر مفید واقع شود. در نهایت نتایج این آزمایش گلخانه‌ای نشان داد که برهمکنش آهن و نیکل تحت تأثیر منبع آهن قرار می‌گیرد.

سپاسگزاری: بدین وسیله از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه تبریز به دلیل تامین هزینه تحقیق و از کلیه داوران محترم این مقاله به دلیل مطالعه و ارائه نقطه نظرات ارزشمند سپاسگزاریم.

References

- Allison L., and Moodie C. 1965. Carbonates. *In: Black CA. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, pp. 1379-1396.*
- Bollard EG. 1983. Involvement of unusual elements in plant growth and nutrition. *Inorganic plant nutrition Encyclopedia Plant Physiology, New Series Vol. 15M, A. Lauchli and RL Bielecki. (Ed.), pp. 695-744.*
- Cassel D.K., and Nielsen D.R. 1986. Particle-size analysis, *In: Klute J. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. pp. 901-926.*
- Das M., and Maiti S.K. 2007. Metal accumulation in five native plant growing on abandoned CU-tailings ponds. *Applied Ecology and Environmental Research, 5(1): 27-35.*
- Fageria N.K. 2009. The Use of Nutrients in Crop Plants. CRC by Press Taylor & Francis Group, LLC, pp. 241-260.
- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis, *In: Klute. (Ed.), Methods of Soil Analysis-Part 4. Physical Methods, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA. pp. 255-293*
- Gerendas J., and Sattel Macher B. 1997. Significance of Ni supply for growth, urease activity and the concentration of urea, amino acids, and mineral nutrients of urea-grown plants. *Plant and Soil, 190: 153-162.*
- Khalid B.Y., and Tinsley J. 1980. Some effects of nickel toxicity on rye grass. *Plant and Soil, 55: 139-144.*
- Kopitke P.M., Asher C.J., and Menzies N.W. 2007. Toxic effects of Ni⁺² on growth of cowpea (*Vigna unguiculata*), *Plant and Soil, 222: 283-289.*
- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society America, 42: 421-428.*
- Malakooti M.J., Balali M.R., Golchin A., Majidi A., Doroodi M.S., Ziaeiian A.A., lotfollahi M.A., Shahabian M., Basirat M., Manoochehri S., Davodi M.H., Khademi Z., and shahbazi K. 2000. Optimal Fertilizer Recommendation for Horticulture Crops. *Technical Publication, Soil and Water Research Institute, Agriculture Education Publishing. Karaj, Iran, 200p. (In Persian)*
- Mclean E.O. 1982. Soil pH and lime requirement, *In: Page A.L. (Ed.), Methods of Soil Analysis, Part2. Chemical and Microbiological Properties, 2nd edition Agron, Monogr. 9. ASA and Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, USA, pp: 199-224.*

- Mishra D., and Kar M. 1971. Nickel in plant growth and metabolism. *The Botanical Review*, 141: 395-452.
- Mizuno N. 1968. Interaction between iron, nickel, and copper in various plants species. *Nature*, 912: 1271-1272.
- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, and organic matter, *In: A. L. (Eds.), Methods of soil Analysis*, 2nd edition. Agronomy Monogr, 9. *American Society of Agronomy and Soil Science Society of America*, Madison, USA, pp. 539-580
- Rabie M.H., Abdellatif E.A., Asy K.G., Eleiwa M.E. 1992. The effect of nickel on Plants: III. The effect of application of nickel on yield and elemental content of some crops. Jameel King Abdulaziz University Press, 4: 15-21.
- Samar S.M., Samavat S., Tadayon M.S., Rezaee H., Tehrani M.M., Ardakani M.S., Besharati H., and Fallah A.R. 2010. Iron in Plant and Soil. (Ed.), Academic Press, Kraj, Iran, 191p.
- Singh S.A.M., Kayastha R.K., Asthana R.K., and Singh S.P. 2004. Response of garden pea to nickel toxicity. *Plant Nutrition*, 27: 1543-1560.
- Sposito G. 1989. *The Chemistry of Soils*. Eds. Oxford University Press: New York, Oxford. 276 p.
- Waling I., Vark W.V., Houba V.J.G., and Vanderlee J.J. 1989. Soil and Plant Analysis, a series of syllabi- Part 7, Plant Anal Proceeding. Wageningen Agriculture University, the Netherlands. 47p.
- Wiersma J.V. 2007. Iron acquisition of three soybean varieties grown at five seeding densities and five rates of Fe-EDDHA. *Journal of Agronomy*, 99: 1018-1028.
- Yang X. 1996. Nickel effects on influx and transport of mineral nutrients in four plant species. *Plant Nutrition*, 19: 265-279.

Study on the Interaction Effects of Ni and Fe Co-Application on their Uptake by Corn Plant (*Zea mays* L.) in a Calcareous Soil

Adel Reyhanitabar^{1*}, Monire Eydi², Neda Pashapoor²

(Received: December 2016

Accepted: October 2017)

Abstract

Nickel (Ni) has recently added to the list of essential nutrients. Ni is needed for plants in low concentrations but it is toxic at high concentrations. Considering the importance of iron (Fe) and that Fe deficiency is one of the main nutritional problems of the Iranian people's, this study was carried out to investigate the interaction effect of Ni×Fe on concentration and uptake of Ni and Fe by corn plant (*Zea mays* L.). A greenhouse experiment was conducted within the framework of factorial randomized complete block design (RCBD) in a calcareous soil with Ni treatments at four levels (0, 10, 50 and 100 mg Ni kg⁻¹ soil) from NiSO₄ and Fe from FeSO₄ and Fe-EDDHA at five levels (0, 10 and 20 mg Fe kg⁻¹ soil), according to two source on corn plant (single cross 704). After 90 days, plants harvested and Ni and Fe concentration of shoot and root were measured. According to the results, with increasing applied Ni levels, shoot Ni concentration significantly increased at levels 10, 50 and 100 mg Ni Kg⁻¹ soil, respectively, 18.78%, 41.106%, 97.116% compared to the control. With increasing applied Ni levels, root Ni Concentration increased respectively, 1.27, 4.63, 9.18 compared to the control. With increasing levels of applied Ni in the soil, root Fe concentration significantly (P<0.05) decreased at levels 10, 50 and 100 mg Ni Kg⁻¹ soil, respectively, 8.27%, 16.1% and 32.7%. With increasing levels of applied Ni in the soil, Fe concentration of root significantly (P<0.05) decreased at levels 50 and 100 mg Ni Kg⁻¹ soil, respectively, 8.7% and 9.3%. With the increase in Fe levels, translocation factor of nickel significantly increased 44.8 and 48.9 percent at 10 and 20 mg kg⁻¹ soil when FeSO₄ was Fe source and at 10 mg Fe kg⁻¹ from Fe-EDDHA 55.1 percent respectively. According to the results, interaction of Ni and Fe was affected by Fe fertilizer sources.

Keyword: Dual effect, Greenhouse, Iron sulfate, Nickel sulfate, Translocation factor

1- Associate Prof., Department of Soil Science, University of Tabriz.

2- MSc Graduate, Department of Soil Science, University of Tabriz.

* Corresponding Author Email: areyhani@tabrizu.ac.ir