

Effect of Non-stabilized and Carboxymethylcellulose-stabilized Hematite on Growth and Nutrient Uptake of Maize in Ni-contaminated Soils

SOLMAZ BIDAST^{1*}, AHMAD GOLCHIN¹, AHMAD BAYBORDI², ABBASALI ZAMANI³

1. Department of Soil Science Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

2. Soil and Water Research Department, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran.

3. Department of Environmental Science, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

(Received: Jan. 8, 2020- Revised: Jan. 27, 2020- Accepted: Feb. 22, 2020)

ABSTRACT

Nickel toxicity in agricultural crops is one of the most common problems in recent years. However, few studies have been conducted on the effect of iron oxides on the reduction of nickel toxicity in crops. The goals of this research were to investigate the effects of non-stabilized and Na carboxymethylcellulose (Na-CMC)-stabilized hematite on mobility reduction and phytoavailability of nickel and to study their effects on some agronomic traits, concentrations of phosphorus, potassium, iron, zinc and nickel in maize. For this purpose, a factorial experiment was conducted using a completely randomized design with three replications. The experimental factors were types and dosages of adsorbents; two types of adsorbents including non-stabilized (H) and Na-CMC-stabilized hematite (H-CMC) at four levels (0, 0.25, 0.5 and 1%) and different levels of soil total Ni (25, 75, 125, 175 and 325 mg kg⁻¹). The results showed that with increasing total soil nickel concentration, shoot height, shoot and root dry weight and concentrations of potassium, phosphorus, iron and zinc in the shoot of maize were decreased and nickel concentration increased. At the contaminated level of 325 mg/kg nickel, concentrations of potassium, phosphorus, iron and zinc were decreased about 43.56, 47.98, 73.79 and 86.03%, respectively, and shoot height and dry weight were decreased about 36.86 and 42.56% respectively as compared to control treatment. The results also showed that the application of adsorbents in soil increased the concentration of K, P, Fe and Zn and decreased the concentration of nickel in maize. By applying 0.5% H-CMC, the concentration of nickel in the shoot and root of maize decreased by 52.61 and 46.84% respectively, followed by the concentration of potassium, phosphorus, iron and zinc in the shoot increased about 20.55, 18.68, 61.66 and 48.81% respectively, as compared to control treatment.

Keywords: Hematite, Maize, Nickel toxicity, Nutrients.

تأثیر هماتیت خالص و تثبیت‌شده با کربوکسی متیل سلولز بر رشد و جذب عناصر غذایی گیاه ذرت در خاک‌های آلوده به نیکل

سولماز بی‌دست^{۱*}، احمد گلچین^۱، احمد بایبوردی^۲، عباسعلی زمانی^۳

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲. بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، تبریز، ایران.

۳. گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۲/۳)

چکیده

سمی بودن نیکل در محصولات کشاورزی یکی از مشکلات متداول در سال‌های اخیر هست. با این حال مطالعات اندکی در خصوص تأثیر اکسیدهای آهن بر کاهش سمی بودن نیکل در محصولات کشاورزی انجام گرفته است. لذا پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی هماتیت خالص و تثبیت‌شده با سدیم کربوکسی متیل سلولز (Na-CMC) در کاهش تحرک و گیاه‌فراهمی نیکل و تأثیر آن‌ها بر برخی صفات زراعی، غلظت عناصر فسفر، پتاسیم، آهن، روی و نیکل گیاه ذرت انجام شد. بدین‌منظور یک آزمایش فاکتوریل با دو فاکتور نوع و مقدار جاذب (دو نوع جاذب شامل هماتیت خالص (H) و تثبیت‌شده با Na-CMC (H-CMC) هر یک در چهار مقدار (۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد) و فاکتور غلظت‌های مختلف نیکل (۰/۲۵، ۰/۷۵، ۱/۲۵، ۱/۷۵ و ۳/۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار انجام شد. نتایج نشان داد، با افزایش غلظت نیکل کل خاک، متوسط ارتفاع ساقه، وزن خشک بخش هوایی و ریشه و غلظت عناصر پتاسیم، فسفر، آهن و روی بخش هوایی گیاه ذرت کاهش و غلظت نیکل افزایش یافت. در سطح آلوده به ۳/۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم، غلظت پتاسیم، فسفر، آهن و روی بخش هوایی به‌ترتیب حدود ۴۳/۵۶، ۴۷/۹۸، ۷۳/۷۹ و ۸۶/۰۳ درصد و ارتفاع ساقه و وزن خشک بخش هوایی به‌ترتیب حدود ۳۶/۸۶ و ۴۲/۵۶ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد جاذب‌ها در خاک باعث افزایش غلظت عناصر پتاسیم، فسفر، آهن و روی و کاهش غلظت نیکل در گیاه ذرت گردید. با کاربرد ۰/۵ درصد جاذب H-CMC، غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت کشت شده در این تیمار به‌ترتیب ۵۲/۶۱ و ۴۶/۸۴ درصد کاهش و به‌دنبال آن غلظت پتاسیم، فسفر، آهن و روی بخش هوایی به‌ترتیب حدود ۲۰/۵۵، ۱۸/۶۸، ۱۶/۶۶ و ۴۸/۸۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت.

واژه‌های کلیدی: ذرت، سمی بودن نیکل، عناصر غذایی، هماتیت.

مقدمه

آهن، برای تولید بذرهای سالم و جوانه‌زنی بذر نیز مورد نیاز می‌باشد (Ahmad and Ashraf, 2012). آلودگی محیط زیست با نیکل از جمله مسائلی است که در چند دهه گذشته افزایش قابل توجهی داشته است، به‌طوری‌که اثرات سمی بودن این فلز نسبت به کمبود آن در گیاهان بیشتر مشاهده می‌گردد. آلودگی زیست-محیطی نیکل از برخی فعالیت‌های انسانی نظیر احتراق سوخت‌های فسیلی، استخراج معادن، ذوب، متالورژی و صنعت آبکاری، تولید سیمان و فولاد، سوزاندن زباله‌های شهری، صنعت برق و الکترونیک، کاربرد لجن فاضلاب و کودهای آلی و معدنی در زمین‌های کشاورزی و موارد دیگر ناشی می‌شود (Yusuf et al., 2011). تخمین زده می‌شود، غلظت این فلز در خاک‌های آلوده به ۲۶۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم برسد که ۳۰-۲۰ برابر بیشتر از

نیکل به‌عنوان یک فلز سنگین ریزمغذی شناخته شده است که برای رشد و توسعه بهتر گیاهان مورد نیاز می‌باشد (Rehman et al., 2015) و یکی از عناصری است که جدیداً به فهرست عناصر ضروری افزوده شده است و نیاز گیاهان به این فلز نسبت به سایر عناصر ضروری کمتر می‌باشد (کمتر از ۰/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه) (Liu et al., 2011; López and Magnitski, 2011). عنصر نیکل به‌عنوان کوفاکتور در ساختمان برخی آنزیم‌ها از جمله اوره‌آز به‌کار رفته است (Fageria, 2009). متابولیسم این عنصر برای ایجاد شرایط احیایی مناسب و دیگر پاسخ‌های بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و رشد بسیار مهم هست. نیکل علاوه بر شرکت در تثبیت نیتروژن و دخالت در جذب عناصری مثل

آلوده استفاده کرد. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن از جمله موادی هستند که طی سال‌های اخیر به‌عنوان ماده اولیه در جهت تیمار و پاکسازی آب و خاک آلوده به فلزات سنگین به‌کار برده شده‌اند (Lo *et al.*, 2009). مزایای استفاده از اکسیدهای آهن در مقیاس نانو/میکرو ممکن است به‌دلیل تمایل بالای این مواد برای تعامل با فلزات سنگین باشد که دلیل این امر، سطح ویژه بالا و داشتن گروه عاملی در سطح آن‌ها می‌باشد (Hafez and Yousef, 2012). Mansouri and Golchin (2018) تأثیر نانوذرات هماتیت بر غلظت آرسنیک و برخی عناصر غذایی در گیاه ذرت کشت‌شده در یک خاک آلوده به سطوح مختلف آرسنیک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد، آرسنیک در غلظت‌های کمتر از ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم رشد و وزن ریشه و بخش هوایی ذرت را افزایش داد ولی در غلظت‌های بیش از آن، با ایجاد اثرات سمی و برهم زدن تعادل عناصر غذایی، رشد گیاه را کاهش داد. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد، نانوذرات هماتیت در کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب خاک بسیار مؤثر عمل کردند که این امر سبب کاهش غلظت آرسنیک در گیاه و افزایش رشد آن شد.

وقتی ذرات اکسید آهن به‌صورت خالص در خاک به‌کار می‌روند، نیروهای مغناطیسی درون‌ذره‌ای باعث کاهش خاصیت مغناطیسی ذاتی این ذرات می‌گردد که به‌دنبال آن تجمع ذرات صورت گرفته و در نهایت سطح ویژه این ذرات کاهش می‌یابد (Olsson *et al.*, 2010). برای جلوگیری از تجمع ذرات، پلیمرهای طبیعی مانند سلولز به‌دلیل ویژگی‌های سازگار با محیط زیست مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند (Kong, 2017). در این پژوهش برای جلوگیری از تجمع ذرات هماتیت، کربوکسی متیل سلولز به‌کار برده شد که این پلیمر به‌عنوان پوشش‌دهنده و تثبیت‌کننده ذرات اکسید آهن می‌باشد و ظرفیت جذب آلاینده‌ها را بهبود می‌بخشد (Lee *et al.*, 2006). اطلاعات اندکی در مورد تأثیر هماتیت خالص و تثبیت‌شده با CMC^۱ در کاهش سمی بودن نیکل در گیاه ذرت وجود دارد. بنابراین فرض می‌شود که جاذب H و H-CMC با کاهش جذب نیکل و بهبود جذب عناصر غذایی پرنیاز و کم‌نیاز توسط گیاه ذرت باعث کاهش سمی بودن این فلز می‌گردد. بنابراین، مطالعه حاضر به منظور بررسی اثرات H⁻ و H-CMC بر متوسط ارتفاع ساقه، وزن خشک بخش هوایی و ریشه و غلظت عناصر غذایی گیاه ذرت (پتاسیم، فسفر، آهن، روی و نیکل) در یک خاک آلوده به سطوح مختلف نیکل انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور مقایسه‌ی کارایی هماتیت خالص و تثبیت‌شده با CMC

مکان‌های غیرآلوده می‌باشد (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). حداکثر غلظت مجاز نیکل در خاک کشاورزی طبق استانداردهای تعیین شده توسط کمیسیون‌های اقتصادی سازمان ملل متحد برای اروپا (UNECE) ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در آب‌های زیرزمینی ۲۰ میکروگرم بر لیتر است (Gaillardet *et al.*, 2005; Nazir *et al.*, 2015). آلودگی اراضی به فلزات سنگین و از جمله نیکل در چندین مطالعه موردی در ایران گزارش شده است. Mohammad Alizadeh *et al.*, (2018) سطح آلودگی فلزات سنگین کروم، نیکل، مس، سرب و روی را در شهر صنعتی ماهشهر مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که بالاترین مقادیر شاخص آلودگی مربوط به فلزات کروم و نیکل بود که در سطح آلودگی شدید قرار داشتند و غلظت فلزات نیکل و مس در ماهشهر به مراتب بیشتر از مناطق صنعتی در اهواز بود. Mohammadpour *et al.*, (2016) محتوای نیکل ۵۸ نمونه خاک و همچنین محصولات کشاورزی را در استان همدان مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که متوسط غلظت نیکل در خاک‌های مورد مطالعه حدود ۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود و غلظت نیکل در ذرت نسبت به سایر محصولات کشاورزی از حد استاندارد بالاتر بود. گیاهان نیکل را به آسانی جذب نموده و نیکل در گیاه متحرک است. در مورد مکانیسم‌های سمی بودن نیکل در گیاهان، در مقایسه با سایر فلزات سنگین سمی نظیر سرب، کادمیوم، مس و کروم اطلاعات کمتری وجود دارد. دلیل این امر، رفتار دوگانه و شیمی الکترونیکی پیچیده این فلز است که مطالعه نقش بیولوژیکی و سمی بودن آن را دشوار می‌کند (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). شایع‌ترین علامت سمی بودن نیکل در گیاهان مهار رشد، کلروز، نکروز و پژمردگی است (Sharma, 2002). نیکل می‌تواند از طریق مصرف محصولات زراعی که در خاک‌های آلوده به نیکل رشد یافته‌اند، وارد بدن انسان شود (Guo *et al.*, 2010). (Zafar *et al.*, 2015; Khan *et al.*, 2016). گزارش کردند، با افزایش غلظت نیکل در خاک، غلظت این فلز در ساقه‌ها و برگ‌های ذرت به‌صورت خطی و در دانه‌ها به‌صورت غیرخطی افزایش یافت. سمی بودن نیکل باعث کاهش خطی جوانه‌زنی بذر، ارتفاع ریشه و ساقه و زی‌توده در خردل هندی گردید (Ansari *et al.*, 2015). بنابراین برای اطمینان از تولید محصولات غذایی ایمن در خاک‌های آلوده به نیکل، کاهش جذب و سمی بودن این فلز در گیاه ضروری هست. برای کاهش سمی بودن فلزات سنگین در گیاهان می‌توان از استراتژی‌های مختلف مدیریتی از جمله کاربرد جاذب‌های آلی و معدنی در خاک‌های

تعادل نسبی برسند. در این پژوهش هماتیت از شرکت مرک و Na-CMC از شرکت سیگما-آلدریچ خریداری گردید.

تهیه جاذب هماتیت تثبیت شده با Na-CMC

برای تهیه جاذب H-CMC حاوی ۳۰ درصد آهن، ۰/۴۲ گرم Fe_2O_3 با ۴۰ میلی لیتر آب دیونیزه مخلوط و به مدت ۱ ساعت التراسوند گردید تا سوسپانسیون کاملاً همگن هماتیت به دست آید. سپس مقدار ۰/۵۸ گرم Na-CMC به سوسپانسیون فوق اضافه و به منظور دستیابی به محلول کاملاً یکنواخت به مدت ۱۰ دقیقه (۱۰۰ وات) التراسوند گردید. پس از سانتریفیوژ محلول حاوی هماتیت-Na-CMC، محلول رویی دور ریخته شد و پودر باقیمانده در کوره خلاء در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد خشک گردید (Habibi, 2014). خصوصیات ذرات H و H-CMC با استفاده از دستگاه طیف سنج مادون قرمز تبدیل فوریه ۲ تعیین گردید.

پس از گذشت مدت زمان دو ماه، نمونه‌های خاک آلوده به نیکل با جاذب‌های H و H-CMC تیمار شدند و به مدت دو ماه دیگر نیز در رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداری شدند. پس از سپری شدن زمان مورد نیاز برای برهم کنش جاذب‌ها با خاک، مقداری از خاک گلدان‌ها برای اندازه‌گیری غلظت نیکل قابل استخراج با DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) و $MgCl_2$ (Meers *et al.*, 2007) برداشته شد. سپس در خاک باقیمانده درون هر یک از گلدان‌ها ۷ عدد بذر ذرت (رقم ماکسیم) کاشته شد، پس از ظهور گیاهچه‌ها، تعداد بوته در هر گلدان با عملیات تنک، به ۵ عدد کاهش یافت و گیاهان به مدت ۶۰ روز در شرایط گلخانه نگهداری شدند. در طی دوره‌ی رشد، آبیاری گلدان‌ها با آب مقطر و در حد رطوبت ظرفیت مزرعه انجام شد. بدین منظور گلدان‌ها هر روز توزین و تا رسیدن به رطوبت ظرفیت مزرعه آب مقطر به آن‌ها اضافه گردید. پس از پایان زمان مورد نظر، متوسط ارتفاع بوته‌ها با خط‌کش اندازه‌گیری و بخش هوایی از محل طوقه قطع گردید. سپس بخش هوایی (ساقه و برگ) و ریشه گیاهان برداشت گردید و با آب مقطر شستشو داده شد. نمونه‌های گیاهی در داخل پاکت‌های کاغذی به آون تهویه‌دار منتقل شده و به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شدند. نمونه‌های گیاهی پس از آسیاب و الک شدن به وسیله اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه ۳۰ درصد در دمای ۱۲۰ درجه سانتی گراد هضم شدند (Tang and Miller, 1991). غلظت عناصر نیکل، آهن و روی با دستگاه جذب اتمی، غلظت فسفر با دستگاه اسپکتروفوتومتر و غلظت پتاسیم با دستگاه فلیم فوتومتر در

در کاهش تحرک و گیاه فراهمی نیکل در خاک و همچنین تأثیر آن‌ها بر شاخص‌های رشد و غلظت عناصر نیکل، فسفر، پتاسیم، آهن و روی گیاه ذرت کشت شده در خاک آلوده به سطوح مختلف نیکل، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار، به صورت گلدانی و در شرایط گلخانه به اجرا در آمد. فاکتورهای مورد بررسی عبارت بودند از سطوح نیکل خاک شامل ۰، ۲۵، ۷۵، ۱۲۵، ۱۷۵ و ۳۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم خاک و نوع و مقدار جاذب شامل هماتیت خالص و تثبیت شده با CMC که هر یک از جاذب‌ها در چهار سطح ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی (بر مبنای اکسید آهن) به کار رفتند. برای انجام این آزمایش، یک نمونه خاک مرکب از عمق ۲۰-۰ سانتی متری مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان در پاییز سال ۱۳۹۷ تهیه شد. نمونه خاک در هوای آزاد خشک و پس از گذرانده شدن از الک ۲ میلی متری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از قبیل pH در گل اشباع، EC در عصاره گل اشباع، بافت به روش هیدرومتری (Day, 1965)، درصد کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر در مجاورت بی-کرومات پتاسیم و اسید سولفوریک غلیظ (Walkley and Black, 1934)، درصد کربنات کلسیم معادل با روش کلسیمتری (Nelson, 1982)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش تبادل با استات آمونیوم (CEC) (Bower and Hatcher, 1966)، غلظت پتاسیم قابل جذب به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم (Helmke and Olsen, 1996)، غلظت فسفر قابل جذب به روش اولسن (Spark, 1996) (et al., 1954)، غلظت قابل دسترس عناصر سرب، کادمیوم، کروم، مس، آهن، روی به روش عصاره‌گیری با DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) و غلظت کل نیکل با روش هضم توسط اسیدنیتریک ۴ مولار (Sposito *et al.*, 1982) تعیین گردیدند. برای تخمین شکل قابل دسترس فلز نیکل از دو عصاره‌گیر DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) و $MgCl_2$ (Meers *et al.*, 2007) استفاده گردید. برای آلوده‌سازی نمونه‌های خاک مقادیر محاسبه شده از نمک سولفات نیکل ($NiSO_4 \cdot 6H_2O$) در آب مقطر معادل ظرفیت مزرعه حل گردید و به نمونه‌های خاک اسپری و به خوبی یکنواخت شد. خاک طبیعی (شاهد) دارای سطح ۲۵ میلی گرم نیکل بر کیلوگرم بود که به طور مصنوعی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی گرم نیکل به آن اضافه گردید، بدین ترتیب سطوح کل این فلز شامل غلظت‌های ۲۵ (شاهد)، ۷۵، ۱۲۵، ۱۷۵ و ۳۲۵ میلی گرم در کیلوگرم خاک شدند. سپس نمونه‌های آلوده، هواخشک و همگن شدند و در گلدان‌های پلاستیکی ریخته شدند و به مدت دو ماه در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن قرار گرفتند تا به

حدود ۴۳۸، ۴۴۶ و ۵۷۹ مربوط به پیوند Fe-O می‌باشند که حضور هماتیت را نشان می‌دهند (Schwertmann and Cornell, 2008). پیک حدود ۷۹۸ مربوط به پیوند Fe-O-OH و پیک حدود ۲۹۲۳ مربوط به سنتز مرطوب هماتیت هست (Gotic and Music, 2007). دیگر پیک‌های حدود ۳۴۰۵ و ۱۶۲۰ مربوط به پیوند O-H می‌باشند که نشان‌دهنده حضور آب می‌باشد (Srivastava, 2012). در شکل (۱-ب)، پیک‌های حدود ۴۶۹ و ۵۷۹ مربوط به پیوند Fe-O (Schwertmann and Cornell, 2008) و پیک حدود ۷۹۸ مربوط به پیوند Fe-OH می‌باشند که حضور هماتیت را نشان می‌دهند. همچنین پیک‌های حدود ۱۰۳۰ مربوط به پیوند C-O-C، ۱۴۱۴ مربوط به پیوند COO و ۱۵۹۸ مربوط به پیوند C=O می‌باشند که حضور CMC را نشان می‌دهند (El-Sakhawy et al., 2018).

عصاره‌های به‌دست آمده قرائت شد. تحلیل‌های آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد صورت پذیرفت. نمودارها با نرم‌افزار Excel ترسیم گردیدند.

نتایج و بحث

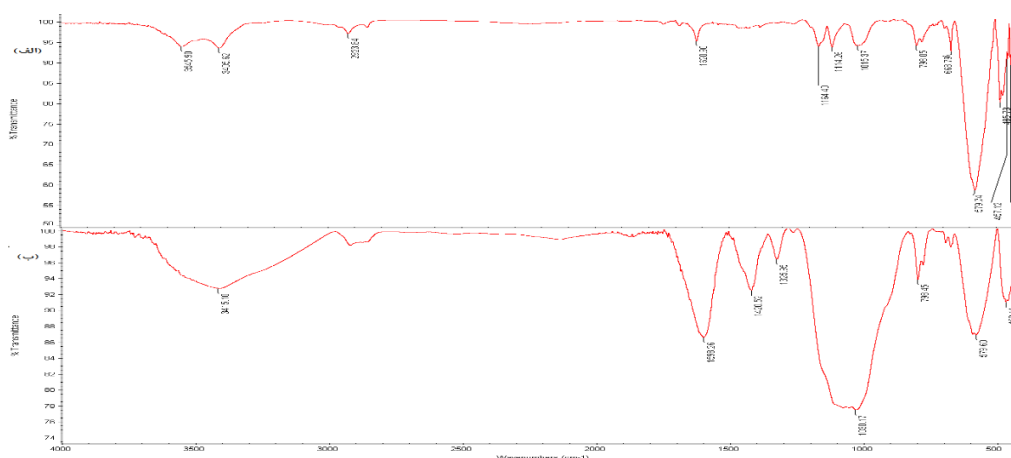
نتایج مربوط به برخی از ویژگی‌های خاک مورد استفاده در آزمایش در جدول (۱) ارائه گردیده است. نتایج حاصل از تجزیه خاک نشان می‌دهد که بافت خاک مورد مطالعه لوم شنی، مقدار کربن آلی آن ۰/۹ درصد و غلظت Ni-DTPA، Ni-MgCl₂ و نیکل کل به ترتیب برابر با ۱/۴، ۷/۶ و ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. خصوصیات اکسید آهن بکار رفته در این تحقیق در جدول (۲) نشان داده شده است. طیف مادون قرمز H و H-CMC در شکل (۱) آورده شده است. با توجه به شکل (۱-الف)، پیک‌های

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مورد استفاده

ویژگی	واحد	مقدار	ویژگی	واحد	مقدار
شن	(/)	۶۵	آهن استخراجی با DTPA	mg kg ⁻¹	۳/۱۸
سیلت	(/)	۲۵	روی استخراجی با DTPA	mg kg ⁻¹	۴/۳۹
رس	(/)	۱۰	سرب استخراجی با DTPA	mg kg ⁻¹	۳/۷۷
کربنات کلسیم معادل	(/)	۲۰/۵۸	مس استخراجی با DTPA	mg kg ⁻¹	۱/۳۳
کربن آلی	(/)	۰/۹	کروم استخراجی با DTPA	mg kg ⁻¹	۱/۴۲
EC عصاره گل اشباع	dSm ⁻¹	۲/۲۵	کادمیم استخراجی با DTPA	mg kg ⁻¹	۰/۲۲
pH	-	۷/۸۶	نیکل استخراجی با DTPA	mg kg ⁻¹	۱/۴
ظرفیت تبادل کاتیونی	Cmol(c ⁺)Kg ⁻¹	۱۳	نیکل استخراجی با MgCl ₂	mg kg ⁻¹	۷/۶
فسفر قابل جذب	mg kg ⁻¹	۱۵/۱۰	نیکل کل	mg kg ⁻¹	۲۵
پتاسیم قابل جذب	mg kg ⁻¹	۲۰۷/۹۲			

جدول ۲- برخی خصوصیات اکسید آهن به‌کار رفته در این آزمایش

نوع ماده	فرمول شیمیایی	اندازه (میکرومتر)	نقطه ذوب (°C)	چگالی (g/cm ³)	وزن مخصوص (g/cm ³)	pH	pH _{ZPC}
هماتیت	α-Fe ₂ O ₃	۲۰-۶۰	۱۵۳۸	۵/۲۴	۵/۵-۱/۲	۳/۷	۶/۷



شکل ۱- طیف مادون قرمز H (الف) و H-CMC (ب)

غلظت Ni-MgCl₂ و Ni-DTPA

نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نیکل کل خاک، غلظت Ni-DTPA و Ni-MgCl₂ به طور معنی دار افزایش یافت، به طوری که با افزایش غلظت نیکل کل خاک از سطح ۲۵ تا ۳۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم، غلظت Ni-DTPA از ۱/۴ به ۳۹/۷۶ و غلظت Ni-MgCl₂ از ۷/۶ به ۱۹/۰۹ میلی گرم بر کیلوگرم در تیمار شاهد (فاقد جاذب) رسید (جدول ۳). همچنین نتایج نشان داد که افزودن جاذب (اکسید آهن) باعث کاهش معنی دار غلظت Ni-DTPA و Ni-MgCl₂ بیشترین غلظت (فاقد جاذب) و کمترین غلظت آن مربوط به تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC بود. هماتیت نیز مانند دیگر ترکیبات اکسید آهن می تواند فلزات سنگین را از طریق فرایند جذب و جانشینی در ساختار خود قرار دهد. در تمامی سطوح نیکل کل خاک، جاذب H-CMC در کاهش غلظت Ni-DTPA و Ni-MgCl₂ مؤثرتر از H بود. در واقع CMC باعث افزایش کارایی هماتیت در جذب نیکل گردیده است، این ماده به عنوان پلیمری مشتق شده از سلولز، حاوی آنیون کربوکسیلات و گروه های عاملی هیدروکسیل است (Yan *et al.*, 2014) که دارای قدرت کمپلکس کنندگی برخی یون های فلزی مانند Cu²⁺، Cd²⁺، Zn²⁺، Ni²⁺، Pb²⁺ می باشد (Petrox *et al.*, 2002). از طرفی CMC با سازوکار تثبیت الکتروستاتیک و تثبیت فضایی ذرات هماتیت می گردد که به دنبال آن سطح تماس ذرات با یون های نیکل و قابلیت جذب آن ها افزایش می یابد. با افزایش مقدار جاذب از صفر به ۰/۲۵ درصد و از ۰/۲۵ تا ۰/۵ درصد وزنی، غلظت Ni-DTPA و Ni-MgCl₂ کاهش و با افزایش مقدار جاذب از ۰/۵ تا ۱ درصد وزنی، غلظت نیکل قابل عصاره گیری افزایش یافت. با توجه به این که جاذب های به کار برده شده در این پژوهش دارای pH اسیدی می باشند، لذا انتظار می رود pH تیمارهای دارای جاذب کمتر از pH تیمار شاهد باشد و با افزایش مقدار مصرف جاذب، کاهش pH مشهودتر باشد. نتایج مربوط به تأثیر مقادیر مختلف جاذب بر pH خاک نشان داد (Bidast *et al.*, 2020)، با افزایش مقدار جاذب، pH خاک کاهش یافت و در تیمار H1 نسبت به تیمار شاهد ۰/۵۷ واحد کمتر بود. نتایج پژوهش های مربوط به Sabouri *et al.*, (2014) و Shafaei *et al.*, (2012) نیز نشان دادند که کاربرد هماتیت باعث کاهش pH خاک گردید. بنابراین می توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش مقدار مصرف جاذب، مقدار pH

خاک بیشتر کاهش یافته و اسیدی شدن موضعی خاک در تیمار دارای یک درصد جاذب، باعث افزایش تحرک نیکل در خاک گردیده است و مقدار نیکل قابل عصاره گیری افزایش یافته است (Bidast *et al.*, 2020).

جدول ۳- مقایسه میانگین های اثر متقابل نوع و مقدار جاذب و غلظت های

نیکل کل خاک بر غلظت نیکل قابل استخراج با DTPA و MgCl ₂		سطوح نیکل	نوع و مقدار جاذب
DTPA	MgCl ₂		
۱/۴ ^t	۷/۶ ^{nopqrs}	۲۵	Blank
۱۰/۸۵ ^o	۸/۶۴ ^{klmn}	۷۵	
۲۴/۴ ^j	۱۰/۵۷ ^{gh}	۱۲۵	
۳۱/۸۱ ^f	۱۷/۲ ^b	۱۷۵	
۳۹/۷۶ ^a	۱۹/۰۹ ^a	۳۲۵	
۱/۱ ^{tu}	۷/۴۹ ^{pqrs}	۲۵	H 0.25
۹ ^p	۸/۴۳ ^{lmnopq}	۷۵	
۱۸/۶۱ ^m	۹/۷۵ ^{hij}	۱۲۵	
۲۹/۶ ^h	۱۶/۰۲ ^{cd}	۱۷۵	
۳۷/۰۷ ^b	۱۸/۵۷ ^a	۳۲۵	
۱/۰۹ ^{tu}	۷/۴۴ ^{qrs}	۲۵	H 0.5
۸/۶۵ ^p	۸/۰۸ ^{mnpqrs}	۷۵	
۱۸/۵۹ ^m	۹/۶۷ ^{hijk}	۱۲۵	
۲۹/۵۸ ^h	۱۵/۱۲ ^d	۱۷۵	
۳۵/۲۶ ^c	۱۷/۵۱ ^b	۳۲۵	
۱/۱۱ ^{tu}	۷/۵ ^{pqrs}	۲۵	H 1
۹/۰۳ ^p	۸/۵۴ ^{lmnop}	۷۵	
۲۰/۲ ^l	۱۰/۳۳ ^{ghi}	۱۲۵	
۳۰/۲۷ ^g	۱۶/۸۶ ^{bc}	۱۷۵	
۳۷/۱۹ ^b	۱۸/۹۴ ^a	۳۲۵	
۰/۹۵ ^u	۶/۸۸ ^s	۲۵	H-CMC 0.25
۶/۹۱ ^r	۸ ^{nopqr}	۷۵	
۱۷/۴۱ ⁿ	۹/۳۸ ^{ijkl}	۱۲۵	
۲۴/۲۴ ^j	۱۱/۴۵ ^f	۱۷۵	
۳۳/۰۳ ^e	۱۷/۳۳ ^b	۳۲۵	
۰/۸۹ ^u	۶/۸ ^s	۲۵	H-CMC 0.5
۶/۲۶ ^s	۷/۵۷ ^{pqrs}	۷۵	
۱۷/۳ ⁿ	۹/۱۱ ^{klm}	۱۲۵	
۲۰/۷۶ ^k	۱۱/۲۸ ^{fg}	۱۷۵	
۲۴/۲ ^j	۱۷/۲۸ ^b	۳۲۵	
۰/۹۸ ^{tu}	۷/۲۳ ^{rs}	۲۵	H-CMC 1
۷/۴۱ ^q	۸/۰۵ ^{mnpqrs}	۷۵	
۱۸/۴۴ ^m	۹/۴ ^{ijkl}	۱۲۵	
۲۴/۹۱ ⁱ	۱۳/۴۵ ^e	۱۷۵	
۳۴/۴۶ ^d	۱۷/۳۳ ^b	۳۲۵	

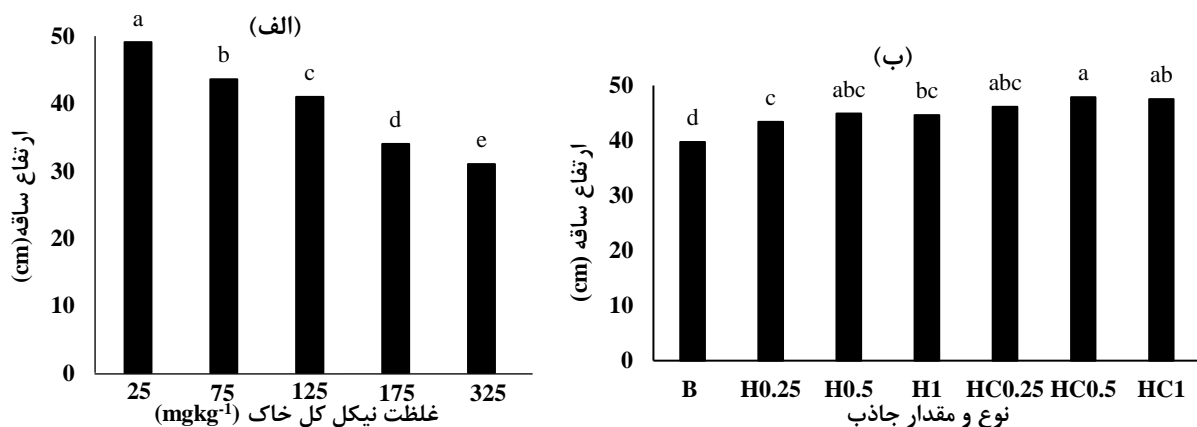
میانگین های دارای حروف لاتین مشترک با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد تفاوت معنادار ندارند. ستون ها به صورت مجزا مقایسه گردیدند و غلظت نیکل قابل استخراج با دو عصاره گیر با هم مقایسه نشدند.

ارتفاع ساقه

کاهش یافت. در مطالعه‌ای دیگر که توسط Reyhanitabar *et al.*, (2018) انجام شد، با افزایش غلظت نیکل کل خاک تا سطح ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ارتفاع ساقه گیاه ذرت تغییر معنی‌داری نکرد، ولی در سطح ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. سمی بودن نیکل باعث کاهش ارتفاع و عملکرد در برنج شد (Nazir *et al.*, 2015).

افزودن جاذب باعث افزایش معنی‌داری متوسط ارتفاع ساقه گیاه ذرت شد (شکل ۲-ب). هر دو نوع جاذب در همه مقادیر به‌کار برده شده باعث افزایش متوسط ارتفاع ساقه در مقایسه با تیمار شاهد (فاقد جاذب) گردید. بیش‌ترین متوسط ارتفاع ساقه مربوط به گیاهان کشت شده در تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC و کم‌ترین مربوط به تیمار شاهد بود، به‌طوری‌که تفاوت این دو تیمار حدود ۲۰/۴۳ درصد بود. همچنین بین تیمارهای دارای H و H-CMC نیز از لحاظ متوسط ارتفاع ساقه تفاوت وجود داشت، البته این تفاوت از لحاظ آماری معنی‌داری نبود. مقدار افزایش متوسط ارتفاع ساقه گیاهان کشت شده در تیمارهای دارای ۰/۵ درصد H خالص و H تثبیت‌شده با CMC به‌ترتیب برابر با ۱۳/۰۳ و ۲۰/۴۳ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. با افزایش مقدار جاذب از ۰/۲۵ به ۰/۵ درصد متوسط ارتفاع ساقه افزایش و با افزایش از ۰/۵ به ۱ درصد ارتفاع کاهش یافت. میزان افزایش متوسط ارتفاع ساقه با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به‌ترتیب برابر با ۹/۲، ۱۳/۰۳ و ۱۲/۲۷ درصد و جاذب H-CMC به‌ترتیب برابر با ۱۶/۰۵، ۲۰/۴۳ و ۱۹/۵۷ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. (Mansouri and Golchin (2018) نیز بیان کردند، کاربرد نانوذرات هماتیت سبب افزایش معنی‌داری متوسط ارتفاع بوته گیاه ذرت کشت شده در خاک‌های آلوده به سطوح مختلف آرسنیک گردید و با افزایش سطح کاربرد نانوذرات، میزان افزایش ارتفاع ساقه، افزایش یافت.

اثر سطوح نیکل کل خاک بر متوسط ارتفاع ساقه گیاه ذرت در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). متوسط ارتفاع ساقه گیاهان کشت شده در تیمارهای دارای سطوح نیکل کل ۷۵، ۱۲۵، ۱۷۵ و ۳۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم نسبت به تیمار شاهد (سطح دارای ۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک) کاهش معنی‌داری داشت (شکل ۲-الف). مخصوصاً با افزایش غلظت نیکل کل خاک از سطح ۱۲۵ تا ۱۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، متوسط ارتفاع ساقه با شدت بیشتری کاهش یافت، به‌طوری‌که از ۴۱ به ۳۴ سانتی‌متر رسید. بیش‌ترین متوسط ارتفاع ساقه مربوط به گیاهان کشت شده در تیمار دارای ۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین مربوط به تیمار دارای بالاترین سطح نیکل کل (۳۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود. متوسط ارتفاع ساقه گیاهان کشت شده در خاک آلوده به سطح ۳۲۵ میلی‌گرم نیکل نسبت به گیاهان کشت شده در تیمار شاهد حدود ۳۶/۸ درصد کاهش یافت. در گیاهان، سمی بودن فلزات سنگین فرایندهای مختلف فیزیولوژیکی از جمله رابطه آب و فعالیت فتوسنتز (*Dimkpa et al.*, 2008)، متابولیسم نیتروژن و جذب عناصر غذایی (*Matraszek et al.*, 2016) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سطح بیوشیمیایی، سمی بودن فلزات تأثیر منفی بر عملکرد غشاها دارند و فعالیت‌های آنزیم‌ها را مهار می‌کنند (*Yusuf et al.*, 2010). همچنین شواهدی وجود دارد که سمی بودن فلزات در گیاهان با افزایش تنش اکسیداتیو همراه است (*Chen et al.*, 2009). همه این فرایندهای فیزیولوژیکی تغییر یافته، در نهایت باعث کاهش رشد و عملکرد در گیاهان می‌گردند. در مطالعه‌ای که توسط Rathor *et al.*, (2014) انجام شد، با افزایش غلظت نیکل کل خاک تا سطح ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ارتفاع ساقه گیاه ذرت ۳۰ درصد کاهش و تا سطح ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۴۲/۵ درصد



شکل ۲- تأثیر سطوح نیکل کل خاک بر ارتفاع ساقه گیاه ذرت (الف)، تأثیر نوع و مقدار جاذب بر ارتفاع ساقه گیاه ذرت (ب).

B: تیمار شاهد (فاقد جاذب)، H0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد هماتیت، H0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد هماتیت، H1: تیمار دارای ۱ درصد هماتیت

HC0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد H-CMC، HC0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC، HC1: تیمار دارای ۱ درصد H-CMC

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر نوع و مقادیر مختلف جاذب و غلظت‌های کل نیکل و اثر متقابل آن‌ها بر برخی صفات زراعی و غلظت‌های پتاسیم، فسفر، آهن، روی و نیکل بخش هوایی و ریشه ذرت.

میانگین مربعات							
منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع گیاه	وزن خشک بخش هوایی	وزن خشک ریشه	غلظت پتاسیم بخش هوایی	غلظت پتاسیم ریشه	غلظت فسفر بخش هوایی
نوع و مقدار جاذب	۶	۱۱۵/۲***	۲/۴۹***	۰/۵۷***	۱/۳۹***	۱/۴۷***	۰/۰۴***
غلظت کل	۴	۳۳۳/۴***	۵/۹۸***	۱/۵۸***	۳/۰۵***	۲۷/۷۱***	۰/۰۱***
نوع و مقدار جاذب × غلظت کل	۲۴	۱۴/۳***	۰/۵۱***	۰/۱۴***	۰/۳۸***	۰/۴۹***	۰/۰۰۰۳***
خطای آزمایش	۷۰	۰/۴	۰/۰۳۹	۰/۰۱۸	۰/۰۵۱	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۲
ضریب تغییرات		۱/۳۷	۴/۳۳	۶/۵	۶/۰۳۱	۳/۹۹	۴/۴
میانگین مربعات							
منابع تغییر	درجه آزادی	غلظت آهن بخش هوایی	غلظت آهن ریشه	غلظت روی بخش هوایی	غلظت روی ریشه	غلظت نیکل بخش هوایی	غلظت نیکل ریشه
نوع و مقدار جاذب	۶	۳۸۱۵***	۴۲۳۹۹۷***	۳۲۵/۸***	۲۲۷۳***	۶۳۳/۹***	۲۸۲۴۵***
غلظت کل	۴	۸۹۲۷***	۱۰۸۱۹۱۴***	۲۱۵۴/۳***	۲۵۱۹۵***	۱۶۱۱/۶***	۳۷۸۸۵۱***
نوع و مقدار جاذب × غلظت کل	۲۴	۱۱۴۱***	۱۷۱۰۰۲***	۱۰۸/۱***	۲۰۱۱***	۹/۸***	۷۸۵***
خطای آزمایش	۷۰	۱	۳۵	۰/۳	۳	۰/۳	۳
ضریب تغییرات		۱/۰۱۸	۰/۶۰۵	۱/۳۱	۱/۳۸	۲/۳۲	۰/۸۲

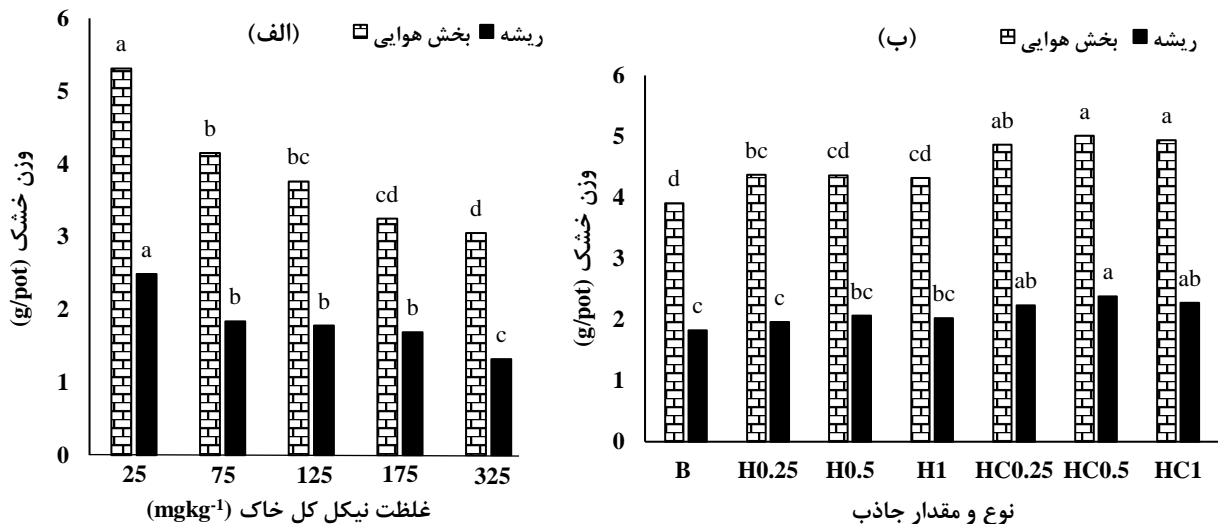
***: معنی دار در سطح ۰/۰۰۱

وزن خشک بخش هوایی و ریشه ذرت

اثر سطوح نیکل کل خاک بر وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی دار بود (جدول ۴). با افزایش غلظت نیکل کل خاک، وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت کاهش یافت؛ به طوری که در سطوح نیکل کل خاک بالاتر از ۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم خاک وزن خشک بخش هوایی و ریشه به طور معنی داری نسبت به شاهد کاهش یافت (شکل ۳- الف). بیشترین وزن خشک بخش هوایی و ریشه مربوط به تیمار شاهد و کمترین مقادیر آنها مربوط به تیمار دارای سطح آلودگی ۳۲۵ میلی گرم نیکل بر کیلوگرم بود. با افزایش سطح نیکل از ۲۵ تا ۳۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم، وزن خشک بخش هوایی و ریشه به ترتیب ۴۲/۵۶ و ۴۶/۹۸ درصد کاهش یافت. کاهش رشد ریشه نسبت به کاهش رشد بخش هوایی بیشتر بود که نشان دهنده آنست که رشد ریشه، تحت تنش نیکل بیشتر از رشد اندام هوایی کاهش می یابد. در گیاهانی که نیکل بیشتر در ریشه ها تجمع می یابد، رشد ریشه نسبت به بخش هوایی بیشتر کاهش می یابد (Seregin et al., 2003). تکنیک‌های مرئی سازی ساختارهای بیولوژیک از طریق رنگ آمیزی^۱ نشان داد که حداقل دو مکان مهم برای تجمع نیکل در گیاه ذرت وجود دارد، نوک ریشه و کلروپلاست سلول‌های غلاف آوندی برگ‌ها (L'Huillier et al., 1996). سمی بودن

نیکل و دیگر فلزات سنگین در درجه اول با کاهش رشد بخش هوایی و ریشه گیاهان ظاهر می گردد (Nagajyoti et al., 2010). غلظت‌های بالای نیکل می تواند از تقسیم سلولی در مریستم‌های ریشه ممانعت به عمل آورده (Robertson and Meakin, 1980) و رشد گیاه را کاهش دهد (Foy et al., 1978). نیکل احتمالاً با تأثیر مستقیم بر مریستم ریشه و بدنبال آن کاهش تقسیم میتوزی^۲، رشد گیاه ذرت را کاهش می دهد (L'Huillier et al., 1996). گزارش شده است که Ni به طور قابل توجهی تعداد ریشه های جانبی در گیاه ذرت و برنج را کاهش داده است (Seregin et al., 1997; Samanatory et al., 2003; et al.), زیرا نیکل می تواند از مانع اندودرمی عبور کرده و در سلول‌های دایره محیطیه تجمع کند (Srekanth et al., 2012). کاهش زیست توده گیاهان تحت تنش غلظت بالای نیکل، می تواند به دلیل کاهش عرضه عناصر غذایی مورد نیاز گیاه و یا به دلیل ایجاد تنش اکسیداسیونی در گیاه باشد (Chen et al., 2009). یکی دیگر از دلایل کاهش زیست توده، احتمالاً ناشی از تغییرات فرایندهای متابولیکی ایجاد شده توسط نیکل (Tripathi, 1973) و کاهش محتوای آب گیاه می باشد (Vijayarengan and Dhanavel, 2005). ذرت (Zea mays L.) بعد از گندم و برنج سومین محصول زراعی دنیا از نظر سطح زیر کشت و دومین محصول بعد از گندم از نظر میزان تولید

بخش هوایی و ریشه تفاوت معنی‌دار وجود داشت. تفاوت دو تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC و H در افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه به ترتیب ۱۶/۵۴ و ۱۷/۲۱ درصد بود. با افزایش مقدار جاذب از ۰/۲۵ به ۰/۵ درصد، وزن خشک بخش هوایی افزایش و با افزایش از ۰/۵ به ۱ درصد، کاهش یافت. میزان افزایش وزن خشک بخش هوایی با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به ترتیب برابر با ۱۱/۹۸، ۱۱/۷۸ و ۱۰/۶۵ درصد و جاذب H-CMC به ترتیب برابر با ۲۴/۵۹، ۲۸/۳۲ و ۲۶/۵۳ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. همچنین میزان افزایش وزن خشک ریشه با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به ترتیب برابر با ۷/۴۵، ۱۳/۲۶ و ۱۰/۸۵ درصد و جاذب H-CMC به ترتیب برابر با ۲۲/۵۸، ۳۰/۴۸ و ۲۴/۶۷ درصد نسبت به تیمار شاهد بود.



شکل ۳- تأثیر سطوح نیکل کل خاک بر وزن خشک بخش هوایی و ریشه ذرت (الف)، تأثیر نوع و مقدار جاذب بر وزن خشک بخش هوایی و ریشه ذرت (ب) B: تیمار شاهد (فاقد جاذب)، H0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد هماتیت، H0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد هماتیت، H1: تیمار دارای ۱ درصد هماتیت HC0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد H-CMC، HC0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC، HC1: تیمار دارای ۱ درصد H-CMC

حضور نیکل افزایش یافته است، به طوری که با افزایش غلظت نیکل کل خاک تا سطح ۳۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، غلظت پتاسیم ریشه به بیشترین مقدار خود رسیده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که تنش ناشی از فلزات سنگین باعث پراکسیداسیون چربی‌های غشای پلاسمایی شده، در نتیجه نفوذپذیری غشا تغییر می‌کند. از آنجا که جذب عناصر غذایی تحت تأثیر ویژگی‌های انتخابی غشای پلاسمایی قرار می‌گیرد، با آسیب رسیدن به غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه در اثر حضور فلزات سنگین و تغییر نفوذپذیری آن، جذب پتاسیم و فسفر تسهیل می‌گردد (Jiang et al., 2004). افزایش نفوذپذیری غشای پلاسمایی با افزایش نشت یون پتاسیم از سلول‌ها ایجاد می‌گردد. در بررسی پاسخ‌های فیزیولوژیک گیاه ذرت به تنش فلزات سنگین مس و نیکل

است (Reyhanitabar et al., 2018). در مطالعات متعددی گزارش شده است که سمی بودن نیکل میزان رشد و عملکرد ذرت را کاهش داده است (Ahmad and Ashraf, 2012; Sreekanth et al., 2013).

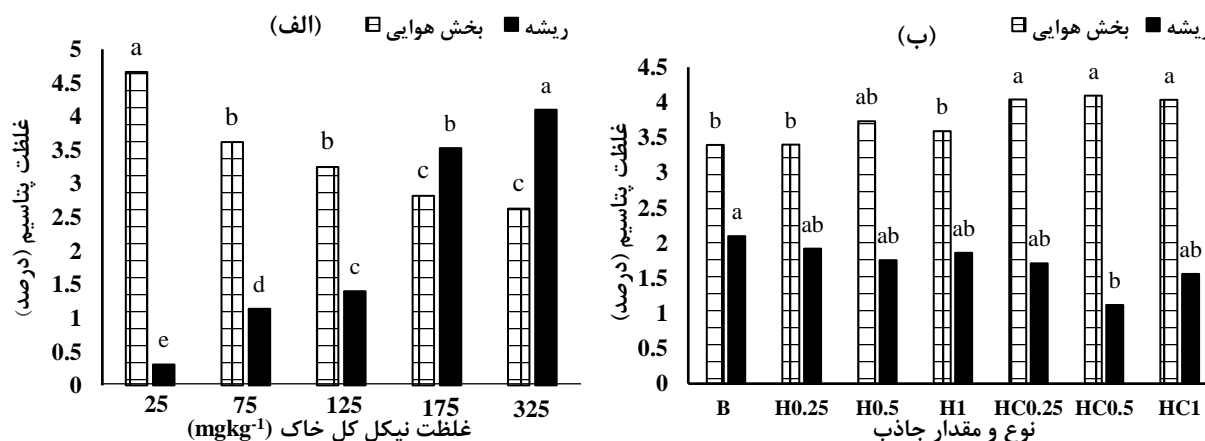
هر دو نوع جاذب مورد استفاده در این تحقیق، در همه مقادیر به کار رفته باعث افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه گردید (شکل ۳-ب). کم‌ترین وزن خشک بخش هوایی و ریشه مربوط به تیمار شاهد و بیشترین مقادیر آن‌ها مربوط به تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC بود. میزان افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه در تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC به ترتیب ۲۸/۳۲ و ۳۰/۴۸ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. همچنین بین تیمارهای دارای H و H-CMC نیز از لحاظ مقدار وزن خشک

غلظت پتاسیم

اثر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت پتاسیم بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش غلظت نیکل کل خاک، غلظت پتاسیم ریشه به طور معنی‌دار افزایش و غلظت پتاسیم بخش هوایی کاهش یافت (شکل ۴-الف). بیشترین غلظت پتاسیم بخش هوایی مربوط به تیمار شاهد و کمترین غلظت مربوط به تیمار دارای سطح آلودگی ۳۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم بود، برای ریشه کاملاً عکس این مسئله صادق بود. با افزایش سطح نیکل از ۲۵ تا ۳۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، غلظت پتاسیم بخش هوایی حدود ۴۳/۵ درصد کاهش و غلظت پتاسیم ریشه از ۰/۳۱۲ به ۴/۱ درصد افزایش یافت. با توجه به نتایج به دست آمده، جذب یون پتاسیم توسط ریشه در

ولی با کاربرد جاذب، غلظت پتاسیم ریشه نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت، البته این کاهش از لحاظ آماری معنی‌دار نبود. کم-ترین غلظت پتاسیم ریشه در تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC و بیش‌ترین غلظت در تیمار شاهد مشاهده گردید. میزان افزایش غلظت پتاسیم بخش هوایی و کاهش پتاسیم دارای ۰/۵ درصد H-CMC به ترتیب حدود ۲۰/۵۵ و ۴۶/۶۸ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. بین تیمارهای دارای H و H-CMC نیز از لحاظ غلظت پتاسیم بخش هوایی تفاوت معنی‌دار وجود داشت، کاربرد جاذب H-CMC در همه مقادیر غلظت پتاسیم بخش هوایی و ریشه را نسبت به جاذب H بیشتر افزایش و کاهش داد. با افزایش مقدار جاذب از ۰/۲۵ به ۰/۵ درصد، غلظت پتاسیم بخش هوایی افزایش و با افزایش از ۰/۵ به ۱ درصد، کاهش یافت، برای ریشه کاملاً عکس این مسئله صادق بود. میزان افزایش غلظت پتاسیم بخش هوایی با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به ترتیب برابر با ۰/۱۱، ۹/۸۳ و ۵/۷۱ درصد و جاذب H-CMC به ترتیب برابر با ۱۸/۹۶، ۲۰/۵۵ و ۱۸/۸۴ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. میزان کاهش غلظت پتاسیم ریشه با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به ترتیب برابر با ۸/۵۳، ۱۶/۱۸ و ۱۱/۲ درصد و جاذب H-CMC به ترتیب برابر با ۱۸/۳۴ و ۴۶/۶۸ و ۲۵/۵۵ درصد نسبت به تیمار شاهد بود.

مشخص گردید که نشت یون پتاسیم و قندهای محلول به‌طور چشمگیری از سلول‌ها افزایش یافت. همچنین غلظت مالون دی‌آلدئید، به‌عنوان شاخص پراکسیداسیون چربی‌ها نیز در ریشه به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت (Poorakbar and Ebrahimzade, 2012). بنابراین غلظت بالای پتاسیم و فسفر در ریشه گیاه ذرت در این آزمایش را نیز می‌توان به افزایش نفوذپذیری غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه در اثر تنش ناشی از فلز سنگین نیکل نسبت داد. ولی با افزایش غلظت نیکل کل خاک، محتوای پتاسیم بخش هوایی کاهش یافت و در بالاترین سطح نیکل کل، به کم‌ترین مقدار خود رسید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً نیکل باعث کاهش انتقال پتاسیم از ریشه به بخش هوایی گردیده است. سمی بودن نیکل، ارتفاع گیاه، عملکرد و غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم در گیاه برنج را کاهش داد (Nazir et al., 2015). کاهش غلظت پتاسیم در گیاهان تحت تنش نیکل در چندین تحقیق دیگر نیز گزارش شده است (Matraszek et al., 2016; Lin and Kao, 2006; Maheshwari and Dubey, 2007). جاذب‌ها در همه مقادیر به‌کار برده شده باعث افزایش غلظت پتاسیم بخش هوایی گردید، به‌طوری که بیش‌ترین افزایش معنی‌دار غلظت پتاسیم بخش هوایی نسبت به تیمار شاهد، در تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC مشاهده گردید (شکل ۴-ب).



شکل ۴- تأثیر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت پتاسیم بخش هوایی و ریشه ذرت (الف)، تأثیر نوع و مقدار جاذب بر غلظت پتاسیم بخش هوایی و ریشه ذرت (ب)
 B: تیمار شاهد (فاقد جاذب)، H0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد هماتیت، H0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد هماتیت، H1: تیمار دارای ۱ درصد هماتیت
 HC0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد H-CMC، HC0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC، HC1: تیمار دارای ۱ درصد H-CMC

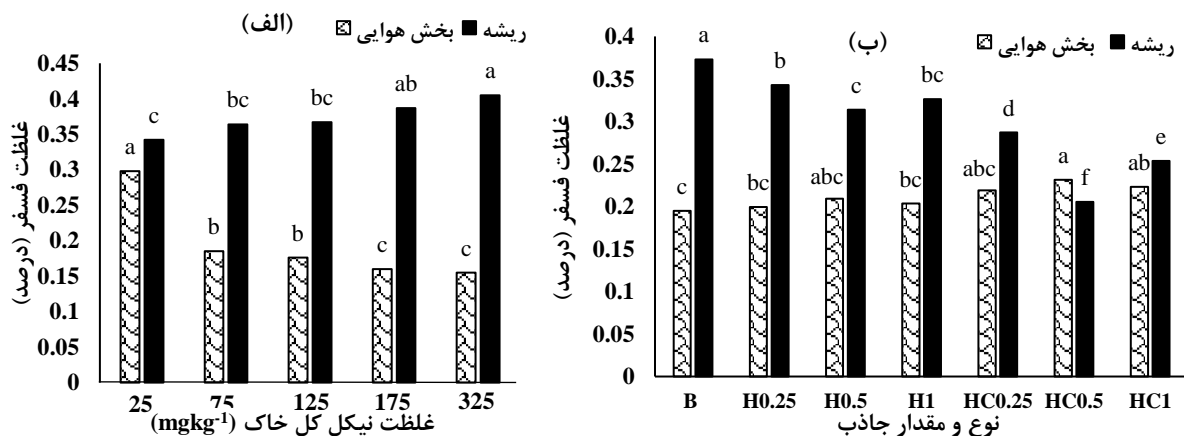
شاهد و تیمار آلوده به سطح ۳۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک بود، برای ریشه کاملاً عکس این مسئله صادق بود. نیکل با تغییر میزان استرول و فسفولیپید و همچنین ساختار و فعالیت ATPase بر ترکیب و نفوذپذیری غشای سلولی تأثیر می‌گذارد (Sreekanth et al., 2013). بنابراین می‌توان گفت، احتمالاً نیکل موجب آسیب دیدن غشای پلاسمایی سلول‌های ریشه گردیده و باعث

غلظت فسفر

اثر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش غلظت نیکل کل خاک، غلظت فسفر بخش هوایی کاهش و فسفر ریشه به‌طور معنی‌دار افزایش یافت (شکل ۵-الف). بیش-ترین و کم‌ترین غلظت فسفر بخش هوایی به ترتیب مربوط به تیمار

فسفر ریشه را به‌طور معنی‌دار کاهش داد (شکل ۵-ب). جاذب‌ها با جذب نیکل و کاهش غلظت قابل دسترس آن در خاک از استرس آن بر سلول‌های ریشه کاسته و با حفظ پایداری غشای پلاسمایی باعث بهبود جذب و انتقال بهتر عناصر غذایی به اندام-های هوایی گیاه می‌شوند و بدین ترتیب با انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی، تجمع فسفر در ریشه گیاه ذرت کاهش و غلظت این عنصر در بخش هوایی افزایش می‌یابد. بیش‌ترین غلظت فسفر بخش هوایی مربوط به تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC و کم‌ترین مربوط به تیمار شاهد بود، تفاوت این دو تیمار حدود ۱۸/۶۸ درصد بود. کم‌ترین غلظت فسفر ریشه مربوط به تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC و بیش‌ترین مربوط به تیمار شاهد بود، تفاوت این دو تیمار حدود ۴۴/۹۳ درصد بود. بین تیمارهای دارای H- و H-CMC نیز از لحاظ غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه تفاوت وجود داشت، البته این تفاوت برای غلظت فسفر بخش هوایی غیر معنی‌دار بود. غلظت فسفر بخش هوایی در تیمار H-CMC در همه مقادیر نسبت به تیمار H بیشتر بود، ولی عکس این نتیجه برای غلظت فسفر ریشه بدست آمد. با افزایش مقدار جاذب از ۰/۲۵ به ۰/۵ درصد، غلظت فسفر بخش هوایی افزایش و با افزایش از ۰/۵ به ۱ درصد، کاهش یافت، برای ریشه کاملاً عکس این مسئله صادق بود. میزان افزایش غلظت فسفر بخش هوایی با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به ترتیب برابر با ۲/۲۵، ۷/۲۸ و ۴/۴۱ درصد و جاذب H-CMC به ترتیب برابر با ۱۲/۴۲، ۱۸/۶۸ و ۱۴/۴۷ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. میزان کاهش غلظت فسفر ریشه با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H بترتیب برابر با ۸/۱۵، ۱۵/۹۲ و ۱۲/۵۴ درصد و جاذب H-CMC بترتیب برابر با ۲۳/۰۵، ۴۴/۹۳ و ۳۲/۰۶ درصد نسبت به تیمار شاهد بود.

می‌شود میزان نفوذپذیری آن تغییر یابد، در نتیجه جذب پتاسیم و فسفر توسط ریشه تسهیل می‌شود (Jiang et al., 2004). همچنین می‌توان گفت، احتمالاً غلظت بالای نیکل در ریشه‌های گیاه ذرت با تشکیل رسوب فسفات نیکل مانع انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی گردیده است (Mathan and Amberger, 1975). کاهش محتوای عناصر پرنیاز در گیاه گندم تحت تنش نیکل ممکن است به دلیل کاهش انرژی در اثر اختلال در تنفس باشد که در نتیجه آن جذب عناصر و انتقال آنها در گیاه کاهش می‌یابد (Matraszek et al., 2016). تفاوت غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه در تیمار دارای بالاترین سطح آلودگی به نیکل به ترتیب ۴۷/۹۸ و ۱۸/۴۲ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. بنابراین تغییرات غلظت فسفر بخش هوایی نسبت به ریشه در تیمار دارای ۳۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک بیشتر بود. کاهش محتوای فسفر در گیاهان تحت تنش نیکل در چندین تحقیق گزارش شده است (Nazir et al., 2015; Maheshwari and Dubey, 2007; Lin and Kao, 2006). در مطالعه‌ی Mansouri and Golchin (2018) نیز با افزایش غلظت آرسنیک خاک، غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه در گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده کاهش و افزایش یافت. آن‌ها بیان کردند، فسفر و آرسنیک رفتار فیزیکوشیمیایی مشابهی دارند و مستقیماً برای اشغال مکان‌های جذبی با یکدیگر رقابت دارند، بنابراین افزایش غلظت آرسنیک خاک سبب آزاد شدن فسفر از مکان‌های جذبی خاک، افزایش قابلیت دسترسی و جذب آن توسط ریشه می‌شود. همچنین اضافه کردند، آرسنیک تأثیر منفی بر انتقال فسفر داشته و کاهش انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی باعث تجمع فسفر در ریشه و کاهش غلظت آن در بخش هوایی شده است. کاربرد جاذب، غلظت فسفر بخش هوایی را افزایش و غلظت



شکل ۵- تأثیر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه ذرت (الف)، تأثیر نوع و مقدار جاذب بر غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه ذرت (ب) B: تیمار شاهد (فاقد جاذب)، H0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد هماتیت، H0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد هماتیت، H1: تیمار دارای ۱ درصد هماتیت

HC0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد H-CMC، HC0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC، HC1: تیمار دارای ۱ درصد H-CMC

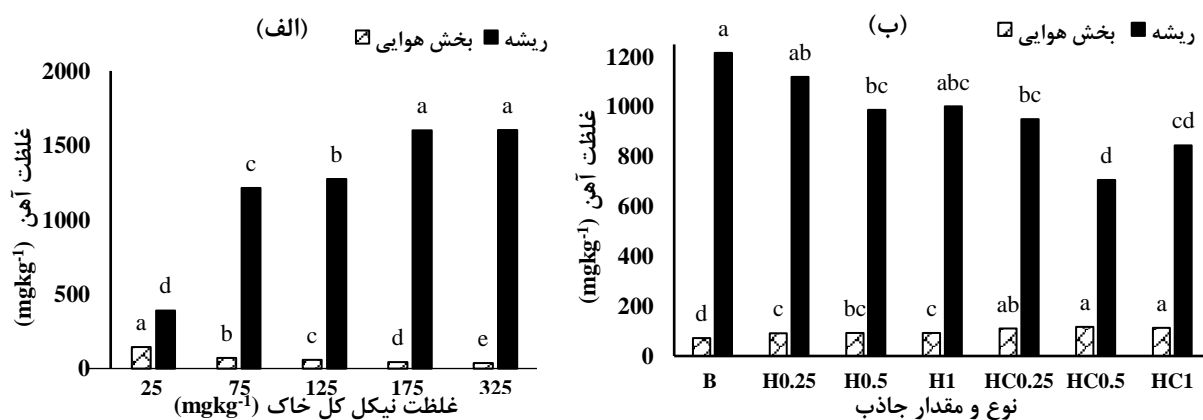
گیاه ذرت در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش غلظت نیکل کل خاک، غلظت آهن بخش هوایی و ریشه

غلظت آهن اثر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت آهن بخش هوایی و ریشه

از دلایل اصلی کلروز در گیاهان تحت تنش نیکل، کمبود منیزیم و آهن در بافت‌های آنها می‌باشد. کمبود منیزیم و آهن در برگ‌های گیاهان تحت تیمار با نیکل، از سنتز کلروفیل ممانعت می‌کند، در نتیجه محتوای کلروفیل در برگ‌ها کاهش یافته و علائم کلروز ظاهر می‌گردد (Piccini and Malavolta, 1992).

کم‌ترین غلظت آهن بخش هوایی و بیش‌ترین غلظت آهن ریشه در تیمار شاهد ملاحظه گردید (شکل ۶-ب). هر دو نوع جاذب در همه مقادیر به‌کار برده شده موجب افزایش معنی‌دار غلظت آهن بخش هوایی و کاهش غلظت آهن ریشه گردیدند. بیش‌ترین غلظت آهن بخش هوایی در تیمار داری ۰/۵ درصد H-CMC و کم‌ترین غلظت آهن ریشه نیز در این تیمار مشاهده شد. کاربرد ۰/۵ درصد H-CMC موجب افزایش ۶۱/۶۶ درصد غلظت آهن بخش هوایی و کاهش ۴۱/۹۳ درصد غلظت آهن ریشه نسبت به تیمار شاهد شد. میزان افزایش و کاهش غلظت آهن بخش هوایی و ریشه با کاربرد ۰/۵ درصد جاذب‌ها، نسبت به مقادیر ۰/۲۵ و ۱ درصد بیشتر بود. میزان افزایش غلظت آهن بخش هوایی با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به‌ترتیب برابر با ۲۶/۱۱، ۲۹/۱۶ و ۲۸/۰۵ درصد و جاذب H-CMC به‌ترتیب برابر با ۵۳/۴۱، ۶۱/۶۶ و ۵۷/۷۷ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. میزان کاهش غلظت آهن ریشه با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به‌ترتیب برابر با ۷/۹۹، ۱۸/۷۹ و ۱۷/۶۹ درصد و جاذب H-CMC به‌ترتیب برابر با ۲۱/۹۲، ۴۱/۹۳ و ۳۰/۵۳ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، جاذب H-CMC در همه مقادیر نسبت به جاذب H غلظت آهن بخش هوایی و ریشه را بیشتر افزایش و کاهش داد.

به‌طور معنی‌دار کاهش و افزایش یافت (شکل ۶-الف). غلظت آهن بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک آلوده به سطح ۳۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم نسبت به خاک غیر آلوده، ۷۳/۷۹ درصد کاهش و غلظت آهن ریشه حدود ۳۰۹ درصد افزایش یافت. در واقع نیکل با کاهش انتقال آهن از ریشه به بخش هوایی منجر به تجمع آن در ریشه گردیده است (Ghasemi et al., 2009). در مطالعه‌ی (Tafvivi and Motesharezadeh, 2018)، افزایش غلظت سرب در خاک موجب کاهش غلظت آهن و منگنز در بخش هوایی ارقام مختلف ذرت و افزایش غلظت آنها در ریشه گردید. همانطور که در نتایج نشان داده شد، با افزایش غلظت نیکل کل خاک، غلظت آهن بخش هوایی کاهش یافت. گزارش شده است که نیکل با کاهش جذب آهن یا غیر متحرک کردن آن در ریشه موجب کمبود این عنصر غذایی در گیاه می‌شود (Mysliwa-Kurdziel et al., 2004). کاهش محتوای آهن در گیاهان تحت تنش نیکل در چندین تحقیق گزارش شده است (Rehman et al., 2015; Deng et al., 2016). بسیاری از آنزیم‌ها نظیر سوپر اکسید دیسموتاز (SOD) و کاتالاز (CAT)، متالوآنزیم‌هایی می‌باشند که حاوی آهن، مس، روی و منگنز در ساختار خود هستند. از آنجا که نشان داده شده است، سمی بودن نیکل باعث کاهش محتوای آهن در بافت‌های گیاهی می‌شود (Rehman et al., 2015; Deng et al., 2016). در نتیجه به‌نظر می‌رسد که نیکل با ایجاد کمبود این عنصر غذایی در گیاه باعث کاهش بیوسنتز این متالوآنزیم‌ها می‌شود (Gajewska et al., 2006). نیکل می‌تواند جذب منیزیم یا آهن و عرضه این عناصر به بخش‌های هوایی گیاه را از طریق رقابت کاهش دهد و منجر به کمبود این عناصر در گیاه شود. یکی



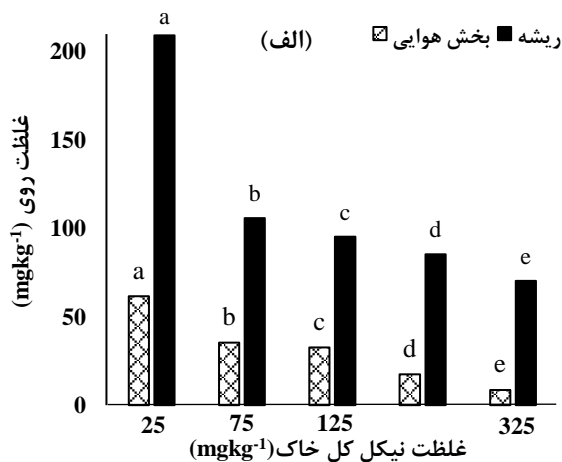
شکل ۶- تأثیر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت آهن بخش هوایی و ریشه ذرت (الف)، تأثیر نوع و مقدار جاذب بر غلظت آهن بخش هوایی و ریشه ذرت (ب)
 B: تیمار شاهد (فاقد جاذب)، H0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد هماتیت، H0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد هماتیت، H1: تیمار دارای ۱ درصد هماتیت
 HC0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد H-CMC، HC0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC، HC1: تیمار دارای ۱ درصد H-CMC

گیاه ذرت در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش غلظت نیکل کل خاک، غلظت روی بخش هوایی و ریشه

غلظت روی

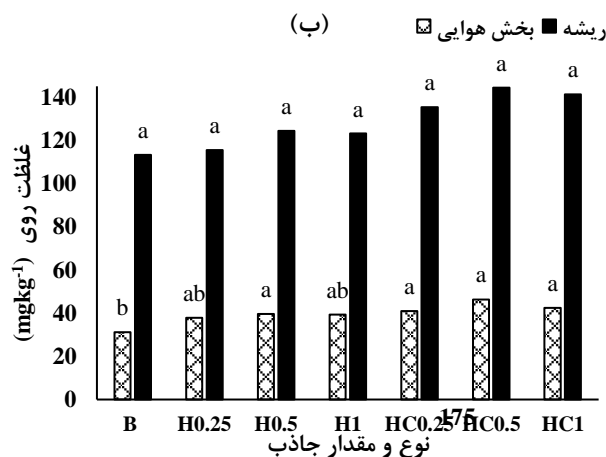
اثر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت روی بخش هوایی و ریشه

کم‌ترین غلظت روی بخش هوایی و ریشه مربوط به تیمار شاهد و بیش‌ترین مربوط به تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC بود. میزان افزایش غلظت روی بخش هوایی و ریشه در تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC به ترتیب ۴۸/۸۱ و ۲۷/۵۳ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. بین تیمارهای دارای H و H-CMC نیز از لحاظ غلظت روی بخش هوایی و ریشه تفاوت وجود داشت. تفاوت دو تیمار دارای ۰/۵ درصد H و H-CMC در افزایش غلظت روی بخش هوایی و ریشه به ترتیب ۲۱/۸ و ۱۷/۷۵ درصد بود، البته این تفاوت از لحاظ آماری غیرمعنی‌دار بود. با افزایش مقدار جاذب از ۰/۲۵ به ۰/۵ درصد، غلظت روی بخش هوایی و ریشه افزایش و با افزایش از ۰/۵ به ۱ درصد، کاهش یافت. میزان افزایش غلظت بخش هوایی با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به ترتیب برابر با ۲۱/۵۱، ۲۷/۰۱ و ۲۶/۱۴ درصد و جاذب H-CMC به ترتیب برابر با ۳۱/۶۸، ۴۸/۸۱ و ۳۶/۳۵ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. همچنین میزان افزایش غلظت روی ریشه با کاربرد ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H به ترتیب برابر با ۲/۰۱، ۹/۷۸ و ۸/۷۶ درصد و جاذب H-CMC به ترتیب برابر با ۱۹/۵۵، ۲۷/۵۳ و ۲۴/۷۱ درصد نسبت به تیمار شاهد بود.



به‌طور معنی‌دار کاهش یافت (شکل ۷-الف). غلظت روی بخش هوایی و ریشه گیاهان کشت شده در خاک آلوده به سطح ۳۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم نسبت به خاک غیر آلوده، به ترتیب ۸۶/۰۳ و ۶۶/۳۹ درصد کاهش یافت. یون Zn²⁺ (83pm) دارای شعاع یونی نزدیک به یون Ni²⁺ (78pm) می‌باشند (شعاع‌های یونی داخل پرانتز نوشته شده است)، بنابراین این عناصر بر سر جذب توسط گیاه با هم رقابت می‌کنند (Kidd *et al.*, 2009). در نتیجه سمی بودن نیکل باعث کاهش غلظت روی در گیاه می‌گردد (Matraszek *et al.*, 2016; Deng *et al.*, 2016; Parida *et al.*, 2003; Emsley, 1991) و آن را از عملکرد فیزیولوژیکی‌اش باز می‌دارد (Amari *et al.*, 2016). روی در بسیاری از آنزیم‌های گیاهی وجود دارد. همچنین روی در پایداری ریبوزوم‌ها و غشای سیتوپلاسمی سلول‌های ریشه تأثیرگذار است. این فلز سبب تسریع فرایندهای اکسایش، سنتز پروتئین و انتقال کربوهیدرات‌ها می‌شود (Emsley, 2011).

هر دو نوع جاذب در همه مقادیر به کار رفته باعث افزایش غلظت روی بخش هوایی و ریشه نسبت به تیمار شاهد گردید، البته این افزایش برای روی ریشه غیر معنی‌دار بود (شکل ۷-ب).



شکل ۷- تأثیر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت روی بخش هوایی و ریشه ذرت (الف)، تأثیر نوع و مقدار جاذب بر غلظت روی بخش هوایی و ریشه ذرت (ب)
 B: تیمار شاهد (فاقد جاذب)، H0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد هماتیت، H0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد هماتیت، H1: تیمار دارای ۱ درصد هماتیت
 HC0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد H-CMC، HC0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC، HC1: تیمار دارای ۱ درصد H-CMC

کیلوگرم خاک، غلظت نیکل بخش هوایی گیاه از ۱۷/۵ به ۴۸/۹ و غلظت نیکل ریشه از ۸۷/۱ به ۴۴۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک رسید، به عبارت دیگر غلظت نیکل بخش هوایی ۱۷۹/۴۲ درصد و غلظت نیکل ریشه ۴۰۵/۳۹ درصد افزایش یافت. فرض بر اینست، حد بحرانی سمی بودن نیکل در گونه‌های حساس، نسبتاً متحمل و متحمل به ترتیب ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک هست (Hussain *et al.*, 2013) و با توجه به

غلظت نیکل

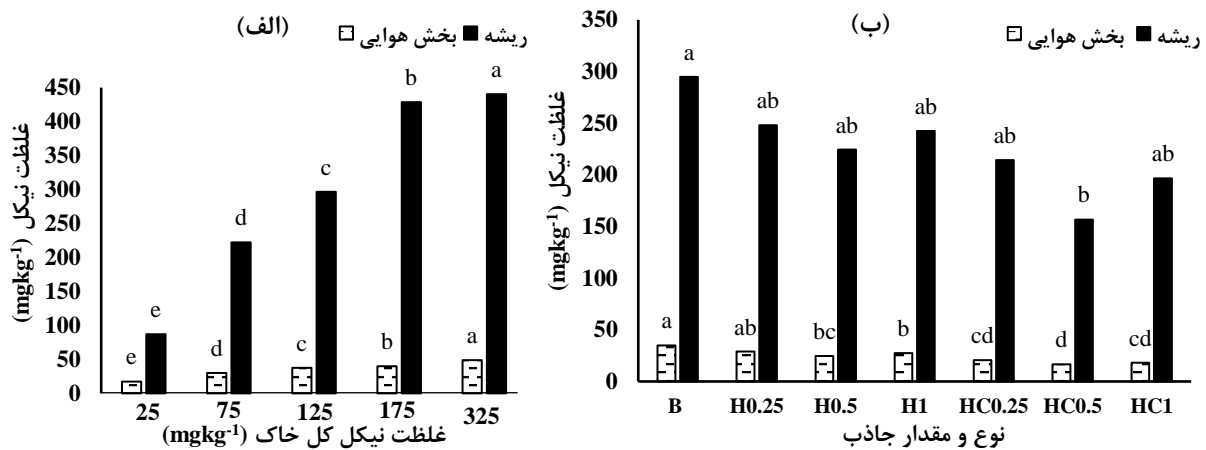
اثر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش غلظت نیکل کل خاک، غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه به‌طور معنی‌دار افزایش یافت (شکل ۸-الف). کم‌ترین غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه در تیمار شاهد و بیش‌ترین غلظت در تیمار آلوده به سطح ۳۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم مشاهده شد. با افزایش غلظت نیکل کل خاک از سطح ۲۵ تا ۳۲۵ میلی‌گرم بر

اینکه دامنه کفایت نیکل در بخش هوایی گیاهان، از ۰/۱ تا ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک متغیر است (Gerendas and Macher, 1997)، می‌توان نتیجه گرفت که غلظت نیکل بخش هوایی در تمامی سطوح، مخصوصاً در سطوح بالای آلودگی، بیشتر از این دامنه قرار گرفته است. با افزایش غلظت نیکل در مطالعه‌ی Reyhanitabar *et al.*, (2017) در سطح ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، افزایش شدید در غلظت نیکل بخش هوایی رخ داد، اما در سطح ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم نیکل، تغییرات اندک و غیر معنی‌دار بود. آن‌ها دلیل این امر را این‌گونه بیان کردند، احتمالاً تأثیر منفی نیکل بر ساختار و عملکرد ریشه باعث کاهش رشد آن و مقاومت گیاه در برابر جذب اضافی آن و در نهایت باعث عدم اختلاف معنی‌دار غلظت نیکل بخش هوایی شده است. اما در مطالعه حاضر تغییرات غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه تا سطح ۳۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم معنی‌دار بود. در مطالعه‌ی Rathor *et al.*, (2014) نیز با افزایش غلظت نیکل کل خاک از صفر تا ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، محتوای غلظت نیکل در گیاه به‌طور معنی‌دار افزایش یافت و از ۲۸ به ۶۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک رسید. افزایش جذب و غلظت نیکل در گیاهان تحت تنش نیکل در مطالعات متعددی گزارش شده است (Ansari *et al.*, 2015; Sirhindi *et al.*, 2015; Khaliq *et al.*, 2016; Mosa *et al.*, 2016). افزایش جذب و غلظت نیکل در گیاه ممکن است به‌دلیل قبلاً نیز گفته شد، با افزایش غلظت نیکل کل خاک از ۲۵ تا ۳۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، غلظت Ni-MgCl₂ و Ni-DTPA به‌طور معنی‌دار افزایش یافت؛ غلظت Ni-DTPA از ۱/۴ به ۳۹/۷۶ و غلظت Ni-MgCl₂ از ۷/۶ به ۱۹/۰۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم رسید. با افزایش غلظت نیکل کل خاک از سطح ۲۵ تا ۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک، غلظت نیکل بخش هوایی گیاه از ۱۷/۵ به ۳۰/۱ و غلظت نیکل ریشه از ۸۷/۱ به ۲۲۲/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم ماده خشک رسید، به‌عبارت دیگر غلظت نیکل بخش هوایی ۷۲ درصد و غلظت نیکل ریشه ۱۵۴/۹۹ درصد افزایش یافت. بنابراین می‌توان گفت در سطح ۷۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم، افزایش شدید در غلظت نیکل بخش هوایی و مخصوصاً ریشه رخ داد. در این سطح آلودگی غلظت پتاسیم، فسفر، آهن و روی بخش هوایی به‌ترتیب حدود ۲۲/۳۱، ۳۷/۹۱، ۴۹/۶۵ و ۴۲/۶۹ درصد و ارتفاع ساقه و وزن خشک بخش هوایی به‌ترتیب حدود ۱۱/۲ و ۲۱/۸۴ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. در نتیجه می‌توان گفت در سطح آلودگی ۷۵ میلی‌گرم نیکل، بیشترین تغییرات در محتوای عناصر غذایی و زیست‌توده گیاه ذرت رخ داده است. جذب نیکل در برخی تک‌لپه‌ای‌ها نظیر ذرت از طریق کلاهک

ریشه اتفاق می‌افتد (Turina, 1968). نیکل با تغییر میزان استرول و فسفولیپید و همچنین ساختار و فعالیت ATPase بر ترکیب و نفوذپذیری غشای سلولی تأثیر می‌گذارد (Sreekanth *et al.*, 2013). پمپ پروتون H-ATPase در جذب فعال و انتقال عناصر غذایی ضروری دخیل است که این امر، به میزان انرژی موجود برای قطبش غشای سلولی بستگی دارد. احتمالاً در سطوح پایین آلودگی تغییرات ساختار غشای سلولی و عملکرد آن چندان نمی‌باشد و این مسئله موجب جذب و به‌دنبال آن افزایش شدید محتوای نیکل در بافت‌های گیاه شده است، در نتیجه نیکل با ایجاد تغییرات متابولیکی باعث کاهش جذب و انتقال عناصر غذایی ذکر شده در گیاه گردید. در سطح آلوده به ۳۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم، غلظت پتاسیم، فسفر، آهن و روی بخش هوایی به‌ترتیب حدود ۴۳/۵۶، ۴۷/۹۸، ۷۳/۷۹ و ۸۶/۰۳ درصد و ارتفاع ساقه و وزن خشک بخش هوایی به‌ترتیب حدود ۳۶/۸۶ و ۴۲/۵۶ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. بنابراین در این سطح آلودگی، ترتیب تغییرات محتوای عناصر غذایی در اندام هوایی گیاه ذرت بدین گونه بود: روی < آهن < فسفر < پتاسیم. با توجه به رفتار فیزیکی‌شیمیایی و شعاع یونی مشابه نیکل، روی و آهن (Chen *et al.*, 2009) چنین نتیجه‌ای قابل انتظار بود.

هر دو نوع جاذب به‌کار برده شده باعث کاهش معنی‌دار غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه شد، به‌طوریکه بیشترین غلظت در تیمار شاهد و کمترین در تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC ملاحظه گردید (شکل ۸-ب). میزان کاهش غلظت نیکل بخش هوایی در تیمارهای دارای ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H، به‌ترتیب برابر ۱۶/۷۷، ۲۸/۷۷ و ۲۱/۴۲ درصد و جاذب H-CMC، به‌ترتیب برابر با ۴۰/۴۹، ۵۲/۶۱ و ۴۷/۹ درصد بود. همچنین میزان کاهش غلظت نیکل ریشه در تیمارهای دارای ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد جاذب H، به‌ترتیب برابر ۱۵/۸۶، ۲۳/۹۲ و ۱۷/۷۳ درصد و جاذب H-CMC، به‌ترتیب برابر با ۲۷/۳۲ و ۴۶/۸۴ و ۳۳/۲۷ درصد بود. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، جاذب H-CMC غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه را بیشتر از جاذب H کاهش داد. همچنین با افزایش مقدار جاذب از ۰/۲۵ تا ۰/۵ درصد، غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه کاهش و با افزایش از ۰/۵ تا ۱ درصد غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه کاهش یافت. کاهش غلظت نیکل در گیاه ذرت ممکن است، به‌دلیل غیرمتحرک شدن این فلز در خاک (Shen *et al.*, 2016) توسط جاذب‌های به‌کار برده شده باشد. نتایج مربوط به تحقیق قبلی نشان داد، افزودن جاذب (H و H-CMC) باعث کاهش معنی‌دار غلظت Ni-DTPA و Ni-MgCl₂ گردید. بیش‌ترین غلظت Ni-DTPA و Ni-MgCl₂ مربوط به تیمار شاهد (بدون جاذب) و کم‌ترین غلظت آن مربوط به تیمار دارای ۰/۵

درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون جاذب) کاهش داد (Bidast *et al.*, 2020). بدین ترتیب غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت کشت شده در این تیمار به ترتیب ۵۲/۶۱ و ۴۶/۸۴ درصد کاهش و بدنبال آن غلظت پتاسیم، فسفر، آهن و روی بخش هوایی به ترتیب حدود ۲۰/۵۵، ۱۸/۶۸، ۶۱/۶۶ و ۴۸/۸۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت.



شکل ۸- تأثیر سطوح نیکل کل خاک بر غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه ذرت (الف)، تأثیر نوع و مقدار جاذب بر غلظت نیکل بخش هوایی و ریشه ذرت (ب) B: تیمار شاهد (فاقد جاذب)، H0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد هماتیت، H0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد هماتیت، H1: تیمار دارای ۱ درصد هماتیت HC0.25: تیمار دارای ۰/۲۵ درصد H-CMC، HC0.5: تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC، HC1: تیمار دارای ۱ درصد H-CMC

نیز جذب خود نموده و قابلیت دسترسی آن را کاهش دهند (Mansouri and Golchin, 2018). با توجه به اینکه جاذب H-CMC در سطح ۰/۵ درصد دارای بالاترین قدرت جذب و غیر متحرک کردن فلزات می‌باشد، در نتیجه محتوای عناصر غذایی در گیاهان کشت شده در این تیمار کاهش یافته و به دنبال آن رشد گیاه نیز کاهش یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، در پایین‌ترین سطح نیکل، هر دو نوع جاذب با جذب و کاهش قابلیت دسترسی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه، باعث کاهش رشد آن گردیدند. ولی در سطوح ۰/۷۵، ۱/۲۵، ۱/۷۵ و ۳/۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم، بیش‌ترین متوسط ارتفاع ساقه و وزن خشک بخش هوایی و ریشه مربوط به تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC و کم‌ترین مربوط به تیمار شاهد بود. با افزایش غلظت فلز سنگین در خاک، جاذب‌ها با جذب و غیرمتحرک کردن آن فلز در خاک باعث افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاه گشتند. در نتیجه بیش‌ترین محتوای عناصر غذایی در تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC و کمترین در تیمار شاهد ملاحظه گردید. در تیمارهای شاهد و تیمارهای دارای ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ درصد H با افزایش غلظت نیکل کل خاک، غلظت عناصر پتاسیم، فسفر، آهن و روی بخش هوایی و زیست‌توده گیاه کاهش یافت. در تیمارهای دارای ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد جاذب H-CMC، با افزایش غلظت نیکل کل خاک

درصد H-CMC در تمامی سطوح نیکل کل بود (Bidast *et al.*, 2020). بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد، جاذب‌های به کار رفته با جذب نیکل و غیرمتحرک کردن آن در خاک باعث کاهش جذب آن توسط گیاه گردیده‌اند، بدین ترتیب جذب سایر عناصر غذایی افزایش یافته است. جاذب H-CMC نسبت به جاذب H، کارایی بالاتری در جذب نیکل و غیرمتحرک کردن آن در خاک داشت؛ این جاذب در سطح ۰/۵ درصد، غلظت Ni-DTPA را حدود ۳۶

اثر متقابل نوع و مقدار جاذب و غلظت نیکل کل خاک بر برخی صفات زراعی و غلظت‌های پتاسیم، فسفر، آهن، روی و نیکل بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت اثر متقابل نوع و مقدار جاذب و سطوح نیکل کل خاک بر ارتفاع ساقه و وزن خشک و غلظت‌های پتاسیم، فسفر، آهن، روی و نیکل بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). در سطح ۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک، بیش‌ترین ارتفاع ساقه و وزن خشک بخش هوایی و ریشه مربوط به تیمار شاهد (فاقد جاذب) و کم‌ترین مربوط به تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC بود (جدول ۵). همچنین بیش‌ترین غلظت پتاسیم، فسفر، آهن، روی و نیکل بخش هوایی در تیمار شاهد و کمترین غلظت در تیمار دارای ۰/۵ درصد H-CMC ملاحظه گردید. با توجه به اینکه بیشتر خاک‌های کشاورزی به‌طور میانگین دارای ۲۵ میلی‌گرم نیکل بر کیلوگرم خاک می‌باشند (Holmgren *et al.*, 1993)، بنابراین پایین‌ترین سطح نیکل در این تحقیق دارای حد متوسطی از غلظت این فلز در خاک هست. در نتیجه در این سطح، احتمالاً جاذب‌ها علاوه بر نیکل، سایر عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از جمله روی و آهن را نیز جذب نموده و با غیرمتحرک کردن این عناصر منجر به کاهش جذب آن‌ها توسط گیاه گردیده‌اند. نانوذرات هماتیت می‌توانند آهن را

جذب و عرضه سایر عناصر غذایی مورد نیاز گیاه را بهبود بخشیده و باعث افزایش رشد گیاه ذرت گردیده است. در تمامی سطوح نیکل کل خاک، با افزایش مقدار جاذب از ۰/۲۵ تا ۰/۵ درصد، زیست توده و محتوای عناصر غذایی مورد نیاز گیاه افزایش و از ۰/۵ تا ۱ درصد، کاهش یافت.

از سطح ۲۵ تا ۷۵ میلی گرم بر کیلوگرم، ارتفاع ساقه و وزن خشک بخش هوایی و ریشه و غلظت عناصر پتاسیم، فسفر، آهن و روی بخش هوایی افزایش یافت و پس از آن کاهش یافت. زیرا طبق نتایج مطالعه قبلی، جاذب H-CMC نسبت به جاذب H، کارایی بالاتری در غیرمتحرک کردن نیکل در خاک داشت (Bidast et al., 2020)، در نتیجه با کاهش قابلیت دسترسی این فلز در خاک،

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع و مقدار جاذب و اثر غلظت‌های نیکل کل خاک بر برخی صفات زراعی و غلظت‌های پتاسیم، فسفر، آهن، روی و نیکل بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت.

نوع و مقدار جاذب	سطوح نیکل (mgkg ⁻¹)	ارتفاع ساقه (cm)	وزن خشک بخش هوایی (g/pot)	وزن خشک ریشه (g/pot)	غلظت پتاسیم بخش هوایی (%)	غلظت پتاسیم ریشه (%)	غلظت فسفر بخش هوایی (%)	غلظت فسفر ریشه (%)
Blank	۲۵	۴۹/۱ ^{bc}	۵/۳۱ ^{abc}	۲/۴۹ ^{bcd}	۴/۶۶ ^a	۰/۳۱۳ ^q	۰/۳۹۸ ^a	۰/۳۴۴ ^{def}
	۷۵	۴۳/۶ ^{jk}	۴/۱۵ ^{jk}	۱/۸۴ ^{nop}	۳/۶۲ ^{ghi}	۱/۱۴ ^{jk}	۰/۱۸۵ ^{pqrst}	۰/۳۶۴ ^{cd}
	۱۲۵	۴۱ ^{mn}	۳/۷۶ ^{lm}	۱/۷۸ ^{opq}	۳/۲۵ ^{hjk}	۱/۴ ⁱ	۰/۱۷۶ ^{rstu}	۰/۳۶۷ ^{bcd}
	۱۷۵	۳۴ ^q	۳/۲۵ ^{no}	۱/۶۹ ^{pqr}	۲/۸۲ ^{lmn}	۳/۵۳ ^b	۰/۱۶ ^v	۰/۳۸۷ ^{abc}
	۳۲۵	۳۱ ^r	۳/۰۵ ^o	۱/۳۳ ^s	۲/۶۳ ⁿ	۴/۱ ^a	۰/۱۵۵ ^v	۰/۴۰۵ ^a
H 0.25	۲۵	۴۹ ^{bcd}	۵/۲۲ ^{abcd}	۲/۴ ^{bcd}	۴/۴۵ ^{ab}	۰/۶۷۷ ^{op}	۰/۲۶۱ ^{bc}	۰/۳۱۷ ^{fghi}
	۷۵	۴۶/۵ ^{ghi}	۵ ^{bcd}	۲/۰۷ ^{ijklmn}	۳/۷ ^{fgh}	۱/۰۴ ^{klm}	۰/۲۰۱ ^{lmnop}	۰/۳۱۷ ^{fghi}
	۱۲۵	۴۶ ^{hi}	۴/۲۵ ^{ijk}	۲/۰۷ ^{ijklmno}	۳/۳۲ ^{hijk}	۱/۰۹ ^{kl}	۰/۱۹۱ ^{opqr}	۰/۳۳۳ ^{efg}
	۱۷۵	۳۸/۵ ^o	۳/۹۹ ^{kl}	۱/۹ ^{mno}	۲/۸۲ ^{lmn}	۳/۱۸ ^d	۰/۱۸۲ ^{qrst}	۰/۳۵۳ ^{de}
	۳۲۵	۳۷ ^p	۳/۴ ^{mno}	۱/۴۱ ^s	۲/۷۱ ^{mn}	۳/۶ ^b	۰/۱۶۱ ^{uv}	۰/۳۹۳ ^{ab}
H 0.5	۲۵	۴۸/۱ ^{cdef}	۵/۱۵ ^{abcde}	۲/۲ ^{Fghijkl}	۴/۲۴ ^{abc}	۰/۷۲۹ ^o	۰/۲۳۵ ^{defg}	۰/۲۹۲ ^{ijk}
	۷۵	۴۷/۵ ^{efg}	۵/۱۱ ^{abcdef}	۲/۱۲ ^{hijklm}	۴/۱ ^{bcd}	۰/۹۳۷ ^{mn}	۰/۲۲۳ ^{fghijk}	۰/۲۹۸ ^{hij}
	۱۲۵	۴۶/۵ ^{ghi}	۴/۵ ^{hij}	۲/۳ ^{cdefgh}	۳/۸۲ ^{defg}	۱/۰۴ ^{klm}	۰/۲۱۶ ^{hijkl}	۰/۳۱۳ ^{fghi}
	۱۷۵	۴۲ ^{lm}	۳/۶۱ ^{mn}	۲/۱۵ ^{ghijklm}	۳/۳۲ ^{hijk}	۲/۹۷ ^e	۰/۱۹۸ ^{mno}	۰/۳۲۳ ^{fgh}
	۳۲۵	۴۰/۵ ⁿ	۳/۴۵ ^{mn}	۱/۵۳ ^{qrs}	۳/۱۷ ^{kl}	۳/۱۱ ^d	۰/۱۷۳ ^{stuv}	۰/۳۴۴ ^{def}
H 1	۲۵	۴۸/۶ ^{bcd}	۵/۱۹ ^{abcd}	۲/۲۷ ^{efghij}	۴/۳۱ ^{abc}	۰/۷۲۹ ^o	۰/۲۴۲ ^{de}	۰/۳۱۱ ^{ghii}
	۷۵	۴۷ ^{fghi}	۵/۱۱ ^{abcdef}	۲/۱۱ ^{hijklmn}	۳/۸۲ ^{defg}	۰/۹۸۹ ^{lmn}	۰/۲۱ ^{ijklmn}	۰/۳۱۴ ^{fghi}
	۱۲۵	۴۶/۵ ^{ghi}	۴/۴۸ ^{hij}	۲/۲۴ ^{efghij}	۳/۶۶ ^{ghijk}	۱/۰۹ ^{kl}	۰/۲۰۳ ^{lmnop}	۰/۳۲۷ ^{efg}
	۱۷۵	۴۱ ^{mn}	۳/۵ ^{mn}	۱/۹ ^{klmno}	۳/۲۵ ^{ijkl}	۳/۱۸ ^d	۰/۱۹۲ ^{opqr}	۰/۳۲۷ ^{efg}
	۳۲۵	۴۰ ⁿ	۳/۳۳ ^{no}	۱/۵ ^{rs}	۳/۱۱ ^{klm}	۳/۳۲ ^c	۰/۱۷ ^{tuv}	۰/۳۵۳ ^{de}
H-CMC0.25	۲۵	۴۷/۸ ^{def}	۴/۹۹ ^{bcd}	۲/۱۵ ^{ghijklm}	۴/۱ ^{bcd}	۰/۸۸۵ ⁿ	۰/۲۳۲ ^{defghi}	۰/۲۷۶ ^{ijkl}
	۷۵	۴۹/۳ ^b	۵/۲۹ ^{abc}	۲/۵۷ ^{abcd}	۴/۲۱ ^{abcde}	۰/۸۸۵ ⁿ	۰/۲۳۸ ^{def}	۰/۲۶ ^{lm}
	۱۲۵	۴۷ ^{fghi}	۴/۸۳ ^{defgh}	۲/۴۵ ^{bcd}	۴/۱۷ ^{bcd}	۰/۹۸۹ ^{lmn}	۰/۲۲۹ ^{defghi}	۰/۲۹۲ ^{ijk}
	۱۷۵	۴۴/۵ ^j	۴/۶۵ ^{gh}	۲/۲۲ ^{efghijk}	۴/۱۲ ^{bcd}	۲/۸۳ ^f	۰/۲۰۸ ^{klmno}	۰/۲۹۸ ^{hij}
	۳۲۵	۴۲ ^{lm}	۴/۵۶ ^{hi}	۱/۷۸ ^{opq}	۳/۶ ^{ghij}	۲/۹۷ ^e	۰/۱۸۸ ^{pqrs}	۰/۳۰۹ ^{ghi}
H-CMC0.5	۲۵	۴۷/۲ ^{fgh}	۴/۷۲ ^{gh}	۱/۹۷ ^{lmno}	۳/۸۲ ^{defg}	۱/۲۵ ^j	۰/۲۰۱ ^{lmnop}	۰/۱۸۳ ^{pq}
	۷۵	۵۲/۶ ^a	۵/۴۵ ^a	۲/۷۸ ^a	۴/۳۸ ^{ab}	۰/۴۱۶ ^q	۰/۲۶۷ ^b	۰/۱۶۹ ^q
	۱۲۵	۴۹/۵ ^b	۵/۲ ^{abcd}	۲/۶۴ ^{ab}	۴/۲۷ ^{abc}	۰/۵۸۳ ^p	۰/۲۴۵ ^{cd}	۰/۱۹۸ ^{op}
	۱۷۵	۴۶/۵ ^{ghi}	۴/۹۲ ^{cdefg}	۲/۴۹ ^{bcd}	۴/۲ ^{bcd}	۱/۶۷ ^h	۰/۲۲۶ ^{efghij}	۰/۲۱۳ ^{no}
	۳۲۵	۴۳/۵ ^{jk}	۴/۷۶ ^{efg}	۲/۰۷ ^{ijklmno}	۳/۸ ^{efg}	۱/۶۷ ^h	۰/۲۱۷ ^{ghijkl}	۰/۲۶۴ ^{kl}
H-CMC1	۲۵	۴۷/۵ ^{efg}	۴/۷۵ ^{fgh}	۲/۱ ^{hijklmn}	۳/۸۹ ^{cdefg}	۰/۹۸۹ ^{lmn}	۰/۲۳۲ ^{defgh}	۰/۲۳۶ ^{mn}
	۷۵	۵۲/۱ ^a	۵/۳۲ ^{ab}	۲/۵۸ ^{abc}	۴/۲۴ ^{abcd}	۰/۶۷۷ ^{op}	۰/۲۳۸ ^{def}	۰/۲۱۲ ^{no}
	۱۲۵	۴۹ ^{bcd}	۵/۱۱ ^{abcdef}	۲/۴۹ ^{bcd}	۴/۱۷ ^{bcd}	۰/۶۷۷ ^{op}	۰/۲۳۳ ^{defgh}	۰/۲۶۷ ^{kl}
	۱۷۵	۴۶ ⁱ	۴/۸۵ ^{defgh}	۲/۳۱ ^{defghi}	۴/۱۷ ^{bcd}	۲/۶۳ ^g	۰/۲۱۴ ^{ijklm}	۰/۲۷۳ ^{ijkl}
	۳۲۵	۴۳ ^{kl}	۴/۶۷ ^{gh}	۱/۸۹ ^{mno}	۳/۷۱ ^{fgh}	۲/۸۳ ^f	۰/۱۹۸ ^{nopq}	۰/۲۷۹ ^{ijkl}

ادامه جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع و مقدار جاذب و اثر غلظت‌های نیکل کل خاک بر برخی صفات زراعی و غلظت‌های پتاسیم، فسفر، آهن، روی

و نیکل بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت							نوع و مقدار جاذب
غلظت نیکل ریشه (mgkg ⁻¹)	غلظت نیکل بخش هوایی (mgkg ⁻¹)	غلظت روی ریشه (mgkg ⁻¹)	غلظت روی بخش هوایی (mgkg ⁻¹)	غلظت آهن ریشه (mgkg ⁻¹)	غلظت آهن بخش هوایی (mgkg ⁻¹)	سطوح نیکل (mgkg ⁻¹)	
۸۷/۱ ^u	۱۷/۵ ^o	۲۰۹/۳ ^a	۶۱/۶ ^a	۳۹۱ ^A	۱۴۵ ^a	۲۵	
۲۲۲/۱ ⁿ	۳۰/۱ ^f	۱۰۵/۹ ^p	۳۵/۳ ^o	۱۲۱۴ ^g	۷۳ ^u	۷۵	
۲۹۶/۵ ⁱ	۳۷/۵ ^d	۹۵/۳ ^q	۳۲/۷ ^p	۱۲۷۳ ^f	۵۹ ^x	۱۲۵	Blank
۴۲۸/۶ ^b	۴۰/۱ ^b	۸۵/۴ ^s	۱۷/۵ ^u	۱۶۰۰ ^a	۴۵ ^y	۱۷۵	
۴۴۰/۳ ^a	۴۸/۹ ^a	۷۰/۳ ^v	۸/۶ ^v	۱۶۰۳ ^a	۳۸ ^z	۳۲۵	
۵۱ ^v	۱۶/۷ ^o	۱۹۳/۹ ^b	۵۴/۱ ^b	۴۵۰ ^z	۱۳۹ ^b	۲۵	
۱۹۵/۴ ^p	۲۵/۳ ⁱ	۱۱۳ ⁿ	۴۰/۳ ^k	۹۹۸ ⁱ	۱۰۰ ⁿ	۷۵	
۲۴۴/۳ ^l	۲۹/۱ ^f	۱۰۸/۶ ^{op}	۳۹/۳ ^l	۱۲۰۳ ^g	۷۵ ^t	۱۲۵	H 0.25
۳۴۰/۹ ^f	۳۲/۸ ^e	۸۸/۳ ^{rs}	۳۰/۸ ^q	۱۳۸۲ ^c	۷۵ ^t	۱۷۵	
۴۰۹/۱ ^c	۴۱/۱ ^b	۷۴/۷ ^u	۲۴/۸ ⁱ	۱۵۶۲ ^b	۶۵ ^w	۳۲۵	
۴۷/۴ ^w	۱۱/۴ ^f	۱۶۰ ^g	۵۱/۳ ^c	۷۹۷ ^c	۱۲۵ ^{fg}	۲۵	
۱۵۵ ^r	۲۲/۱ ^{kl}	۱۵۰/۸ ^h	۴۵/۸ ^{ef}	۸۴۳ ^r	۱۰۴ ^{lm}	۷۵	
۲۲۳/۳ ⁿ	۲۶/۲ ^{hi}	۱۱۸/۳ ^{kl}	۴۲/۰۶ ^{ij}	۹۴۸ ^m	۸۵ ^p	۱۲۵	H 0.5
۳۱۵/۸ ^h	۲۷/۲ ^g	۱۱۳/۳ ^{mn}	۳۲/۷ ^p	۱۰۴۸ ^k	۷۸ ^{rs}	۱۷۵	
۳۸۰/۳ ^d	۳۷/۱ ^d	۷۹/۳ ^t	۲۶ ^s	۱۳۰۲ ^c	۷۳ ^u	۳۲۵	
۴۹/۷ ^w	۱۵/۴ ^p	۱۷۷/۳ ^d	۵۳/۷ ^b	۴۸۳ ^y	۱۲۸ ^c	۲۵	
۱۸۶ ^q	۲۳/۵ ^j	۱۴۲/۵ ⁱ	۴۴/۴ ^{gh}	۹۲۴ ⁿ	۱۰۳ ^m	۷۵	
۲۳۵/۱ ^m	۲۷/۳ ^g	۱۱۰/۱ ^{no}	۴۱/۵ ⁱ	۱۱۱۸ ⁱ	۸۲ ^q	۱۲۵	H 1
۳۳۵/۶ ^e	۳۱/۹ ^e	۱۰۷/۱ ^p	۳۱/۵ ^q	۱۱۴۱ ^h	۷۷ ^s	۱۷۵	
۴۰۶/۶ ^c	۳۸/۷ ^c	۷۸/۷ ^t	۲۵/۱ st	۱۳۳۹ ^d	۷۱ ^v	۳۲۵	
۲۶/۹ ^x	۱۰/۹ ^r	۱۴۳/۷ ^t	۴۸/۹ ^d	۸۹۴ ^o	۱۲۴ ^e	۲۵	
۱۵۱/۶ ^{rs}	۱۶/۴ ^{op}	۱۷۳/۱ ^e	۴۹ ^d	۸۲۷ ^s	۱۲۶ ^f	۷۵	
۲۰۱/۴ ^o	۲۰/۱ ^m	۱۶۲/۴ ^e	۴۲/۵ ⁱ	۸۶۰ ^q	۱۲۰ ^h	۱۲۵	H-CMC0.25
۳۱۳/۴ ^{hi}	۲۶ ^{hi}	۱۱۶/۱ ^m	۳۷/۶ ⁿ	۸۹۲ ^o	۱۰۵ ^l	۱۷۵	
۳۷۸/۳ ^d	۳۰/۳ ^f	۸۱/۳ ^t	۲۷/۰۳ ^r	۱۲۷۵ ^f	۷۸ ^s	۳۲۵	
۱۰ ^z	۵ ^t	۱۳۷/۶ ⁱ	۴۵/۴ ^{fg}	۱۰۰۶ ^l	۹۸ ⁿ	۲۵	
۸۷/۸ ^u	۱۳/۷ ^q	۱۹۵ ^b	۵۳/۳ ^b	۳۴۲ ^B	۱۴۶ ^a	۷۵	
۱۳۸/۳ ^t	۱۷/۵ ^o	۱۷۷/۸ ^d	۵۰/۳ ^c	۵۹۴ ^x	۱۳۵ ^c	۱۲۵	H-CMC0.5
۲۵۱/۴ ^k	۲۱ ^{lm}	۱۲۱/۴ ^k	۴۴/۱ ^h	۷۰۹ ^v	۱۱۳ ⁱ	۱۷۵	
۲۹۶/۳ ^j	۲۵/۳ ⁱ	۹۰/۲ ^r	۳۸/۶ ^{lm}	۸۸۰ ^p	۹۰ ^o	۳۲۵	
۱۸/۵ ^y	۸ ^s	۱۴۱/۵ ⁱ	۴۵/۸ ^{ef}	۹۱۴ ⁿ	۱۰۷ ^k	۲۵	
۱۵۱/۱ ^s	۱۴/۱ ^q	۱۸۸/۸ ^c	۵۰/۵ ^c	۶۹۴ ^w	۱۴۰ ^b	۷۵	
۱۵۴/۱ ^{rs}	۱۸/۹ ⁿ	۱۶۸/۴ ^f	۴۶/۴ ^e	۷۲۶ ^u	۱۳۱ ^d	۱۲۵	H-CMC1
۳۱۰/۴ ⁱ	۲۲/۶ ^{jk}	۱۱۸/۹ ^{kl}	۳۸/۲ ^{mn}	۷۸۸ ^t	۱۱۰ ^j	۱۷۵	
۳۴۹/۷ ^e	۲۷/۱ ^{gh}	۸۸/۴ ^{rs}	۳۱/۴ ^q	۱۱۰۲ ^j	۸۰ ^r	۳۲۵	

نتیجه‌گیری

یافت. جاذب هماتیت خالص و تثبیت‌شده با CMC با جذب نیکل و غیرمتحرک کردن آن در خاک باعث کاهش جذب این فلز توسط گیاه گردید، بدین ترتیب جذب سایر عناصر غذایی از جمله پتاسیم، فسفر، آهن و روی افزایش یافت. جاذب H-CMC نسبت به H، کارایی بالاتری در غیر متحرک کردن نیکل و کاهش سمی بودن آن در گیاه ذرت داشت، همچنین سطح ۰/۵ درصد جاذب‌ها مؤثرتر از سطوح ۰/۲۵ و ۱ درصد بود.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که با افزایش غلظت نیکل کل خاک، ارتفاع ساقه و وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت کشت شده در خاک‌های آلوده کاهش یافت. همچنین افزایش غلظت کل این فلز در خاک باعث به هم خوردن تعادل عناصر غذایی در گیاهان شد، به‌طوریکه غلظت پتاسیم، فسفر، آهن و روی در بخش هوایی گیاهان، کاهش و غلظت نیکل افزایش

REFERENCES

Ahmad, M.S.A., Ashraf, M. 2012. Essential roles and hazardous effect of nickel in plants. In: Whitacre DM

(ed) Reviews of environmental contamination and toxicology. Springer, New York, Dordrecht Heidelberg,

- London, 125–167.
- Amari, T., Lutts, S., Taamali, M., Lucchini, G., Sacchi, G.A., Abdelly, C., Ghnaya, T., 2016. Implication of citrate, malate and histidine in the accumulation and Transport of nickel in *Mesembryanthemum crystallinum* and *Brassica juncea*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 126:122–128.
- Ansari, M.K.A., Ahmad, A., Umar, S., Zia, M.H., Iqbal, M., Owens, G., 2015. Genotypic variation in phytoremediation potential of Indian mustard exposed to nickel stress: a hydroponic study. *Int. J. Phytorem.* 17:135–144.
- Bidast, S., Golchin, A., Baybordi, A., Zamani, A. 2020. Effect of hematite on reduction of nickel toxicity in maize (*Zea mays L.*) in relation to plant growth and nutrient uptake. *Iran. J. Soil. Water. Res.* (accepted) (in Farsi).
- Bower, C.A., Hatcher, J.T. 1966. Simultaneous determination surface area and cation exchange capacity. *J. Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 30:527–527.
- Chen, C., Huang, D., Liu, J., 2009. Functions and toxicity of nickel in plants: recent advances and future prospects. *Clean–Soil Air Water* 37, 304–313.
- Day, R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis, P 545–566. In: Black, C.A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Ser. No. 9.* ASA, Madison, WI.
- Deng, T.H.B., Tang, Y.T., van der Ent, A., Sterckeman, T., Echevarria, G., Morel, J.L., Qiu, R.L., 2016. Nickel translocation via the phloem in the hyperaccumulator *Noccaea caerulea* (Brassicaceae). *Plant Soil* 404:35–45.
- Dimkpa, C., Svatos, A., Merten, D., Buchel, G., Kothe, E. 2008. Hydroxamate siderophores produced by *Streptomyces acidiscabies* E13 bind nickel and promote growth in cowpea (*Vigna unguiculata L.*) under nickel stress. *Can. J. Microbiol.* 54:163–172.
- El-Sakhawy, M., Kamel, S., Salama, A., Tohamy, H.A., 2018. Preparation and infrared study of cellulose based amphiphilic materials. *Journal of Cellulose Chemistry Technology.* 52(3-4) 193-200
- Emsley, J. 1991. *The elements.* Clarendon, Oxford.
- Emsley, J. 2011. *Nature's building blocks: an AZ guide to the elements.* Oxford University Press.
- Fageria, N.K. 2009. *The Use of Nutrients in Crop Plants.* CRC by Press Taylor & Francis Group, LLC, 241–260.
- Foy, C.D., Chaney, R.L., White, M.C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant. Physiol.* 29:511–566.
- Gaillardet, J., Viers, J., Dupré, B. 2005. Trace elements in river waters. In: Drever HI (ed) *Surface and ground water, weathering and soils.* Treatise on Geochemistry, Oxford, Elsevier 5:225–227.
- Gajewska, E., Sklodowska, M., Slaba, M., Mazur, J. 2006. Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots. *Biol. Plant.* 50:653–659.
- Gerendas J., 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. Soil.* 190: 153-162.
- Ghasemi, R., Ghaderian, M., Krämer, U. 2009. Interference of nickel with copper and iron homeostasis contributes to metal toxicity symptoms in the nickel hyperaccumulator plant *Alyssum inflatum*. *New Phytologist.* 184: 566–580
- Gotic, M., Music, S., 2007. Mossbauer, FT-IR and FE SEM investigation of iron oxides precipitated from FeSO₄ solutions. *Journal of Molecular Structure,* (834-836):445-453.
- Guo, X.Y., Zuo, Y.B., Wang, B.R., Li, J.M., Ma, Y.B., 2010. Toxicity and accumulation of copper and nickel in maize plants cropped on calcareous and acidic field soils. *Plant Soil.* 333:365–373.
- Habibi, N. 2014. Preparation of biocompatible magnetite-carboxymethyl cellulose nanocomposite: Characterization of nanocomposite by FTIR, XRD, FESEM and TEM. *J. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy,* 131:55–58.
- Hafez, H., Yousef, H., 2012. A study on the use of nano/micro structured goethite and hematite as adsorbents for the removal of Cr (III), Co (II), Cu (II), Ni (II), and Zn (II) metal ions from aqueous solutions. *Int. J. of Engin. Sci. and Tech. (IJEST),* 4(6): 3018-3028.
- He, F., Zhao, D., Liu, J., Roberts, C.B. 2007. Stabilization of Fe–Pd nanoparticles with sodium carboxymethyl cellulose for enhanced transport and dechlorination of trichloroethylene in soil and groundwater. *Ind Eng Chem Res.* 46(1):29–34.
- Helmke, P.H., Sparks D.L. 1996. Potassium. In Sparks, D.L. *et al.*, *Method of soil analysis.* Published by: Soil. Sci. Soc. of Am. J., Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 551–574.
- Hoch, L.B., Mack, E.J., Hydutsky, B.W., Hershman, J.M., Skluzacek, J.M., Mallouk, T.E. 2008. Carbothermal synthesis of carbon supported nanoscale zero-valent iron particles for the remediation of hexavalent chromium. *J. Environ. Sci. Tech.* 42(7):2600–5.
- Holmgren, G.G.S., Meyer, M.W., Chaney, R.L., Daniels, R.B. 1993. Cadmium, lead, zinc, copper and nickel in agricultural soils of the United States of America. *J. Environ. Qual.* 22: 335-348.
- Hussain, M.B., Ali, S., Azam, A., Hina, S., Ahsan, M., Farooq, B.A., Bharwana, S.A., Gill, M.B. 2013. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to nickel stress: A review. *Afr. J. Agric. Sci.* 8(17): 1596–1602. doi:10.5897/AJAR12.407
- Jiang, X.J., Luo, Y.M., Liu, Q., Liu, S.L., Zhao, Q.G. 2004. Effects of cadmium on nutrient uptake and translocation by Indian Mustard. *Environ. Geo. Health.* 26: 319–324.
- Kabata-Pendias, A., Mukherjee, A.B. 2007. *Trace elements from soil to human.* Springer, New York, Berlin, Heidelberg, 550. doi:10.1007/978-3-540-32714-1.
- Khalique, A., Ali, S., Hameed, A., Farooq, M.A., Farid, M., Shakoor, M.B., Mahmood, K., Ishaque, W., Rizwan, M., 2016. Silicon alleviates nickel toxicity in cotton seedlings through enhancing growth, photosynthesis and suppressing Ni uptake and oxidative stress. *Arch. Agron. Soil Sci.* 62:633–647.
- Khan, M.U., Shahbaz, N., Waheed, S., Mahmood, A., Shinwari, Z.K., Malik, R.N., 2016. Comparative health risk surveillance of heavy metals via dietary foodstuff consumption in different land-use types of Pakistan. *Hum. Ecol. Risk Assess. Int. J.* 22:168–186.
- Kidd, P., Barceló, J., Bernal, M.P., Navari-Izzo, F., Poschenrieder, C., Shilev, S., Clemente, R., Monterroso, C., 2009. Trace element behaviour at the root–soil interface: implications in phytoremediation. *Environ. Exp. Bot.* 67:243–259.
- Kong, D. 2017. *Synthesis and Characterization of Iron Oxides onto Cellulose Supports for Adsorption of Roxarsone,* M.S. Thesis, Department of Chemistry, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Lee, H.; Lee, E.; Kim, D.; Jang, N.; Jeong, Y.; Jon, S., 2006. Antibiofouling polymer-coated superparamagnetic iron oxide nanoparticles as potential magnetic resonance contrast agents for in vivo cancer imaging. *Journal of American Chemistry Society,* 128 (22):7383-7389.
- Lindsay, W.L., Norvell, W.A., 1978. Development of a DTPA Soil Test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper I. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 42(3):421-428.

- Lin, Y.C., Kao, C.H. 2006. Effect of excess nickel on starch mobilization in germinating rice grains. *J. Plant. Nutr.* 29: 1405-1412.
- Liu, G.D., Simonne, E.H., Li, Y. 2011. Nickel nutrition in plants. Gainesville: University of Florida: Institute of Food and Agricultural Sciences, <http://edis.ifas.ufl.edu> (Access:15.04.2015).
- L'Huillier, L., d'Auzac, J., Durand, M., Michaud-Ferrière, N. 1996. Nickel effects on two maize (*Zea mays*) cultivars: growth, structure, Ni concentration, and localization. *Can. J. Bot.* 74:1547-1554.
- López, M.A., Magnitski, S. 2011. Nickel: The last of the essential micronutrients. *Agron Colom* 29:1-9.
- Lo, I., Hu, J., Chen, G. 2009. Iron-based magnetic nanoparticles for removal of heavy metals from electroplating and metal-finishing wastewater. *Nanotechnologies for water environment applications*, 1st edn American Society of Civil Engineers (ASCE), USA:213.
- Maheshwari, R., Dubey, R.S. 2007. Nickel toxicity inhibits ribonuclease and protease activities in rice seedlings: protective effects of proline. *Plant. Growth. Regul.* 51: 231-243.
- Mansouri, T., Golchin, A. 2018. The effects of hematite nanoparticles on the concentrations of arsenic and some micronutrients of corn plant grown in contaminated soils. *J. Water. Soil. Conserv.*, 25(1): 1-34 (in Farsi). <http://jwsc.gau.ac.ir> DOI: 10.22069/jwsc.2017.12528.2723.
- Mathan, K.K., Amberger, A. 1975. Influence of iron on the uptake of phosphorus by maize. *J. Plant. Soil.* 46(2): 413-422.
- Matraszek, R., Hawrylak-Nowak, B., Chwil, S., Chwil, M., 2016. Macronutrient composition of nickel-treated wheat under different sulfur concentrations in the nutrient solution. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23:5902-5914.
- Meers, E., Samson, R., Tack, F.M.G., Ruttens, A., Vandegheuchte, M., Vangronsveld, J., Verloo, M.G. 2007. Phytoavailability assessment of heavy metals in soils by single extractions and accumulation by *Phaseolus vulgaris*. *J. Environ. Expe. Bot.*, 60:385-396.
- Mohammad Alizadeh, F., Panahpour, E., Nazarpour, A. 2018. The Study on the Level of Pollution and Spatial Distribution of Concentrations of Heavy Metals (Cr, Ni, Cu, Pb and Zn) in the Industrial City of Mah-Shahr. *JOURNAL OF NATURAL ENVIRONMENT (IRANIAN JOURNAL OF NATURAL RESOURCES)* 71(3):399-412.
- Mohammadpour, G.H., Karbassi, A., Baghvand, A. 2016. Pollution intensity of nickel in agricultural soil of Hamedan region. *Caspian J. Environ. Sci.* 14(1):15-24.
- Mosa, A., El-Banna, M.F., Gao, B., 2016. Biochar filters reduced the toxic effects of nickel on tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) grown in nutrient film technique hydroponic system. *J. Chem.* 149:254-262.
- Mysliwa-Kurdziel, B., Prasad, M.N.V., Strzalka, K., 2004. Photosynthesis in heavy metal stressed plants. In: Prasad, M.N.V. (Ed.), *Heavy Metal Stress in Plants: From Biomolecules to Ecosystems*. Narosa Publishing House, New Delhi India, 146-181.
- Nagajyoti, P.C., Lee, K.D., Srekanth, T.V.M. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ. Chem. Lett.* 8:199-216
- Nazir, R., Khan, M., Masab, M., Rehman, H.U., Rauf, N.U., Shahab, S., Ameer, N., Sajed, M., Ullah, M., Rafeeq, M., Shaheen, Z. 2015. Accumulation of heavy metals (Ni, Cu, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe) in the soil, water and plants and analysis of physico-chemical parameters of soil and water collected from Tanda Dam koh at. *J. Pharm. Sci. Res.* 7(3):89-97.
- Nazir, H., Asghar, H.N., Zahir, Z.A., Akhtar, M.J., Saleem, M., 2015. Judicious use of kinetin to improve growth and yield of rice in nickel contaminated soil. *Int. J. Phytorem.* <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2015.1094444>.
- Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum, P 181-196. In: Page, A.L. (Ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. Chemical and microbiological properties.* Agron. Monogr. 9. SSSA and ASA, Madison, WI.
- Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S., Dean, L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. United States Department of Agriculture. United States Government. Print Office, Washington, D.C.
- Olsson, R. T.; Samir, M. A.; Salazar-Alvarez, G.; Belova, L.; Ström, V.; Berglund, L. A.; Ikkala, O.; Nogues, J.; Gedde, U. W. 2010. Making flexible magnetic aerogels and stiff magnetic nanopaper using cellulose nanofibrils as templates. *Nature nanotechnology*, 5 (8):584-588.
- Pandey, N., Sharma, C.P. 2002. Effect of heavy metals Co²⁺, Ni²⁺ and Cd²⁺ on growth and metabolism of cabbage. *Plan. sci.* 163:753-758.
- Parida, B.K., Chhibba, I.M., Nayyar, V.K. 2003. Influence of nickelcontaminated soils on fenugreek (*Trigonella corniculata* L.) growth and mineral composition. *Sci. Hortic.* 98:113-119.
- Petrox, S., Nenov, V., Vasilev, S. 2002. Divalent heavy metal removal from water by complexation-ultrafiltration.- In: Proceedings of the 5th International Conference on membranes in drinking and industrial water production, Mulheim, Ruhr, Germany, 2002, pp. 245-252.
- Piccini, D.F., Malavolta, E. 1992. Effect of nickel on two common bean cultivars. *J. Plant. Nutr.* 15:2343-2350.
- Poorakbar, L., Ebrahimzade, N. 2012. Growth and physiological responses of *Zea mays* L. to Cu and Ni stress. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)* 103:147-159 (in Farsi).
- Rathor, G., Chopra, N., Adhikari. 2014. Effect of variation in Nickel concentration on Growth of Maize plant: A comparative over view for Pot and Hoagland culture. *Res. J.Chem. Sci.* 4(10):30-32.
- Rehman, M.Z., Rizwan, M., Ghafoor, A., Naeem, A., Ali, S., Sabir, M., Qayyum, M.F., 2015. Effect of inorganic amendments for in situ stabilization of cadmium in contaminated soil and its phyto-availability to wheat and rice under rotation. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 22:16897-16906.
- Reyhaniatabar, A., Eydi, M., Najafi, N. 2018. The Interactive Effects of Nickel and Iron on Some Agronomic Traits of Corn (*Zea mays* L.) in a Calcareous Soil. *Water. Soil. Sci.* 28(3):79-91 (in Farsi).
- Reyhaniatabar, A., Eydi, M., Pashapoor, N. 2017. Study on the Interaction Effects of Ni and Fe Co-Application on their Uptake by Corn Plant (*Zea mays* L.) in a Calcareous Soil. *Applied Soil Research.* 6(1):37-50. (in Farsi).
- Robertson, A.I., Meakin, M.E.R. 1980. The effect of nickel on cell division and growth of *Brachystegia spiciformis* seedlings. *J. Bot. Zimb.* 12:115-125.
- Sabouri, F., Fotovat, A., Astarae, A. R. and Khorasani, R. (2014). The effect of iron nanoparticles on chemical distribution of lead in a calcareous soil, 21(4), 99-118. (In Farsi).
- Samantaray, S., Rout, G.R., Das, P. 1997. Tolerance of rice to nickel in nutrient solution. *Biol. Plant.* 40:295-298.
- Schwertmann, U., Cornell, R.M., 2008. *Iron oxides in the laboratory: preparation and characterization.* John Wiley & Sons.

- Seregin, I.V., Kozhevnikova, A.D., Kazyumina, E.M., Ivanov, V.B. 2003. Nickel toxicity and distribution in maize roots. *Fiziol. Rast.* 50:793–800.
- Shafaei, Sh., A, Fotovat. and Khorsni, R. (2012). Effect of nanoscale zero-valent iron (nzvi) on heavy metals availability in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 26(3), 586-596. (In Farsi).
- Shen, Z., Som, A.M., Wang, F., Jin, F., McMillan, O., Al-Tabbaa, A., 2016. Long-term impact of biochar on the immobilisation of nickel (II) and zinc (II) and the revegetation of a contaminated site. *Sci. Total Environ.* 542:771–776.
- Sirhindi, G., Mir, M.A., Sharma, P., Gill, S.S., Kaur, H., Mushtaq, R., 2015. Modulatory role of jasmonic acid on photosynthetic pigments, antioxidants and stress markers of *Glycine max* L. under nickel stress. *Physiol. Mol. Biol. Plants* 21:559–565.
- Sposito, G., Lund, L., Chang, A., 1982. Trace Metal Chemistry in Arid-zone Field Soils Amended with Sewage Sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid Phases 1. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 46(2):260-264.
- Sreekanth, T.V.M., Nagajyothi, P.C., Lee, K.D., Prasad, T.N.V.K.V. 2013. Occurrence, physiological responses and toxicity of nickel in plants. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 10:1129–1140.
- Srivastava, S., 2012. Synthesis and characterization of iron oxide nanoparticle from FeCl₃ by using polyvinyl alcohol. *International Journal of Physical and Social Sciences*, 2(5)161-184.
- Tafvizi, M., Motesharezadeh, B. (2014). Effects of Lead on Iron, Manganese, and Zinc Concentrations in Different Varieties of Maize (*Zea mays*). *Comm. Soil. Sci. and Plant. Anal.* 45:1853-1865.
- Tang, T., and Miller, D.M. 1991. Growth and tissue composition of rice grown in soil treated with inorganic copper, nickel, and arsenic. *Comm. Soil. Sci. and Plant. Anal.* 22: 2037-2045.
- Tripathi., T. C. 1973. Plant responses to water stress. *Annual. Review. Plant Physiol.* 24: 519-570.
- Turina B. 1968. Absorption of selenium, sulfur, tellurium, potassium, magnesium, iron, nickel and chromium ions by plant roots, *Agronomy Glasgow*, 30:919-950.
- Vijayarangan, P., Dhanavel, D. 2005. Effects of nickel on chlorophyll content of black gram cultivars. *Plant Sciences.* 18: 253.
- Walkley, A., Black., I.A., 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science.* 37: 29-38.
- Yan, X., Zhang, Y., Zhu, K., Gao, Y., Zhang, D., Chen, G., Wang, C., Wei, Y. 2014. Enhanced electrochemical properties of TiO₂(B) nanoribbons using the styrene butadiene rubber and sodium carboxyl methyl cellulose water binder. – *J. Power Sources.* 246: 95-102.
- Yusuf, M., Fariduddin, Q., Hayat, S., Ahmad, A. 2011. Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 86(1):1–17. doi:10.1007/s00128-010-0171-1.
- Yusuf, M., Fariduddin, Q., Hayat, S., Hasan, S.A., Ahmad, A., 2010. Protective responses of 28 homobrassinolide in cultivars of *Triticum aestivum* with different levels of nickel. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 60, 68–76.
- Zafar, A., Eqani, S.A., Bostan, N., Cincinelli, A., Tahir, F., Shah, S.T., Hussain, A., Alamdar, A., Huang, Q., Peng, S., Shen, H., 2015. Toxic metals signature in the human seminal plasma of Pakistani population and their potential role in male infertility. *Environ. Geochem. Health* 37:515–527.