Archive of SID

تأثیر کاربرد فاضلاب تصفیه‌شده شهری بر میزان و الگوی تجمع برخی از فلزات سنگین در نیمرخ خاک زیر کشت ذرت و گوجه‌فرنگی

بختیار کریمی[۱]*، چنور عبدی، زینب فتحی تیلکو و هوشیار گویلیان

استادیار گروه مهندسی علوم و مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

Bakhtiar.karimi@gmail.com

دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه کردستان.

Chonor.abdi@yahoo.com

دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه کردستان.

zeyneb.fathi@gmail.com

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه محیط زیست دانشگاه کردستان.

hoshyargavilian@gmail.com

چکیده

زمانی که آب با کیفیت مناسب کمیاب باشد، منابع آب نا متعارف برای استفاده در کشاورزی مورد توجه قرار می‌گیرند. فاضلاب تصفیه‌شده شهری یکی از این منابع آبی نا متعارف می‌باشد. در این تحقیق تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده شهری بر تجمع برخی از فلزات سنگین (آهن، مس، روی، منگنز، آرسنیک، کادمیوم، سرب و نیکل) در لایه‌های خاک، در گلدان در شرایط گلخانه دانشگاه کردستان مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. در این تحقیق اثر تیمارهای نوع آب آبیاری شامل فاضلاب تصفیه‌شده، یکی در میان فاضلاب تصفیه‌شده - آب و آب معمولی بر تجمع فلزات سنگین در عمق‌های مختلف خاک کشت شده با گیاه ذرت و گوجه‌فرنگی مورد آزمایش قرار گرفت. از چهار عمق مختلف از سطح خاک و همچنین سه فاصله افقی از گیاه نمونه‌برداری انجام شد. نتایج نشان داد که خاک آبیاری شده با فاضلاب تصفیه‌شده شهری به طور معنی‌داری مقادیر بیشتری از فلزات سنگین مورد مطالعه را در مقایسه با آب معمولی دارا می‌باشد. بر اساس این نتایج، بیشترین و کمترین مقدار فلزات سنگین اندازه‌گیری شده به ترتیب در تیمارهای خاک آبیاری شده با فاضلاب تصفیه‌شده و آب معمولی مشاهده گردید. نتایج همچنین نشان داد که میزان غلظت عناصر سنگین خاک با افزایش عمق و فاصله افقی از گیاه کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج میزان تجمع عناصر سنگین در خاک، منگنز (۷/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشترین میزان تجمع در خاک را دارا می‌باشد و پس از آن فلزات آرسنیک (۵/۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، آهن (۴/۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، روی (۳/۹۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و مس (۳/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در رتبه‌های دوم تا پنجم قرار می‌گیرند. نوع گیاه نیز تأثیر معنی‌داری بر تجمع فلزات منگنز، روی و آرسنیک در خاک دارد. بر اساس نتایج این پژوهش احتمال آلودگی گیاهانی نظیر ذرت و گوجه‌فرنگی به عناصر سنگین وجود دارد. لذا با توجه به شرایط تصفیه فعلی فاضلاب، پیشنهاد می‌گردد که آبیاری با فاضلاب تصفیه شده برای محصولات غیر خوراکی استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: آب نامتعارف، آبیاری، پروفیل خاک، گلخانه.

---

۱ – آدرس نویسنده مسئول: دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.

* – دریافت: مهر ۱۳۹٤ . پذیرش: اسفند ۱۳۹٤

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

ایران جزء کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان است و در این کشور برداشت آب از منابع آب زیرزمینی در مقایسه با سایر کشورها به مراتب بیشتر است (اروندی و مقدس، ۱۳۷۹). از طرف دیگر پتانسیل آبی کشور دیگر نمی‌تواند پاسخ‌گوی نیازهای رو به رشد تقاضای آب در بخش کشاورزی باشد. لذا در شرایطی که کشور به شدت از لحاظ کمبود منابع آب شیرین رنج می‌برد و در بلندمدت بحران منابع آب به صورت یک مساله جدی مطرح است، لذا توجه به منابع آب غیرمتعارف یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر می‌باشد (عابدی و نجفی، ۱۳۸۰). امروزه استفاده مجدد از فاضلاب تصفیه شده به عنوان یکی از منابع پایدار در بخش کشاورزی حائز اهمیت می‌باشد. در همین راستا حسیان و الساتی (۱۹۹۹) استفاده از فاضلاب تصفیه شهری را یک ضرورت برای توسعه کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک می‌دانند.

توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن سبب گردیده همه ساله بخش قابل توجهی از منابع آب موجود به علت تغییر کیفیت از چرخه مصرف خارج گردد که نمونه بارز آن فاضلاب‌های شهری است. با توجه به حجم عظیم فاضلاب‌های تولیدی، تلاش برای دستیابی به شیوه‌های دفع مناسب فاضلاب ضرورت می‌یابد (حسین‌پور و همکاران، ۱۳۸۸). استفاده از آب‌های نامتعارف، نظیر فاضلاب‌های تصفیه‌شده ضرورتی اجتناب ناپذیر جهت تأمین آب مصرفی در بخش کشاورزی و دفع مناسب فاضلاب تصفیه‌شده محسوب می‌شود (پسکاد، ۱۹۹۲). البته فاضلاب تصفیه‌شده در مقایسه با حجم آب آبیاری مورد نیاز، مقدار کمی را شامل می‌شود ولی بهره‌برداری از همین مقدار باعث می‌شود که آب‌های با کیفیت بالاتر را بتوان در موارد با اهمیت‌تری به کار برد (عابدی و نجفی، ۱۳۸۰). به رغم جنبه‌های مفید کاربرد فاضلاب تصفیه‌شده شهری در کشاورزی به عنوان منبع غنی از عناصر غذایی، وجود مقادیری از فلزات سنگین و عناصر کمیاب در آن، کاربرد بلند مدت فاضلاب تصفیه‌شده در خاک‌های زراعی را مشکل‌ساز خواهدکرد. غلظت بالای فلزات سنگین در فاضلاب همراه با استفاده طولانی مدت آن در آبیاری اراضی می‌تواند سبب افزایش قابل ملاحظه فلزات سنگین خاک شود (نن و همکاران،۲۰۰۲؛ توز، ۲۰۰۶). در واقع ۵ تا ۱۰ سال زمان لازم است تا سطح فلزات سنگین خاک آبیاری شده با فاضلاب به بیش از حد مجاز برسد (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۹). به عنوان مثال پژوهش‌های راتان و همکاران (۲۰۰۵) نشان داد که به مدت پنج سال آبیاری با فاضلاب ، فقط غلظت آهن موجود در خاک افزایش می‌یابد و به مدت ۱۰ سال غلظت فلزات سنگین روی، آهن، نیکل و سرب نیز بیشتر گردید و در خاک آبیاری شده با فاضلاب به مدت ۲۰ سال غلظت فلزات سنگین آهن، روی، مس، منگنز، نیکل و سرب خاک افزایش یافت.

آلودگی خاک به عناصر سنگین، موجبات ورود آنها به زنجیره غذایی از طریق جذب به وسیله گیاه و ایجاد سمیت را فراهم می آورد (علیزاده و همکاران، ۲۰۰۱). اگر چه برخی از این عناصر در مقادیری ناچیز برای رشد گیاه لازم هستند، ولی غلظت آنها کمی بیش از حد آستانه می‌تواند برای حیات گیاهی و جانوری خطرساز باشد. بنابراین یکی از مسایل عمده‌ای که در هنگام استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده شهری در اراضی کشاورزی باید مورد توجه قرار گیرد، احتمال تجمع عناصر سنگین در خاک است (سازمان حفاظت محیط زیست ایران، ۱۳۷۸).

شاکرمی و همکاران (۱۳۹٤) به بررسی اثر فاضلاب (فاضلاب خام و فاضلاب تصفیه شده تصفیه‌خانه کرمانشاه) و کمپوست بر انتقال برخی از فلزات سنگین در نیمرخ خاک کشت شده با گیاه ریحان در شرایط گلخانه‌ای پرداختند. برای اجرای این تحقیق از لایسیمترهای فلزی حجمی با سطح مقطع مربعی شکل با طول ضلع ۳۰ و ارتفاع ۱۲٦ سانتیمتر استفاده شد. خاک داخل لایسیمترها سه لایه بود به طوری که بافت خاک

www.SID.ir

Archive of SID

لایه اول رسی، لایه دوم لوم رسی شنی و لایه سوم لوم شنی بود. فاکتورهای مورد بررسی شامل سه نوع آب آبیاری که شامل آب معمولی، فاضلاب تصفیه‌شده و ترکیب ۵۰ درصد فاضلاب خام و آب معمولی، چهار سطح کود کمپوست زباله شهری که شامل بدون کمپوست، ٤٠، ۸۰ و ۱۲۰ تن در هکتار بودند. همچنین از سه عمق خاک نمونه‌برداری انجام شد. بعد از برداشت ریحان، نمونه‌های خاک از اعماق ۱۰، ٤٠ و ۸۵ سانتی‌متر تهیه و مقادیر نیکل، سرب، کادمیوم، آهن، مس، روی و منگنز قابل جذب آنها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که اثر نوع آب آبیاری، کمپوست و عمق بر کلیه عناصر معنی‌دار می‌باشد.

پارسافر و معروفی (۱۳۹۲) در تحقیقی از فاضلاب خام و تصفیه‌شده تصفیه خانه شهر سرکان، در کشت سیب‌زمینی و در شرایط لایسیمتری استفاده کردند. برای اجرای این تحقیق از لایسیمترهای استوانه‌ای فلزی (عایق‌بندی شده) با قطر ٦٠ و ارتفاع ۹۰ سانتیمتر استفاده شد. خاک داخل لایسیمترها دو لایه بود به طوری که بافت خاک لایه اول لوم شنی، لایه دوم لوم رسی شنی بود. تیمارهای آبیاری شامل فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه-شده، ترکیب ۵۰ درصد فاضلاب خام و آب معمولی، ترکیب ۵۰ درصد فاضلاب تصفیه‌شده و آب معمولی و آب معمولی بودند. همچنین از دو عمق خاک نمونه‌برداری انجام شد. نتایج نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری بر غلظت عناصر سنگین کادمیوم، سرب و نیکل معنی‌دار بوده و اثر متقابل عمق خاک و کیفیت آب بر تجمع عناصر سنگین بی‌معنی می‌باشد.

طبری و صالحی (۱۳۹۰) به بررسی تأثیر آبیاری با استفاده از فاضلاب شهری اطراف شهر تهران بر تجمع فلزات سنگین (آهن، منگنز، کروم، سرب و کادمیم) در سال ۱۳۸۵ بر روی خاک دو توده جنگل کاری شده کاج تهران در اراضی اطراف شهر تهران پرداختند. یکی از دو توده مورد مطالعه با فاضلاب شهری و دیگری با آب چاه از زمان کاشت آبیاری شده بودند. بافت خاک منطقه مورد مطالعه لومی رسی بود. نتایج نشان داد که غلظت فلزات سنگین در خاک آبیاری شده با فاضلاب شهری حدود ۱/۵ برابر آن‌ها در خاک آبیاری شده با آب چاه شده و تجمع فلزات سنگین در لایه سطحی (عمق ۱۵-۰ سانتیمتری) بیشتر از لایه‌های زیرین بوده است. مقایسه سطح فلزات سنگین مورد مطالعه در خاک نشان داده است که غلظت این فلزات در مدت شش ماه، به جز سرب به محدوده خطرناکی برای خاک نرسیده است ولی استفاده طولانی مدت از فاضلاب شهری به عنوان آب آبیاری می‌تواند سبب تجمع و افزایش بیش از سطح مجاز فلزات سنگین در خاک و نهایتاً موجب تخریب محیط خاک و منابع آبی شود. منیر و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی تأثیر مدت زمان-های مختلف دو، پنج و ده سال آبیاری با فاضلاب تصفیه-شده در عمق‌های مختلف خاک (صفر تا ۲۰، ۲۰ تا ٤٠ و ٤٠ تا ٦٠ سانتی‌متر) بر عناصر مس، روی، آهن، منگنز، سرب و کادمیوم به این نتیجه رسیدند که برای عنصر مس، سرب و کادمیوم بین تیمارهای مختلف، اختلاف معنی-داری مشاهده نمی‌گردد، اما مقدار عناصر روی، آهن و منگنز در خاک با افزایش مدت زمان آبیاری، افزایش می-یابد و بیشترین تجمع آنها در سطح خاک می‌باشد. مجیری و حمیدی (۲۰۱۱) با بررسی اثر فاضلاب شهری بر تجمع فلزات سنگین در خاک و گیاه گندم با دو روش آبیاری به این نتیجه رسیدند که فاضلاب شهری در هردو روش آبیاری باعث افزایش تجع فلزات سنگین (آهن، منگنز، نیکل و کادمیوم) شده است. تجمع فلزات سنگین در ریشه بیشتر از اندام هوایی بوده است و همچنین نتایج نشان داد که تجمع فلزات سنگین در گیاه گندم در سیستم آبیاری غرقابی بیشتر از سیستم قطره‌ای بوده است. ال-لهم و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی تأثیر فاضلاب تصفیه‌شده بر غلظت عناصر سنگین در عمق‌های مختلف خاک و میوه گوجه‌فرنگی پرداختند.

نتایج تحقیق نشان داد که کاربرد فاضلاب تصفیه‌شده تصفیه خانه ابونصیر در مقایسه با آب معمولی سبب تجمع بیشتر فلزات سنگین در عمق‌های مختلف از

www.SID.ir

Archive of SID

خاک نسبت تیمار آب معمولی می‌گردد. البانا و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی تجمع و توزیع مکانی فلزات سنگین (سرب،کادمیوم، مس و نیکل) در خاک شنی تحت آبیاری طولانی مدت (۹٤ سال) با فاضلاب در کشور مصر پرداختند. نتایج تحقیق این محققان نشان داد غلظت نیکل در خاک سطحی در حد مجاز بوده و تجمع سرب به طور عمده در خاک سطحی اتفاق افتاده است. همچنین آن‌ها نشان دادند تجمع سرب و مس در لایه سطحی جنوب منطقه مورد مطالعه بیشتر از تحمل خاک بوده است و توزیع کادمیوم در عمق تقریباً همگن بوده است. هدف از تحقیق حاضر بررسی میزان تجمع فلزات سنگین در جهت‌های افقی و عمودی خاک دارای کشت گیاه ذرت و گوجه‌فرنگی آبیاری شده با فاضلاب تصفیه‌شده شهری و همچنین تأثیر دو گیاه مذکور بر غلظت فلزات سنگین در خاک، تحت شرایط گلخانه‌ای می‌باشد.

مواد وروش‌ها

این تحقیق در قالب یک طرح آزمایشی فاکتوریل با طرح پایه کامل تصادفی و با سه تکرار در سال ۱۳۹۲-۹۳ به مدت شش ماه (از اواسط اسفند ۹۲ تا اواسط شهریور ۹۳) در گلخانه دانشگاه کردستان انجام شد. تیمارها شامل سه سطح آبیاری: آبیاری با آب معمولی در تمام مراحل رشد (شاهد)، آبیاری با آب معمولی و فاضلاب تصفیه‌شده به صورت یک در میان و آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده برای گیاه ذرت و گوجه‌فرنگی می-باشد. آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاهان و به صورت حجمی انجام گرفت. در اجرای این پژوهش به منظور کنترل هر چه مطلوب‌تر کلیه عوامل موثر، از گلدان‌های زهکش‌دار استفاده گردید. تعداد ۱۸ عدد گلدان به قطر ۳۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر استفاده گردید. خاک مورد استفاده از زمین زراعی شهرستان سنندج به دلیل مناسب بودن آن جهت کشت گیاه، تهیه شد. برای این امر ابتدا خاک تهیه شده از الک چهار میلی‌متر (جهت جداسازی ذرات درشت و نامناسب) گذرانده شده و سپس جهت کشت گیاه ذرت و گوجه‌فرنگی به صورت لایه لایه وارد لایسیمترها شد. شایان ذکر است که لایه پایینی گلدان‌ها (به ارتفاع ۲ سانتی‌متر) را جهت تسهیل در زهکشی (در شرایط وجود آب اضافی) با شن پر گردید. خاک استفاده شده جهت این آزمایش دارای بافت لوم شنی (با درصد شن: ۷۰ ، درصد سیلت: ۲۰ و درصد رس: ۱۰) می‌باشد. در جدول ۱ برخی از مشخصات خاک مورد استفاده در تحقیق ارائه شده است. پس از فراهم کردن بستر کشت، بذر ذرت و گوجه‌فرنگی در گلدان‌ها کاشته شد و تیمارهای لازم بر اساس (نوع آب آبیاری) اعمال گردید. لازم به ذکر است که در این تحقیق مقدار آب مورد نیاز گیاهان با استفاده از از داده‌های گلخانه‌ای موجود و نرم افزار کراپ‌وات (cropwat.8) محاسبه گردید. در این تحقیق گیاهان ذرت و گوجه‌فرنگی به صورت همزمان در اواسط اسفند ماه در داخل گلدان کشت گردید و تا رسیدن به مرحله سه برگی از آب معمولی برای آبیاری آنها استفاده شد. فاضلاب تصفیه‌شده از تصفیه خانه فاضلاب شهر سنندج تأمین گردید که روش تصفیه به صورت لجن فعال بوده و فاضلاب مورد استفاده برای آزمایش از آخرین مرحله تصفیه برداشت شد. در جدول ۲ خصوصیات فاضلاب تصفیه‌شده و آب معمولی (آب شرب شهری) مورد استفاده ارائه گردیده است. مقادیر جدول ۲ میانگین اندازه‌گیری هر ماه نمونه‌های پساب با سه تکرار در طول آزمایش می‌باشد و نتایج نشان داد تفاوت چندانی بین اندازه‌گیری‌ها در طول فصل رشد وجود ندارد.

به منظور تعیین عناصر سنگین (آهن، مس، روی، منگنز، آرسنیک، کادمیوم، سرب و نیکل) در خاک در اثر کاربرد فاضلاب تصفیه‌شده، نمونه‌های خاک مربوط به هر تیمار در پایان فصل کشت از چهار عمق (بر اساس الگوی جذب آب در ریشه گیاهان مذکور) (علیزاده، ۱۳۸۹) و در سه فاصله افقی از گیاه، مطابق شکل ۱ جمع-آوری شدند. اگر عمق توسعه ریشه ها را به چهار بخش مساوی تقسیم کنیم، حدود ٤۰ درصد ریشه گیاه در لایه یک چهارم سطحی، ۳۰ درصد در لایه یک چهارم دومی،

www.SID.ir

Archive of SID

۲۰ درصد در لایه سومی و ۱۰ درصد در لایه یک چهارمی آخر گسترش دارند. لذا جذب آب از این چهار لایه نیز متناسب با گسترش ریشه به نسبت ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ خواهد بود (علیزاده، ۱۳۸۹). تعداد نقاط برداشت نمونه برای هر گلدان ۱۲ عدد بود. نمونه‌برداری به این صورت انجام گرفت که برای فاصله افقی سه فاصله صفر، ۵ و ۱۰ سانتی‌متر از گیاه (x_0، x_1 وx_2) و برای فواصل عمودی چهار فاصله صفر، ۷/۵، ۱۵ و ۲۲/۵ سانتی‌متر (y_0، y_1، y_2 وy_3) از گیاه در نظر گرفته شد. به‌عنوان مثال در شکل ۱ نقطه x_1y_1 منظور نقطه‌ای است که در آن به فاصله افقی پنج سانتی‌متر از گیاه و فاصله عمودی ۷/۵ سانتی‌متر (از سطح خاک) نمونه برداشت می‌شود. برای انجام نمونه‌برداری در پایان فصل رشد سطح محیط کشت هر گلدان مش بندی شده و نمونه برداری از فاصله ها و عمق‌های مشخص با استفاده از قاشق های نمونه‌برداری انجام گرفت.

نمونه‌های خاک ابتدا در آزمایشگاه، در محلی سرپوشیده در هوا خشک شده در مرحله بعد از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و سپس پنج گرم خاک در ظرف پلی‌اتیلنی ریخته و عصاره خاک با استفاده از مخلوطی اسید سولفوریک نرمال ۰/۰۲۵ نرمال و اسید کلریدریک ۰/۰۵ تهیه شد. در مرحله آخر عناصر سنگین عصاره جمع‌آوری شده، اندازه‌گیری گردید. برای تعیین غلظت عناصر سنگین قابل جذب در خاک از روش اسپکتروفتومتری جذب اتمی (با شعله) با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی Phoenix-986 سری Biotech ساخت کشور انگلستان اندازه‌گیری شد استفاده شد (ال-لهم و همکاران، ۲۰۰۷).

در این تحقیق به منظور تجزیه آماری تجمع عناصر سنگین در نقاط مختلف خاک در تیمارهای مختلف و مقایسه آنها با تیمار شاهد، از نرم افزار MSTATC استفاده شد. مقایسه میانگین داده‌ها هم با استفاده از آزمون دانکن انجام گردید.

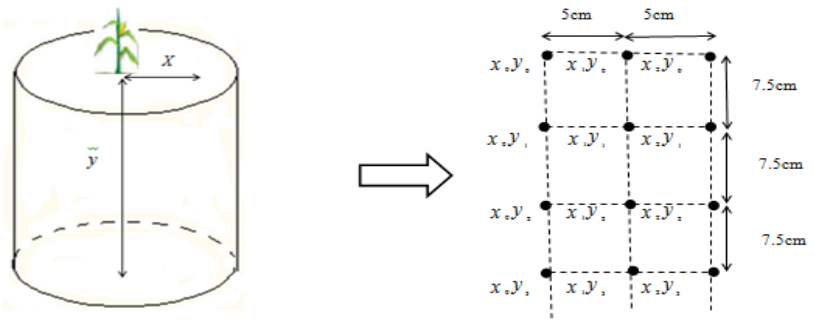
نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری فلزات سنگین در نقاط مختلف خاک پس از اتمام آزمایشات و برداشت نمونه‌ها، نشان داد که مقادیر فلزات سنگین کادمیوم، سرب و نیکل در خاک بسیار ناچیز بوده و با دستگاه جذب اتمی موجود قابل به اندازه‌گیری نبودند. در نتایج تحقیقات ال-لهم و همکاران (۲۰۰۷) نیز هیچ مقداری برای فلزات کادمیوم و سرب در خاک مشاهده نگردید. با توجه به جدول ۳ مشاهده می-گردد که مقادیر فلزات آهن، مس، منگنز، روی و آرسنیک هم در تیمار نوع آب آبیاری و هم در تیمار فاصله از گیاه دارای تغییرات می‌باشند.

***جدول۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک لوم شنی در شروع آزمایش**

بافت خاک	PH	نیترات	پتاسیم	کلسیم	منیزیم	سدیم	آهن	روی	منگنز	مس	آرسنیک	کادمیوم	سرب	نیکل
لومی-شنی	۷/۹	۲۳/۹۸	۹۴	۸/۶	۴۶/۳۱	۲۵/۸۱	۴/۱۶	۲/۲۵	۷/۲۴	۰/۸۶	۰	۰	۰	۰

* واحد عناصر بر اساس میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد



شکل ۱- شکل شماتیک از گلدان و محل برداشت نمونه‌های خاک

www.SID.ir

Archive of SID

جدول۲- نتایج تجزیه شیمیایی آب معمولی و فاضلاب تصفیه‌شده استفاده شده در آبیاری

پارامتر	واحد	آب معمولی	فاضلاب تصفیه‌شده	مرز استاندار برای کشاورزی (*)
BOD_5	(mg/l)	ندارد	۲۰	۲۰۰
COD	(mg/l)	ندارد	۲۷	۱۰۰
PH	-	۷/۵	۸/۰۵	۶-۸/۵
هدایت الکتریکی	(ds/m)	۰/۳۵	۰/۸۷۹	-
نیترات	(mg/l)	ندارد	۴۱/۲	-
فسفر	(mg/l)	۰/۰۲	۹/۲۵	-
پتاسیم	(mg/l)	۰/۰۸	۱۴/۱۳	-
کلسیم	(mg/l)	۴/۲	۲۵/۸۳	-
منیزیم	(mg/l)	۱/۳	۱۲/۰۵	۱۰۰
سدیم	(mg/l)	۰/۵۶	۱۳/۲۶	-
آهن	(mg/l)	۰/۰۱	۲/۲۱	۳
روی	(mg/l)	ندارد	۱/۸۱	۲
مس	(mg/l)	ندارد	۲/۱۱۲	۰/۲
منگنز	(mg/l)	ندارد	۰/۵۰۳	۱
آرسنیک	(mg/l)	ندارد	۵/۵	۰/۱
کادمیوم	(mg/l)	ندارد	۰/۱۴	۰/۰۵
نیکل	(mg/l)	ندارد	۱/۲۰۹	۲
سرب	(mg/l)	ندارد	۰/۱۲	۱

* برگرفته از استاندارد سازمان محیط زیست ایران، ۱۳۷۸

جدول ۳- مقادیر میانگین و دامنه تغییرات فلزات سنگین در خاک

عنصر	آهن		مس		روی		منگنز		آرسنیک	
	میانگین	دامنه تغییرات	میانگین	دامنه تغییرات	میانگین	دامنه تغییرات	میانگین	دامنه تغییرات	میانگین	دامنه تغییرات
W1	۴/۰۶	۳/۸-۴/۲۱	۲/۹۵	۲/۸-۳/۳	۳/۸۷	۳/۶۹-۳/۹۳	۶/۸۲	۶/۴-۷/۳	۵/۲۸	۵/۱۹-۵/۴۱
W2	۳/۸۱	۳/۷-۳/۹۱	۱/۸۲	۱/۷-۲/۲	۲/۶۶	۲/۵۱-۲/۷۱	۵/۶۱	۵/۱-۵/۹	۲/۴۳	۲/۳۷-۲/۵۳
W3	۳/۵۱	۳/۴-۳/۵۵	۰/۶۵	۰/۵-۰/۷۹	۲/۰۰	۲/۸۲-۲/۰۶	۴/۶	۴/۳-۴/۹	۰	۰

W1: فاضلاب تصفیه‌شده، W2: یکی در میان فاضلاب تصفیه‌شده - آب معمولی W3: آب معمولی

در جدول ٤ نتایج تجزیه واریانس حاصل از اندازه‌گیری فلزات سنگین در خاک ارائه شده است. مشاهده جدول مذکور نشان می‌دهد که اثر تیمار نوع آب آبیاری و فاصله از گیاه برای همه فلزات سنگین اندازه-گیری شده معنی‌دار می‌باشد، اما نوع گیاه تاثیر معنی‌داری بر تجمع فلزات آهن و مس در نیمرخ خاک ندارد. در جدول‌های ۵ الی ۹ نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس اثر تیمارهای مورد آزمایش بر تجمع فلز آهن، مس، منگنز، روی و آرسنیک اندازه‌گیری شده در نیمرخ خاک (۱۲ نقطه محل اندازه‌گیری) آورده شده است. مشاهده جدول ۵ نشان می‌دهد که اثر نوع آب آبیاری تأثیر معنی‌داری بر مقدار آهن در خاک دارد، به طوری که مقدار آهن اندازه-گیری شده در هر نمونه خاک با سایر نمونه‌ها اختلاف معنی‌داری در سطح آماری یک درصد و پنج درصد دارد. با توجه به جدول ۵ می‌توان عنوان نمود که اثر نوع گیاه بر جذب آهن در عمق‌های مختلف خاک معنی‌دار نمی-باشد، اما برای فواصل افقی سطح خاک، بین دو گیاه ذرت و گوجه فرنگی (x_0y_0 ،x_1y_0 ،x_2y_0) برای مقدار آهن اختلاف معنی‌دار می‌باشد. با توجه به جدول ٦ مشاهده می‌گردد که اثر تیمار نوع آب آبیاری بر همه نقاط اندازه-گیری شده غلظت مس در خاک (در سطح آماری یک درصد) معنی‌دار می‌باشد، اما نوع گیاه تأثیر معنی‌دار بر مقدار مس در خاک ندارد. نتایج بدست آمده در جدول ۷ نشان می‌دهد که اثر نوع آب آبیاری و همچنین اثر متقابل نوع آب آبیاری و نوع گیاه برای تمام نقاط اندازه‌گیری شده منگنز در خاک معنی‌داری است. اما اثر نوع گیاه برای نزدیک‌ترین عمق‌ها به گیاه معنی‌دار نمی‌باشد. با توجه به جداول ۸ و ۹ نیز مشخص است که اثر تیمارهای مورد مطالعه و همچنین اثر متقابل آنها بر تمامی نقاط اندازه-گیری شده فلز روی و آرسنیک در خاک معنی‌دار می‌باشد.

این نتیجه با نتایج بعضی از مطالعات قبلی همخوانی دارد. به عنوان مثال مانسینو و پپر (۱۹۹۲)

www.SID.ir

Archive of SID

دریافتند که کاربرد فاضلاب سبب تجمع معنی‌دار دو عنصر مس و روی در لایه بالایی خاک نسبت به تیمار شاهد شده است. همچنین نتایج عابدی کوپایی و همکاران (۲۰۰۶) افزایش معنی‌دار غلظت دو عنصر سرب و نیکل در خاک آبیاری شده با فاضلاب در مقایسه با خاک آبیاری شده با آب زیر زمینی را نشان دادند.

جدول ۴- تجزیه واریانس حاصل از اندازه‌گیری فلزات سنگین در خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات				
		منگنز	مس	روی	آهن	آرسنیک
آب‌آبیاری(A)	۲	۱۵۰/۲**	۱۰۰/۲**	۱۱۰/۲**	۱۰۵/۲**	۸۷/۲**
نوع گیاه (B)	۱	۳۵/۲۲**	۲۸/۲۲^{ns}	۳۹/۲۲**	۷۵/۲۲^{ns}	۵۶/۲۲**
A×B	۲	۸۷/۲۶*	۵۷/۲۹^{ns}	۹۶/۵۶*	۸۱/۶۶*	۶۹/۳۶*
فاصله (C)	۱۱	۱۲۰/۱**	۱۰۰/۴**	۱۰۷/۱**	۱۰۷/۱**	۱۱۳/۱**
A×C	۲۲	۱۱۵/۱**	۸۷/۲۳**	۸۹/۵۸**	۹۸/۹۱**	۹۶/۷۷**
B×C	۱۱	۹۹/۱۳^{ns}	۷۵/۲۸^{ns}	۸۸/۱۷^{ns}	۷۶/۸۳^{ns}	۷۸/۶۳^{ns}
A×B×C	۲۲	۲۰۵/۱^{ns}	۹۵/۴۷^{ns}	۶۹/۸۷^{ns}	۸۵/۶۶^{ns}	۵۴/۴۹^{ns}
خطا	۱۴۲	۷۰/۲۳	۴۸/۲۳	۸۸/۲۳	۲۹/۲۳	۱۸/۲۳

* و ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد و ^{ns} معنی‌دار نبودن است.

بهبهانی‌نیا و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که افزایش غلظت عناصر سنگین در خاک و گیاه به طور معنی‌داری در تیمارهای آبیاری شده به وسیله فاضلاب بیشتر از تیمار شاهد مشاهده گردید. نتایج تحقیقات پارسافر و معروفی (۱۳۹۲) نشان داد اثر کاربرد فاضلاب بر غلظت فلزات سنگین سرب، کادمیوم و نیکل در خاک معنی‌دار بوده است. طبری و صالحی (۱۳۹۰) نیز بیان نمودند که فلزات سنگین آهن، منگنز، کروم و سرب در خاک آبیاری شده با فاضلاب شهری به طور معنی‌داری بیشتر از خاک آبیاری شده با آب چاه است. اما صابر (۱۹۸۶) گزارش کرد که کاربرد فاضلاب اثر معنی‌داری بر غلظت مس در خاک نداشته است.

جدول ۵- تجزیه واریانس حاصل از اندازه‌گیری فلز آهن در نیمرخ خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات										
		x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
آب‌آبیاری(A)	۲	۱۸۰/۵**	۲۵۶**	۲۳/۳**	۲۹/۶**	۱۶/۵**	۹۷/۱**	۶۸/۷**	۵۸/۸**	۹۷۵/۴*	۹۸۵/۵*	۱۸/۸**	۸۳۰/۹*
نوع گیاه (B)	۱	۱۷۷/۶**	۱۳۸۸^{ns}	۸۵/۸۴^{ns}	۶۰۲/۲^{ns}	۱۱/۰**	۰/۰۶۷^{ns}	۴۷۸/۴^{ns}	۶۰۷/۴^{ns}	۱۱۹/۲*	۲۵۰/۹^{ns}	۸۳۵/۱*	۸/۵۴۲^{ns}
A×B	۲	۲۸۰/۴*	۳۵۱**	۵۱/۱**	۴۹/۳**	۲۶/۳**	۱۶/۲**	۴۸/۳**	۶۸/۵**	۴۶۲/۵^{ns}	۵۰۸/۸^{ns}	۲۲۲/۳^{ns}	۳۵۹/۴^{ns}
خطا	۱۲	۷۶/۲۴	۱۳۶/۴	۱۱۱/۲	۷۲/۶۱	۱۰۹/۹۱	۱۵۶/۷	۱۱۳/۴	۱۰۲/۰۸	۱۵۴/۵	۱۶۲/۶	۱۴۶/۳	۱۴۱/۵

* و ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد و ^{ns} معنی‌دار نبودن است.

جدول ۶- تجزیه واریانس حاصل از اندازه‌گیری فلز مس در نیمرخ خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات										
		x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
آب‌آبیاری(A)	۲	۶۶۹/۱**	۱۰۸**	۲۳/۳**	۶۷/۱**	۱۵/۵**	۸۵/۱**	۷۶/۵**	۱/۸**	۱۲/۸**	۷۴/۵**	۸۰/۸**	۱۰/۸**
نوع گیاه (B)	۱	۱/۴۴۵^{ns}	۲۴/۶^{ns}	۸۵/۸۴^{ns}	۶۳/۴۷^{ns}	۱۰۷/۰^{ns}	۱/۵۶۷^{ns}	۳۳/۳۵^{ns}	۰/۱۱۸^{ns}	۰/۰۰۵^{ns}	۰/۰۳۶^{ns}	۱۰/۴۳^{ns}	۹/۱۱۲^{ns}
A×B	۲	۱۷/۸۸^{ns}	۱۱/۲^{ns}	۵۷۱/۱*	۵۳/۵۴^{ns}	۹۶/۳^{ns}	۰/۵۹۱*	۶/۴۹^{ns}	۱۴/۴۲*	۲۶/۱۱^{ns}	۷/۷۴^{ns}	۶/۹۹^{ns}	۱۳/۴^{ns}
خطا	۱۲	۶/۶۵۶	۶/۵۰۴	۱۱۱/۲	۶/۲۱	۹/۹۱	۰/۳۰۱	۶/۱۱۸	۶/۵۷	۷/۴۲	۶/۵۷	۵/۴۱۰	۷/۲۱۵

* و ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد و ^{ns} معنی‌دار نبودن است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۷- تجزیه واریانس حاصل از اندازه‌گیری فلز منگنز در نیمرخ خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات										
		x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
آب‌آبیاری(A)	۲	۳/۱۳**	۰/۳۱**	۲/۰۶**	۱۶/۵**	۰/۸۳**	۰/۳۹**	۱/۷۴**	۱۷/۶**	۲/۰۶**	۱/۱۴**	۰/۶۳**	۱۴/۷**
نوع گیاه (B)	۱	۱/۳۵^{ns}	۰/۰۹^{ns}	۲/۸۹^{ns}	۰/۸۱^{ns}	۱/۵۴*	۱۰/۳**	۰/۵**	۲/۸۱**	۰/۷۶**	۱/۷۴**	۶/۸۴**	۱/۰۲**
A×B	۲	۶/۶۱**	۳/۲۷**	۷/۵۱*	۱/۷۸**	۳/۱۸**	۳/۶۷*	۰/۴۹**	۰/۶۷**	۲/۲۹**	۵/۶۸*	۱/۸۶**	۷/۶۴**
خطا	۱۲	۰/۱۴	۰/۱۷۲	۰/۱۹	۰/۱۸۱	۰/۱۸	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۵	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۷۸۱

* و ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد و ^{ns} معنی‌دار نبودن است.

جدول ۸- تجزیه واریانس حاصل از اندازه‌گیری فلز روی در نیمرخ خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات										
		x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
آب‌آبیاری(A)	۲	۴۳/۶۱**	۱۵/۱**	۲۰/۶**	۶۷/۲**	۳۵/۴**	۱۳/۹**	۳۴/۵**	۱۹/۴**	۶۵/۲**	۳۱/۲**	۱۱/۲**	۲۵/۱**
نوع گیاه (B)	۱	۱۲/۶۵**	۵۱/۳**	۱۹۸/۱*	۵۱/۴**	۰/۵۶**	۲۴/۲**	۲۸/۸**	۳۷۷/۳*	۴۲/۸**	۱۱/۶**	۲۹/۸**	۵۴/۶**
A×B	۲	۵۵/۱۲**	۳/۸۳**	۳/۲۱**	۲۱۱/۷*	۲۶/۷**	۷۰/۳**	۷/۴۹**	۳۷/۶**	۳۱/۱**	۵/۱۱**	۲۷/۲**	۲۰/۸**
خطا	۱۲	۰/۸۵۸	۰/۹۵۱	۱/۰۱۹	۱/۶۸۱	۱/۰۹	۱/۰۱۲	۰/۷۶۱	۱/۵۱۲	۱/۱۱	۰/۸۶۲	۱/۰۱	۱/۶۱

* و ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد و ^{ns} معنی‌دار نبودن است.

جدول ۹- تجزیه واریانس حاصل از اندازه‌گیری فلز آرسنیک در نیمرخ خاک

منبع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات										
		x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
آب‌آبیاری(A)	۲	۱۳/۵۱**	۱۵/۱**	۱۷/۴**	۱۵/۶**	۱۷/۴**	۱۳/۲**	۲۲/۵**	۲۰/۴**	۲۶/۲**	۲۰/۲**	۲۲/۲**	۱۹/۵**
نوع گیاه (B)	۱	۲/۶۷**	۲/۳**	۳/۱۸**	۴/۴**	۵/۱۱**	۵/۶**	۲/۱۸**	۴/۲۱**	۳/۲۵**	۳/۵**	۳/۴۵**	۳/۶۱**
A×B	۲	۴/۷۲**	۲/۳**	۲/۵۶**	۱/۷**	۲/۲۸**	۲/۳**	۱/۹**	۳/۷۶**	۲/۱۲**	۳/۰۴**	۳/۱۲**	۲/۴۸**
خطا	۱۲	۰/۰۶۳	۰/۰۵۲	۰/۰۴۳	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۳۱	۰/۳۵۱	۰/۳۲۴	۰/۳۹۵	۰/۳۱۵	۰/۳۳۸	۰/۳۰۱

* و ** به ترتیب معنی‌دار بودن در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد می‌باشد و ^{ns} معنی‌دار نبودن است

در جدول ۱۰ مقایسه میانگین داده‌ها برای بررسی اثر تیمار نوع آب آبیاری بر اساس آزمون دانکن، بر غلظت فلزات سنگین منگنز، مس، روی، آهن و آرسنیک ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که بجز آهن بین هر سه تیمار مورد آزمایش برای فلزات سنگین اندازه‌گیری شده اختلاف معنی‌دار می‌باشد.

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری بر غلظت فلزات سنگین در نقاط مختلف خاک

تیمار	میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)				
	آهن	مس	منگنز	روی	آرسنیک
W1	۴/۰۶^{a}	۲/۹۵^{a}	۶/۸۲^{a}	۳/۸۷^{a}	۵/۲۸^{a}
W2	۳/۸۱^{ab}	۱/۸۲^{b}	۵/۶۱^{b}	۲/۶۶^{b}	۲/۴۳^{b}
W3	۳/۵۱^{b}	۰/۶۵^{c}	۴/۶۱^{c}	۲/۰۰^{c}	۰/۰۰^{c}

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است

W1: فاضلاب تصفیه‌شده، W2: یکی در میان فاضلاب تصفیه‌شده – آب معمولی W3: آب معمولی

در جداول ۱۱ الی ۱۵ مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری بر اساس آزمون دانکن، بر غلظت فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در خاک ارائه گردیده است. از نتایج جدول ۱۱ چنین استنباط می‌گردد که روند تغیرات مقدار آهن از یک نقطه به نقطه دیگر چه در فاصله افقی و چه در فاصله عمودی دارای روند نامنظمی است. اما به طور کلی آهن بیشتر در نزدیک‌ترین فواصل نسبت به گیاه تجمع می‌یابد و هر چه فاصله نقاط نمونه‌برداری از گیاه بیشتر می‌شود مقدار آهن (هم در فاصله افقی و هم در فاصله عمودی از گیاه) کاهش می‌یابد. مشاهده جدول مذکور همچنین بیانگر این مطلب است که برای تمامی نقاط اندازه‌گیری شده خاک برای تیمار فاضلاب تصفیه‌شده و آب معمولی اختلاف معنی‌دار می‌باشد. در جدول ۱۲ مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری بر غلظت فلز مس

www.SID.ir

Archive of SID

در نقاط مختلف خاک آورده شده است. نتایج جدول مذکور بیانگر این مطلب است که در تیمارهای مورد مطالعه، مقدار مس نقاط اندازه‌گیری شده نیز مشابه آهن دارای روند منظمی نمی‌باشد. اما به طور کلی کمترین مقدار مس در چهارمین عمق اندازه‌گیری شده از سطح خاک (y_3) و همچنین دورترین فاصله نسبت به گیاه (x_2) قرار دارد. در تمام نقاط اندازه‌گیری شده بین تیمار فاضلاب تصفیه‌شده و فاضلاب تصفیه‌شده آب اختلاف معنی‌داری مشاهده می‌گردد، اما مقادیر مس اندازه‌گیری شده تیمار فاضلاب تصفیه‌شده بیشتر می‌باشد. در جداول ۱۳، ۱٤ و ۱۵ مقایسه میانگین اثر تیماهای آبیاری بر غلظت منگنز، روی و آرسنیک تجمع یافته در خاک ارائه شده است. با توجه به جدول‌های مذکور مشاهده می‌گردد که هر چه فاصله از سطح خاک بیشتر می‌شود از غلظت عناصر منگنز، روی و آرسنیک موجود در خاک کاسته می‌شود. همچنین با افزایش فاصله افقی از گیاهان مورد مطالعه نیز غلظت عناصر مذکور کمتر می‌گردد. نتایج جداول ۱۳، ۱٤ و ۱۵ همچنین بیانگر آن است که بین هر سه تیمار مورد مطالعه برای عناصر منگنز و روی اختلاف معنی‌دار می‌باشد. به طور کلی نتایج جدول‌های ۱۱ الی ۱۵ بیانگر این مطلب است که بیشترین و کمترین غلظت عناصر اندازه‌گیری شده به ترتیب مربوط به تیمار فاضلاب تصفیه‌شده و شاهد می‌باشد. همچنین بین عناصر اندازه-گیری شده، منگنز و مس به ترتیب بیشترین و کمترین غلظت در خاک را دارا می‌باشد. بیشترین تحرک فلزات سنگین به ترتیب مربوط به مس، منگنز، آهن، روی و آرسنیک می‌باشد.نتایج این تحقیق در انطباق با نتایج پارسافر و معروفی (۱۳۹۲)، طبری و صالحی (۱۳۹۰)، آقابراتی و همکاران (۲۰۰۸)، منیر و همکاران (۲۰۰۷)، مادجئون و همکاران (۲۰۰٦) و برار و همکاران (۲۰۰۲) می‌باشد که، طی تحقیقی گزارش نمودند که غلظت فلزات سنگین در سطح خاک بیشتر از عمق خاک می‌باشد. بول و همکاران (۲۰۰۹) نیز گزارش نمودند که ترکیب فاضلاب-های خام و تصفیه‌شده با آب معمولی، تجمع غلظت عناصر مورد مطالعه را نسبت به تیمار فاضلاب در خاک کاهش می‌دهد.

گوپتا و همکاران (۲۰۰۸) پس از انجام تحقیقاتشان با فاضلاب تصفیه‌شده، نشان دادند که بین عناصر آهن، کادمیوم، کروم، منگنز و سرب اندازه‌گیری شده در خاک، آهن بیشترین تجمع را در خاک دارد. اما نتایج این تحقیق با تحقیق محمد و مظهره (۲۰۰۳) همخوانی ندارد که بیان نمودند، آبیاری با فاضلاب تصفیه-شده، غلظت عناصر منگنز و آهن را در خاک افزایش می-دهد ولی هیچ اثری بر غلظت روی و مس خاک ندارد. به طور کلی غلظت کمتر فلزات سنگین در عمق های پایین‌تر خاک، به علت پویایی کم این فلزات و در نتیجه حرکت ضعیف آنها به سمت لایه‌های پایینی خاک می‌باشد.

جدول ۱۱- مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری بر غلظت فلز آهن در نقاط مختلف خاک

تیمار	میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)										
	x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
W1	۴/۲۱^{a}	۴/۲۱^{a}	۴/۲۰^{a}	۴/۱۵^{a}	۴/۱۳^{a}	۴/۱۴^{a}	۴/۱۵^{a}	۴/۱۲^{a}	۳/۹۱^{a}	۳/۹^{a}	۳/۸۲^{a}	۳/۸۰^{a}
W2	۳/۹۱^{ab}	۳/۹۰^{ab}	۳/۸۸^{ab}	۳/۸۹^{ab}	۳/۸۹^{ab}	۳/۸۵^{ab}	۳/۸۴^{ab}	۳/۸۳^{ab}	۳/۷۳^{ab}	۳/۷۱^{ab}	۳/۷۱^{ab}	۳/۷۰^{ab}
W3	۳/۵۵^{b}	۳/۵۵^{b}	۳/۵۴^{b}	۳/۵۲^{b}	۳/۵۳^{b}	۳/۵۲^{b}	۳/۵۱^{b}	۳/۵۰^{b}	۳/۵۰^{b}	۳/۴۸^{b}	۳/۴۵^{b}	۳/۴۰^{b}

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است

W1: فاضلاب تصفیه‌شده، W2: یکی در میان فاضلاب تصفیه‌شده - آب معمولی W3: آب معمولی

جدول ۱۲- مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری بر غلظت فلز مس در نقاط مختلف خاک

تیمار	میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)										
	x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
W1	۳/۳^{a}	۳/۱^{a}	۲/۹^{a}	۲/۸^{a}	۳/۲^{a}	۳/۰^{a}	۲/۹^{a}	۲/۹^{a}	۳/۰^{a}	۲/۸^{a}	۲/۷^{a}	۲/۸^{a}
W2	۲/۲^{b}	۲/۲^{b}	۱/۹^{b}	۱/۶^{b}	۲/۰^{b}	۱/۷^{b}	۱/۶^{b}	۱/۷^{b}	۱/۹^{b}	۱/۷^{b}	۱/۶^{b}	۱/۷^{b}
W3	۰/۷۹^{c}	۰/۷۵^{c}	۰/۷^{c}	۰/۷^{c}	۰/۷^{c}	۰/۷^{c}	۰/۶^{c}	۰/۶^{c}	۰/۷^{c}	۰/۵^{c}	۰/۶^{c}	۰/۵^{c}

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۳- مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری بر غلظت فلز منگنز در نقاط مختلف خاک

تیمار	میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)										
	x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
W1	۷/۳^a	۶/۹^a	۶/۵^a	۶/۶^a	۷/۱^a	۶/۷^a	۶/۹^a	۶/۸^a	۷/۱^a	۶/۶^a	۶/۴^a	۶/۴^a
W2	۵/۹^b	۵/۷^b	۵/۸^b	۵/۷^b	۵/۹^b	۵/۷^b	۵/۴^b	۵/۵^b	۵/۶^b	۵/۷^b	۵/۴^b	۵/۱^b
W3	۴/۹^c	۴/۵^c	۴/۴^c	۴/۵^c	۴/۵^c	۴/۵^c	۴/۴^c	۴/۵^c	۴/۶^c	۴/۵^c	۴/۵^c	۴/۳^c

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است

جدول ۱۴- مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری بر غلظت فلز روی در نقاط مختلف خاک

تیمار	میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)										
	x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
W1	۳/۹۳^a	۳/۹۲^a	۳/۸۸^a	۳/۹۱^a	۳/۹۱^a	۳/۹۱^a	۳/۹۰^a	۳/۹۰^a	۳/۸۶^a	۳/۸۳^a	۳/۸۱^a	۳/۶۹^a
W2	۲/۷۱^b	۲/۶۹^b	۲/۷۰^b	۲/۶۶^b	۲/۷^b	۲/۶۷^b	۲/۶۶^b	۲/۶۷^b	۲/۶۹^b	۲/۶۲^b	۲/۶۱^b	۲/۵۱^b
W3	۲/۰۶^c	۲/۰۶^c	۲/۰۵^c	۲/۰۴^c	۲/۰۶^c	۲/۰۴^c	۲/۰۱^c	۲/۰۰^c	۲/۰۳^c	۱/۹۴^c	۱/۹۲^c	۱/۸۹^c

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است

جدول ۱۵- مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری بر غلظت فلز آرسنیک در نقاط مختلف خاک

تیمار	میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)										
	x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
W1	۵/۴۱^a	۵/۳۵^a	۵/۳۰^a	۵/۲۶^a	۵/۲۷^a	۵/۲۶^a	۵/۲۴^a	۵/۲۱^a	۵/۲۱^a	۵/۲۱^a	۵/۱۹^a	۵/۱۹^a
W2	۲/۵۳^b	۲/۵۱^b	۲/۴۸^b	۲/۴۷^b	۲/۴۶^b	۲/۴۵^b	۲/۴۳^b	۲/۴۲^b	۲/۳۹^b	۲/۳۸^b	۲/۳۸^b	۲/۳۷^b
W3	۰/۰۰^c	۰/۰۰^c	۰/۰۰^c	۰/۰۰۰^c	۰/۰۰^c	۰/۰۰^c	۰/۰۲۸^c	۰/۰۰^c	۰/۰۰^c	۰/۰۰^c	۰/۰۰^c	۰/۰۰^c

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است

در جدول‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ مقایسه میانگین اثر نوع گیاه (گوجه‌فرنگی و ذرت) بر غلظت فلز منگنز، روی و آرسنیک در نقاط مختلف خاک نمایش داده شده است. نتایج جداول مذکور نشان می‌دهد که برای منگنز خاک کشت شده با گیاه ذرت و برای فلز روی و آرسنیک خاک کشت شده با گیاه گوجه‌فرنگی دارای بیشترین مقادیر هستند. برای بقیه عناصر برای هر دو گیاه کشت شده مقدار تقریبا یکسانی بدست آمد و اختلاف معنی‌داری مشاهده نگردید.بر اساس نتایج جدول‌های مذکور و همچنین جدول‌های ۱۱ الی ۱۵در هر دوی این گیاهان تغییرات غلظت فلزات سنگین درخاک، مشابه تغییرات نوع آب آبیاری می‌باشد و هر چه فاصله عمودی و افقی از گیاه بیشتر می‌شود از تجمع فلزات سنگین مذکور کاسته می‌شود. نتایج جدول‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ همچنین نشان می‌دهد که تغییرات فلز آرسنیک در خاک کمتر از فلز منگنز و منگنز کمتر از فلز روی می‌باشد. این به این معنی است که تحرک و جابه‌جایی آرسنیک در خاک کمتر از سایر فلزها می‌باشد و بیشترین مقدار آرسنیک در محل آبیاری (نزدیک گیاه) می‌باشد. تغییرات عناصر منگنز و آرسنیک در خاک برای گوجه‌فرنگی و ذرت تقریباً مشابه هم می‌باشد، اما برای روی میزان فلزات سنگین در خاک داری کشت گیاه گوجه فرنگی دارای تغییرات بیشتری می‌باشد. لازم به ذکر است که بیشترین مقدار فلز آهن و مس در خاک به ترتیب مربوط به ذرت و گوجه‌فرنگی می‌باشد.

جدول ۱۶- مقایسه میانگین اثر نوع گیاه بر غلظت فلز منگنز در نقاط مختلف خاک

تیمار	میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)										
	x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
گوجه‌فرنگی	۴/۹^a	۴/۶^a	۴/۲^a	۴/۳^a	۴/۸^a	۴/۳^a	۴/۴^a	۴/۱^a	۴/۶^a	۴/۲^a	۴/۳^a	۴/۲^a
ذرت	۵/۷^b	۵/۶^b	۵/۳^b	۵/۳^b	۵/۷^b	۵/۵^b	۵/۶^b	۵/۳^b	۵/۵^b	۵/۴^b	۵/۱^b	۴/۹^b

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۷- مقایسه میانگین اثر نوع گیاه بر غلظت فلز روی در نقاط مختلف خاک

تیمار	میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)											
	x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
گوجه‌فرنگی	۳/۲^a	۲/۹^a	۳/۱^a	۳/۱^a	۲/۷^a	۲/۸^a	۱۹/۷^a	۲/۹^a	۲/۸^a	۲/۴^a	۲/۵^a	۲/۴^a
ذرت	۲/۷^b	۲/۶^b	۲/۷^b	۲/۶^b	۲/۷^b	۲/۷^b	۲/۶^b	۲/۷^b	۲/۶^b	۲/۲^b	۲/۴^b	۲/۱^b

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است

جدول ۱۸- مقایسه میانگین اثر نوع گیاه بر غلظت فلز آرسنیک در نقاط مختلف خاک

تیمار	میانگین غلظت (میلی‌گرم بر کیلوگرم)											
	x_0y_0	x_0y_1	x_0y_2	x_0y_3	x_1y_0	x_1y_1	x_1y_2	x_1y_3	x_2y_0	x_2y_1	x_2y_2	x_2y_3
گوجه‌فرنگی	۲/۴۴^a	۲/۳۴^a	۲/۲۰^a	۱/۹۷^a	۲/۰۱^a	۲/۳۳^a	۲/۲۷^a	۲/۲۹^a	۲/۲۲^a	۲/۲۴^a	۲/۱۷^a	۲/۱۴^a
ذرت	۲/۳۵^b	۲/۲۷^b	۲/۲۸^b	۲/۲۴^b	۲/۲۲^b	۱/۱۹^b	۱/۲۲^b	۱/۲۱^b	۲/۲۰^b	۲/۱۶^b	۲/۱۲^b	۲/۱۲^b

حروف مشترک در هر ستون نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین تیمارها است

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تیمارهای آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده شهری، فاضلاب تصفیه‌شده-آب معمولی (به صورت یکی در میان) و آب معمولی بر میزان تجمع فلزات سنگین آهن، مس، منگنز، روی، آرسنیک، کادمیوم، سرب و نیکل در خاک مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از تحقیق حاضر اثر نوع آب آبیاری بر میزان فلزات مذکور در نیمرخ خاک معنی‌دار بوده و بیشترین و کمترین مقادیر عناصر سنگین به ترتیب در تیمارهای فاضلاب تصفیه‌شده و آب معمولی مشاهده گردید. همچنین نتایج نشان داد که بین هر سه تیمار مورد مطالعه برای مقدار فلزات سنگین اختلاف معنی‌داری وجود دارد، لذا ترکیب فاضلاب تصفیه‌شده شهری با آب معمولی می‌تواند از میزان اثرات زیان‌بار فاضلاب (نظیر تجمع عناصر سنگین در خاک) بکاهد. به طور کلی بر اساس نتایج بدست آمده بیشترین مقدار فلزات سنگین اندازه‌گیری شده بین تیمارها مربوط به تیمار فاضلاب تصفیه‌شده است و بین فلزات سنگین مورد مطالعه، منگنز دارای بیشترین مقدار در خاک می‌باشد و کمترین میزان تغییرات فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در خاک مربوط به فلز آرسنیک می‌باشد. نتایج همچنین حاکی از آن است که به طور کلی با افزایش فاصله (افقی و عمودی) از گیاه از میزان تجمع فلزات سنگین در خاک کاسته می‌شود و الگوی جذب آب توسط ریشه گیاه (قانون ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰) تأثیری بر میزان تجمع فلزات سنگین اندازه‌گیری شده در خاک ندارد، اما نوع گیاه تأثیر معنی‌داری بر غلظت فلزات آرسنیک، منگنز و روی در خاک دارد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با توجه به بالا بودن مقادیر برخی عناصر نظیر آرسنیک، احتمال آلودگی گیاهانی که مصرف خوراکی دارند (نظیر ذرت و گوجه‌فرنگی) وجود دارد. بنابراین با توجه به شرایط تصفیه فعلی فاضلاب، پیشهاد می‌گردد که آبیاری با فاضلاب تصفیه شده برای محصولات غیر خوراکی (مثل پنبه) محدود گردد.

فهرست منابع

۱. اروندی، س.، و مقدس، ک. ۱۳۷۹. یکی از راه کارهای مقابله با کم آبی، استفاده بهینه از فاضلاب شهری. مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با کم آبی و خشکسالی کرمان. ۱۰-۹ اسفند ۱۳۷۹. دانشگاه باهنر کرمان، کرمان، ایران، ۵۵- ٦۵.

۲. پارسافر، ن.، و معروفی، ص. ۱۳۹۲. اثر کاربرد فاضلاب بر تجمع عناصر سنگین در نیمرخ خاک تحت شرایط گلخانه‌ای – لایسیمتری. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ب، ۲۷(۲): ۲۲۹-۲۳۹.

www.SID.ir

Archive of SID

۳. حسین پور، ا.، حق نیا، غ. ح.، علیزاده،ا.، و فتوت، ا. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات کیفیت شیمیایی فاضلاب خام و پساب شهری در اثر عبور از ستون‌های خاک. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳ (۳): ٤٥-٥٦.

٤. سازمان حفاظت محیط زیست ایران. ۱۳۷۸. ضوابط و استانداردهای زیست محیطی. انتشارات سازمان حفاظت محیط زیست ایران.

٥. شاکرمی، م.، معروفی، ص.، رحیمی ، ق.، و دشتی، ف. ۱۳۹٤. اثر فاضلاب و کمپوست بر انتقال برخی از فلزات سنگین در نیمرخ خاک. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ب، ۲۹(۱): ۷۵-۸٦.

٦. طبری، م.، و صالحی، آ. ۱۳۹۰. بررسی تأثیر آبیاری با استفاده از پساب فاضلاب شهری بر تجمع فلزات سنگین در خاک. علوم و تکنولوژی محیط زیست. ۱۳(٤): ٥۹-٤۹.

۷. عابدی، م.، و نجفی، ب. ۱۳۸۰. استفاده از فاضلاب تصفیه شده در کشاورزی. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.۲٤۸ صفحه.

۸. علیزاده، ا. ۱۳۸۹. طراحی سیستم‌های آبیاری(جلد اول)، طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی، چاپ چهارم، انتشارات آستان قدس رضوی، مشهد.

9. Abedi-Koupai, J., Mostafazadeh-Fard, B., Afyuni., M., and Bagheri, M. R. 2006. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. Plant, Soil and Environment. 52(8): 335-344.
10. Alizadeh, A., Bazari, M. E. Velayati, S., Hasheminia, M., and Yaghmaie, M. 2001. Irrigation of cron with wastewater. In: R. Ragab, G. Pearce, J. Changkim, S. Nairizi and A. Hamdy. (Eds.), 52nd ICID International. Workshop on Wastewater Reuse and Management. Seoul, Korea, 137- 146.
11. Al-Lahham, O., El-Assi, N.M., and Fayyad, M. 2007. Translocation of heavy metals to tomato (Solanum lycopersicom L.) fruit irrigated with treated wastewater. Scientia Horticulturae Amsterdam. 113:250-254.
12. Aghabarati, A., Hosseini, S.M., and Maralian, H. 2008. Heavy metal contamination of soil and olive trees (*Olea europaea* L.) in suburban areas of Tehran, Iran. Research Journal of Environmental Science. 2(5): 323-329.
13. Behbahaninia, A., Mirbagheri, S.A., Khorasani, N., Nouri, J., and Javid A.H. 2009. Heavy metal contamination of municipal effluent in soil and plants. Journal of Food, Agriculture and Environment. 7(3 – 4): 851-856.
14. Boll, R., Dernbach, H., and Kayser, R. 1986. Aspects of land disposal of wastewater as experienced in Germany. Journal of Water Science and Technology. 18: 383-390.
15. Brar, M.S., Khurana, M.P.S., and Kansal, B.D. 2002. Effect of irrigation by untreated sewage effluents on the micro and potentially toxic elements in soils and plants, Department of Soils, Punjab Agricultural University, Ludhiana, Punjab, India.
16. Elbana, T. A., Ramadan, M. A., Gaber, H. M., Bahnassy, M. H., Kishk, F. M., and Selim, H. M. 2013. Heavy metals accumulation and spatial distribution in long term wastewater irrigated soils. Environmental Chemical Engineering. 1: 925–933.
17. Gupta, S., Satpati, S., Nayek, S., and Garai, D. 2010. Effect of wastewater irrigation on vegetables in relation to bioaccumulation of heavy metals and biochemical changes. Environmental Monitoring and Assessment. 165(1-4): 169-77.
18. Hussian, G., and Al-Saati. A. J. 1999. wastewater quality and its reuse in agriculture in Saudi Arabia. Desalination. 123: 241-251.

www.SID.ir

Archive of SID

19. Mojiri, A., and Hamidi, A.A. 2011. Effects of municipal wastewater on accumulation of heavy metals in soil and wheat (*Triticum bestivum L.*) with two irrigation method. Romanian Agricultural Research. 28: 217-222.
20. Munir, J., Rusan, M., Hinnawi, S., and Rusan, L. 2007. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. Desalination. 215: 143-152.
21. Madejo´n, P., Maran˜o´n, T., and Murillo, J.M. 2006. Bio monitoring of trace elements in the leaves and fruits of wild olive and holm oak trees. Science of the Total Environment. 355: 187- 203.
22. Mohammad, M., and Mazahreh., N. 2003. Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated wastewater. Communications in Soil Science and Plant Analalysis. 34 (9 – 10): 1281-1294.
23. Mancino, C. F., and Pepper, I. L. 1992. Irrigation of turf grass with secondary sewage effluent: soil quality, Agron. J. 84(4): 650–654.
24. Nan, Z. L., Zhang, J., and Cheng, G. 2002. Cadmium and zinc interaction and their transfer in soil-Crop system under actual field conditions. Science of the Total Environment. 285(1-3): 187-195.
25. Pescode, M.B. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO, Irrigation and Drainage Paper No. 47, 118 p.
26. Rattan, R.K., Datta, S.P., Chhonkar, P.K., Suribabu, K., and Singh, A.K. 2005. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater-A case study. . journal of Agriculture, Ecosystems and Environment. 109: 310-322.
27. Saber, M. S. M. 1986. Prolonged effect of land disposal of human wastes on soil conditions. Journal of Water Science and Technology. 18: 371-374.
28. Smith, C. J., Hopmans, P., and Cook, F.J. 1996. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia. journal of Environmental Pollution. 94(3): 317-323.
29. Toze, S. 2006. Reuse of effluent water-benefits and risks. journal of Agricultural water Management. 80: 147-159.

www.SID.ir