



دانشگاه گوارز و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره اول، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2017.12528.2723

## بررسی تأثیر نانوذرات هماتیت بر غلظت آرسنیک و برخی عناصر غذایی گیاه ذرت کشت‌شده در خاک‌های آلوده

\* طاهره منصوری<sup>۱</sup> و احمد گلچین<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان، استاد گروه علوم خاک، دانشگاه زنجان

تاریخ دریافت: ۹۶/۵/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱/۲۶

### چکیده

**سابقه و هدف:** آرسنیک یکی از شبه‌فلزات است که اخیراً به دلیل اثرات مزمن بر سلامتی انسان توجهات زیادی را به سوی خود جلب کرده است. قرار گرفتن طولانی‌مدت در معرض آرسنیک سبب بروز سرطان‌های پوست، شش و پروستات می‌شود. حضور آرسنیک در آب و خاک منجر به انتقال آن به بخش‌های مختلف گیاهان می‌شود. تاکنون تأثیر نانوذرات هماتیت بر غلظت آرسنیک در گیاهان کشت‌شده در مناطق آلوده بررسی نشده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی نانوذرات هماتیت در کاهش تحرک و گیاه فراهمی آرسنیک و تأثیر آن بر غلظت عناصر فسفر، آهن، روی و منگنز گیاه ذرت کشت‌شده در خاک‌های آلوده انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** بدین‌منظور یک آزمایش فاکتوریل با دو فاکتور سطوح نانوذرات هماتیت (صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی) و سطوح مختلف آرسنیک (صفر، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه انجام شد. خاک به‌صورت مصنوعی و با استفاده از نمک آرسنات سدیم ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) به سطوح مختلف آرسنیک آلوده و به‌مدت پنج ماه خوابانیده شد. نانوذرات هماتیت ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) از نیترات آهن سنتز شدند و خصوصیات آن‌ها به‌وسیله تکنیک‌های XRD، SEM و TEM بررسی گردید. پس از پایان زمان خوابانیدن، نانوذرات هماتیت به خاک‌های آلوده و غیرآلوده افزوده شد و پس از یک ماه غلظت آرسنیک قابل جذب خاک‌ها اندازه‌گیری شد. از گیاه ذرت به‌عنوان شاخص زیستی استفاده شد. پس از گذشت ۷۵ روز گیاهان برداشت و ارتفاع بوته، وزن خشک ریشه و بخش هوایی، غلظت آرسنیک، فسفر، آهن، روی و منگنز ریشه و بخش هوایی اندازه‌گیری شد.

**یافته‌ها:** مورفولوژی نانوذرات هماتیت به‌وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی و عبوری کروی تشخیص داده شد و میانگین اندازه آن‌ها ۳۰ نانومتر اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک، غلظت آرسنیک قابل جذب، غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت افزایش یافت. تجمع آرسنیک در ریشه بیش از بخش هوایی ذرت بود. آرسنیک سبب افزایش غلظت عناصر فسفر و منگنز و کاهش غلظت عناصر آهن و روی ریشه ذرت شد. همچنین در بخش هوایی غلظت فسفر، آهن و روی را کاهش ولی منگنز را افزایش داد. آرسنیک همچنین سبب

\* مسئول مکاتبه: [t.mansouri2010@gmail.com](mailto:t.mansouri2010@gmail.com)

کاهش انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی شد. نانوذرات هماتیت در همه سطوح آرسنیک خاک، غلظت آرسنیک قابل جذب و غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت را به طور معنی‌دار کاهش دادند. این نانوذرات با افزایش غلظت عناصر غذایی آهن و روی، کاهش تجمع آرسنیک، فسفر و منگنز ریشه گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده، سبب افزایش وزن خشک ریشه شدند و با افزایش غلظت عناصر فسفر، آهن و روی و کاهش تجمع آرسنیک و منگنز بخش هوایی سبب افزایش وزن خشک آن شدند، ولی در خاک‌های غیرآلوده با کاهش غلظت عناصر غذایی فسفر، آهن، روی و منگنز ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده منجر به کاهش وزن خشک گیاه شدند. مؤثرترین سطح مصرف نانوذرات هماتیت ۰/۲ درصد بود به طوری که مقدار کاهش غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک تیمار شده با ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت و ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم ۵۴/۶۴ و ۴۰/۲۰ درصد بود.

**نتیجه‌گیری:** 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 بر هم زدن تعادل عناصر غذایی رشد گیاه را کاهش 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. به طور کلی نتایج نشان دادند که نانوذرات هماتیت می‌تواند برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به آرسنیک به کار روند به شرط آن‌که پژوهش‌های تکمیلی در خصوص اثرات زیست‌محیطی آن‌ها صورت گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** آرسنیک، ذرت، عناصر غذایی، نانوذرات هماتیت

## مقدمه

آرسنیک (As) از جمله شبه‌فلزهای سمی است که آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی توسط آن شایع و نگران‌کننده است. علاوه بر عوامل زمین‌شناختی و مواد مادری خاک، فعالیت‌های انسانی مانند معدن‌کاوی و ذوب فلزات، احتراق زغال‌سنگ و استفاده گسترده از ترکیبات حاوی آرسنیک مانند حشره‌کش‌ها، آفت‌کش‌ها، محافظت‌کننده‌های چوب و غیره سبب تجمع مقادیر بالای این فلز در خاک‌ها شده است (۲۴). یافتن اصلاح‌کننده کارا و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه، جهت غیرمتحرک کردن آرسنیک در خاک، از جمله چالش‌هایی است که پژوهشگران محیط زیست، امروزه با آن مواجه هستند. راه‌کارهای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های آلی و معدنی بر یکی از دو اصل خارج نمودن آلاینده از خاک (استخراج) و یا غیرمتحرک کردن آن استوارند.

روش‌های غیرمتحرک کردن شامل جامدسازی<sup>۱</sup> یا تثبیت<sup>۲</sup> است. روش تثبیت شیمیایی بر مبنای کاهش تحرک و فراهمی آلاینده با استفاده از افزودنی‌های مختلف، استوار است. نانوآکسیدها و هیدروکسیدهای آهن از جمله موادی هستند که طی سال‌های اخیر به عنوان عوامل تثبیت‌کننده فلزات سنگین به کار برده شده‌اند (۲۶). اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در مقیاس نانو به دلیل داشتن سطح ویژه بیشتر و واکنش‌پذیری بالاتر، در قیاس با مقیاس میکرو ۵ تا ۱۰ برابر قدرت جذب و راندمان بیشتری برای حذف آلاینده داشته (۴۷)، بنابراین از پتانسیل بیشتری برای غیرمتحرک کردن آلاینده در خاک و آب زیرزمینی آلوده برخوردارند. جنونگ و همکاران (۲۰۰۷) اکسید آهن هماتیت و اکسید آلومینیوم کراندوم را جهت

1- Solidification

2- Stabilization

هماتیت کارایی زیادی در حذف فلزات از محلول‌های آبی دارد (۱۳). آرسنیک در خاک عمدتاً پیوسته به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن است (۱۵) و جذب آن به وسیله این کانی‌ها کنترل می‌شود، بنابراین به نظر می‌رسد افزودن اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به خاک روش مناسبی در پاک‌سازی خاک آلوده به آرسنیک به صورت درجا باشد. تاکنون تأثیر هماتیت به خصوص در مقیاس نانو بر غلظت آرسنیک در گیاه بررسی نشده است، بنابراین پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی نانوذرات هماتیت در کاهش تحرک و گیاه فراهمی آرسنیک و تأثیر آن بر غلظت عناصر آرسنیک، فسفر، آهن و روی در ذرت و رشد ذرت در خاک‌های آلوده انجام شد.

### مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش، یک نمونه خاک مرکب از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متری مزرعه تحقیقاتی دانشگاه زنجان تهیه شد. نمونه خاک در هوای آزاد خشک و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن مانند pH و EC در عصاره گل اشباع، بافت به روش هیدرومتری (۲۳)، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (۳۱)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری (۳۰)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (۳۳)، نیتروژن کل خاک با استفاده از هضم کج‌جلدال (۵)، فسفر فراهم خاک به روش اولسن (۱۷)، پتاسیم قابل جذب به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم (۱۷) و غلظت آرسنیک معادل کل با اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه (۱۹) و با استفاده از روش پلاسما جفت‌شده القایی-طیف‌سنجی نشر اتمی (ICP-OES) تعیین شد. به منظور سنتز نانوذرات هماتیت ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) از روش مادن و هوشلا (۲۷) استفاده شد. بدین ترتیب که ۶۰ میلی‌لیتر از محلول یک مولار نیترات آهن به آهستگی

حذف آرسنات از آب آشامیدنی به کار برده و بیان نمودند که هماتیت جاذب کاراتری در مقایسه با کراندوم است (۲۲). هارتلی و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از آزمایش‌های ستونی تأثیر افزودن یک درصد وزنی آهن، اکسید آهن گوتیت، سولفات‌های آهن (II) و (III) را بر تثبیت و کاهش تحرک آرسنیک در چند خاک آلوده را بررسی نموده و گزارش کردند که ترکیبات حاوی آهن، به خصوص آهن سه‌ظرفیتی، به خوبی غلظت آرسنیک در زه‌آب خروجی از ستون‌های خاک را کاهش دادند، به طوری که میزان کاهش غلظت آرسنیک در زه‌آب خروجی با افزودن سولفات آهن (II) و (III) و گوتیت به ترتیب ۸۷، ۹۲ و ۵۶ درصد بود در حالی که آهن فقط ۱۷ درصد آن را کاهش داد (۱۶). شیپلی و همکاران (۲۰۱۱) در یک آزمایش ستونی تأثیر نانو اکسیدهای مگنتیت و هماتیت بر پاک‌سازی آرسنیک را در یک خاک شنی مورد بررسی قرار دادند و بیان نمودند که این نانوذرات به خصوص نانوذرات هماتیت از پتانسیل بالایی در حذف آرسنیک برخوردار بود (۳۶). گارسیا-سانچز و همکاران (۲۰۰۲) دریافتند که اکسید آهن گوتیت ظرفیت بسیار بالایی در پاک‌سازی خاک‌های آلوده به آرسنیک داشت. آن‌ها گزارش کردند که مقدار آرسنیک قابل استخراج با آب در دو نمونه خاک معدن پس از مصرف گوتیت به ۷۹-۵۵ درصد و نزدیک به ۱۰۰ درصد کاهش داشت (۹). حافظ و یوسف (۲۰۱۲) تأثیر نانوذرات هماتیت را بر جذب مس، روی، کروم، کبالت و نیکل از محلول‌های آبی بررسی کرده و مشاهده نمودند که این نانوذرات پس از ۱۵ دقیقه تماس با کروم (III) ۹۵ درصد آن را جذب نمود. این پژوهشگران بیش‌ترین مقدار جذب مس، نیکل، کروم (III)، روی و کبالت (II) را به ترتیب ۱۰، ۴۲/۵، ۴۷/۵، ۴۰ و ۳۵ میلی‌گرم بر گرم نانوذرات هماتیت گزارش کردند و بیان نمودند که نانوذرات

از ظهور گیاهچه‌ها و اطمینان از استقرار آن‌ها، تعداد بوته در هر گلدان با عملیات تنک، به سه عدد کاهش یافت. گیاهان به مدت ۷۵ روز در شرایط گلخانه‌ای و تحت رطوبت ظرفیت مزرعه نگهداری شدند. با توجه به عدم کمبود عناصر غذایی خاک (جدول ۱) و همچنین جهت جلوگیری از وقوع واکنش‌های ناخواسته فقط کود اوره همراه با آب آبیاری به صورت یکسان و هفتگی به گلدان‌ها داده شد. پس از گذشت زمان مورد نظر، متوسط ارتفاع بوته در گلدان اندازه‌گیری شد و بخش هوایی (ساقه و برگ) و ریشه گیاهان برداشت شدند و ابتدا با آب شهری و سپس با آب مقطر شستشو داده شدند و به مدت ۷۲ ساعت در آن تهویه‌دار در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس توزین گردیدند. نمونه‌های گیاهی پس از آسیاب و الک شدن به وسیله اسید نیتریک غلیظ و آب اکسیژنه ۳۰ درصد در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد هضم شدند (۴۰). در عصاره‌های به دست آمده غلظت عنصر آرسنیک با دستگاه ICP-OES, Varian Vista-MPX، فسفر با دستگاه اسپکتروفوتومتر S2000 UV/Vis، آهن، روی و منگنز با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. این آزمایش در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل شامل دو فاکتور سطوح نانوذرات هماتیت (صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد) و سطوح مختلف آرسنیک (صفر، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) در سه تکرار انجام شد. تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چنددامنه‌ای دانکن صورت پذیرفت. نمودارها با نرم‌افزار Excel رسم شدند.

### نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

(دو قطره در ثانیه) بر روی ۷۵۰ میلی‌لیتر آب دیونیزه در حال جوش اضافه شد. سپس سوسپانسیون نانوذرات از روی حرارت برداشته شد و به منظور خنک شدن به مدت یک شب به حال خود رها گردید. سپس با آب دیونیزه دیالیز شد تا جایی که هدایت الکتریکی سوسپانسیون با آب دیونیزه برابر گردید. با خشک کردن انجمادی (Freeze drying) سوسپانسیون نانوذرات هماتیت به دست آمد. ساختار و خصوصیات نانوذرات سنتز شده با استفاده از پراش پرتو ایکس ( XRD, 40 Kv, 30 Ma, Cu K $\alpha$  Bruker, D4 ) (Advance, Germany)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Leo Supra, 50 VP, Carl Ziess, Germany) و میکروسکوپ الکترونی عبوری ( TEM, Philips - EM 208 TEM instrument with accelerating voltage of 100 kV ) تعیین گردید. به منظور آلوده‌سازی خاک با آرسنیک، مقادیر مناسب از نمک آرسنات سدیم ( $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) در آب مقطر معادل ظرفیت زراعی حل شد و به نمونه‌های خاک اضافه گردید و به خوبی مخلوط شد. سطوح مختلف آلودگی عبارت بودند از: ۰، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ و ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک در کیلوگرم خاک (۳). خاک‌های آلوده شده در داخل گلدان‌های پنج کیلوگرمی ریخته شدند و جهت رسیدن به تعادل نسبی چندین چرخه مرطوب کردن (تا رطوبت ظرفیت زراعی) و خشک کردن (تا رطوبت هواخشک) به مدت پنج ماه در گلخانه به آن‌ها اعمال گردید. سپس نانوذرات هماتیت ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) در مقادیر صفر، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد وزنی با خاک‌های دارای سطوح مختلف آرسنیک به‌طور یکنواخت مخلوط شدند (۴۲) و پس از گذشت یک ماه از افزودن جاذب‌ها به خاک‌ها، غلظت آرسنیک قابل جذب با استفاده از سولفات آمونیوم ۰/۰۵ مولار (۴۳) اندازه‌گیری شد. سپس تعداد ۶ عدد بذر ذرت رقم ماکسیما در هر گلدان کاشته شد. پس

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش.

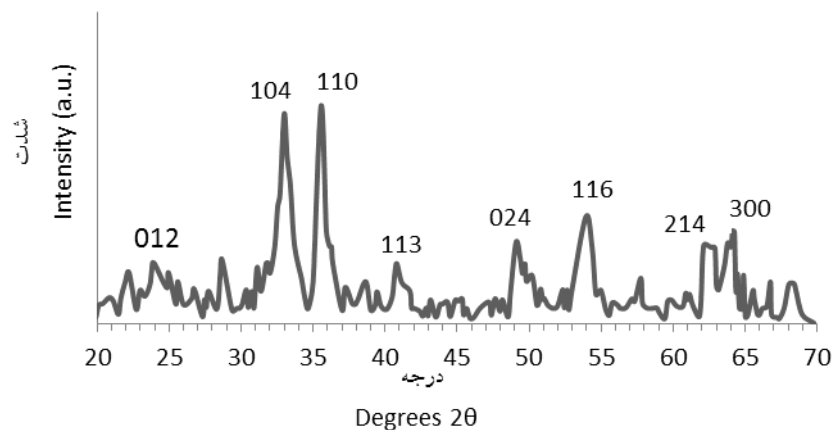
**Table 1. Selected physico-chemical properties of the soil used in the experiment.**

Value مقدار	Unit واحد	Parameter ویژگی
38	(%)	Saturation moisture رطوبت اشباع
16.2	(%)	Clay رس
55	(%)	Sand شن
28.8	(%)	Silt سیلت
7.3	-	pH
0.49	(dS/m)	EC of saturation paste عصاره گل اشباع
0.33	(%)	Organic Carbon کربن آلی
0.063	(%)	Total Nitrogen نیتروژن کل
13.45	(%)	Calcium Carbonate کربنات کلسیم
15	(mg/kg soil)	Concentration of available phosphorus غلظت فسفر قابل جذب
232.5	(mg/kg soil)	Concentration of available potassium غلظت پتاسیم قابل جذب
7.5	(mg/kg soil)	Concentration of available iron غلظت آهن قابل جذب
0.95	(mg/kg soil)	Concentration of available zinc غلظت روی قابل جذب
6	(mg/kg soil)	Concentration of available manganese غلظت منگنز قابل جذب
n.d	(mg/kg soil)	Concentration of available As غلظت آرسنیک قابل جذب
n.d	(mg/kg soil)	Concentration of total As آرسنیک کل

n.d. not detectable

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) نانوذرات هماتیت سنتز شده نشان داده شده است.

خصوصیات نانوذرات هماتیت ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) سنتز شده: در شکل ۱ آنالیز پراش پرتو X (XRD)، در شکل ۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و در

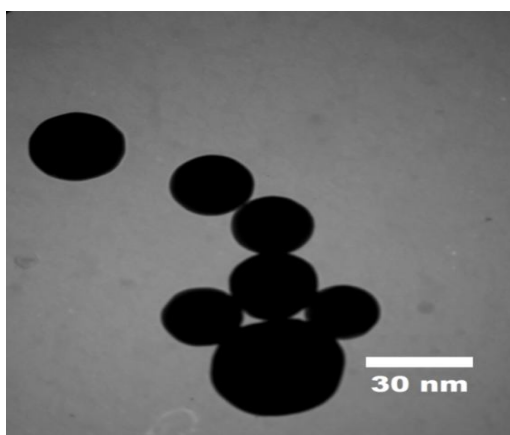


شکل ۱- الگوی XRD نانوذرات هماتیت.

**Figure 1. XRD pattern of hematite nanoparticles.**

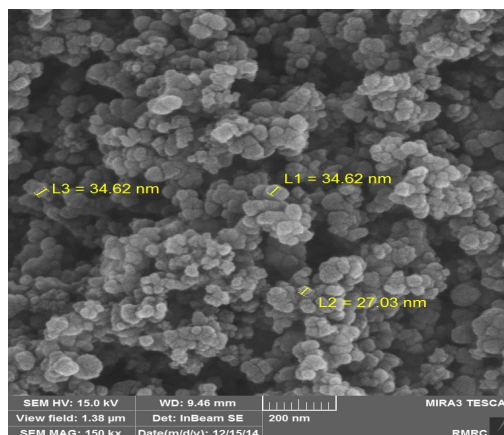
24.39° (012), 33.45° (104), 36.02° (110),  
41.15° (113), 49.80° (024), 54.36° (116),  
57.33° (122), 62.70° (214), 64.37° (300).

پیک‌های مشخصه هماتیت بدین شرح هستند که با منابع دیگر از جمله چن و لی (۲۰۱۰) مطابقت داشت (۶):



شکل ۳- تصویر TEM نانوذرات هماتیت.

Figure 3. TEM image of hematite nanoparticles.



شکل ۲- تصویر SEM نانوذرات هماتیت.

Figure 2. SEM image of hematite nanoparticles.

۴). متوسط ارتفاع بوته گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده به سطوح ۶ و ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم نسبت به گیاهان کشت شده در خاک غیرآلوده به ترتیب ۳۲/۵۲ و ۵۰/۵۷ درصد افزایش و کاهش یافت. جهان و همکاران (۲۰۰۳) بیان نمودند که هنگامی‌که گیاه برنج در معرض مقادیر بالاتر از ۲۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک قرار می‌گیرد علائم سمیت از جمله کاهش ارتفاع در آن‌ها بروز می‌کند (۲۱). شایبور و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی برهم‌کنش آرسنیک و آهن مشاهده کردند که با افزودن ۳۳/۵ میکرومول در لیتر به محیط کشت گیاه جو، ارتفاع بخش هوایی آن کاهش یافت (۳۴).

مورفولوژی نانوذرات هماتیت به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی کروی تشخیص داده شد و میانگین اندازه آن‌ها ۳۲/۶۹ نانومتر اندازه‌گیری گردید. تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری کروی بودن نانوذرات هماتیت را تأیید نموده و نشان می‌دهد که اندازه ذرات آن عمدتاً کم‌تر از ۳۰ نانومتر است.

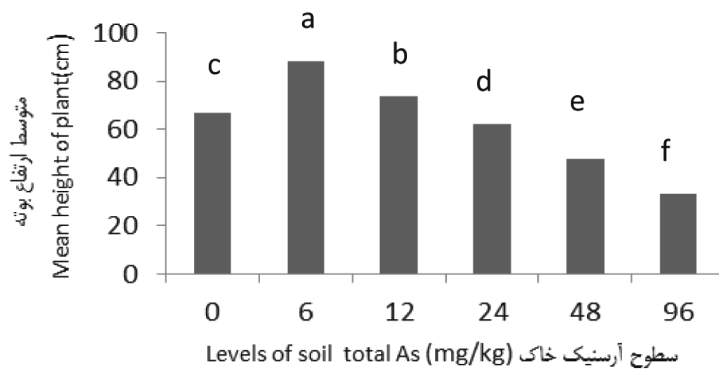
**متوسط ارتفاع بوته:** اثر سطوح آرسنیک کل خاک بر متوسط ارتفاع بوته گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک تا ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، متوسط ارتفاع بوته گیاه نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش و پس از آن کاهش یافت (شکل

جدول ۲- اثرات اصلی و متقابل سطوح مختلف نانوذرات هماتیت و آرسنیک کل خاک بر متوسط ارتفاع بوته و وزن‌های خشک ریشه و بخش هوایی ذرت.

**Table 2. Effects of hematite nanoparticles application rates, levels of soil total As and interactive effects of these factors on mean height and dry weights of root and aerial parts of the corn plant.**

میانگین مربعات Mean of squares				
وزن خشک بخش هوایی Dry weight of aerial parts	وزن خشک ریشه Dry weight of root	متوسط ارتفاع بوته Mean height of plant	درجه آزادی Degree of freedom	منبع تغییرات Sources of variation
538.55**	119.12**	771.72**	3	سطوح نانوذرات هماتیت Hematite nanoparticles application rates
5846.27**	1944.02**	4565.63**	5	سطوح آرسنیک کل خاک Levels of soil total As
96.26**	46.22**	237.36**	15	سطوح نانوذرات هماتیت * سطوح آرسنیک کل خاک Hematite nanoparticles application rates * levels of soil total As
11.56	2.04	12.45	48	خطا Error
7.61	6.02	5.70	-	ضریب تغییرات CV(%)

\*\*P < 0.01

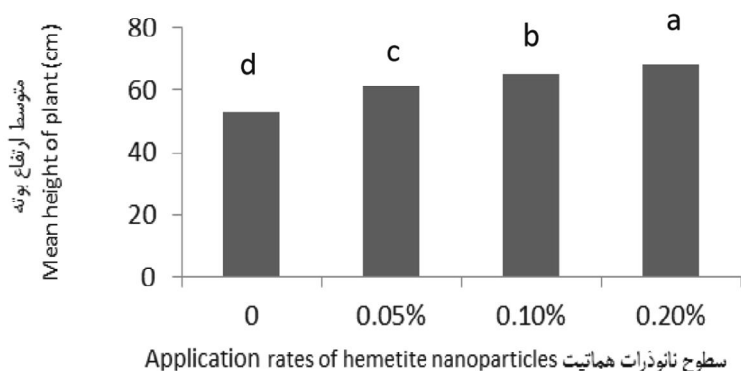


شکل ۴- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر متوسط ارتفاع بوته ذرت.

**Figure 4. Effects of levels of soil total As on mean height of corn plant.**

افزایش سطح کاربرد آن میزان افزایش، افزایش یافت (شکل ۵). مقدار افزایش متوسط ارتفاع بوته با کاربرد سطوح ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت به ترتیب ۱۶، ۲۲/۷۷ و ۲۸/۵۴ درصد بود.

اثر سطوح نانوذرات هماتیت بر متوسط ارتفاع بوته گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). کاربرد نانوذرات هماتیت سبب افزایش معنی‌دار متوسط ارتفاع بوته گیاه شد و با



شکل ۵- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر متوسط ارتفاع بوته ذرت.

Figure 5. Effects of hematite nanoparticles application rates on mean height of corn plant.

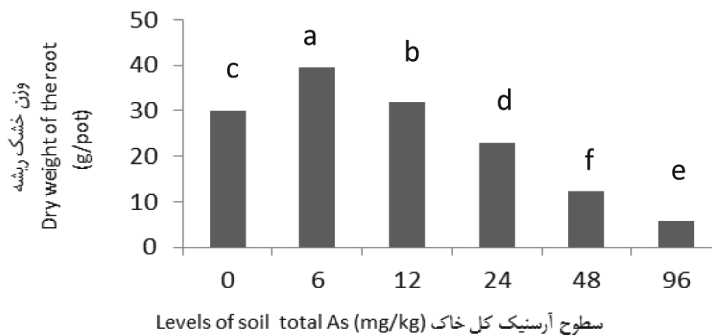
بود (جدول ۲). با افزایش غلظت آرسنیک خاک کل تا سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاهان به‌طور معنی‌داری افزایش و پس از آن کاهش یافت (شکل‌های ۶ و ۷). وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت‌شده در خاک آلوده به ۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم نسبت به گیاهان کشت‌شده در خاک غیرآلوده به ترتیب ۳۱/۸۴ و ۱۹/۹۵ درصد افزایش و در خاک دارای سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم ۸۰/۸۸ و ۸۱ درصد کاهش یافت. گزارش شده است که فعالیت آنزیم‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهان در حضور آرسنیک کاهش می‌یابد (۳۳). آرسنیک با تولید گونه‌های اکسیژن‌دار فعال<sup>۱</sup> مانند پراکسید هیدروژن در گیاهان، سبب آسیب به DNA، پروتئین‌ها و لیپیدها می‌شود (۳۸). گالز (۲۰۰۲) بیان نمود که بهم خوردن تعادل تغذیه عناصر معدنی رایج‌ترین نشانه سمیت آرسنیک و مهم‌ترین عامل کاهش عملکرد گیاهان است (۱۰). بنابراین، دلیل دیگر کاهش وزن خشک ریشه و بخش هوایی در سطوح بالای آرسنیک خاک، کاهش رشد آن‌ها در اثر کاهش غلظت عناصر غذایی مورد نیاز گیاه از جمله آهن و روی در آن‌ها، افزایش بیش از حد غلظت فسفر ریشه و منگنز بخش هوایی در نتیجه سمیت

اثر متقابل سطوح نانوذرات هماتیت و سطوح آرسنیک کل خاک بر متوسط ارتفاع بوته گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). متوسط ارتفاع بوته گیاهان کشت شده در خاک‌های فاقد نانوذرات هماتیت با افزایش سطح آرسنیک کل خاک کاهش یافت، ولی در خاک‌های دارای سطوح ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد این نانوذرات به ترتیب با افزایش سطح آرسنیک خاک تا ۱۲، ۲۴ و ۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم، افزایش و سپس کاهش یافت (جدول ۳). با افزایش سطح کاربرد نانوذرات هماتیت متوسط ارتفاع بوته گیاهان کشت‌شده در خاک‌های غیرآلوده کاهش ولی در خاک‌های آلوده افزایش یافت (جدول ۳). بیش‌ترین ارتفاع بوته به مقدار ۹۹ سانتی‌متر از گیاهان کشت شده در خاک‌های دارای سطح ۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت و کم‌ترین ارتفاع آن به مقدار ۱۹/۱۳ سانتی‌متر از گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده به سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و فاقد نانوذرات هماتیت به‌دست آمد. وزن خشک ریشه و بخش هوایی ذرت: اثر سطوح آرسنیک کل خاک بر وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار



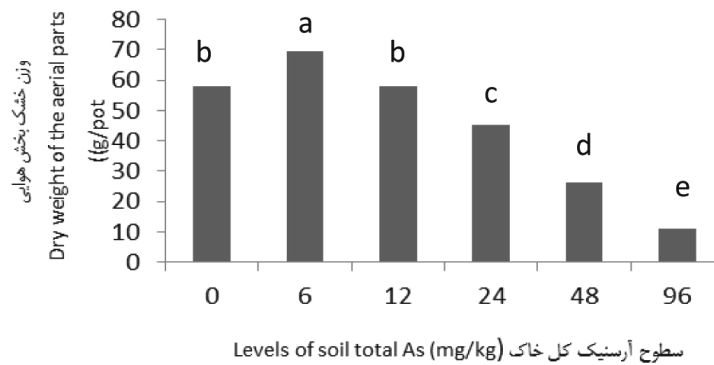
ہوایی گیاه و متعاقباً رشد و وزن خشک آن کاهش می‌یابد (۳۲). گالز و همکاران (۲۰۰۵) بیان نمودند که مقادیر بالای آرسنیک در خاک برای تمامی گیاهان سمی است و سبب بروز کلروز، ممانعت از رشد و در نهایت مرگ آن‌ها می‌شود (۱۱). عابدین و همکاران (۲۰۰۲) نیز کاهش قابل‌ملاحظه در بیومس ریشه برنج را در غلظت ۸ میلی‌گرم بر لیتر آرسنیک گزارش نمودند (۱). لیو و همکاران (۲۰۱۲) گزارش نمودند که ارتفاع و وزن خشک گندم در غلظت ۶۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم ۷/۸ و ۲۴/۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت ولی با افزایش غلظت آرسنیک به بیش از ۸۰ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (۲۵).

آرسنیک است، ولی در سطوح ۶ و ۱۲ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک به‌دلیل بیش‌تر بودن غلظت فسفر بخش هوایی و آهن و روی ریشه و بخش هوایی رشد گیاهان نسبت به خاک‌های غیرآلوده (به‌ترتیب شکل‌های ۱۷، ۲۰، ۲۱، ۲۴ و ۲۵) بهتر بوده، بنابراین ارتفاع و وزن خشک بیش‌تری داشته است. آرسنات از نظر شیمیایی شبیه فسفات است و از عرض‌غشای پلاسما از طریق سیستم انتقال فسفر عبور داده می‌شود و درون سیتوپلاسم، با فسفات برای جایگزین شدن با فسفات در ساخت ATP رقابت و ADP-As تولید می‌کند که منجر به قطع جریان انرژی در سلول‌ها و در نهایت مرگ آن‌ها می‌شود (۳۷). با کاهش غلظت آهن گیاهان کشت داده شده در خاک‌های آلوده به آرسنیک، ظرفیت فتوسنتز در بخش



شکل ۶- تأثیر سطوح آرسنیک خاک بر وزن خشک ریشه ذرت.

Figure 6. Effects of levels of soil total As on dry weight of the root.

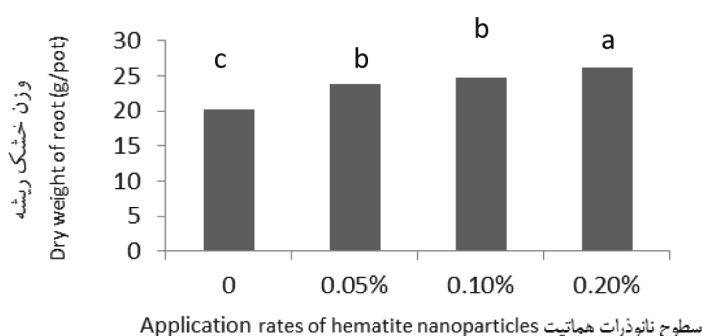


شکل ۷- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر وزن خشک بخش هوایی ذرت.

Figure 7. Effects of levels of soil total As on dry weight of the aerial parts.

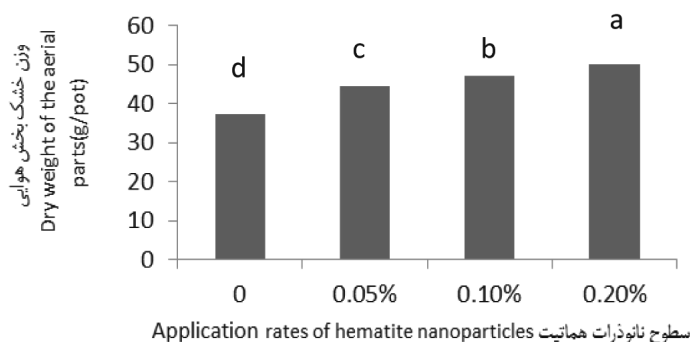
بخش هوایی کاهش و غلظت فسفر، آهن و روی آن افزایش یافت و از تجمع زیاد منگنز در این اندام ممانعت به عمل آمد که منجر به رشد بیش‌تر و افزایش وزن خشک شدند. عناصر کم‌مصرف از جمله آهن و روی عناصری ضروری برای حیات گیاهان هستند. به‌عنوان مثال می‌توان به رابطه بین وجود مقدار کافی روی در گیاه و تولید آنزیم کربونیک‌انیدراز اشاره کرد. این آنزیم نقش مهمی در فتوسنتز گیاه دارد و سبب افزایش تولید کربوهیدرات‌ها می‌شود. آهن نیز در مسیرهای بیوستتزی متعددی در گیاه از جمله در ساخت کلروفیل، تیلاکوئید و نمو کلروپلاست شرکت دارد (۴۶)، بنابراین استنباط می‌شود که کاربرد نانوذرات هماتیت با افزایش غلظت آهن و روی منجر به افزایش شدت فتوسنتز گیاه می‌شود. بنابراین کربوهیدرات بیش‌تری به ریشه‌ها منتقل شده و رشد آن زیاد می‌شود.

اثر سطوح نانوذرات هماتیت بر وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). کاربرد نانوذرات هماتیت سبب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه شد و با افزایش سطح کاربرد آن میزان افزایش، افزایش یافت (شکل‌های ۸ و ۹). مقدار افزایش وزن خشک ریشه با کاربرد سطوح ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۲ و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت به‌ترتیب ۱۸/۱۳، ۲۲/۷۰ و ۲۹/۹۲ درصد و میزان افزایش وزن خشک بخش هوایی به‌ترتیب ۱۹/۱، ۲۶/۸۴ و ۳۴/۱۴ درصد بود. با کاربرد نانوذرات هماتیت غلظت آرسنیک خاک و ریشه کاهش یافت، همچنین از تجمع زیاد فسفر و منگنز در ریشه ممانعت به عمل آمد و غلظت آهن و روی نیز افزایش یافت که این اوامر موجبات رشد بیش‌تر و افزایش وزن خشک آن را فراهم آورده است. همچنین با کاربرد نانوذرات هماتیت غلظت آرسنیک



شکل ۸- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر وزن خشک ریشه ذرت.

Figure 8. Effects of hematite nanoparticles application rates on dry weight of the root.



شکل ۹- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر وزن خشک بخش هوایی ذرت.

Figure 9. Effects of hematite nanoparticles application rates on dry weight of the aerial parts.

افزایش یافت (جدول ۳). این نانوذرات با کاهش غلظت عناصر غذایی فسفر، آهن، روی و منگنز ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های غیرآلوده، وزن خشک آن‌ها را کاهش دادند ولی با افزایش غلظت عناصر غذایی آهن و روی، کاهش تجمع زیاد و سمیت آرسنیک، فسفر و منگنز در ریشه گیاهان کشت‌شده در خاک‌های آلوده، وزن خشک ریشه را افزایش دادند. همچنین با افزایش غلظت عناصر غذایی فسفر، آهن و روی و کاهش تجمع زیاد آرسنیک و منگنز در بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده سبب افزایش وزن خشک آن شدند. بیشترین وزن خشک ریشه و بخش هوایی به‌ترتیب به مقادیر ۴۳ و ۷۶/۵۶ گرم در گلدان از گیاهان کشت‌شده در خاک‌های دارای سطح ۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت و کمترین وزن خشک آن‌ها به مقادیر ۱/۵ و ۳/۱۳ گرم در گلدان از گیاهان کشت‌شده در خاک‌های آلوده به سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم و فاقد نانوذرات هماتیت به‌دست آمد.

اثر متقابل سطوح نانوذرات هماتیت و سطوح آرسنیک کل خاک بر وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). تغییرات وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در تیمارهای مختلف بدین‌شرح بود: در خاک‌های فاقد نانوذرات هماتیت با افزایش سطح آرسنیک خاک کاهش یافتند، در خاک‌های دارای سطح ۰/۰۵ درصد نانوذرات هماتیت به‌ترتیب با افزایش سطح آرسنیک خاک تا ۱۲ و ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و سپس کاهش یافتند، در خاک‌های دارای سطح ۰/۱ درصد نانوذرات هماتیت با افزایش سطح آرسنیک خاک تا ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و سپس کاهش یافتند، در خاک‌های دارای سطح ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت با افزایش سطح آرسنیک خاک تا ۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و سپس کاهش یافتند (جدول ۳).

با افزایش سطح کاربرد نانوذرات هماتیت وزن خشک ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های غیرآلوده کاهش و در خاک‌های آلوده

جدول ۳- اثر متقابل سطوح مختلف نانوذرات هماتیت و سطوح مختلف آرسنیک کل خاک بر متوسط ارتفاع بوته و وزن‌های خشک ریشه و بخش هوایی ذرت.

**Table 3. Interactive effects of hematite nanoparticles application rates and levels of soil total As on mean height and dry weights of root and aerial parts of the corn plant.**

وزن خشک بخش هوایی Dry weight of aerial parts (g/pot)	وزن خشک ریشه Dry weight of root (g/pot)	متوسط ارتفاع بوته Mean height of plant (cm)	سطوح آرسنیک کل خاک Levels of soil total As (mg/ kg)	سطوح نانوذرات هماتیت Application rates of hematite nanoparticles
65.432 <sup>cd</sup>	37.037 <sup>b</sup>	81.967 <sup>dc</sup>	0	0
58.040 <sup>fg</sup>	33.087 <sup>dc</sup>	73.167 <sup>ef</sup>	6	
47.60 <sup>jk</sup>	25.851 <sup>ef</sup>	61.230 <sup>gh</sup>	12	
34.585 <sup>lm</sup>	16.801 <sup>i</sup>	50.003 <sup>jk</sup>	24	
14.615 <sup>op</sup>	6.798 <sup>lm</sup>	33.027 <sup>n</sup>	48	
3.130 <sup>q</sup>	1.502 <sup>n</sup>	19.127 <sup>o</sup>	96	0.05%
59.165 <sup>efg</sup>	30.998 <sup>e</sup>	68.153 <sup>f</sup>	0	
69.352 <sup>bc</sup>	40.603 <sup>a</sup>	87.70 <sup>bc</sup>	6	
57.470 <sup>fgh</sup>	31.719 <sup>e</sup>	72.233 <sup>ef</sup>	12	
44.20 <sup>k</sup>	21.95 <sup>h</sup>	61.433 <sup>gh</sup>	24	
25.70 <sup>n</sup>	12.302 <sup>k</sup>	47.137 <sup>kl</sup>	48	
10.186 <sup>p</sup>	5.453 <sup>m</sup>	32.85 <sup>n</sup>	96	

ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

وزن خشک بخش هوایی Dry weight of aerial parts (g/pot)	وزن خشک ریشه Dry weight of root (g/pot)	متوسط ارتفاع بوته Mean height of plant (cm)	سطوح آرسنیک کل خاک Levels of soil total As (mg/ kg)	سطوح نانوذرات هماتیت Application rates of hematite nanoparticles
55.333 <sup>gh</sup>	26.882 <sup>gf</sup>	61.477 <sup>gh</sup>	0	
73.895 <sup>ab</sup>	41.404 <sup>a</sup>	93.427 <sup>ab</sup>	6	
62.003 <sup>def</sup>	34.204 <sup>cd</sup>	78.243 <sup>de</sup>	12	0.1%
49.105 <sup>jki</sup>	24.863 <sup>g</sup>	66.907 <sup>fg</sup>	24	
29.480 <sup>nm</sup>	14.093 <sup>jk</sup>	53.133 <sup>ijk</sup>	48	
13.550 <sup>op</sup>	7.103 <sup>lm</sup>	37.88 <sup>mn</sup>	96	
51.702 <sup>hij</sup>	25.003 <sup>g</sup>	55.0 <sup>ij</sup>	0	
76.562 <sup>a</sup>	43.017 <sup>a</sup>	99.0 <sup>a</sup>	6	
64.785 <sup>cde</sup>	36.096 <sup>bc</sup>	84.033 <sup>dc</sup>	12	0.2%
53.703 <sup>ghi</sup>	28.003 <sup>f</sup>	71.467 <sup>f</sup>	24	
35.91 <sup>l</sup>	16.298 <sup>ij</sup>	58.003 <sup>hi</sup>	48	
17.0 <sup>o</sup>	8.877 <sup>l</sup>	41.93 <sup>lm</sup>	96	

درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش سطح آرسنیک کل خاک، غلظت آرسنیک قابل جذب به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل ۱۰).

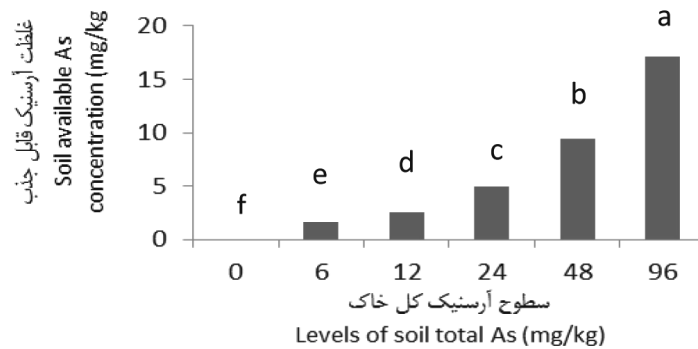
غلظت آرسنیک قابل جذب خاک: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطوح نانوذرات هماتیت، سطوح آرسنیک کل و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت آرسنیک قابل جذب خاک در سطح احتمال یک

جدول ۴- اثرات اصلی و متقابل نانوذرات هماتیت و سطوح مختلف آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک قابل جذب خاک، غلظت‌های آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت.

Table 4. Effects of hematite nanoparticles application rates, levels of soil total As and the interactive effects of these factors on concentration of soil available As and concentrations of As in root and aerial parts of the corn plant.

میانگین مربعات Mean of squares				
غلظت آرسنیک ریشه Concentration of As in aerial parts	غلظت آرسنیک ریشه Concentration of As in root	غلظت آرسنیک قابل جذب خاک Concentration of soil available As	درجه آزادی Degree of freedom	منبع تغییرات Sources of variation
411.36**	13310.11**	104.21**	3	سطوح نانوذرات هماتیت Hematite nanoparticles application rates
3498.61**	122693.87**	486.84**	5	سطوح آرسنیک کل خاک Levels of soil total As
48.83**	3773.96**	26.04**	15	سطوح نانوذرات هماتیت * سطوح آرسنیک کل خاک Hematite nanoparticles application rates * levels of soil total As
1.34	16.91	0.117	48	خطا Error
7.19	5.45	5.75	-	ضریب تغییرات CV(%)

\*\*P < 0.01

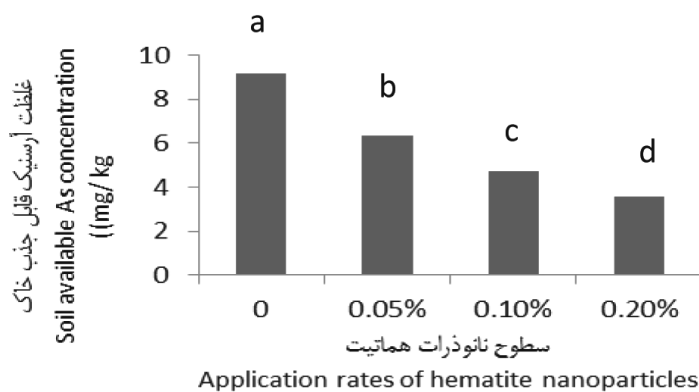


شکل ۱۰- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک قابل جذب.

Figure 10. Effects of levels of soil total As on the concentration of soil available As.

بیشترین غلظت آن مربوط به تیمار شاهد (بدون کاربرد جاذب) بود. مقدار کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب خاک با کاربرد سطح ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت به ترتیب ۳۰/۴۷، ۴۸/۱ و ۶۰/۸۰ درصد بود.

کاربرد نانوذرات هماتیت سبب کاهش معنی‌دار غلظت آرسنیک قابل جذب خاک شد و با افزایش سطح کاربرد آن میزان کاهش افزایش یافت (شکل ۱۱). کم‌ترین غلظت آرسنیک قابل جذب مربوط به سطح ۰/۲ درصد جاذب نانوذرات هماتیت و



شکل ۱۱- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت آرسنیک قابل جذب.

Figure 11. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of soil available As.

اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم عمدتاً به صورت اختصاصی و از طریق مکانیسم تبادل لیگاندی و تشکیل کمپلکس درون‌کره‌ای می‌باشد (۳۵). آرسنات از طریق واکنش تبادل لیگاندی با

نانوذرات هماتیت به دلیل دارا بودن سطح ویژه و مکان‌های تبادل یونی زیاد، واکنش‌پذیری و کارایی بالایی در حذف فلزات سنگین دارند. بررسی‌های صورت‌گرفته نشان داده‌اند که جذب آرسنات توسط

سطوح پایین آن، توانایی بیشتری در کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب خاک داشتند، به طوری که مقدار کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب در سطح ۰/۲ درصد این نانوذرات و سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک ۶۵/۳۱ درصد، سطح ۴۸ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک ۶۰/۳۵ درصد بود ولی در سطح ۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم خاک کاربرد سطح مشابه این نانوذرات غلظت آرسنیک قابل جذب را ۴۹/۷۸ درصد کاهش داد (جدول ۵). با کاربرد سطوح ۰/۱ و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت غلظت آرسنیک قابل جذب در خاک‌های با غلظت بالاتر آرسنیک نسبت به خاک‌های دارای سطوح پایین‌تر آن که فاقد جاذب بودند یا سطح ۰/۰۵ درصد جاذب در آن‌ها به کار برده شده بود، کاهش معنی‌دار یافت. به عنوان مثال غلظت آرسنیک قابل جذب خاک در سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت به طور معنی‌داری کم‌تر از سطح ۴۸ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک و ۰/۰۵ درصد این نانوذرات و همچنین تیمار بدون کاربرد جاذب بود. باقریفام و همکاران (۲۰۱۴) در بررسی غیرمتحرک نمودن آرسنیک توسط اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز در خاک آهکی دریافتند که افزودن این جاذب‌ها به خاک آلوده، به شدت جزء قابل دسترس آرسنیک را کاهش داد (۴).

گروه‌های اکسیژن اکسید آهن هماتیت، به شکل پیوندهای تک‌دندانه‌ای- تک‌هسته‌ای در سطوح با بار کم، دودندانه‌ای- دوهسته‌ای در سطوح با بار متوسط و زیاد و در موارد نادر به شکل سه‌دندانه‌ای- چندهسته‌ای جذب آن می‌شود (۲۳).

مطالعات آزمایشگاهی با دستگاه‌های EXAFS<sup>۱</sup> و FTIR<sup>۲</sup> شواهد مستقیمی از تشکیل کمپلکس‌های درون‌کره‌ای آرسنات و آرسنیت با اکسیدهای آهن ارائه داده است (۳۹). زانگ و همکاران (۲۰۱۱) نیز با استفاده از تکنیک EXAFS نشان دادند که آرسنات عمدتاً در اثر تشکیل کمپلکس‌های درون کره‌ای تک‌هسته‌ای و دوهسته‌ای جذب سطح نانوذرات مگنتیت می‌شود (۴۸). مکانیسم جذب غیراختصاصی (الکترواستاتیکی) آرسنیک، به مقادیر pH خاک و نقطه صفر بار الکتریکی (Zero Point of Charge) سطح جاذب مربوط می‌گردد (۲). با توجه به این‌که نقطه صفر بار الکتریکی اکسید آهن هماتیت در محدوده ۷-۶/۵ بوده (۴۵) و pH خاک مورد مطالعه ۸ است، بنابراین امکان جذب آرسنات بر سطح آن به صورت الکترواستاتیکی اندک است. مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که تشکیل کمپلکس‌های درون‌کره‌ای مکانیسم اصلی جذب آرسنات بر سطح اکسیدهای آهن می‌باشد (۳۵).

اثر متقابل سطوح نانوذرات هماتیت و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک قابل جذب خاک نشان داد که با افزایش سطح کاربرد نانوذرات هماتیت و کاهش سطح آرسنیک کل خاک مقدار آرسنیک قابل جذب خاک کاهش یافت (جدول ۵). نانوذرات هماتیت در سطوح بالاتر آرسنیک کل خاک نسبت به

1- Extended x-ray absorption fine structure

2- Fourier transform infrared spectroscopy

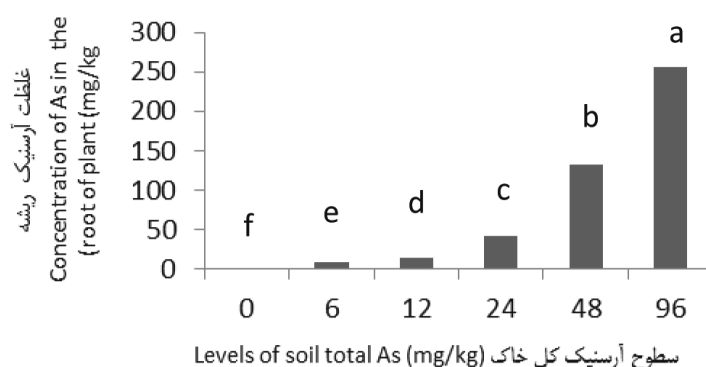
جدول ۵- اثر متقابل نانوذرات هماتیت و سطوح مختلف آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک قابل جذب، غلظت‌های آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت.

**Table 5. The interactive effects of hematite nanoparticles application rates and levels of soil total As on the concentration of soil available As and concentrations of As in the root and aerial parts of the corn plant.**

غلظت آرسنیک بخش هوایی Concentration of As in the aerial part	غلظت آرسنیک ریشه Concentration of As in the root	غلظت آرسنیک قابل جذب خاک Concentration of soil available As of (mg/ kg)	سطوح آرسنیک کل خاک Levels of soil total As (mg/ kg)	سطوح نانوذرات هماتیت Application rates of hematite nanoparticles
0 <sup>m</sup>	0 <sup>p</sup>	0 <sup>o</sup>	0	0
6.838 <sup>i</sup>	12.861 <sup>nm</sup>	2.27 <sup>kl</sup>	6	
10.389 <sup>h</sup>	20.703 <sup>l</sup>	3.64 <sup>j</sup>	12	
21.506 <sup>g</sup>	67.256 <sup>i</sup>	6.908 <sup>g</sup>	24	
39.79 <sup>c</sup>	197.29 <sup>d</sup>	14.683 <sup>c</sup>	48	
59.556 <sup>a</sup>	383.40 <sup>a</sup>	27.3 <sup>a</sup>	96	
0 <sup>m</sup>	0 <sup>p</sup>	0 <sup>o</sup>	0	0.05%
3.505 <sup>kl</sup>	8.569 <sup>mno</sup>	1.79 <sup>lm</sup>	6	
6.336 <sup>ij</sup>	14.582 <sup>lm</sup>	2.52 <sup>k</sup>	12	
12.256 <sup>h</sup>	39.747 <sup>j</sup>	5.34 <sup>h</sup>	24	
27.608 <sup>e</sup>	131.823 <sup>f</sup>	10.07 <sup>e</sup>	48	
44 <sup>b</sup>	252.265 <sup>b</sup>	18.38 <sup>b</sup>	96	
0 <sup>m</sup>	0 <sup>p</sup>	0 <sup>o</sup>	0	0.1%
2.748 <sup>kl</sup>	6.623 <sup>nop</sup>	1.53 <sup>nm</sup>	6	
4.650 <sup>jk</sup>	12.194 <sup>mno</sup>	2.12 <sup>klm</sup>	12	
11.501 <sup>h</sup>	31.314 <sup>k</sup>	4.26 <sup>i</sup>	24	
25.064 <sup>f</sup>	107.533 <sup>g</sup>	7.39 <sup>g</sup>	48	
38.234 <sup>c</sup>	217.58 <sup>c</sup>	13.15 <sup>d</sup>	96	
0 <sup>m</sup>	0 <sup>p</sup>	0 <sup>o</sup>	0	0.2%
2.273 <sup>l</sup>	4.764 <sup>op</sup>	1.14 <sup>n</sup>	6	
4.062 <sup>kl</sup>	10.378 <sup>mno</sup>	1.67 <sup>lmn</sup>	12	
10.547 <sup>h</sup>	27.525 <sup>k</sup>	3.38 <sup>j</sup>	24	
21.028 <sup>g</sup>	89.584 <sup>h</sup>	5.82 <sup>h</sup>	48	
35.62 <sup>d</sup>	173.92 <sup>d</sup>	9.47 <sup>f</sup>	96	

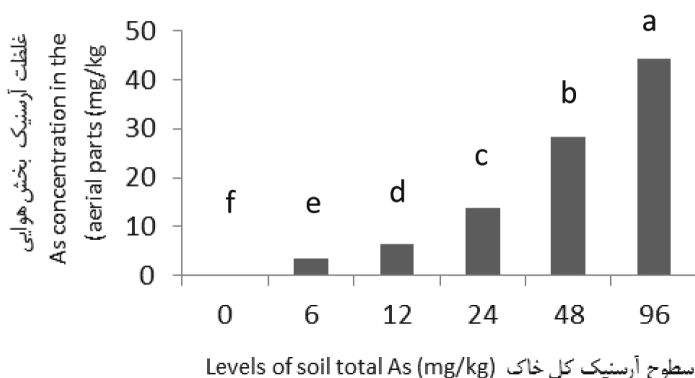
کل بر کیلوگرم متغیر بود. گالز و همکاران (۲۰۰۵) نیز افزایش غلظت آرسنیک ریشه گیاهان ذرت، آفتابگردان و کلزا را با افزایش غلظت آرسنیک در خاک گزارش نمودند (۱۱). دلیل این امر را می‌توان با کاهش وزن‌های خشک ریشه و بخش هوایی ذرت و در نتیجه افزایش غلظت آرسنیک این اندام‌ها نیز توجیه نمود. تجمع آرسنیک در ریشه بیش‌تر از بخش هوایی بود. نتیجه مشابه را وو و همکاران (۲۰۱۵) گزارش نمودند (۴۴).

غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت: اثر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش سطح آرسنیک کل خاک، غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). غلظت آرسنیک از صفر در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت‌شده در خاک غیرآلوده، تا ۲۵۶/۸ و ۴۴/۳۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت‌شده خاک آلوده به ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک



شکل ۱۲- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک ریشه ذرت.

Figure 12. Effects of levels of soil total As on the concentrations of As in the root.



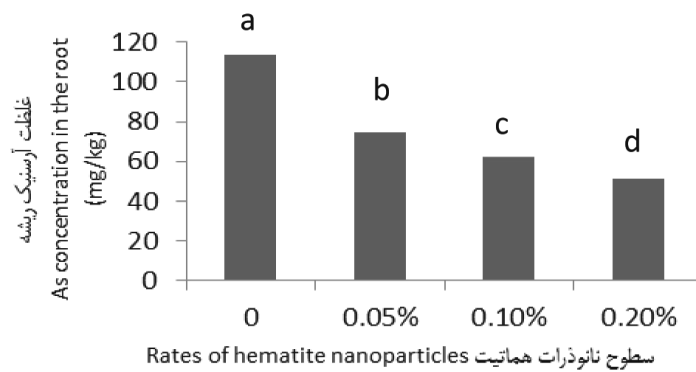
شکل ۱۳- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک بخش هوایی ذرت.

Figure 13. Effects of levels of soil total As on the concentration of As in the aerial parts.

و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت به ترتیب ۳۴/۴۱، ۴۶/۹۴ و ۵۵/۱ درصد و ۳۲/۱۳، ۴۰/۴۷ و ۴۶/۷۵ درصد بود. کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب خاک در اثر کاربرد این نانوذرات سبب کاهش غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت شد. وارن و همکاران (۲۰۰۳) گزارش نمودند که تجمع آرسنیک در بخش هوایی کلم بروکلی، تربچه و گل کلم کشت شده در خاک آلوده به آرسنیک که با محلول سولفات آهن، به مقداری که ۰/۲ درصد اکسید آهن فراهم می‌کرد، تیمار شده بود در مقایسه با گیاهان شاهد به‌طور معنی‌دار کاهش یافت (۴۲).

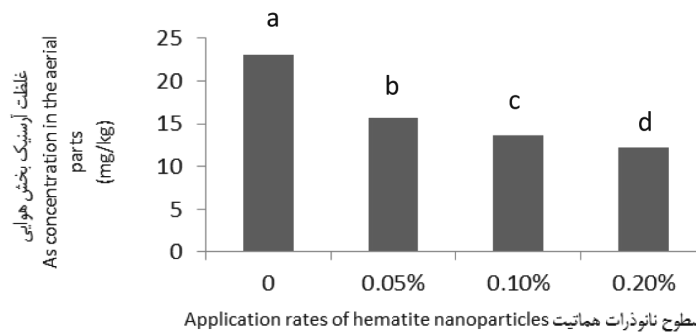
اثر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). کاربرد نانوذرات هماتیت سبب کاهش معنی‌دار غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه شد و با افزایش سطح کاربرد آن مقدار کاهش غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی بیش‌تر شد (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). کم‌ترین غلظت‌های آرسنیک ریشه و بخش هوایی مربوط به تیمار دارای سطح ۰/۲ درصد جاذب نانوذرات هماتیت و بیش‌ترین غلظت آن‌ها مربوط به تیمار شاهد (بدون کاربرد جاذب) بود. مقدار کاهش غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه با کاربرد سطوح ۰/۱، ۰/۰۵





شکل ۱۴- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت آرسنیک ریشه ذرت.

Figure 14. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of As in the root.



شکل ۱۵- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت آرسنیک بخش هوایی ذرت.

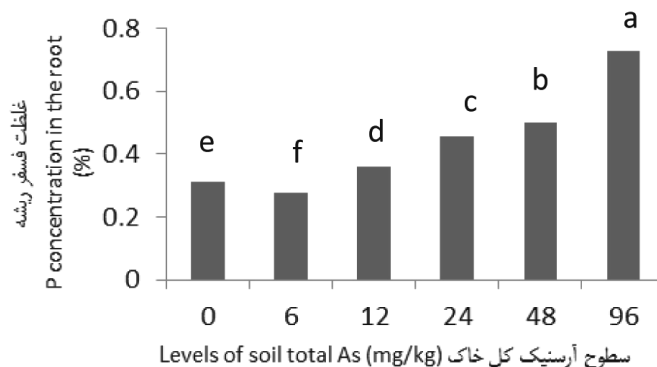
Figure 15. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of As in the aerial parts.

غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه: اثر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۶). با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک تا سطح ۶ میلی گرم بر کیلوگرم، غلظت فسفر ریشه گیاه به طور معنی داری کاهش و پس از آن افزایش یافت (شکل ۱۶) ولی فسفر بخش هوایی گیاه به طور معنی داری افزایش و پس از آن کاهش یافت (شکل ۱۷). بیشترین و کمترین غلظت فسفر ریشه (۰/۷۲۷ و ۰/۲۷۸ درصد) به ترتیب در گیاهان کشت شده در خاکهای آلوده به ۹۶ و ۶ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم مشاهده شد. بالعکس بیشترین و کمترین غلظت فسفر بخش هوایی (۰/۳۱۲ و ۰/۱۲۹ درصد) به ترتیب در گیاهان کشت شده در خاکهای آلوده به ۶ و ۹۶ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم اندازه گیری شدند. غلظت فسفر ریشه گیاهان کشت شده

اثر متقابل سطوح نانوذرات هماتیت و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که در هر سطح آرسنیک کل خاک، با افزایش سطح استفاده از نانوذرات هماتیت غلظت آرسنیک بخش هوایی گیاه کاهش یافت و در هر سطح از نانوذرات هماتیت، با افزایش سطوح آرسنیک کل خاک غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی گیاه افزایش یافت (جدول ۵). بیشترین غلظت آرسنیک ریشه و بخش هوایی ذرت به ترتیب ۳۸۳/۴۱ و ۵۹/۵۶ میلی گرم بر کیلوگرم بود که در گیاهان کشت شده در خاک آلوده به سطح ۹۶ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم و فاقد نانوذرات هماتیت اندازه گیری شد و کمترین غلظت آن نیز مربوط به گیاهان کشت شده در خاک غیرآلوده با یا بدون کاربرد نانوذرات هماتیت بود (جدول ۵).

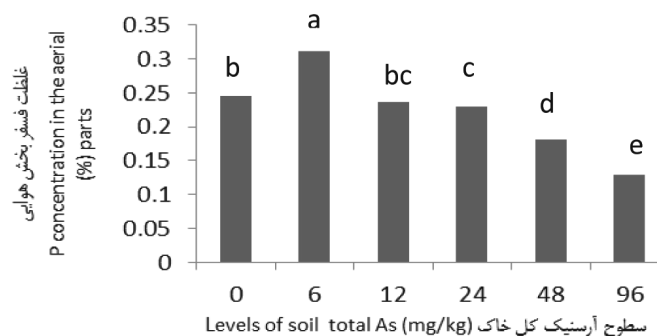
آن در ریشه و کاهش غلظت آن در بخش هوایی گیاه شده است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷) ولی در غلظت ۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم، این عنصر تأثیر منفی بر انتقال فسفر نداشته و انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی باعث کاهش غلظت آن در ریشه و افزایش غلظت آن در بخش هوایی شده است. شایبور و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان نمودند که آرسنیک تأثیر منفی بر انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی گیاه جو داشت (۳۴). لیو و همکاران (۲۰۱۲) گزارش کردند که با افزایش غلظت آرسنیک خاک تا ۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، مقدار فسفر در گیاه گندم افزایش یافت (۲۵). کونگ و لنا (۲۰۰۳) بیان نمودند که افزایش غلظت فسفر در خاک تجمع آرسنات در گیاه (*Pteris vittata* L.) را افزایش داد (۷).

در خاک‌های آلوده به سطوح ۶ و ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم نسبت به گیاهان کشت‌شده در خاک غیرآلوده به ترتیب ۱۱/۲ و ۱۲۳/۲۶ درصد کاهش و افزایش یافت. همچنین غلظت فسفر بخش هوایی گیاهان کشت‌شده در خاک‌های آلوده به سطوح ۶ و ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم نسبت به گیاهان کشت‌شده در خاک غیرآلوده به ترتیب ۲۷/۳۵ و ۴۷/۳۵ درصد افزایش و کاهش یافت. 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 (۸ و ۱۸). از طرف دیگر آرسنیک در غلظت‌های بیش از ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم، با کاهش انتقال فسفر از ریشه به بخش هوایی گیاه، سبب تجمع



شکل ۱۶- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت فسفر ریشه ذرت.

Figure 16. Effects of levels of soil total As on the concentrations of P in the root.



شکل ۱۷- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت فسفر بخش هوایی ذرت.

Figure 17. Effects of levels of soil total As on the concentration of P in the aerial parts.

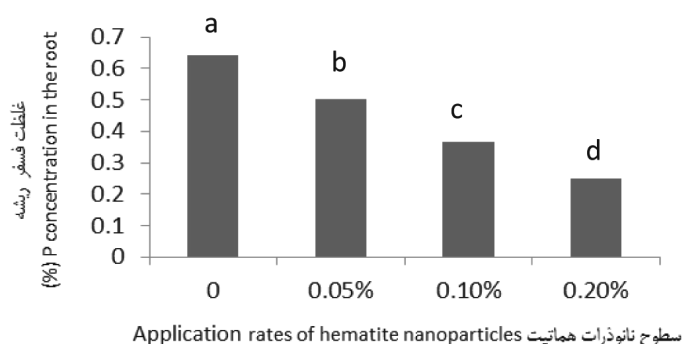
جدول ۶- اثرات اصلی و متقابل سطوح مختلف نانوذرات ہماتیت و آرسنیک کل خاک بر غلظت‌های فسفر، آهن، روی و منگنز ریشہ و بخش هوایی ذرت.  
**Table 6. Effects of hematite nanoparticles application rates, different levels of soil total As and their interactive effects of these factors on P, Fe, Zn and Mn concentrations of root and aerial parts of the corn plant.**

میانگین مربعات Mean of squares										
غلظت منگنز بخش هوایی Mn concentration of aerial parts	غلظت منگنز ریشہ Mn concentration of root	غلظت روی بخش هوایی Zn concentration in aerial parts	غلظت روی ریشہ Zn concentration in root	غلظت آهن بخش هوایی Fe concentration in aerial parts	غلظت آهن ریشہ Fe concentration in root	غلظت فسفر بخش هوایی P concentration in aerial parts	غلظت فسفر ریشہ P concentration in root	درجہ آزادی Degree of freedom	Sources of variation	
6183.58**	3837.26**	1025.54**	605.27**	2204.79**	1145.95**	0.015**	0.514**	3	سطوح نانوذرات ہماتیت Hematite nanoparticles application rates	
6479.91**	7051.15**	2525.63**	1113.88**	2484.165**	8595.75**	0.046**	0.326**	5	سطوح آرسنیک کل خاک Levels of soil total As	
34.03*	17.36**	392.24**	269.46**	2300.23**	590.75**	0.005**	0.006**	15	سطوح نانوذرات ہماتیت* سطوح آرسنیک کل خاک Hematite nanoparticles application rates * levels of soil total As	
17.38	6.77	6.11	4.14	27.09	8.26	0.0002	0.0005	48	خطا Error	
5.1	4.47	5.29	6.77	5.76	5.17	6.43	5.31	-	ضریب تغییرات CV(%)	

\*\*P < 0.01, \*P < 0.05

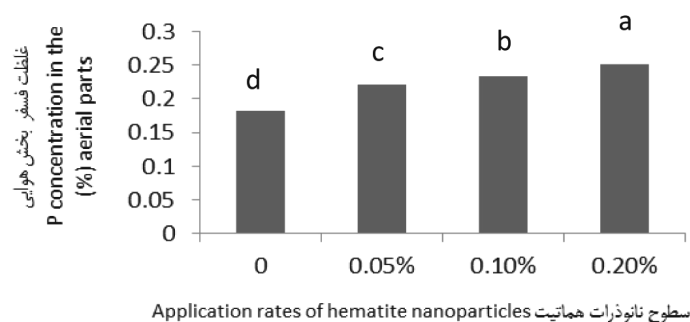
با کاربرد سطوح ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت به ترتیب ۲۱/۵۶، ۴۲/۶۵ و ۶۱/۱ درصد بود و مقدار افزایش غلظت فسفر بخش هوایی با کاربرد سطوح مشابه این نانوذرات به ترتیب ۲۰/۷۷، ۲۷/۳۲ و ۳۷/۷۰ درصد بود. نانوذرات هماتیت با کاهش غلظت آرسنیک ریشه ذرت (شکل ۹)، سبب انتقال بهتر فسفر از ریشه به بخش هوایی آن شده و این امر موجب تجمع کم‌تر فسفر در ریشه و تجمع بیش‌تر آن در بخش هوایی شده است (شکل‌های ۱۸ و ۱۹). همچنین این نانوذرات با کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب، موجب کاهش آزدسازی فسفر از مکان‌های جذبی و متعاقباً کاهش قابلیت دسترسی و جذب آن توسط ریشه شده‌اند.

اثر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). کاربرد نانوذرات هماتیت به ترتیب سبب کاهش و افزایش معنی‌دار غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه شد و با افزایش سطح کاربرد آن مقدار کاهش و افزایش، بیش‌تر شد (شکل‌های ۱۸ و ۱۹). کم‌ترین غلظت فسفر ریشه مربوط به تیمار دارای سطح ۰/۲ درصد جاذب نانوذرات هماتیت و بیش‌ترین غلظت آن مربوط به تیمار شاهد (بدون کاربرد جاذب) بود و بالعکس کم‌ترین غلظت فسفر بخش هوایی مربوط به تیمار شاهد (بدون کاربرد جاذب) و بیش‌ترین غلظت آن مربوط به تیمار دارای سطح ۰/۲ درصد جاذب نانوذرات هماتیت بود. مقدار کاهش غلظت فسفر ریشه



شکل ۱۸- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت فسفر ریشه ذرت.

Figure 18. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of P in the root.



شکل ۱۹- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت فسفر بخش هوایی ذرت.

Figure 19. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of P in the aerial parts.

بود (جدول ۶). در هر سطح از نانوذرات هماتیت با افزایش سطح آرسنیک کل خاک تا ۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک، غلظت فسفر ریشه کاهش و سپس

اثر متقابل سطوح نانوذرات هماتیت و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار

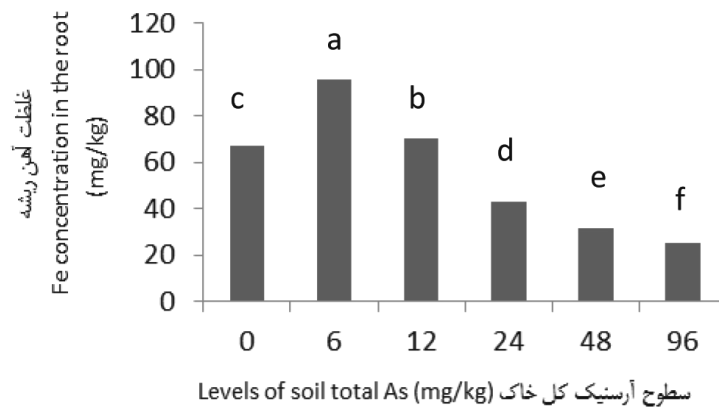
غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه: اثر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۶). با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک تا سطح ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم، غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه نسبت به تیمار شاهد به طور معنی داری افزایش و پس از آن کاهش یافت (شکل های ۲۰ و ۲۱). غلظت آهن ریشه گیاهان کشت شده در خاک های آلوده به سطوح ۶ و ۹۶ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم نسبت به خاک غیر آلوده، به ترتیب ۴۲/۳۹ و ۶۲/۲۹ درصد و در بخش هوایی ۴۸/۶۷ و ۶۷/۹۵ درصد افزایش و کاهش یافت. شایبور و همکاران (۲۰۰۹) نیز در بررسی اثر متقابل آرسنیک و آهن در گیاه جو در شرایط هیدروپونیک مشاهده کردند که با افزایش غلظت آرسنیک به ۳۳/۵ میکرومول در لیتر، غلظت آهن ریشه جو از ۲۸۱ میلی گرم بر کیلوگرم در گیاه شاهد به ۴۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش یافت (۳۴).

با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک، فسفر از مکان های جذبی خاک آزاد شده و غلظت قابل جذب آن افزایش می یابد (۸ و ۱۸). گیاهانی که فسفر بیش تری جذب می کنند توسعه و گسترش ریشه در آن ها بیش تر بوده و امکان جذب سایر عناصر غذایی از جمله آهن و روی برای آن ها افزایش می یابد. اما مقادیر زیاد فسفر در خاک با تشکیل رسوب فسفات آهن، می تواند غلظت آهن در گیاه را کاهش دهد. طبق بیانات مندل و هالدار (۱۹۸۰) کاربرد فسفر، مقادیر روی و آهن قابل استخراج با DTPA را به دلیل تشکیل فسفات های آهن و روی در خاک کاهش می دهد (۲۸). هالدار و مندل (۱۹۸۱) تأثیر فسفر بر رشد و غلظت عناصر فسفر، روی، مس، آهن و منگنز گیاه برنج را بررسی نموده و گزارش کردند که کاربرد فسفر سبب کاهش غلظت آهن ریشه و بخش هوایی شد (۱۴).

افزایش یافت و در هر سطح از آرسنیک کل خاک با افزایش سطح کاربرد نانوذرات هماتیت غلظت فسفر ریشه کاهش یافت (جدول ۷). غلظت فسفر بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک فاقد نانوذرات هماتیت، با افزایش سطح آرسنیک کل خاک، کاهش یافت ولی در بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک های تیمار شده با نانوذرات هماتیت با افزایش سطح آرسنیک تا ۶ میلی گرم بر کیلوگرم، افزایش و سپس کاهش یافت. همچنین با افزایش سطح کاربرد نانوذرات هماتیت، غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک های غیر آلوده کاهش یافت ولی غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک های آلوده به ترتیب کاهش و افزایش یافت (جدول ۷). کاهش غلظت فسفر ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک غیر آلوده با کاربرد نانوذرات هماتیت، نشان می دهد که این نانوذرات فسفر را نیز جذب خود نموده و قابلیت دسترسی آن را کاهش داده اند. هانگ (۲۰۰۴) نیز گزارش نمود که هماتیت قادر است فسفر را جذب سطحی کند (۲۰). توتیجاروی و همکاران (۲۰۱۲) بیان نمودند که فسفر نیز می تواند جذب سطحی اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن شود (۴۱). بیش ترین غلظت فسفر ریشه به مقدار ۰/۹۵۴ درصد در گیاهان کشت شده در خاک های آلوده به ۹۶ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم و فاقد نانوذرات هماتیت و کم ترین غلظت آن به مقدار ۰/۱۶۶ درصد در گیاهان کشت شده در خاک های تیمار شده با ۶ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت به دست آمد و بالعکس بیش ترین غلظت فسفر بخش هوایی به مقدار ۰/۳۹۳ درصد در گیاهان کشت شده در خاک تیمار شده با ۶ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت و کم ترین غلظت آن به مقدار ۰/۰۷۴ درصد در گیاهان کشت شده در خاک آلوده به سطح ۹۶ میلی گرم آرسنیک بر کیلوگرم و فاقد نانوذرات هماتیت به دست آمد (جدول ۷).

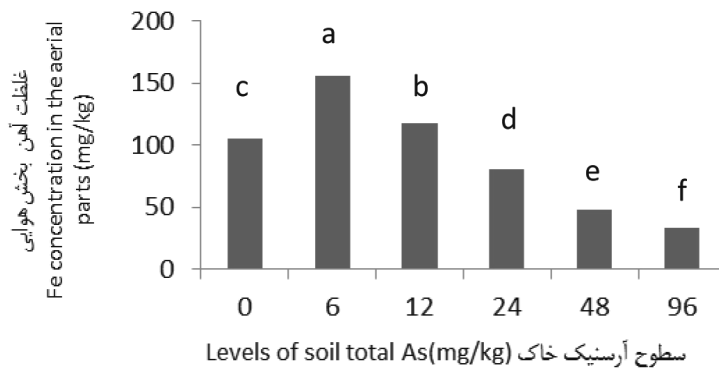
جدول ۷- اثر متقابل سطوح مختلف نانوذرات هماتیت و سطوح مختلف آرسنیک کل خاک بر غلظت‌های فسفر، آهن، روی و منگنز ریشه و بخش هوایی ذرت.

غلظت منگنز بخش هوایی	غلظت منگنز ریشه Mn concentration in the root (%)	غلظت روی بخش هوایی Zn concentration in the aerial part (mg/kg)	غلظت روی ریشه Zn concentration in the root (mg/kg)	غلظت آهن بخش هوایی Fe concentration in the aerial part (mg/kg)	غلظت آهن ریشه Fe concentration in the root (mg/kg)	غلظت فسفر بخش هوایی P concentration in the aerial parts (%)	غلظت فسفر ریشه P concentration in the root (%)	سطوح آرسنیک کل خاک levels of soil total As (mg/kg)	سطوح نانوذرات هماتیت Hematite nanoparticles application rates
83.333 <sup>gf</sup>	57.80 <sup>i</sup>	72.583 <sup>ah</sup>	50.22 <sup>b</sup>	168.00 <sup>b</sup>	96.60 <sup>c</sup>	0.313 <sup>bc</sup>	0.461 <sup>f</sup>	0	
77.167 <sup>gh</sup>	50.667 <sup>j</sup>	50.70 <sup>ef</sup>	32.354 <sup>ef</sup>	121.68 <sup>ef</sup>	76.00 <sup>e</sup>	0.231 <sup>ef</sup>	0.439 <sup>gf</sup>	6	
95.70 <sup>d</sup>	62.667 <sup>gh</sup>	42.10 <sup>gh</sup>	22.813 <sup>ij</sup>	84.64 <sup>i</sup>	52.08 <sup>ij</sup>	0.178 <sup>hi</sup>	0.550 <sup>e</sup>	12	0
107.30 <sup>c</sup>	79.00 <sup>d</sup>	29.622 <sup>l</sup>	13.913 <sup>lm</sup>	47.68 <sup>l</sup>	27.00 <sup>lm</sup>	0.172 <sup>hi</sup>	0.671 <sup>d</sup>	24	
122.33 <sup>b</sup>	95.117 <sup>b</sup>	15.272 <sup>n</sup>	10.871 <sup>m</sup>	22.00 <sup>n</sup>	12.68 <sup>n</sup>	0.128 <sup>k</sup>	0.765 <sup>c</sup>	48	
149.90 <sup>a</sup>	121.20 <sup>a</sup>	8.142 <sup>o</sup>	4.008 <sup>o</sup>	10.30 <sup>o</sup>	7.00 <sup>o</sup>	0.074 <sup>l</sup>	0.954 <sup>a</sup>	96	
66.750 <sup>i</sup>	40.567 <sup>l</sup>	51.00 <sup>ef</sup>	30.144 <sup>fg</sup>	104.88 <sup>g</sup>	63.40 <sup>g</sup>	0.246 <sup>def</sup>	0.361 <sup>i</sup>	0	
57.417 <sup>j</sup>	32.667 <sup>m</sup>	66.80 <sup>c</sup>	45.008 <sup>c</sup>	152.51 <sup>c</sup>	93.83 <sup>c</sup>	0.299 <sup>e</sup>	0.298 <sup>j</sup>	6	
76.750 <sup>gh</sup>	46.150 <sup>k</sup>	54.85 <sup>e</sup>	33.933 <sup>e</sup>	114.58 <sup>f</sup>	68.48 <sup>f</sup>	0.239 <sup>ef</sup>	0.429 <sup>gf</sup>	12	0.05%
92.067 <sup>de</sup>	66.367 <sup>fg</sup>	47.451 <sup>f</sup>	27.543 <sup>gh</sup>	78.48 <sup>i</sup>	41.24 <sup>k</sup>	0.231 <sup>ef</sup>	0.531 <sup>e</sup>	24	
98.617 <sup>d</sup>	74.067 <sup>e</sup>	34.231 <sup>jk</sup>	23.951 <sup>ij</sup>	47.93 <sup>l</sup>	29.02 <sup>lm</sup>	0.183 <sup>hi</sup>	0.570 <sup>e</sup>	48	
120.383 <sup>b</sup>	97.68 <sup>b</sup>	24.004 <sup>m</sup>	15.802 <sup>l</sup>	32.10 <sup>m</sup>	24.83 <sup>m</sup>	0.131 <sup>k</sup>	0.820 <sup>b</sup>	96	
57.0 <sup>jk</sup>	33.833 <sup>m</sup>	43.167 <sup>g</sup>	24.80 <sup>hi</sup>	83.64 <sup>i</sup>	58.40 <sup>h</sup>	0.228 <sup>ef</sup>	0.251 <sup>k</sup>	0	
48.0 <sup>l</sup>	27.117 <sup>n</sup>	71.20 <sup>b</sup>	49.733 <sup>b</sup>	168.70 <sup>b</sup>	103.00 <sup>b</sup>	0.325 <sup>b</sup>	0.208 <sup>l</sup>	6	
65.667 <sup>i</sup>	40.0 <sup>l</sup>	59.832 <sup>d</sup>	38.00 <sup>d</sup>	130.08 <sup>e</sup>	77.00 <sup>e</sup>	0.254 <sup>de</sup>	0.281 <sup>kl</sup>	12	0.1%
75.0 <sup>h</sup>	53.30 <sup>j</sup>	54.122 <sup>e</sup>	33.813 <sup>e</sup>	93.52 <sup>h</sup>	49.04 <sup>j</sup>	0.248 <sup>de</sup>	0.378 <sup>hi</sup>	24	
87.250 <sup>ef</sup>	68.133 <sup>f</sup>	42.201 <sup>gh</sup>	28.203 <sup>gh</sup>	58.11 <sup>jk</sup>	37.10 <sup>k</sup>	0.197 <sup>gh</sup>	0.411 <sup>gh</sup>	48	
108.467 <sup>c</sup>	98.50 <sup>c</sup>	31.729 <sup>kl</sup>	21.00 <sup>jk</sup>	41.82 <sup>j</sup>	31.04 <sup>l</sup>	0.146 <sup>jk</sup>	0.671 <sup>d</sup>	96	
49.167 <sup>j</sup>	24.217 <sup>no</sup>	37.00 <sup>ij</sup>	19.20 <sup>k</sup>	64.140 <sup>j</sup>	48.80 <sup>j</sup>	0.192 <sup>h</sup>	0.179 <sup>lm</sup>	0	
40.0 <sup>m</sup>	20.417 <sup>o</sup>	75.50 <sup>a</sup>	55.00 <sup>a</sup>	182.50 <sup>a</sup>	109.00 <sup>a</sup>	0.393 <sup>a</sup>	0.166 <sup>m</sup>	6	
50.167 <sup>kl</sup>	33.50 <sup>m</sup>	64.853 <sup>c</sup>	42.417 <sup>c</sup>	140.00 <sup>d</sup>	83.48 <sup>d</sup>	0.272 <sup>d</sup>	0.171 <sup>lm</sup>	12	0.2%
63.0 <sup>ij</sup>	44.0 <sup>kl</sup>	59.25 <sup>d</sup>	38.226 <sup>d</sup>	104.00 <sup>g</sup>	55.00 <sup>hi</sup>	0.269 <sup>d</sup>	0.250 <sup>k</sup>	24	
75.333 <sup>h</sup>	59.0 <sup>hi</sup>	48.005 <sup>f</sup>	33.192 <sup>ef</sup>	66.00 <sup>j</sup>	48.00 <sup>j</sup>	0.220 <sup>fg</sup>	0.264 <sup>jk</sup>	48	
98.217 <sup>d</sup>	79.667 <sup>d</sup>	38.571 <sup>hi</sup>	27.71 <sup>gh</sup>	50.61 <sup>kl</sup>	37.90 <sup>k</sup>	0.164 <sup>ij</sup>	0.464 <sup>f</sup>	96	



شکل ۲۰- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آهن ریشه ذرت.

Figure 20. Effects of levels of soil total As on the concentration of Fe in the root.

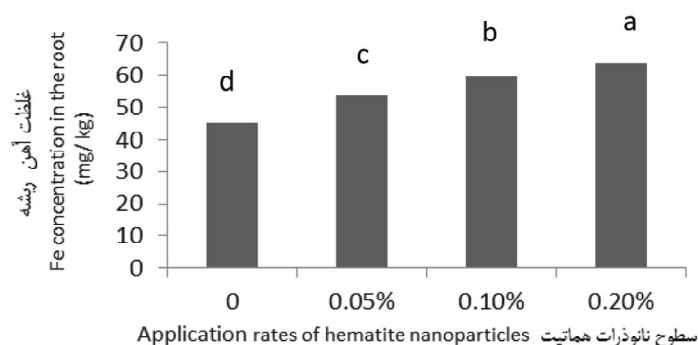


شکل ۲۱- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آهن بخش هوایی ذرت.

Figure 21. Effects of levels of soil total As on the concentration of Fe in the aerial parts.

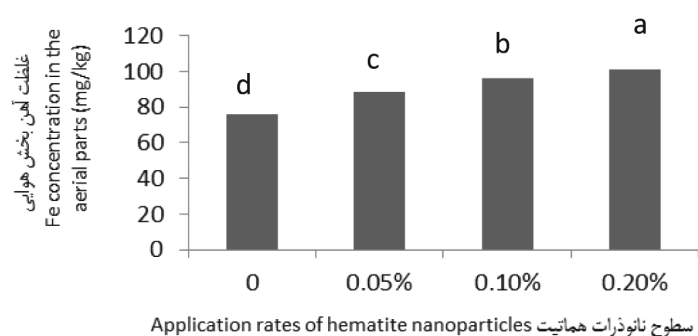
نانوذرات هماتیت به ترتیب ۱۸/۲۲، ۳۱/۰۴ و ۴۰/۸۵ درصد و در بخش هوایی ۱۶/۷۷، ۲۶/۷۶ و ۳۳/۶۷ درصد بود. با کاربرد نانوذرات هماتیت غلظت آرسنیک قابل جذب در خاک کاهش یافته (شکل ۱۰)، بنابراین امکان آزادسازی فسفر از مکان‌های جذبی در خاک و رسوب نمودن آن با آهن محلول کاهش و مقدار آهن قابل جذب برای گیاه افزایش می‌یابد.

اثر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). کاربرد نانوذرات هماتیت سبب افزایش معنی‌دار غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه شد و با افزایش سطح کاربرد آن مقدار افزایش غلظت آهن ریشه و بخش هوایی، بیش‌تر شد (شکل‌های ۲۲ و ۲۳). مقدار افزایش غلظت آهن در ریشه با کاربرد سطح ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد



شکل ۲۲- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت آهن ریشه ذرت.

Figure 22. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of Fe in the root.



شکل ۲۳- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت آهن بخش هوایی ذرت.

Figure 23. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of Fe in the aerial parts.

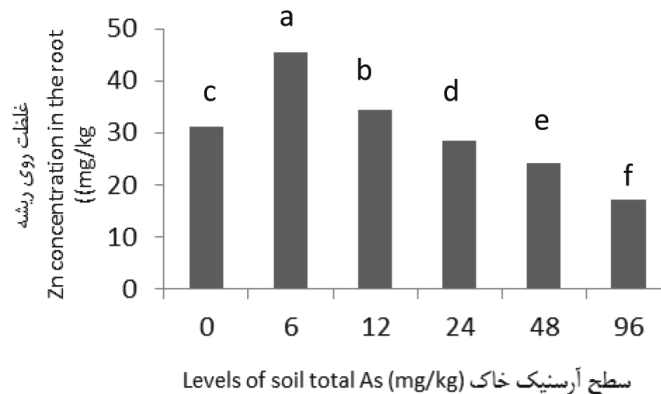
هماتیت، با افزایش سطح آرسنیک کل به ترتیب تا ۲۴ و ۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و سپس کاهش یافت. با افزایش سطح کاربرد نانوذرات هماتیت غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های غیرآلوده کاهش ولی در خاک‌های آلوده افزایش یافت (جدول ۷). این امر نشان می‌دهد که نانوذرات هماتیت می‌توانند آهن را نیز جذب خود نموده و قابلیت دسترسی آن را کاهش دهند. بیش‌ترین غلظت آهن ریشه و بخش هوایی به ترتیب در مقادیر ۱۰۹ و ۱۸۲/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم از گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با سطح ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت و سطح ۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و کم‌ترین غلظت آن‌ها به ترتیب در مقادیر ۷ و ۱۰/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم از گیاهان کشت شده در خاک‌های آلوده به سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک کل بر کیلوگرم و فاقد نانوذرات هماتیت به دست آمد.

اثر متقابل سطوح نانوذرات هماتیت و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت آهن ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). غلظت آهن در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های فاقد نانوذرات هماتیت با افزایش سطح آرسنیک کل خاک کاهش یافت ولی در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با سطح ۰/۰۵ درصد این نانوذرات، با افزایش سطح آرسنیک کل خاک تا ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و سپس کاهش یافت (جدول ۷). همچنین غلظت آهن در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با سطح ۰/۱ درصد نانوذرات هماتیت، با افزایش سطح آرسنیک کل خاک به ترتیب تا ۱۲ و ۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و سپس کاهش یافت و در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با سطح ۰/۲ درصد نانوذرات



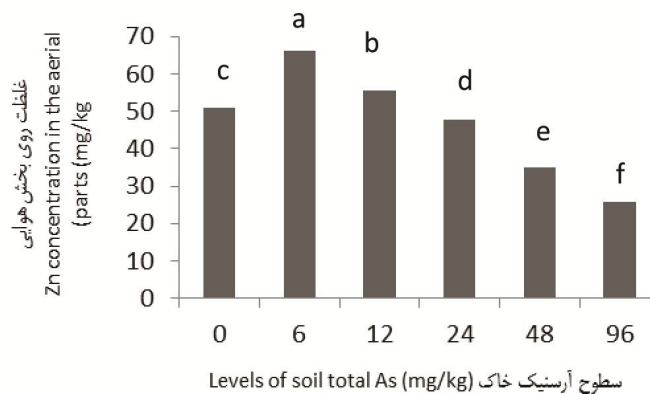
با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک، فسفر از مکان‌های جذبی خاک آزاد شده و غلظت آن در فاز محلول افزایش یافته (۸ و ۱۸) و می‌تواند با روی محلول رسوب نماید. مقادیر زیاد فسفر در خاک با تشکیل رسوب فسفات روی، می‌تواند غلظت روی در گیاه را کاهش دهد. فسفر عنصر مهمی است که در جذب روی تداخل ایجاد می‌کند به طوری که اغلب، جذب روی توسط گیاهان با افزایش غلظت فسفر در خاک کاهش می‌یابد (۲۹). شایبور و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی برهم‌کنش آرسنیک و آهن در گیاه جو در شرایط هیدروپونیک مشاهده کردند که با افزایش غلظت آرسنیک به ۳۳/۵ میکرومول در لیتر، غلظت روی ریشه و بخش هوایی جو کاهش یافت (۳۴).

غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه: اثر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). با افزایش غلظت آرسنیک کل خاک تا سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم، غلظت روی ریشه گیاه نسبت به تیمار شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش و پس از آن کاهش یافت (شکل‌های ۲۴ و ۲۵). غلظت روی ریشه گیاهان کشت‌شده در خاک‌های آلوده به ۶ و ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم نسبت به گیاهان کشت‌شده در خاک غیرآلوده به ترتیب ۶۲/۴ و ۹۰/۴۴ درصد افزایش و کاهش داشت. همچنین در بخش هوایی گیاهان کشت‌شده در این خاک‌ها به ترتیب ۶۷/۲۹ و ۷۲/۴۹ درصد افزایش و کاهش داشت.



شکل ۲۴- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت روی ریشه ذرت.

Figure 24. Effects of levels of soil total As on the concentration of Zn in the root.

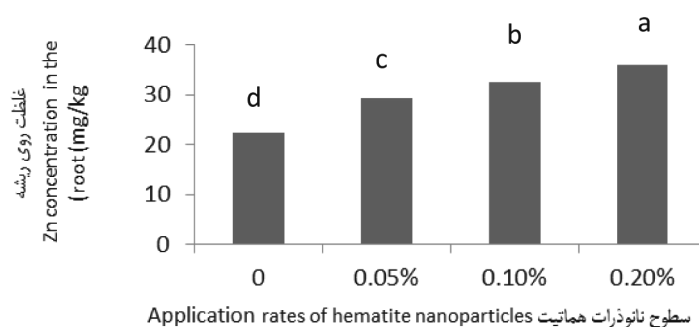


شکل ۲۵- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت روی بخش هوایی ذرت.

Figure 25. Effects of levels of soil total As on the concentration of Zn in the aerial parts.

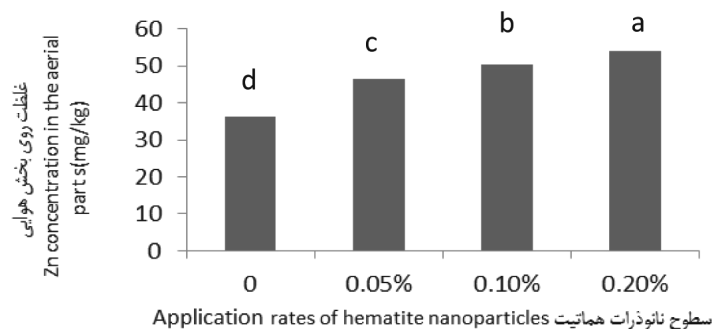
۴۵/۷۳ و ۶۰/۸۰ درصد و در بخش هوایی به ترتیب ۲۷/۴۳، ۳۷/۳۸ و ۴۷/۹۶ درصد بود. با کاربرد نانوذرات هماتیت غلظت آرسنیک قابل جذب خاک کاهش یافته (شکل ۱۰)، بنابراین امکان آزادسازی فسفر از مکان‌های جذبی در خاک و رسوب نمودن آن با روی محلول کاهش و مقدار روی قابل جذب برای گیاه افزایش می‌یابد.

اثر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). کاربرد نانوذرات هماتیت سبب افزایش معنی‌دار غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه شد و با افزایش سطح کاربرد آن میزان افزایش آن، افزایش یافت (شکل‌های ۲۶ و ۲۷). مقدار افزایش غلظت روی ریشه با کاربرد سطوح ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت به ترتیب ۳۱/۴۵،



شکل ۲۶- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت روی ریشه ذرت.

Figure 26. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of Zn in the root.



شکل ۲۷- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت روی بخش هوایی ذرت.

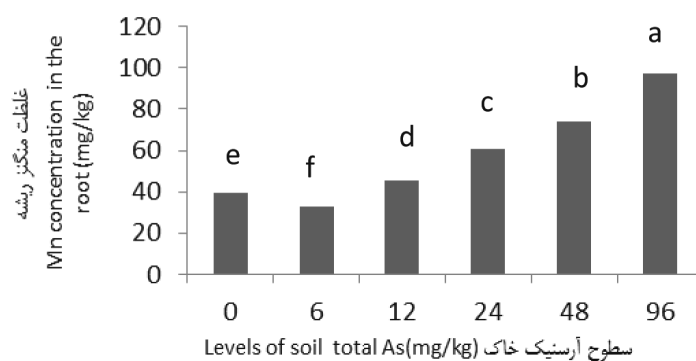
Figure 27. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of Zn in the aerial parts.

هماتیت با افزایش سطح آرسنیک خاک کاهش ولی در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های تیمار شده با سطح ۰/۰۵ درصد نانوذرات هماتیت با افزایش سطح آرسنیک تا ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و سپس کاهش یافت (جدول ۷). همچنین

اثر متقابل سطوح نانوذرات هماتیت و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). غلظت روی در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت شده در خاک‌های فاقد نانوذرات

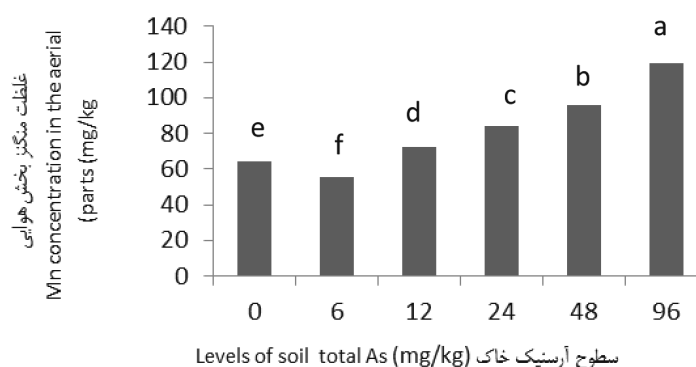
غلظت منگنز ریشه و بخش هوایی گیاه: اثر سطوح آرسنیک خاک بر غلظت منگنز ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). با افزایش غلظت آرسنیک خاک تا سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم، غلظت منگنز ریشه و بخش هوایی گیاه به‌طور معنی‌داری کاهش و پس از آن افزایش یافت (شکل‌های ۲۸ و ۲۹)، به‌گونه‌ای که از ۳۹/۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در ریشه گیاهان کشت شده در خاک غیرآلوده به ۹۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم در ریشه گیاهان کشت‌شده در خاک آلوده به ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم و از ۶۴/۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم در بخش هوایی گیاهان کشت‌شده در خاک غیرآلوده به ۱۱۹/۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم در بخش هوایی گیاهان کشت‌شده در خاک آلوده به ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم، افزایش یافت. اثر افزایشی آرسنات بر غلظت منگنز در گیاه احتمالاً به این دلیل است که با افزایش غلظت آرسنیک، غلظت فسفر در خاک افزایش یافت که با رسوب دادن آهن و روی، غلظت این عناصر که آنالوگ منگنز هستند و در جذب با آن رقابت دارند را کاهش داد (جدول ۴). هنگامی‌که غلظت فسفر در محیط رشد بیش از حد باشد سبب بهم خوردن تعادل سایر عناصر غذایی شده و قابلیت دسترسی و جذب آن‌ها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. به‌عنوان مثال مقادیر زیاد فسفر در خاک، قابلیت دسترسی و جذب منگنز را افزایش ولی قابلیت دسترسی و جذب آهن و روی را به‌طور معنی‌داری کاهش می‌دهد (۲۲).

غلظت روی در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت‌شده در خاک‌های تیمار شده با سطح ۰/۱ درصد نانوذرات هماتیت به‌ترتیب با افزایش سطح آرسنیک تا ۴۸ و ۲۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش و سپس کاهش یافت و در ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت‌شده در خاک‌های تیمار شده با سطح ۰/۲ درصد این نانوذرات با افزایش سطح آرسنیک افزایش یافت. این امر نشان می‌دهد که سطوح بالاتر نانوذرات هماتیت کارایی بیشتری در ممانعت از کاهش غلظت عنصر روی گیاه با افزایش غلظت آرسنیک خاک دارد. با افزایش سطح کاربرد نانوذرات هماتیت غلظت روی ریشه و بخش هوایی گیاهان کشت‌شده در خاک‌های غیرآلوده کاهش ولی در خاک‌های آلوده افزایش یافت (جدول ۷). این امر نشان می‌دهد که نانوذرات هماتیت می‌توانند روی را نیز جذب نموده و قابلیت دسترسی آن را کاهش دهند. ها و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان نمودند که نانوذرات هماتیت قادر به جذب سطحی نمودن عنصر روی می‌باشند (۱۲). بیش‌ترین غلظت روی در ریشه و بخش هوایی به مقادیر ۵۵ و ۷۵/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم از گیاهان کشت‌شده در خاک‌های دارای سطح ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت و سطح ۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم و کم‌ترین غلظت آن به مقادیر ۴ و ۸/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم از گیاهان کشت‌شده در خاک‌های فاقد نانوذرات هماتیت و سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد.



شکل ۲۸- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت منگنز ریشه ذرت.

Figure 28. Effects of levels of soil total As on the concentration of Mn in the root.

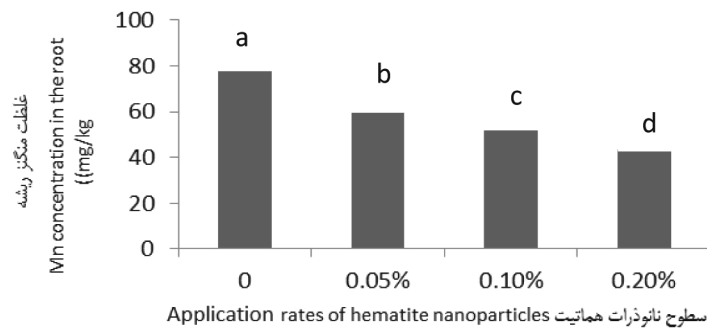


شکل ۲۹- تأثیر سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت منگنز بخش هوایی ذرت.

Figure 29. Effects of levels of soil total As on the concentration of Mn in the aerial parts.

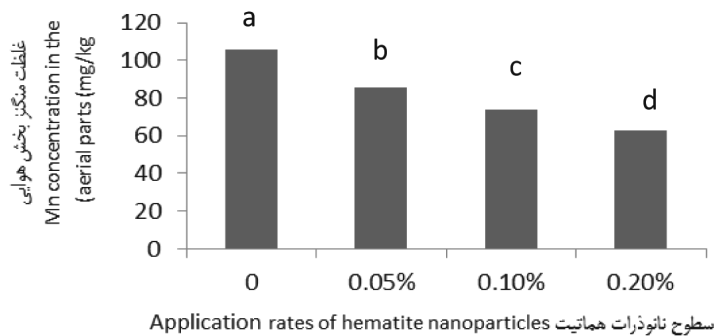
به ترتیب ۱۹/۴۶، ۳۰/۵۷ و ۴۰/۸۷ درصد بود. نانوذرات هماتیت با کاهش غلظت آرسنیک قابل جذب خاک (شکل ۱۰) امکان آزادسازی فسفر از مکان‌های جذبی و رسوب نمودن آن با آهن و روی محلول را کاهش و مقدار آهن و روی قابل جذب را افزایش دادند (جدول ۷). افزایش غلظت عناصر آهن و روی که با منگنز رقابت دارند سبب کاهش غلظت منگنز گیاه شده است.

اثر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت منگنز ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود (جدول ۶). کاربرد نانوذرات هماتیت سبب کاهش معنی دار غلظت منگنز ریشه و بخش هوایی گیاه شد و با افزایش سطح کاربرد آن میزان کاهش آن افزایش یافت (شکل‌های ۳۰ و ۳۱). مقدار کاهش غلظت منگنز در ریشه با کاربرد سطوح ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت به ترتیب ۲۳/۳۵، ۳۳/۱۴ و ۴۴/۱ درصد و در بخش هوایی



شکل ۳۰- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت منگنز ریشه ذرت.

Figure 30. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of Mn in the root.



شکل ۳۱- تأثیر سطوح نانوذرات هماتیت بر غلظت منگنز بخش هوایی ذرت.

Figure 31. Effects of hematite nanoparticles application rates on the concentration of Mn in the aerial parts.

کشت شده در خاک‌های آلوده به سطح ۹۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم و فاقد نانوذرات هماتیت به دست آمد و کم‌ترین غلظت آن‌ها به ترتیب به مقادیر ۲۰/۴۲ و ۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به گیاهان کشت شده در خاک‌های دارای سطح ۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم و ۰/۲ درصد نانوذرات هماتیت مربوط بود.

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که غلظت‌های کم‌تر از ۱۲ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک سبب افزایش رشد و وزن خشک ریشه و بخش هوایی شد و غلظت‌های بیش‌تر از آن با ایجاد اثرات سمی و بهم‌زدن تعادل عناصر غذایی، سبب کاهش رشد و وزن خشک ریشه و بخش هوایی شدند.

اثر متقابل سطوح نانوذرات هماتیت و سطوح آرسنیک کل خاک بر غلظت منگنز ریشه و بخش هوایی گیاه ذرت در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). در هر سطح از نانوذرات هماتیت با افزایش سطح آرسنیک کل خاک تا ۶ میلی‌گرم آرسنیک بر کیلوگرم خاک، غلظت منگنز ریشه و بخش هوایی کاهش و سپس افزایش یافت و در هر سطح از آرسنیک کل خاک با افزایش سطح کاربرد نانوذرات هماتیت غلظت منگنز ریشه و بخش هوایی کاهش یافت (جدول ۷). دلیل کاهش غلظت منگنز با افزایش کاربرد نانوذرات هماتیت در خاک غیرآلوده جذب منگنز توسط این نانوذرات می‌باشد. بیش‌ترین غلظت منگنز ریشه و بخش هوایی به ترتیب به مقادیر ۱۴۹/۹ و ۱۲۱/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم از گیاهان

اثرات زیست‌محیطی آن می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای غیرمتحرک نمودن آرسنیک در خاک مورد استفاده قرار گیرد و خطر ورود آن به سفره‌های آب زیرزمینی و چرخه غذایی را کاهش دهد.

حضور نانوذرات هماتیت در خاک، مکان‌های جدیدی برای جذب آرسنیک و کاهش غلظت قابل‌جذب آن فراهم نمود و سطح ۰/۲ درصد آن مؤثرتر از سطوح دیگر بود. کاربرد نانوذرات هماتیت پس از ارزیابی

#### منابع

1. Abedin, M.J., Cotter-Howells, J., and Meharg, A.A. 2002. Arsenic uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) irrigated with contaminated water. *Plant and Soil*. 240: 311-319.
2. Arai, Y., and Sparks, D.L. 2002. Residence time effects on arsenate surface speciation at the aluminium oxide-water interface. *Soil Science*. 167: 303-314.
3. Azizur Rahman, M., Hasegawa, H., Mahfuzur Rahman, M., Nazrul Islam, M., Majid Miah, M.A., and Tasmien, A. 2007. Effect of arsenic on photosynthesis, growth and yield of five widely cultivated rice (*Oryza sativa* L.) varieties in Bangladesh. *Chemosphere*. 67: 1072-1079.
4. Bagherifam, S., Lakzian, A., Fotovat, A., Khorasani, R., and Komarneni, S. 2014. In situ stabilization of As and Sb with naturally occurring Mn, Al and Fe oxides in a calcareous soil: Bioaccessibility, bioavailability and speciation studies. *J. Hazard. Mater.* 273: 247-252.
5. Bremner, J.M. 1996. Nitrogen–Total, P 1085-1122. In: Sparks, D.L. et al. (Ed). *Methods of Soil Analysis*. SSSA and ASA, Madison, WI.
6. Chen, Y., and Li, F. 2010. Kinetic study on removal of copper (II) using goethite and hematite nano- photocatalysts. *Colloid and Interface Science*. 347: 277-281.
7. Cong, T., and Lena, Q.M. 2003. Effects of arsenate and phosphate on their accumulation by an arsenic-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Plant and Soil*. 249: 373-382.
8. Gao, Y., and Mucci, A. 2001. Acid base reactions, phosphate and arsenate complexation, and their competitive adsorption at the surface of goethite in 0.7 M NaCl solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 65: 2361-2378.
9. Garcia-Sanchez, A., Alvarez-Ayuso, E., and Rodriguez-Martin, F. 2002. Sorption of As(V) by some oxyhydroxides and clay minerals. Application to its immobilization in two polluted mining soils. *Clay Minerals*. 37: 187-194.
10. Gulz, P.A. 2002. Arsenic uptake of common crop plants from contaminated soils and interaction with phosphate. Ph.D. Thesis. Swiss.
11. Gulz, A., Gupta, S.K., and Schulin, R. 2005. Arsenic accumulation of common plants from contaminated soils Petra. *Plant and Soil*. 272: 337-347.
12. Ha, J., Trainor, T.P., Farges, F., and Brown, G.E. 2009. Interaction of Aqueous Zn(II) with Hematite Nanoparticles and Microparticles. Part 1. EXAFS Study of Zn(II) Adsorption and Precipitation. *Langmuir*. 25: 5574-5585.
13. Hafez, H., and 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. *Inter. J. Engin. Sci. Technol.* 4: 3018-3028.
14. Haldar, M., and Mandal, L.N. 1981. Effect of Phosphorus and Zinc on the growth and Phosphorus, Zinc, Copper, Iron and Manganese nutrition of rice. *Plant and Soil*. 59: 415-425.
15. Hale, J.R., Foos, A, Zubrow, J.S., and Cook, J. 1997. Better characterization of arsenic and chromium in soils: a field-scale example. *J. Soil Contamin.* 6: 371-389.
16. Hartley, W., Edwards, R., and Lepp, N.W. 2004. Arsenic and heavy metal mobility in iron oxide-amended contaminated soils as evaluated by short- and long-term leaching tests. *Environmental Pollution*. 131: 495-504.
17. Helmke, P.H., and Spark, D.L. 1996. Potassium, P 551-574. In: Sparks D.L. et al. (Ed). *Methods of Soil Analysis*. SSSA and ASA. Madison, WI.

18. Hingston, F.J., Posner, A.M., and Quirk, J.P. 1971. Competitive adsorption of negatively charged ligands on oxide surfaces. *Discussions of the Faraday Society*. 52: 334-342.
19. Hudson Edwards, K.A., Houghton, S.L., and Osborn, A. 2004. Extraction and analysis of arsenic in soils and sediments. *Trends in Analytical Chemistry*. 23: 745-752.
20. Huang, X. 2004. Intersection of isotherms for phosphate adsorption on hematite. *J. Coll. Interface Sci.* 271: 296-307.
21. Jahan, I., Hoque, S., Ullah, S.M., and Kibria, M.G. 2003. Effects of arsenic on some growth parameters of rice plant. *Dhaka Univ. J. Biol. Sci.* 12: 71-77.
22. Jeong, Y., Fan, M., Singh, S., Chuang, C., Saha, B.J., and Leeuwen, H. 2007. Evaluation of iron oxide and aluminum oxide as potential arsenic (V) adsorbents. *Chemical Engineering and Processing*. 46: 1030-1039.
23. Klute, A. 1986. Physical and mineralogical methods, P 1- 1188. *Methods of soil analysis. Part 1*. 2<sup>nd</sup> ed. ASA, SSSA, Madison, WI, USA.
24. Li, Y., James, D.R., and Redwine, B. 2007. In situ chemical fixation of arsenic-contaminated soils: An experimental study. *Science of the Total Environment*. 387: 28-41.
25. Liu, Q.J., Zheng, C.M., Hu, C.X., Tan, Q.L., Sun, X.C., and Su, J.J. 2012. Effects of high concentrations of soil arsenic on the growth of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and rape (*Brassica napus*). *Plant and Soil Environment*. 58: 22-27.
26. Lo, M.C.I., Hu, J., and Chen, G. 2009. Iron-based magnetic nanoparticles for removal of heavy metals from electroplating and metal-finishing wastewater, P 213-264. In: Zhang, C.T., Surampali, Y.R., Lai, K.C.K., Hu, Z., Tyagi, R.D. and Lo, M.C.I. (Eds). *Nanotechnologies for Water Environment Applications American Society of Civil Engineers, Virginia*.
27. Madden, A.S., and Hochella, J.R.M.F. 2005. A test of geochemical reactivity as a function of mineral size: Manganese oxidation promoted by hematite nanoparticles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 69: 389-398.
28. Mandal, L.N., and Haldar, M. 1980. Influence of P and Zn application on the availability of Zn, Cu, Fe, Mn and P in waterlogged rice soils. *Soil Science*. 130: 251-257.
29. Mousavi, R., Galavi, M., and Rezaei, M. 2012. The interaction of zinc with other elements in plants: a review. *Inter. J. Agric. Crop Sci.* 4: 1881-1884.
30. Nelson, R.E. 1982. Carbonate and gypsum, P 181-196. In: Page, A.L., et al. (Ed). *Methods of soil analysis. Part 2*. 2<sup>nd</sup> ed. Agronomy monograph no. 9. SSSA and ASA. Madison, WI.
31. Nelson, D.W., and Sommers, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter, P 539-579. In: Page, A.L., et al. (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2<sup>nd</sup> ed. American Society of Agronomy. Inc. Soil Science Society of America. Inc. Madison, Wisconsin, USA.
32. Rahman, M.A., Hasegawa, H., Ueda, K., Maki, T., and Rahman, M.M. 2008. Arsenic uptake by aquatic macrophyte *Spirodela polyrhiza* L.: interactions with phosphate and iron. *J. Hazard. Mater.* 160: 356-361.
33. Rhoades, J.D. 1982. Cation exchange capacity, P 149-157. In: Page, A.L., et al. (Ed). *Methods of soil analysis. Part 2*. 2<sup>nd</sup> ed. American Society of Agronomy. Inc. Soil Science Society of America. Inc. Madison, Wisconsin, USA.
34. Shaibur, M.R., Kiltajima, N., Huq, S.M.I., and Kawai, S. 2009. Arsenic-iron interaction: Effect of additional iron on arsenic-induced chlorosis in barley grown in water culture. *Soil Science and Plant Nutrition*. 55: 739-746.
35. Sherman, D.M., and Randall, S.R. 2003. Surface complexation of arsenic (V) to iron (III) (hydr)oxides: Structural mechanism from ab initio molecular geometries and EXAFS spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 67: 4223-4230.
36. Shipley, H.J., Engates, K.E., and Guettner, A.M. 2011. Study of iron oxide nanoparticles in soil for remediation of arsenic. *Nanoparticle Research*. 13: 2387-2397.
37. Sneller, F.E.C., Van Heerwaarden, L.M., Kraaijeveld-Smit, F.J., Ten Bookum, W.M., Koevoets, P.L.M., Schat, H., and Verkleij, J.A.C. 1999. Toxicity of arsenate in *Silene vulgaris*, accumulation and degradation of arsenate-induced phytochelatin. *New Phytologist*. 144: 3-232.

38. Srivastava, S., Mishra, S., Tripathi, R.D., Dwivedi, S., Trivedi, P.K., and Tandon, P.K. 2007. Phytochelatins and antioxidant systems respond differentially during arsenite and arsenate stress in *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle. *Environmental Science & Technology*. 41: 2930-2936.
39. Sun, X.H., and Doner, H.E. 1996. An investigation of arsenate and arsenite bonding structure on goethite by FTIR. *Soil Science*. 161: 865-872.
40. Tang, T., and Miller, D.M. 1991. Growth and tissue composition of rice grown in soil treated with inorganic copper, nickel, and arsenic. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 22: 2037-2045.
41. Tuutijärvi, T., Repo, E., Vahala, R., Sillanpää, M., and Chen, G. 2012. Effect of Competing Anions on Arsenate Adsorption onto Maghemite Nanoparticles. *Chine. J. Chem. Engin.* 20: 505-514.
42. Warren, G.P., Alloway, B.J., Lepp, N.W., Singh, B., Bochereau, F.J.M., and Penny, C. 2003. Field trials to assess the uptake of arsenic by vegetables from contaminated soils and soil remediation with iron oxides. *The Science of the Total Environment*. 311: 19-33.
43. Wenzel, W.W., Kirchbaumer, N., Prohaska, T., Stingeder, G., Lombi, E., and Adriano, D.C. 2001. Arsenic fractionation in soils using an improved sequential extraction procedure. *Analytica Chimica Acta*. 436: 309-323.
44. Wu, G.R., Hong, H.L., and Yan, C.L. 2015. Arsenic accumulation and translocation in mangrove (*Aegiceras corniculatum* L.) grown in Arsenic Contaminated Soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 12: 7244-7253.
45. Xu, H., Allard, B., and Grimvall, A. 1988. Influence of pH and organic substance on the adsorption of As (V) on geologic materials. *Water Air and Soil Pollution*. 40: 293-305.
46. Yassen, A., Abou El-Nour, E.A.A., and Shedeed, S. 2010. Response of wheat to foliar spray with urea and micronutrients. *J. Amer. Sci.* 6: 14-22.
47. Yean, S., Cong, L., Yavuz, C.T., Mayo, J.T., Yu, W.W., Kan, A.T., Calvin, V.L., and Tomson, M.B. 2005. Effect of magnetite particle size on adsorption and desorption of arsenite and arsenate. *J. Mater. Res.* 20: 3255-3264.
48. Zhang, M., Pan, G., Zhao, D., and He, G. 2011. XAFS study of starch-stabilized magnetite nanoparticles and surface speciation of arsenate. *Environmental Pollution*. 159: 3509-3514.





Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(1), 2018*

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2017.12528.2723

## **The effects of hematite nanoparticles on the concentrations of arsenic and some micronutrients of corn plant grown in contaminated soils**

**\*T. Mansouri<sup>1</sup> and A. Golchin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science, University of Zanjan,

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Soil Science, University of Zanjan

Received: 08/21/2017; Accepted: 04/15/2018

### **Abstract**

**Background and Objectives:** Arsenic is one of the metalloids that recently attracted much attention because of its chronic effects on human health. Long-term exposure to As can cause skin, bladder, lung and prostate cancers. The presence of As in soil and water leads to its transfer to the different parts of plants. So far the effect of hematite nanoparticles ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) on the concentration of As in plants grown in contaminated soils has not been evaluated. Therefore this study was conducted to evaluate the effects of hematite nanoparticles on the concentrations of As, P, Fe, Zn and Mn of corn plant grown in contaminated soils.

**Materials and Methods:** A factorial experiment was conducted using a completely randomized design and three replications. The experimental factors were hematite nanoparticles (0, 0.05, 0.1 and 0.2%) and soil As (0, 6, 12, 24, 48 and 96 mg/kg) levels. The soil was artificially contaminated with different levels of As using Na<sub>2</sub>HAsO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O salt and incubated for 5 months. Hematite nanoparticles were synthesized from iron nitrate and their properties were investigated by XRD, SEM and TEM techniques. At the end of incubation time, the hematite nanoparticles were added to the As contaminated and control soils and after 1 month the concentrations of available As were measured. Then, the corn plant was used as a bioindicator. After 75 days, the plants were harvested and the dry weights as well as concentrations of As, P, Fe, Zn and Mn of aerial parts and roots were measured.

**Results:** The spherical morphology of the hematite nanoparticles was diagnosed by SEM and TEM images and the mean diameter of the particles was predominantly less than 30 nm. The results showed that the concentration of soil available arsenic and arsenic concentrations of root and aerial parts increased as the concentration of soil total arsenic increased. The accumulation of arsenic in the root was higher than the corn aerial parts. Contamination of soil by As increased the concentrations of P and Mn and decreased Fe and Zn in corn root. The concentrations of P, Fe and Zn in the aerial parts of corn decreased while Mn increased as a result of As application. As also reduced P translocation from the roots to the aerial parts of corn plants. The application of hematite nanoparticles significantly decreased the concentrations of arsenic in soil and in root and aerial parts of corn. The application of hematite nanoparticles increased the dry weight of root by increasing Fe and Zn concentrations in root and decreasing the accumulation of As, P and Mn in the plant root. The nanoparticles utilization also increased the dry weight of aerial parts as a result of increased concentrations of P, Fe and Zn and reduced accumulation of As and Mn. However, in case of uncontaminated soils, nanoparticles decreased the concentrations of P, Fe, Zn, Mn and dry weight of root and aerial parts of plants. The most effective level of application of hematite nanoparticles was 0.2% in which the decrease of As concentration in root and aerial parts of plant were 54.64 and 40.20 percent, respectively for the soils with total As of 96 mg As/kg.

---

\* Corresponding Author; Email: t.mansouri2010@gmail.com

**Conclusions:** As at the concentrations of less than 12 mg/kg increased root and aerial parts growth and dry weights but at the concentrations higher than 12 mg/kg, by producing toxic effects and disrupting the balance of nutrients, reduced the growth and dry weights of root and aerial parts of corn plant. Hematite nanoparticles have been effective in reducing the concentration of arsenic that is absorbed by the soil, which reduces the concentration of arsenic in the plant and increases its growth. In general, these results suggested that hematite nanoparticles can be used for remediation of arsenic contaminated soils, if further research is carried out on their environmental effects.

**Keywords:** Arsenic, Corn, Hematite nanoparticles, Nutrient