مجله مهندسی بهداشت محیط، زمستان ۱۳۹۸، سال ۷، شماره ۲: ۱۳۵-۱۵۱

بررسی تجمع فلزات سنگین در گیاهان آبیاری شده با آب چاه و فاضلاب تصفیه شده‌ی شهر بیرجند

محمد جواد ذوقی*[۱]، محمد رضا دوستی[۲]

[۱] استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
[۲] دانشیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۲/۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۲۱

چکیده

زمینه و هدف: در سال‌های اخیر در کشورهای خشک و نیمه خشک استفاده از فاضلاب شهری در آبیاری گیاهان مورد توجه قرار گرفته است. با وجود اینکه استفاده از فاضلاب می‌تواند یک استراتژی پایدار و موثر باشد، اثرات زیست محیطی این کاربرد باید بررسی شود. هدف در این مطالعه بررسی امکان استفاده از فاضلاب شهری تصفیه شده در آبیاری گیاهان زراعی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه غلظت فلزات سنگین آهن، روی، کروم، مس، منگنز و نیکل در اندام‌های مختلف و خاک اطراف ریشه گیاه جو و ذرت بررسی شد. گیاهان مورد بررسی با منابع مختلف آب آبیاری شدند. سپس اثرات منابع مختلف آبیاری بر جذب فلزات در قسمت‌های مختلف گیاه به وسیله آزمون‌های آماری بررسی شد.

یافته ها: با توجه به نتایج، نوع منبع آب (آب چاه، فاضلاب تصفیه شده) بر میانگین غلظت فلز سنگین مس در برگ جو، فلزات کروم ، مس و نیکل در ریشه جو و فلزات مس و نیکل در خاک اطراف ریشه جو در سطح ۵٪ معنی دار بود. غلظت نیکل در این مطالعه در خاک اطراف ریشه برای هر دو گیاه و هر دو منبع آبیاری به علت وجود نیکل در سنگ‌های اولترامافیک منطقه بیش از حد بحرانی بود. به علت عملکرد مناسب برکه های تثبیت تصفیه خانه شهر بیرجند در کاهش فلزات سنگین از فاضلاب شهری، غلظت اکثر فلزات سنگین اندام های گیاهی و خاک اطراف ریشه در حالت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده نسبت به حالت آبیاری با آب چاه بطور معنی‌داری کمتر بود. به علت نزدیکی مزارع به محل تردد خودروهای سنگین غلظت مس در تمام حالات مورد بررسی بالا و نزدیک به محدوده بحرانی بود. غلظت فلز کروم در اندام‌های هوایی گیاه نسبت به سایر فلزات مورد بررسی کمتر بود که نشان دهنده، تحرک کمتر این فلز نسبت به سایر فلزات مورد بررسی است.

نتیجه گیری: با توجه به نتایج این مطالعه، غلظت فلزات سنگین در گیاهان مورد بررسی کمتر از حدود بحرانی بود. همچنین غلظت فلزات در خاک اطراف ریشه بیشتر از غلظت در اندام گیاهان بود. بنابراین پایش مستمر غلظت این فلزات در خاک و گیاهان برای جلوگیری از تجمع فلزات سنگین در زنجیره غذایی ضروری است.

کلمات کلیدی: فلزات سنگین، محصولات زراعی، فاضلاب شهری، اندام‌های گیاهی، خاک

* **نویسنده مسئول:** استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
ایمیل: mj.zoqi@birjand.ac.ir - تلفن تماس: ۰۵۶-۳۲۲۰۲۰۴۹

مقدمه

در برخی از مناطق کشاورزی اطراف شهرها به علت دسترسی آسان، دفع نامناسب و کمبود آب شیرین از فاضلاب شهری برای آبیاری محصولات کشاورزی استفاده می‌شود. آبیاری به وسیله فاضلاب یکی از منابع مهم در آلودگی خاک به فلزات سنگین شناخته شده است. میزان تجمع فلزات سنگین در خاک به عوامل مختلفی نظیر درصد مواد آلی، بافت، pH و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک وابسته است [۱].

فلزات سنگین به علت تجزیه ناپذیری زیستی، نیمه عمر بیولوژیکی طولانی و تجمع پذیری در قسمت‌های مختلف بدن بسیار خطرناک می‌باشند. اغلب فلزات سنگین به علت حلالیت در آب سمی می‌باشند. همچنین به علت تجمع و عدم دفع از بدن، غلظت های کم فلزات سنگین نیز سبب آسیب به انسان می‌شود. فاضلاب حاوی مقادیر مختلفی از فلزات سنگین می‌باشد [۲]. افزایش غلظت فلزات سنگین در خاک به علت آبیاری با فاضلاب، سبب آلودگی خاک و کاهش کیفیت و ایمنی محصولات غذایی می‌شود [۳]. مصرف غذای آلوده به فلزات سنگین سبب بیماری‌های مختلف مانند کاهش قدرت سیستم دفاعی بدن، عقب افتادگی نوزادان، معلولیت و افزایش سرطان خواهد شد [٤].

آب و غذا منابع اصلی تامین کننده فلزات مورد نیاز بدن هستند. همچنین از طریق این منابع انسان می‌تواند در معرض فلزات سمی قرار گیرد. گیاهان مختلف می‌توانند فلزات سنگین را جذب کنند. میزان جذب فلزات در گیاهان موجود در خاک آلوده بیشتر خواهد بود [۵]. فلزات جذب شده در قسمت های خوراکی و غیر خوراکی گیاه تجمع یافته و برای انسان و حیوانات مصرف کننده از آن ها می‌توانند مشکلات جدی ایجاد نماید [٦]. با توجه به اهمیت کیفیت غذا تحقیقات مختلفی در زمینه آلودگی غذا به مواد شیمیایی مانند فلزات سنگین، آفت کش‌ها و کودهای شیمیایی انجام می‌شود. با توجه به اینکه محصولات زراعی نسبت به محصولات باغی در دوره‌های زمانی کوتاه تری فلزات و مواد غذایی را جذب می‌نمایند، این گونه محصولات بیشتر مورد توجه می‌باشند. میزان جذب فلزات سنگین در گونه‌های گیاهی مختلف، همچنین تحمل گیاهان به انواع فلزات سنگین، متفاوت است. بنابراین گونه گیاهی عامل دیگری است که در ارتباط با میزان آلایندگی فلزات سنگین اهمیت دارد [۷،۸].

منابع فلزات سنگین در فاضلاب شهری، شامل فاضلاب خانگی، فاضلاب صنعتی، رواناب سطحی و نفوذ آب های زیر زمینی می‌باشد. فاضلاب صنعتی منبع کادمیوم، جیوه، سرب و کروم می‌باشد، در حالیکه منبع اصلی مس، نیکل و روی فاضلاب خانگی است [۹]. در فاضلاب شهری غلظت روی، مس و آهن نسبت به سایر فلزات سنگین بیشتر می‌باشد. همچنین مس و روی در حالت قابل اکسیداسیون در فاضلاب قرار دارند، که سبب ایجاد مسمویت بیشتر می‌شوند [۱۰]. با توجه به عدم ورود فاضلاب صنعتی به فاضلاب شهری بیرجند فلزات روی، مس، نیکل و آهن در این مطالعه بررسی شد. همچنین با توجه به مطالعات گذشته فلزات کروم و منگنز بیش از حد استاندارد در منابع آب منطقه بیرجند موجود است. بطوریکه دامنه تغییر غلظت کروم در منابع آب بیرجند بین ۰/۰۱۳ ppm تا ۰/۱۲ ppm بوده و حدود ٦۹ ٪ از منابع آب منطقه مورد مطالعه دارای غلظتی بیشتر از حد مجاز بود و ۳۱ ٪غلظتی برابر و یا کمتر از حد استاندارد داشتند. کروم موجود در منابع آب منطقه به شکل کرومات بوده که در غلظتهای بالا پتانسیل بیماریزایی دارد [۱۱]. بنابراین در این مطالعه علاوه بر فلزات روی، مس، نیکل و آهن غلظت فلزات کروم و منگنز نیز در اندام‌های مختلف گیاهی بررسی شد.

با توجه به اینکه گیاهان فاقد سیستم انتقال ویژه برای کروم هستند ، این فلز به همراه سایر یون‌ها مانند منگنز یا آهن به گیاه انتقال می‌یابد. این فلز سبب اختلال در فرآیند جوانه زنی و رشد ریشه، ساقه و برگ گیاه شده و از طریق اثر بر آنزیم‌ها متابولیسم گیاه را تغییر می‌دهد [۱۲]. افزایش غلظت فلز مس سبب کاهش وزن تر ، طول ساقه و ریشه ، کلروفیل و کاروتنوئیدها گیاه می‌شود. همچنین این فلز به علت افزایش

سطح گونه های اکسیژن فعال در محفظه های درون سلولی گیاه سبب ایجاد تنش اکسیداتیو می شود [۱۳]. نیکل یک عنصر ضروری برای رشد گیاه است، اما غلظت زیاد آن سبب مسمومیت های گیاهی مانند جلوگیری از فعالیت آنزیم ها، سوخت و ساز نیتروژن و کاهش رشد گیاه می شود. وجود یون‌ها آهن و منگنز سبب کاهش انتقال نیکل به قسمت‌های مختلف گیاه می‌شود [۱۴]. مسمومیت فلز روی در گیاه سبب آسیب در ریشه و قهوه‌ای شدن ریشه، کاهش ریشه های جانبی، کاهش غلظت سایر فلزات ضروری در گیاه به ویژه آهن می‌شود. همچنین افزایش غلظت این فلز سبب افزایش مقدار مالون دی آلدئید شده که نشان‌دهنده افزایش رادیکال‌های آزاد در گیاه است [۱۵]. غلظت بالای عنصر ضروری آهن باعث سیاه شدن سریع، ناهنجاری و مرگ بافت سلولی (نکروز) می‌شود [۱۶]. منگنز یک عنصر ضروری برای رشد گیاه بوده، اما افزایش غلظت آن سبب اختلال در فعالیت آنزیم ، جذب و استفاده از سایر عناصر معدنی و تنش اکسیداتیو می شود. همچنین افزایش غلظت این فلز سبب کاهش رنگ سبز برگ ها و رشد آن‌ها می‌شود [۱۷].

مطالعات مختلفی در زمینه اثرات زیست محیطی کاربرد فاضلاب در آبیاری گیاهان انجام شده است. با توجه به نتایج این مطالعات میزان فلزات سنگین در خاک با طول دوره آبیاری رابطه داشته و با افزایش طول دوره آبیاری میزان غلظت سرب تا $\mu g\ kg^{-1}$ ۱۸۹۰–۱۰۱۰ $\mu g\ kg^{-1}$ و کادمیوم تا $\mu g\ kg^{-1}$ ۲۰–۲ در خاک منطقه مورد بررسی افزایش یافته است [۱۸]. در مطالعه دیگر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده سبب افزایش معنی‌دار نیتروژن کل، پتاسیم و فسفر در برگ درختان زیتون شد، درحالیکه فلزات سرب، کادمیوم، منگنز و روی هیچگونه افزایشی نداشت [۱۹]. در مطالعه انجام شده در ایران و بر روی تجمع فلزات سنگین در گیاهان گندم، یونجه، ذرت، گوجه فرنگی، خیار و طالبی مشخص شد، استفاده از فاضلاب تصفیه شده سبب افزایش غلظت فلزات سنگین شده، اما غلظت این فلزات همواره از حد بحرانی کمتر است. در مطالعه دیگر مشخص شد غلظت فلزات سنگین در فاضلاب خروجی از تصفیه خانه فاضلاب مشهد بطور معنی‌داری از استانداردهای مربوط به استفاده مجدد از فاضلاب در کشاورزی و آبیاری کمتر می‌باشد [۲۰].

در این تحقیق با توجه به گستردگی سطح زیر کشت ذرت و جو در مزارع اطراف تصفیه خانه بیرجند پتانسیل تجمع فلزات سنگین آهن، روی، کروم، مس، منگنز و نیکل در این دو محصول زراعی بررسی شد. همچنین در برخی از مزارع اطراف تصفیه خانه بیرجند، آبیاری با فاضلاب شهری تصفیه شده انجام می‌شود. بنابراین در این تحقیق اثرات آبیاری محصولات کشاورزی با آب زیرزمینی و فاضلاب شهری تصفیه شده، بر روی تجمع فلزات سنگین در خاک و بخش‌های مختلف محصولات نیز بررسی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری

نمونه برداری در فصل تابستان (فصل برداشت محصول در منطقه) و به روش کاملاً تصادفی صورت گرفت. تعداد ۲۰ نمونه از نقاط مختلف اطراف تصفیه خانه شهری واقع در شمال غرب شهر بیرجند در خراسان جنوبی برداشت شد. هریک از این نمونه‌ها شامل گیاه و بخشی از خاک سطحی اطراف ریشه به عمق تقریبی ۳۰–۰ سانتی متری با توجه به عمق ریشه گیاه بود. با توجه به اینکه در این مطالعه غلظت فلزات سنگین علاوه بر خاک در ۳ بخش گیاه شامل ریشه، برگ و دانه بصورت مجزا بررسی شد. لذا در مجموع تعداد ۶۰ نمونه از دو گیاه جو و ذرت و ۲۰ نمونه خاک از دو ناحیه متفاوت جمع آوری شد. این دو ناحیه شامل زمین‌های زراعی اطراف تصفیه خانه فاضلاب شهری بیرجند که بخشی از آن ها با آب چاه و بخشی دیگر با فاضلاب خروجی از تصفیه خانه آبیاری می‌شوند.

آماده سازی نمونه‌های آب، خاک و گیاه

اندازه‌گیری مقادیر pH، اکسیژن بیولوژیکی مورد نیاز (BOD)، اکسیژن شیمیایی مورد نیاز (COD)، هدایت الکتریکی (EC)، نیترات، آمونیوم، فسفات، پتاسیم و فلزات سنگین (کروم، نیکل، روی، آهن، منگنز و مس) در آب چاه و فاضلاب تصفیه شده با استفاده از روش‌های استاندارد برای آزمایش آب و فاضلاب انجام شد [۲۱].

استخراج فلزات سنگین از نمونه گیاه با استفاده از روش‌های مرجع برای آزمایش گیاهان انجام شد [۲۲]. تمام نمونه‌های گیاهی جمع آوری شده با آب دوبار تقطیر برای جداسازی گرد و غبار شستشو و برای کاهش رطوبت کلیه قسمت‌های گیاه با هوا خشک شدند. سپس حدود ۲-۱ گرم از هر نمونه درون ارلن ریخته شد و وزن خشک نمونه ها، از طریق قرار گیری ارلن‌ها به مدت ۲٤ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در آون به دست آمد. نمونه های خشک شده به مدت ۲٤ ساعت در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. سپس برای هضم اسیدی به داخل هر ارلن، حدود ۵ میلی لیتر اسید نیتریک اضافه شد. محلول ایجاد شده به منظور تکمیل عملیات هضم خشک روی هات پلیت قرار گرفت. پس از تبخیر اسید، ارلن‌ها توسط آب دو بار تقطیر حاوی ۱٪ وزنی اسیدنیتریک به حجم رسانده و از کاغذ صافی واتمن ٤۲ با اندازه روزنه‌های ۲/۵ µm عبور داده و وزن بطری‌ها اندازه گیری و به ازای هر ۱۰ نمونه، یک نمونه شاهد تهیه شد [۲۲].

هضم اسیدی خاک بر اساس روش استاندارد شماره ۳۰۵۰ EPA انجام شد. نمونه های خاک پس از خشک شدن در هوا، خرد و از الک شماره ۱۰ عبور داده شدند. یک گرم از نمونه خاک خشک شده در بالون ml ۲۵۰ قرار داده شد. به نمونه ml ۱۰ اسید نیتریک ۵۰٪ اضافه و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۹۵ درجه سلسیوس حرارت داده شد. پس از خنک سازی، ml ۵ اسید نیتریک غلیظ اضافه و به مدت ۳۰ دقیقه رفلاکس انجام شد. این عمل تکرار شد تا بخارات قهوه‌ای از نمونه خارج نشود. پس از خنک سازی ml ۲ آب و H_2O_2 ml ۳ اضافه و از حرارت برای شروع واکنش پراکسید استفاده شد. سپس محلول تا رسیدن به حجم ml ۵ تبخیر شد. پس از خنک سازی H_2O_2 ml ۱۰ به آرامی اضافه شد. محلول با ml ۱۰ اسید هیدروکلریک ۳۷٪ در دمای ۹۵ درجه سلسیوس به مدت ۱۵ دقیقه رفلاکس شد. محلول حاصل از کاغذ صافی واتمن ٤۲ عبور داده و توسط آب دوبار تقطیر به حجم ml ۱۰۰ رسانده و وزن بطری‌ها اندازه‌گیری و به ازای هر ۵ نمونه، یک نمونه شاهد تهیه شد [۲۳]. غلظت فلزات سنگین در تمام نمونه‌ها با دستگاه ICP-OES مدل Varian 725-ES تعیین شد. تمام مواد شیمیایی مورد استفاده در این تحقیق مواد آزمایشگاهی ساخت شرکت مرک آلمان بود. اندازه گیری تمام نمونه‌ها با سه بار تکرار انجام شد.

تجزیه آماری

در این مطالعه برای تایید تغییرپذیری داده‌ها و اعتبار نتایج از تحلیل واریانس یکطرفه(One-Way ANOVA) بر روی تمام داده‌ها استفاده شد. مقایسه غلظت فلزات در اندام‌های گیاهان آبیاری شده با آب چاه با گیاهان آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده با آزمون تی مستقل(Independent-samples T-test) و مقایسه غلظت فلزات در خاک و گونه‌های گیاهی با مقادیر مجاز با آزمون تی یک نمونه(One-Sample T test) انجام شد. بررسی نرمالی و همگنی داده‌ها و واریانس‌ها بترتیب با آزمون آماری کولموگروف-اسمیرنوف(Kolmogorov-Smirnov) و لیون(Leven) انجام شد. روابط بین غلظت فلزات کروم، مس، روی، نیکل و منگنز در ریشه و اندام هوایی گیاهان و روابط بین غلظت این فلزات در خاک و ریشه‌ی هر یک از گونه‌های گیاهی، با ضریب همبستگی پیرسون(Pearson correlation) بررسی شد. تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم افزار SPSS 22 انجام شد.

یافته‌ها

مشخصات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب چاه و فاضلاب تصفیه شده در جدول ۱ نمایش داده شده است. میزان هدایت الکتریکی (EC) آب چاه و فاضلاب تصفیه شده بترتیب برابر ۱/۲ ds/m و ۱/٦ ds/m بود. گیاهان ذرت و جو قابلیت تحمل تنش شوری تا ٦ ds/m را داشته بدون آنکه به راندمان محصول و جوانه زنی دانه‌ها صدمه‌ای وارد شود [۲٤]. مقادیر pH برای آب چاه و فاضلاب تصفیه شده بترتیب برابر ۷/٤ و ۷/۸ بود. با توجه به pH قلیائی منابع آب، امکان انحلال و تحرک فلزات سنگین و انتقال آن‌ها به اندام‌های گیاهی کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۱ مقادیر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در فاضلاب تصفیه شده بیشتر از آب چاه بود. بنابراین میزان نیاز به مصرف کود برای تامین مواد مغذی گیاه در آبیاری با فاضلاب تصفیه شده نسبت به آب چاه کاهش می‌یابد [۲٤].

غلظت متوسط فلزات سنگین در فاضلاب خروجی تصفیه خانه بیرجند، آب چاه مورد استفاده برای آبیاری و خاک آبیاری نشده در جدول ۲ نمایش داده شده است.

غلظت متوسط فلزات سنگین در اطراف ریشه و اندام‌های گیاه جو و ذرت بترتیب در جداول ۳ و ٤ نمایش داده شده است. با توجه به این جداول در برگ، ریشه و دانه گیاه جو و ذرت در هر دو نوع آبیاری، بیشترین و کمترین میانگین غلظت بترتیب مربوط به آهن و کروم است. در خاک اطراف ریشه جو و ذرت، بیشترین و کمترین میانگین غلظت بترتیب مربوط به آهن و مس است.

جدول ۱: مشخصات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب چاه و فاضلاب تصفیه شده

پارامتر	آب چاه	فاضلاب تصفیه شده
pH	۷/٤	۷/۸
EC (dS/m)	۱/۲	۱/٦
BOD (mg/l)	–	۲۵
COD (mg/l)	–	۳۸
NO_3-N (mg/l)	۵/۲	۲۲/۵
آمونیوم (mg/l)	۰/۲٤	۱۰/۳
PO_4-P (mg/l)	۰/٦٤	۳/۱۲
K (mg/l)	۸/۹	۲۳/٦

جدول ۲: میانگین غلظت فلزات سنگین در منابع مختلف آبیاری و خاک آبیاری نشده

	Cr	Zn	Ni	Cu	Fe	Mn
فاضلاب خروجی تصفیه خانه بیرجند (mg/l)	۰/۷۳۱	۱/۲۱۵	۱/۲۱٦	۰/۱۳٤	٦۵/۲٤٦	٤/۸٤۳
آب چاه (mg/l)	۰/۹٦٤	۱/۲٦۳	۱/۳٤۲	۰/۱۲۸	۷۳/۵۰۸	۳/۵۱٦
خاک (mg/kg)	۱۱/۹۱	۲۵/۹۳	۳۸/۲٤	۱٦/۳۷	۷۲۱۰/٦۲	۵۵/۳٤

جدول ۳: میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک اطراف ریشه و اندام‌های گیاه جو بر حسب mg/kg

	گیاه جو آبیاری شده با آب چاه				گیاه جو آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده			
	برگ	دانه	ریشه	خاک	برگ	دانه	ریشه	خاک
Cr	۱/۹٤	۰/۲۱	۲/۸۹	۹۳/٦۸	۰/۸۹	۰/۱۲	۱/۱۵	۵۳/۷۱
Cu	۷/۹٦	۸/۹۸	۹/۲۹	۲۹/۹٤	٤/۹۱	۹/۲۱	۳/۲۸	۲۲/۵۹
Ni	۲/۱۲	۰/۷۹	۳/۸٤	۱۵۹/۲۸	۱/۸۸	۲/۲٤	٤/۹٦	۱۲٦/۲۵
Fe	۲٤۹/۷۵	۸۹/۹۱	۲۷۲/۱۵	۱٦۷۳۵/٤۹	۲۳٤/۸۹	۱۰٦/۸٤	۱۸۸/۰۵	۱٤۹۸۰/۵۷
Mn	٤٤/۲۸	۱۳/۵۸	۱۵/۸٦	۳۵۸/۲۰	٤۷/۳۹	۱۳/٦۲	۱٤/۹۸	۳۵٤/۰۵
Zn	۱۹/۰۵	۱۳/۹۲	۲۷/۱۱	۱۱۹/۲۹	۱۲/۹۳	٦/۹۱	۱۰/۸٤	۱۱۷/۵۳

جدول ٤: میانگین غلظت فلزات سنگین در خاک اطراف ریشه و اندام‌های گیاه ذرت بر حسب mg/kg

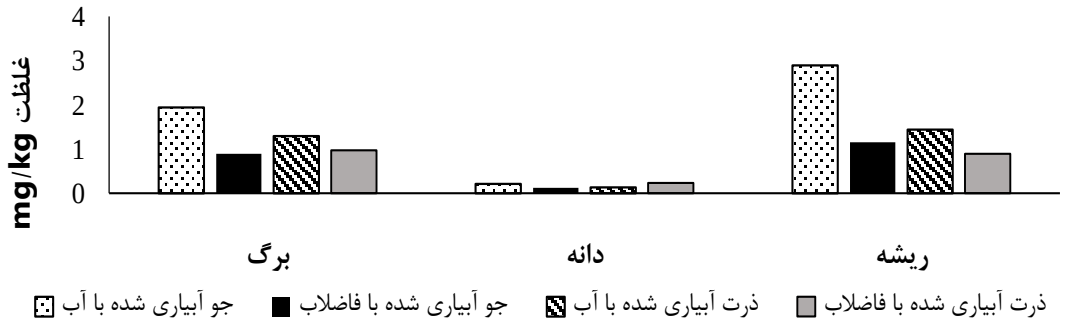
	گیاه ذرت آبیاری شده با آب چاه				ذرت آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده			
	برگ	دانه	ریشه	خاک	برگ	دانه	ریشه	خاک
Cr	١/٢٩	٠/١٣	١/٤٤	٥٩/٩٦	٠/٩٧	٠/٢٣	٠/٨٩	٤٧/٩٢
Cu	٧/٧١	١١/٨٥	٤/٠٨	٢٨/٩٤	١٣/٢٠	١٣/٨٨	٣/٩٧	٢٥/١٧
Ni	١/٩٨	٨/٥٤	٢/٣٨	١٣٦/٩١	١/٦٨	٧/٨٦	٤/١٧	١١٨/٠٢
Fe	١٦٨/٢٤	٣٥/٧٨	٢٧٩/٨٤	١٥٩٧٨/٨٢	١٧٨/٠٦	٤٤/٦٤	١٠٨/٧٥	١٣٩٨٤/٦١
Mn	٤٤/٢٨	١٦/٩٤	١٣/٠٤	٣٩٧/٨٧	٦٥/٠٨	٢٩/٦٣	١٣/٥٩	٤٣٨/٥٤
Zn	٥/٠٩	٢٥/٩١	٦/٢٤	٤٨/٧٧	٣/٦٨	٢٥/٩٤	٤/٨٨	٣٩/٨٢

در جدول ٥ غلظت بحرانی فلزات سنگین در خاک و گیاه نمایش داده شده است. با مقایسه این جدول با جداول ٣ و ٤ مشخص می‌شود که غلظت های به دست آمده در بخش های مختلف گیاه همواره کمتر از محدوده غلظت‌های بحرانی می‌باشد. در سایر مطالعات نیز آبیاری با فاضلاب شهری تصفیه شده سبب افزایش غلظت فلزات سنگین مورد بررسی در جو و ذرت به بیش از حد بحرانی نشده بود [٢٥].

در خاک اطراف ریشه گیاه ذرت و جو غلظت Ni در هر دوحالت آبیاری بیش از حد بحرانی می‌باشد. همچنین در گیاه جو در خاک اطراف ریشه غلظت Zn در هر دوحالت آبیاری و غلظت Cr در حالت آبیاری شده با آب چاه در محدوده بحرانی می‌باشد. در سایر مطالعات نیز مشخص شده استفاده از فاضلاب شهری تصفیه شده سبب افزایش غلظت فلزات سنگین در گیاه به بیش از حدود استاندارد نمی‌شود. نتایج این مطالعات نشان داده که اگر چه امکان افزایش غلظت برخی از فلزات در خاک به بیش از محدوده بحرانی وجود دارد، اما غلظت این فلزات در گیاه همواره کمتر از محدوده بحرانی می‌باشد [٢٧،١٩]. همچنین نتایج مطالعات مختلف نشان داده که میزان جذب فلزات سنگین در گیاه علاوه بر غلظت این فلزات در خاک به اسیدیته خاک نیز بستگی دارند. بطوریکه مناطقی با غلظت بالای فلزات و اسیدیته‌ی پایین خاک، بیشترین خطر را برای انسان دارند [٣٠-٢٨]. pH خاک مناطق اطراف تصفیه خانه فاضلاب بیرجند بین ٧/٥ تا ٨/٥ بوده، بنابراین تا زمانی که اسیدیته کاهش نیافته خطر انحلال و تحرک بالای فلزات و جذب توسط گیاهان کمتر است. بنابراین توجه به تغییرات اسیدیته‌ی خاک منطقه ضروری است.

جدول٥: غلظت‌های بحرانی فلزات سنگین در گیاه و خاک (mg/kg) [٢٦]

	غلظت بحرانی در گیاه	غلظت بحرانی در خاک
Cr	٥ -٣٠	٧٥ -١٠٠
Cu	٢٠ -١٠٠	٦٠ -١٢٥
Ni	١٠ -١٠٠	١٠٠
Mn	٣٠٠ -٥٠٠	١٥٠٠ -٣٠٠٠
Zn	١٠٠ -٤٠٠	٧٠ -٤٠٠



نمودار ۱: میانگین غلظت کروم در اندام‌های گیاه جو و ذرت آبیاری شده با آب چاه و فاضلاب تصفیه شده

نتایج آزمون‌های واریانس یکطرفه و توکی

نتایج تجزیه واریانس غلظت کروم، نیکل، آهن و منگنز در اندام‌های جو نشان داد که بین غلظت این فلزات در اندام‌های جو در هر دو نوع آبیاری تفاوت معنی داری در سطح ۵٪ وجود دارد. در حالیکه این تفاوت برای غلظت های مس و روی معنی‌دار نیست. همچنین بین غلظت کروم، مس، نیکل، آهن، منگنز و روی در اندام‌های ذرت در هر دو نوع آبیاری تفاوت معنی‌داری وجود دارد.

کروم

با توجه به نتایج تجزیه واریانس و مقایسه‌ی میانگین توسط آزمون توکی، در جو آبیاری شده با آب بین غلظت کروم در دانه با ریشه و برگ، و در جو آبیاری شده با فاضلاب بین غلظت کروم در ریشه، دانه و برگ با یکدیگر، تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ وجود دارد. همچنین بین غلظت کروم در دانه ذرت آبیاری شده با آب با برگ و ریشه ذرت آبیاری شده با آب، و دانه ذرت آبیاری شده با فاضلاب، با برگ و ریشه ذرت آبیاری شده با فاضلاب تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ وجود دارد (نمودار ۱).

مس

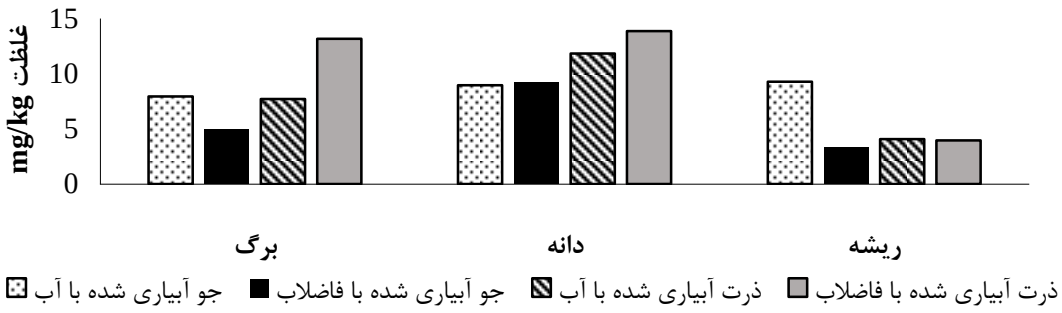
نتایج تجزیه واریانس و مقایسه‌ی میانگین توسط آزمون توکی نشان‌داد که، بین غلظت مس در دانه جو آبیاری‌شده با فاضلاب با ریشه و برگ جو آبیاری شده با فاضلاب تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ وجود دارد. در مورد گیاه ذرت بین غلظت مس در ریشه، برگ و دانه آبیاری شده با آب با یکدیگر و در حالت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده ریشه با برگ و دانه تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ وجود دارد (نمودار ۲).

نیکل

با توجه به نتایج بین غلظت نیکل در دانه، برگ و ریشه جو آبیاری شده با آب با یکدیگر و ریشه جو آبیاری شده با فاضلاب با دانه و برگ جو آبیاری شده با فاضلاب تفاوت معنی داری وجود داشت. همچنین در مورد گیاه ذرت آبیاری شده با آب بین غلظت نیکل در دانه با ریشه و برگ، و در ذرت آبیاری شده با فاضلاب بین غلظت نیکل در دانه با برگ و ریشه تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ وجود دارد (نمودار ۳).

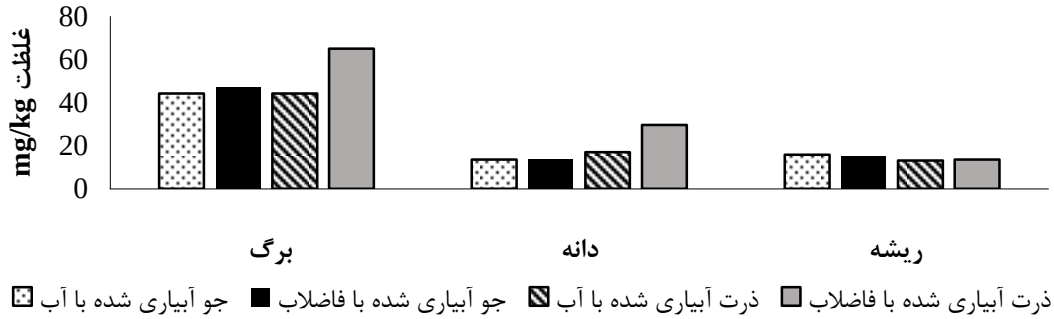
منگنز

با توجه به نتایج در جو آبیاری شده با آب بین غلظت منگنز در برگ با دانه و ریشه، و در جو آبیاری شده با فاضلاب بین غلظت منگنز در برگ با دانه و ریشه تفاوت معنی داری وجود داشت. در مورد ذرت آبیاری شده با آب غلظت در برگ، با غلظت در ریشه و دانه و در حالت آبیاری شده با فاضلاب غلظت در برگ با غلظت در ریشه و دانه تفاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ وجود دارد (نمودار ٤).



نمودار ۲: میانگین غلظت مس در اندام‌های گیاه جو و ذرت آبیاری شده با آب چاه و فاضلاب تصفیه شده

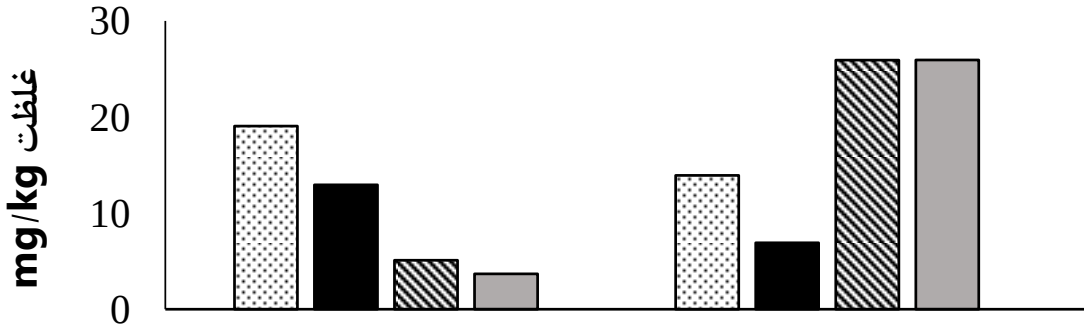
نمودار ۳: میانگین غلظت نیکل در اندام‌های گیاه جو و ذرت آبیاری شده با آب چاه و فاضلاب تصفیه شده



نمودار ٤: میانگین غلظت منگنز در اندام‌های گیاه جو و ذرت آبیاری شده با آب چاه و فاضلاب تصفیه شده

روی

غلظت روی در اندام‌های جو در هر دو نوع آبیاری تفاوت معنی‌داری وجود داشت. در مورد ذرت در هر دو نوع آبیـاری بین غلظت روی در دانه با غلظـت در ریشـه و بـرگ تفـاوت معنی‌داری در سطح ۵٪ وجود دارد (نمودار ۵).



نمودار۵: میانگین غلظت روی در اندام‌های گیاه جو و ذرت آبیاری شده با آب چاه و فاضلاب تصفیه شده

نتایج آزمون تی مستقل و ضریب همبستگی پیرسون

انحراف معیار غلظت فلزات سنگین و نتایج آزمون t برای اندام‌ها و خاک اطراف ریشه جو و ذرت بترتیب در جداول ٦ و ٧ نمایش داده شده است. با توجه به جدول ٦ آبیاری جو با فاضلاب تصفیه شده به جای آب چاه تفاوت معنی‌داری در میانگین غلظت فلزات در دانه گیاه ایجاد نکرد. با توجه به این جدول تاثیر منبع آب (آبیاری با آب چاه، آبیاری با فاضلاب تصفیه شده) بر میانگین غلظت فلز سنگین مس در برگ جو، فلزات کروم ، مس و نیکل در ریشه جو و فلزات مس و نیکل در خاک اطراف ریشه جو در سطح ۵٪ معنی‌دار بود. همچنین نوع منبع آب آبیاری در میانگین غلظت فلز روی در ریشه جو و غلظت فلز کروم در خاک اطراف ریشه جو سبب ایجاد تفاوت معنی‌داری در سطح ۱٪ شد. میانگین غلظت سایر فلزات در اندام ها و خاک اطراف جو آبیاری شده با آب چاه با جو آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده تفاوت معنی‌داری نداشت.

جدول۶: انحراف معیار و نتایج آزمون t میانگین غلظت فلزات سنگین در اندام‌ها و خاک اطراف ریشه جو

فلز		انحراف معیار (mg/kg)				t			
		برگ	دانه	ریشه	خاک	برگ	دانه	ریشه	خاک
Cr	A	۰/۳۹	۰/۰۳	۰/۲۹	٤/۸٤	۲/۰۵۸	۱/۹۸۹	٤/۷۳۱*	٤/۷۸۱+
	B	۰/۰٦	۰./۰۲	۰/۰۳	۳/٦۲				
Cu	A	۰/۳۲	۰/۹۹	۱/٦۹	۱/۸۳	۳/۱۸٤*	۰/۰۸٦	۲/۹٤۸*	۲/۱۹٦*
	B	./۹۵	۱/۳۲	۰/۱۸	۱/۵۸				
Ni	A	۰/۲	۰/۲۵	۰/۳٦	٤/۸۱	۱/۰۸٤	۲/۹۸۳	۲/۲۳۵*	۲/۳۲۷*
	B	۰/۳٤	۰/٤۹	۰/۱۸	۳/۵۹				
Fe	A	٤۷/۲۹	۵/۹۸	۸/۸٤	۵۹٦/۸	۰/۲۵۲	۱/۹۸٤	۱/٦۷۵	۱/۷۵۹
	B	۲۸/٦۵	۳/۵۸	٤٦/۸۵	۵۹۱/۲۸				
Mn	A	۱/۲۲	۱/٤۰	۰/۵۷	۳/۸٤	۱/۳۹۱	۰/۳۰۸	۱/۱۳۵	۰/۵٤۲
	B	۱/۷۳	۰/٤۸	۰/۷۹	٦/۰۹				
Zn	A	٦/۸٤	۱/۲۹	۱/۹۸	۳/٦۸	۰/۸۱۹	۲/۸۸۵	٤/۷۱۵+	۰/۲۹۸
	B	۲/۱۹	۱/۵۷	۲/٤۳	۲/۵۵				

A: آبیاری شده با آب چاه؛ B: آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده؛ *معنی داری در سطح ۵٪ ؛ +معنی داری در سطح ۱٪

جدول۷: انحراف معیار و نتایج آزمون t میانگین غلظت فلزات سنگین در اندام‌ها و خاک اطراف ریشه ذرت

فلز		انحراف معیار (mg/kg)				t			
		برگ	دانه	ریشه	خاک	برگ	دانه	ریشه	خاک
Cr	A	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۱۲	۱/۹٤	۱/۳۸۸	۰/۸۹۸	۳/۵۸٤$^{+}$	٦/۱۰۸$^{+}$
	B	۰/۱٤	۰/۰۹	۰/۰۸	۱/۰۸				
Cu	A	۰/۳۵	۰/۸۹	۰/۲۸	۱/۷٦	۱/۹۸٦	۱/۱۸۹	۰/۲۳۵	۱/۰۵۵
	B	۲/٦۸	۱/۷۳	۰/۸۷	۰/۷۸				
Ni	A	۰/۱۱	۱/۲٦	۰/۳۱	۲/۱۸	۰/۹۸٦	۰/۱۸٤	۳/۹٦۳$^{+}$	۸/۳۹۱+
	B	۰/۲٤	۱/٦۸	۰/۳۲	۱/۷۹				
Fe	A	۹/۱۵	۳/۲٦	۸/۹۱	۹۸/۵٤	۱/۱۳۹	۱/٦۹۱	٤/۸٤۱	٦/۷٤۳$^{+}$
	B	۵/۱۳	۳/۸۹	۲۹/۹۸	۲۲۹/۱٦				
Mn	A	٤/۸۹	۰/۷٤	۰/۵۹	۸/۸۵	۲/۰۹۳	۱۰/۸۵۹$^{+}$	۰/۰۹٦	۱/۲۲٦
	B	۷/۸۵	./۷۸	۲/۱۹	۷/۸۳				
Zn	A	۰/۷۸	۲/۷٤	۰/٦۹	۱/٤۹	۱/۲۵۸	٤/۹۲٦*	۱/۷۱۰	۲/۷۰۵*
	B	۰/۷۹	۱/۷۱	۰/٤۷	۱/٤۸				

A: آبیاری شده با آب چاه؛ B: آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده؛ *معنی داری در سطح ۵٪ ؛ $^{+}$معنی داری در سطح ۱٪

با توجه به جدول ۷ آبیاری ذرت با فاضلاب تصفیه شده به جای آب چاه تفاوت معنی‌داری در میانگین غلظت فلزات در برگ گیاه ایجاد نکرد. در حالیکه نوع منبع آب آبیاری در میانگین غلظت فلز روی در دانه و خاک اطراف ریشه ذرت در سطح ۵٪ و در میانگین غلظت منگنز در دانه ذرت، فلزات کروم و نیکل در ریشه ذرت و فلزات آهن، کروم و نیکل در خاک اطراف ریشه ذرت در سطح ۱٪ تفاوت معنی داری ایجاد کرد.

نتایج محاسبه ضریب همبستگی پیرسون برای فلزات سنگین در خاک و گیاه نشان داد که در ذرت و جو بین غلظت فلزات سنگین در خاک با غلظت فلزات در ریشه و بین غلظت فلزات در ریشه با غلظت فلزات در اندام هوایی گیاهان همبستگی معنی‌داری وجود ندارد.

بحث

با توجه به جداول ۳ و ٤ غلظت اکثر فلزات سنگین اندام های گیاهی و خاک اطراف ریشه در حالت آبیاری با آب چاه نسبت به حالت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بیشتر بود. این نتیجه در مطالعات مشابه نیز تایید شده است [۳۱, ۳۲]. این نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب برکه های تثبیت تصفیه خانه شهر بیرجند در کاهش یا حذف فلزات سنگین از فاضلاب شهری وغلظت بالاتر فلزات سنگین در آب چاه است. بطوریکه با توجه به جدول ۲ غلظت کروم، روی، نیکل و آهن در آب چاه مورد استفاده بیشتر از فاضلاب خروجی از تصفیه خانه می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده، میانگین غلظت تمام فلزات سنگین مورد بررسی در بخش ریشه در هر دو نوع آبیاری در گیاه جو بیشتر از ذرت است. در حالیکه میانگین غلظت در بخش اندام هوایی گیاهان آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده در ذرت بیشتر از جو است. همچنین میانگین غلظت عناصر کروم، مس، نیکل و روی در ریشه جو بیشتر از اندام هوایی آن است. درحالیکه در ذرت فقط میانگین غلظت

فلز کروم در ریشه بیشتر از اندام هوایی است. بنابراین نرخ جذب فلزات سنگین در ذرت بیشتر از جو می‌باشد. غلظت فلزات در گیاهان مختلف با توجه به نوع گونه، بافت و نوع فلزات بسیار متفاوت است. فرآیندهای پیچیده در تجمع فلزات در اندام‌های گیاهی موثر است و بطور معمول فلزات به طور غیر یکنواخت در اندام‌های گیاهی توزیع نمی‌شوند [۳۳].

در گیاه جو کمترین غلظت برای اکثر فلزات در دانه وجود دارد. برگ ها دارای واکوئل بیشتر نسبت به دانه می باشند. با توجه به اینکه واکوئل یک اندامک ذخیره ای مهم برای فلزات است، برگ نسبت به دانه فلزات سنگین بیشتری را در خود ذخیره می‌کنند [۳٤]. بیشترین غلظت آهن در اندام‌های گیاهان مورد بررسی در ریشه و برگ بود. آهن در گیاهان سبز برای ساخت کلروفیل کاربرد داشته و در برگ گیاه تجمع می‌کنند [۳۵]. مسمویت آهن برای گیاه در غلظت بیش از mg/kg ۳۰۰ رخ می‌دهد. در تمام گیاهان و حالات آبیاری مورد بررسی در این مطالعه غلظت آهن در اندام های گیاهی کمتر از mg/kg ۲۷۹/۸٤ بود. تجمع بیشتر آهن در اندام‌های گیاهی نسبت به سایر فلزات سنگین به علت نقش مهم آن در ساخت کلروفیل و فراوانی آن در پوسته زمین تایید شده است [۳٦].

نیکل

در این مطالعه در هر دو نوع آبیاری غلظت نیکل در دانه‌های ذرت بیشتر از ریشه‌ها بود. حداکثر غلظت نیکل در دانه و ریشه ذرت بترتیب برابر mg/kg ۸/٥٤ و mg/kg ٤/۱۷ بود. در سایر مطالعات انجام شده بر روی ذرت غلظت بیشتر نیکل در دانه نسبت به ریشه گیاه مشاهده شده بطوریکه در مطالعه‌ای غلظت نیکل در دانه و ریشه ذرت بترتیب برابر mg/kg ۱۱/٥ و mg/kg ٦/۹ بود [۳۷]. در این مطالعه حداکثر و حداقل غلظت نیکل در اندام‌های مختلف گیاهان مورد بررسی بترتیب برابر mg/kg ۸/٥٤ و mg/kg ۰/۷۹ بود. این مقادیر با غلظت‌های گزارش شده در سایر مطالعات مطابقت داشت. بطوریکه در مطالعه انجام شده بروی جذب فلزات مختلف توسط گندم و ذرت بیشترین و کمترین غلظت نیکل در اندام‌های مختلف گیاهان بترتیب غلظت mg/kg ۱۱/٥ تا mg/kg ۱/٥ بود [۳۷]. همچنین در مطالعه دیگر بروی تجمع فلزات در ذرت حداکثر غلظت نیکل در دانه ذرت و برابر mg/kg ۱۰/۸ و حداقل غلظت در ریشه و برابر mg/kg ۲/٥ بود [۳۸]. غلظت نیکل در این مطالعه در خاک اطراف ریشه برای هردو گیاه و هر دو منبع آبیاری بیش از حد بحرانی بود (جداول ۳ و ٤). منبع طبیعی نیکل سنگ های اولترامافیک و خاک بوجود آمده از این سنگ هاست. همچنین از این فلز در صنایع مختلف و فرایندهای شیمیایی بطور گسترده استفاده می شود [۳۹]. با توجه به اینکه فاضلاب صنایع به تصفیه خانه فاضلاب شهری بیرجند تخلیه نمی شود و مزارع و چاه مورد استفاده در این مطالعه از مراکز صنعتی فاصله دارد. بنابراین منبع اصلی نیکل در این مطالعه سنگ های اولترامافیک منطقه بوده و به همین علت صرفنظر از منبع آبیاری، غلظت آن در خاک بالا می‌باشد. همچنین با توجه به جدول ۲ امکان حذف این فلز در برکه تثبیت تصفیه خانه بیرجند وجود دارد، بنابراین غلظت آن در خاک آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده بطور معنی داری کمتر از خاک آبیاری شده با آب چاه است (جداول ٦ و ۷).

کروم

غلظت فلز کروم در اندام‌های مختلف گیاهان مورد بررسی نسبت به سایر فلزات مورد بررسی کمتر بود (جداول ۳ و ٤). تجمع کمتر کروم نسبت به سایر فلزات در اندام های گیاهی در مطالعات گذشته نیز بیان شده است [٤۰]. در گیاهان مورد بررسی بیشترین غلظت کروم در ریشه و کمترین غلظت در اندام‌های هوایی وجود داشت. این روند با نتایج سایر مطالعات مطابقت داشت، بطوریکه در مطالعه‌ای بیشترین غلظت کروم در اندام‌های هوایی و ریشه گیاه بترتیب برابر mg/kg ۱/٦۱ و

mg/kg ۳/۸۸ بود [۴۱]. غلظت بیشتر فلز کروم در ریشه نشان دهنده، تحرک کمتر این فلز نسبت به سایر فلزات مورد بررسی و تجمع بیشتر آن در ریشه است. کروم با سلول های ریشه پیوند تشکیل داده و به مقدار کمی به قسمت‌های بالایی گیاه منتقل می‌شود. غلظت بیشتر فلزات سنگین در ریشه‌ها نسبت به برگ‌ها و دانه‌ها، خطر آلودگی زنجیره غذایی را از طریق گیاهخواران کاهش می‌دهد [۴۲]. در این مطالعه بیشترین وکمترین غلظت کروم در خاک، بترتیب در خاک اطراف جو آبیاری شده با آب چاه و خاک اطراف ذرت آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده و برابر mg/kg ۹۳/۶۸ و mg/kg ۴۷/۹۲ بود. بطور معمول غلظت کروم در خاک آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده بین mg/kg ۲۳ تا mg/kg ۱۰۰ می‌باشد [۴۳]. همچنین بیشترین و کمترین غلظت کروم در اندام‌های مختلف گیاهان مورد بررسی بترتیب برابر mg/kg ۱/۹۴ تا mg/kg ۰/۱۲ بود. این مقادیر با حداکثر و حداقل غلظت‌های گزارش شده توسط Asgari و همکاران [۴۴] (بترتیب برابر mg/kg ۱/۹ و mg/kg ۰/۱) و Abebe و همکاران [۴۵] (بترتیب برابر mg/kg ۱/۵۸ و mg/kg ۰/۱۷) مطابقت داشت.

روی

در این مطالعه بیشترین تجمع فلز روی در ذرت و جو، بترتیب در اندام‌های هوایی و ریشه بود. تجمع بیشتر روی در ریشه جو در مطالعات دیگر نیز مشاهده شده بطوریکه در بررسی انجام شده بر روی جو میزان غلظت روی در ریشه برابر mg/kg ۴۰/۸۲ و در برگ برابر mg/kg ۲۶/۸۳ بود [۴۶]. در اندام‌های هوایی جو، فلز روی بیشتر در برگ‌ها تجمع کرده و تجمع آن در بخش خوراکی محصول کمتر است. این روند با سایر مطالعات مطابقت داشت بطوریکه در مطالعه‌ای غلظت روی در خاک، برگ و دانه جو بترتیب برابر mg/kg ۱۵۴/۰، mg/kg ۴۳/۴ و mg/kg ۳۱/۶ بود [۴۷]. در گیاه ذرت کمترین تجمع روی در برگ‌ها بود. تجمع کم فلز روی در برگ‌ها نسبت به سایر اندام‌های ذرت در سایر مطالعات مشاهده شده است [۴۶]. تفاوت در سیستم آوندی ذرت در برگ‌ها سبب تغییر در توزیع غلظت روی در قسمت‌های مختلف می‌شود [۴۸]. در این مطالعه در ذرت بیشترین مقدار روی در دانه‌ها تجمع داشت. دانه‌های ذرت در حین فرایند جوانه‌زنی قادر به جذب روی مورد نیاز خود از خاک نبوده به همین علت گیاه ذرت در هنگام رشد اقدام به ذخیره‌سازی این فلز در دانه می‌کند. بنابراین با افزایش غلظت این فلز در خاک، تجمع آن در دانه‌ها افزایش می‌یابد [۴۸]. در این مطالعه محدوده غلظت روی در اندام‌های مختلف گیاهان مورد بررسی بین mg/kg ۲۷/۱۱ تا mg/kg ۳/۶۸ بود که با غلظت‌های mg/kg ۱۸/۳ تا mg/kg ۲/۶ گزارش شده توسط Bashir و همکاران [۴۹] و mg/kg ۲۹/۶ تا mg/kg ۳/۸ گزارش شده توسط Lu و همکاران تطابق داشت [۵۰].

مس

با توجه به جداول ۳ و ٤ در هر دو نوع آبیاری تجمع بیشتر مس در دانه و برگ ذرت نسبت به جو مشاهده می‌شود. این روند در سایر مطالعات مشاهده شده است. بطوریکه در مطالعه‌ای میزان تجمع مس در برگ ذرت و جو بترتیب برابر mg/kg ۳/۹۸ و mg/kg ۲/٤٤ بود [۴۶]. ذرت نسبت به جو توانایی بیشتری در تحمل غلظت‌های بالای مس را داشته و این فلز را بیشتر در اندام‌های هوایی خود ذخیره می‌کند [۴۶]. در این مطالعه بیشترین مقدار غلظت مس در دانه ذرت آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده (mg/kg ۱۳/۸۸) و کمترین مقدار آن در ریشه جو آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده (mg/kg ۳/۲۸) بود که با حداکثر و حداقل غلظت‌های mg/kg ۱٦/۸ و mg/kg ۵/۲ گزارش شده توسط Arora و همکاران [۵۱] و mg/kg ۱۵/٦ و mg/kg ۳/۵ گزارش شده توسط Jaloud و همکاران مطابقت داشت [۳۸]. در این مطالعه غلظت مس در

تمام حالات مورد بررسی کمتر از محدوده بحرانی بوده، اما به این محدوده نزدیک است. در سایر مطالعات مشابه غلظت بالای مس در خاک و گیاهان مورد بررسی به علت نزدیکی مزارع به محل تردد خودروهای سنگین بیان شده است [۵۲]. مزارع مورد بررسی در این مطالعه نیز به جاده ترانزیتی بیرجند-کرمان نزدیک می‌باشد.

آهن

در بین فلزات مورد بررسی بیشترین تجمع در اندام‌های مختلف گیاهان مربوط به آهن بود. تجمع بیشتر آهن نسبت به سایر فلزات سنگین در سایر مطالعات نیز مشاهده شده است. بطوریکه در مطالعه‌ای حداکثر غلظت آهن، منگنز، روی و مس در اندام‌های مختلف گیاه تحت آبیاری با فاضلاب شهری بترتیب برابر ۲۶۰/۶ mg/kg، ۷۲/۴ mg/kg، ۳۴/۶ mg/kg و ۱۲/۳ mg/kg بود [۵۳]. غلظت بالای عنصر ضروری آهن باعث مرگ بافت سلولی می‌شود [۱۶]. در این مطالعه کمترین تجمع آهن در بخش خوراکی گیاهان مورد بررسی بود که انتقال آن در زنجیره غذایی را محدود می‌سازد. انتقال کمتر آهن به دانه های ذرت و جو با روند سایر مطالعات مطابقت داشت [۵۴]. در این مطالعه تجمع زیاد آهن در برگ و ریشه گیاهان تحت هر دو نوع آبیاری دیده شد. بیشترین مقدار تجمع آهن در ریشه ذرت آبیاری شده با آب چاه و برابر ۲۷۹/۸۴ mg/kg و کمترین مقدار تجمع آهن در دانه ذرت آبیاری شده با آب چاه و برابر ۳۵/۷۸ mg/kg و بود که با حداکثر و حداقل غلظت‌های ۳۷۸ mg/kg و ۵۶ mg/kg گزارش شده توسط Arora و همکاران مطابقت داشت [۵۱].

منگنز

در این مطالعه در گیاهان مورد بررسی بیشترین تجمع فلز منگنز در برگ و کمترین مقدار آن در دانه بود. نتایج بررسی اثر فاضلاب شهری تصفیه شده کرمانشاه بر جو و ذرت نیز نشان دهنده تجمع کمتر منگنز در دانه محصولات بود [۵۵]. در این مطالعه میزان تجمع منگنز در دانه ذرت و جو که بخش اصلی و خوراکی این گیاهان است، نسبت به مطالعه انجام شده بر روی فاضلاب شهری تصفیه شده کرمانشاه کمتر بود [۵۵]. بیشترین تجمع منگنز در برگ ذرت و کمترین تجمع در دانه جو و بترتیب برابر ۶۵/۰۸ mg/kg و ۱۳/۵۸ mg/kg بود. این مقادیر با حداکثر و حداقل غلظت‌های ۶۹ mg/kg و ۱۲ mg/kg گزارش شده توسط Arora و همکاران مشابه بود [۵۱].

نتایج تحلیل آماری

طبق نتایج این مطالعه همبستگی معنی‌دار بین غلظت فلزات در خاک و ریشه و بین غلظت فلزات در ریشه و اندام هوایی وجود نداشت. عدم همبستگی بین غلظت فلزات در خاک و ریشه به علت تاثیر پارامترهای فیزیکوشیمیایی و نوع خاک بر جذب فلزات بوسیله ریشه است [۵۶]. عدم همبستگی بین غلظت فلزات در ریشه و اندام هوایی به علت تاثیر برهمکنشی نوع گیاه و فلز می‌باشد. به همین علت در سایر مطالعات نیز همبستگی معنی‌داری بین غلظت فلزات در ریشه و اندام هوایی وجود نداشت [۵۶، ۵۷].

با توجه به میانگین غلظت فلزات سنگین در اندام‌های گیاهان آبیاری شده با آب چاه با اندام‌های گیاهان آبیاری شده با فاضلاب تصفیه شده، بیشترین و کمترین تفاوت معنی‌دار در غلظت فلزات سنگین در اثر دو مدل آبیاری، بترتیب بین ریشه‌های و برگ‌های گیاهان است. به عبارت دیگر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده روی غلظت فلزات سنگین در دانه و برگ گیاه تأثیر کمتری نسبت به ریشه داشته است. این نتایج با نتایج سایر مطالعات مطابقت داشته و نشان دهنده امکان استفاده از فاضلاب تصفیه شده به عنوان یک منبع جایگزین در آبیاری است [۵۸].

نتیجه‌گیری

در این مطالعه دو گونه گیاهی جو و ذرت مورد بررسی قرار گرفت. آبیاری این گیاهان با دو منبع آب مختلف (آب چاه و فاضلاب تصفیه شده) در مزارع اطراف تصفیه خانه فاضلاب شهری بیرجند واقع در خراسان جنوبی انجام شد. تجمع شش فلز سنگین مختلف (آهن، روی، کروم، مس، منگنز و نیکل) در قسمت‌های مختلف گیاه و خاک اندازه‌گیری شد. با توجه به نتایج مشخص شد، آبیاری گیاهان با فاضلاب تصفیه شده از نظر آلودگی آن‌ها به فلزات سنگین، خطرناک نیست. بطوریکه استفاده از فاضلاب تصفیه شده به جای آب چاه در برخی موارد سبب کاهش تجمع فلزات سنگین در گیاه شد. بطور کلی در هیچ یک از قسمت‌های گیاهان مورد بررسی، استفاده از آب چاه و فاضلاب تصفیه شده در آبیاری سبب افزایش غلظت فلزات سنگین به محدوده بحرانی نشد. درحالیکه در هر دو نوع آبیاری غلظت نیکل و روی، و در آبیاری با آب چاه غلظت کروم در خاک به بیش از حد بحرانی رسید. با توجه به این افزایش غلظت و تاثیر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک بر میزان جذب فلزات توسط گیاه، برای جلوگیری از آلودگی گیاهان به فلزات سنگین، غلظت فلزات سنگین و pH در خاک باید مورد پایش قرار گیرد. نتایج نشان داد که بطور کلی بین غلظت فلزات سنگین در خاک اطراف ریشه با غلظت فلزات در ریشه گیاهان همبستگی معنی‌داری وجود ندارد. این عدم همبستگی به علت تاثیر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک بر میزان جذب فلزات توسط گیاه بود. همچنین بین غلظت فلزات سنگین در ریشه با غلظت فلزات در اندام‌های گیاهان همبستگی معنی‌داری وجود نداشت. این عدم همبستگی نشان دهنده پیچیدگی فرایند جذب فلزات در ساختمان گیاه می‌باشد.

References

1. Al-Busaidi A, Shahroona B, Al-Yahyai R, Ahmed M. Heavy metal concentrations in soils and date palms irrigated by groundwater and treated wastewater. Pak J Agric Sci 2015;52(1): 129-34.
2. Chen Y, Wang C, Wang Z. Residues and source identification of persistent organic pollutants in farmland soils irrigated by effluents from biological treatment plants. Environ Int 2005;31(6): 778-83.
3. Muchuweti M, Birkett J, Chinyanga E, et al. Heavy metal content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health. Agric Ecosyst Environ 2006;112(1): 41-8.
4. Orisakwe OE, Nduka JK, Amadi CN, et al. Heavy metals health risk assessment for population via consumption of food crops and fruits in Owerri, South Eastern, Nigeria. Chem Cent J 2012;6(1): 77.
5. Yang Q, Xu Y, Liu S, et al. Concentration and potential health risk of heavy metals in market vegetables in Chongqing, China. Ecotoxicol Environ Saf 2011;74(6): 1664-9.
6. Alam M, Snow E, Tanaka A. Arsenic and heavy metal contamination of vegetables grown in Samta village, Bangladesh. Sci Total Environ 2003;308(1-3): 83-96.
7. Islam MS, Ahmed MK, Habibullah-Al-Mamun M, Raknuzzaman M. The concentration, source and potential human health risk of heavy metals in the commonly consumed foods in Bangladesh. Ecotoxicol Environ Saf 2015;122: 462-9.
8. Khan S, Farooq R, Shahbaz S, et al. Health risk assessment of heavy metals for population via consumption of vegetables. World Appl Sci J 2009;6(12): 1602-6.
9. Chen M, Li X, Yang Q, et al. Total concentrations and speciation of heavy metals in municipal sludge from Changsha, Zhuzhou and Xiangtan in middle-south region of China. J Hazard Mater 2008;160(2-3): 324-9.
10. Wang C, Hu X, Chen M-L, Wu Y-H. Total concentrations and fractions of Cd, Cr, Pb, Cu, Ni and Zn in sewage sludge from municipal and industrial wastewater treatment plants. J Hazard Mater 2005;119(1-3): 245-9.
11. Khaledi Z, Mohamadzadeh H. Evaluation of Cr in ophiolite and groundwater and its potential to contaminate the environment in SE of Birjand. econg 2013;4(2): 335-50.
12. Shanker AK, Cervantes C, Loza-Tavera H, Avudainayagam S. Chromium toxicity in plants. Environ Int 2005;31(5): 739-53.

13. Khatun S, Ali MB, Hahn E-J, Paek K-Y. Copper toxicity in Withania somnifera: growth and antioxidant enzymes responses of in vitro grown plants. Environ Exp Bot 2008;64(3): 279-85.

14. Yusuf M, Fariduddin Q, Hayat S, Ahmad A. Nickel: an overview of uptake, essentiality and toxicity in plants. Bull Environ Contam Toxicol 2011;86(1): 1-17.

15. Prasad K, Saradhi PP, Sharmila P. Concerted action of antioxidant enzymes and curtailed growth under zinc toxicity in Brassica juncea. Environ Exp Bot 1999;42(1): 1-10.

16. Wheeler B, Al- Farraj M, Cook R. Iron toxicity to plants in base- rich wetlands: comparative effects on the distribution and growth of Epilobium hirsutum L. and Juncus subnodulosus Schrank. New Phytol 1985;100(4): 653-69.

17. Millaleo R, Reyes-Díaz M, Ivanov A, et al. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. J Soil Sci Plant Nutr 2010;10(4): 470-81.

18. Klay S, Charef A, Ayed L, et al. Effect of irrigation with treated wastewater on geochemical properties (saltiness, C, N and heavy metals) of isohumic soils (Zaouit Sousse perimeter, Oriental Tunisia). Desalination 2010;253(1-3): 180-7.

19. Bedbabis S, Ferrara G, Rouina BB, Boukhris M. Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term. Sci Hortic 2010;126(3): 345-50.

20. Pirsaheb M, Sharafi K, Dogaohar K. Comparison of Mashhad aolang wastewater treatment plant effluent with wells water quality for irrigation. J Water and Wastewater 2013;23(84): 116-21.

21. Association APH. American Water Works Association and Water Pollution Control Federation (APHA). 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed American Public Health Association, Washington, DC.

22. Campbell CR, Plank CO. Preparation of plant tissue for laboratory analysis. Handbook of reference methods for plant analysis: CRC Press; 1997. p. 51-63.

23. Edgell K. US EPA Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils. United States Environmental Protection Agency (US EPA): Washington, DC; 1996.

24. Al-Karaki GN. Utilization of treated sewage wastewater for green forage production in a hydroponic system. Emir J Food Agric 2011: 80-94.

25. Madejón E, De Mora AP, Felipe E, et al. Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation. Environ Pollut 2006;139(1): 40-52.

26. Alloway B. Heavy metals in soils 2nd Ed. Blackie Academic and Professional, London 1995.

27. Al-Lahham O, El Assi N, Fayyad M. Translocation of heavy metals to tomato (Solanum lycopersicom L.) fruit irrigated with treated wastewater. Sci Hortic 2007;113(3): 250-4.

28. Romero A, González I, Galán E. Trace elements absorption by citrus in a heavily polluted mining site. J Geochem Explor 2012;113: 76-85.

29. Zhao H, Xia B, Fan C, et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China. Sci Total Environ 2012;417: 45-54.

30. Zhuang P, McBride MB, Xia H, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China. Sci Total Environ 2009;407(5): 1551-61.

31. Chary NS, Kamala C, Raj DSS. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer. Ecotoxicol Environ Saf 2008;69(3): 513-24.

32. Dikinya O, Areola O. Comparative analysis of heavy metal concentration in secondary treated wastewater irrigated soils cultivated by different crops. Int J Environ Sci Te 2010;7(2): 337-46.

33. Fadiran AO, Tiruneh AT, Mtshali JS. Assessment of mobility and bioavailability of heavy metals in sewage sludge from Swaziland through speciation analysis. Am J Environ Protect 2014;3(4): 198-208.

34. Yadav S. Heavy metals toxicity in plants: an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants. S Afr J Bot 2010;76(2): 167-79.

35. Ravet K, Touraine B, Boucherez J, et al. Ferritins control interaction between iron homeostasis and oxidative stress in Arabidopsis. Plant J 2009;57(3): 400-12.

36. Hussain A, Alamzeb S, Begum S. Accumulation of heavy metals in edible parts of vegetables irrigated with waste water and their daily intake to adults and children, District Mardan, Pakistan. Food Chem 2013;136(3-4): 1515-23.

37. Lavado RS, Porcelli CA, Alvarez R. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in corn, soybean and wheat as affected by different tillage systems in the Argentine Pampas. Soil Tillage Res 2001;62(1-2): 55-60.

38. Jaloud AA, Hussain G, Saati AJ, Karimulla S. Effect of wastewater irrigation on mineral composition of corn and sorghum plants in a pot experiment. J Plant Nutr 1995;18(8): 1677-92.

39. Khan SA, Liu X, Shah BR, et al. Metals uptake by wastewater irrigated vegetables and their daily dietary intake in peshawar, pakistan. Ecol Chem Eng S 2015;22(1): 125-39.

40. Ferri R, Donna F, Smith DR, et al. Heavy metals in soil and salad in the proximity of historical ferroalloy emission. J Environ Prot 2012;3(5): 374.

41. Srikanth R, Reddy SRP. Lead, cadmium and chromium levels in vegetables grown in urban sewage sludge–Hyderabad, India. Food Chem 1991;40(2): 229-34.

42. Baroni F, Boscagli A, Di Lella L, et al. Arsenic in soil and vegetation of contaminated areas in southern Tuscany (Italy). J Geochem Explor 2004;81(1-3): 1-14.

43. Smith S, Peterson P, Kwan K. Chromium accumulation, transport and toxicity in plants. Toxicol Environ Chem 1989;24(4): 241-51.

44. Asgari K, Cornelis WM. Heavy metal accumulation in soils and grains, and health risks associated with use of treated municipal wastewater in subsurface drip irrigation. Environ Monit Assess 2015;187(7): 410.

45. Abebe A, Chandravanshi BS. Levels of essential and non-essential metals in the raw seeds and processed food (roasted seeds and bread) of maize/corn (Zea mays L.) cultivated in selected areas of ethiopia. Bull Chem Soc Ethiop 2017;31(2): 185-99.

46. Sekara A, Poniedzialeek M, Ciura J, Jedrszczyk E. Zinc and copper accumulation and distribution in the tissues of nine crops: implications for phytoremediation. Pol J Environ Stud 2005;14(6): 829-35.

47. Tlustos P, Balik J, Pavlikova D, Szakova J. The uptake of cadmium, zinc, arsenic and lead by chosen crops. Rostlinna Vyroba-UZPI (Czech Republic) 1997.

48. Furlani ÂMC, Furlani PR, Meda AR, Duarte AP. Efficiency of maize cultivars for zinc uptake and use. Sci Agric 2005;62(3): 264-73.

49. Bashir F, Kashmiri M, Shafiq T, Tariq M. Heavy metals uptake by vegetables growing in sewage irrigated soil: relationship with heavy metal fractionation in soil. Chem Speciat Bioavailab 2009;21(4): 199-209.

50. Lu Y, Yao H, Shan D, et al. Heavy Metal Residues in Soil and Accumulation in Maize at Long-Term Wastewater Irrigation Area in Tongliao, China. J Chem 2015;15(1): 10-9.

51. Arora M, Kiran B, Rani S, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources. Food Chem 2008;111(4): 811-5.

52. Gupta S, Satpati S, Nayek S, Garai D. Effect of wastewater irrigation on vegetables in relation to bioaccumulation of heavy metals and biochemical changes. Environ Monit Assess 2010;165(1-4): 169-77.

53. Kiziloglu F, Turan M, Sahin U, et al. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (Brassica olerecea L. var. botrytis) and red cabbage (Brassica olerecea L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. Agric Water Manag 2008;95(6): 716-24.

54. Smith SR. Agricultural recycling of sewage sludge and the environment: CAB international; 1995.

55. Farmanifard M, Ghamarnia H, Pirsaheb M, Fatahi N. Investigation of heavy metal accumulation on different crop under irrigation with Kermanshah treated municipal wastewater. J Water Irr Manag 2016;6(2): 347-65.

56. Santos-Jallath J, Castro-Rodríguez A, Huezo-Casillas J, Torres-Bustillos L. Arsenic and heavy metals in native plants at tailings impoundments in Queretaro, Mexico. Phys Chem Earth 2012;37: 10-7.

57. Abreu M, Matias M, Magalhães MCF, Basto M. Impacts on water, soil and plants from the abandoned Miguel Vacas copper mine, Portugal. J Geochem Explor 2008;96(2-3): 161-70.

58. Yang J, You S, Zheng J, editors. Review in strengthening technology for phytoremediation of soil contaminated by heavy metals. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science; 2019: IOP Publishing.

Journal of Environmental Health Engineering, February 2019; Vol. 7, No. 2: 135-151

Study of Heavy Metal Accumulation in Plants Irrigated with Well Water and Wastewater from Birjand Wastewater Plant

Mohamad Javad Zoqi[1*], Mohamad Reza Doosti[2]

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

**** E-mail: mj.zoqi@birjand.ac.ir***

Received: 25 Apr. 2019 ; Accepted: 21 Aug. 2019

ABSTRACT

Introduction: In the recent years, the use of municipal wastewater for irrigation has attracted the consideration of arid countries. Despite the potential use of municipal wastewater in plants irrigation as sustainable strategy, the environmental impacts need to be investigated. The aim of this study was to evaluate the use of treated wastewater in irrigation crop plants.

Methods: The present study was carried out to assess levels of iron, zinc, chrome, copper, manganese and nickel, in plants irrigated with water from different sources. Impact of different irrigation sources on metals uptake by plants were determined using Statistical tests.

Results: According to the results, the type of water source (well water, treated wastewater) had a significant effect at 5% level on the mean concentration of Cu in barley leaves, Cr, Cu and Ni in barley root and Cu and Ni in soil around barley root. In this study, nickel concentration was higher than critical value in the soil around the roots for both plants and both irrigation sources due to the presence of nickel in the ultramafic rocks. Due to the proper performance of Birjand treatment plant stabilization ponds in reducing heavy metals from municipal wastewater, the concentration of most heavy metals in plant and soil in irrigation with treated wastewater was significantly lower than in irrigation with well water. The proximity of farms to heavy-duty vehicles increased the concentration of copper in all the situations studied which were close to the critical range. The concentration of chromium in shoots of plant was lower than other metals.

Conclusion: As a result, the values of heavy metals in different parts of plants were below the acceptable levels as suggested. In comparison to plants, the soil presented higher concentration of all studied metals. However, the regular monitoring of levels of these metals from well water and treated wastewater, in plants and soil is essential to prevent excessive build-up of these metals in the food chain.

Keywords: Heavy metals, Crops, Municipal wastewater, Herbal organs, Soil