

تأثیر آبیاری با فاضلاب بر انتقال عناصر سنگین به عمق خاک تحت کشت سیب زمینی

صفر معروفی^{۱*}، نصرالدین پارسافر^۱، قاسم رحیمی^۲ و فرشاد دشتی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۸/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۸/۱۴)

چکیده

این تحقیق در شرایط گلخانه‌ای و در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار و چهار که تیمار شامل فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه شده، ترکیب فاضلاب تصفیه شده و آب چاه به نسبت ۵۰ درصد و ترکیب فاضلاب خام و آب چاه به نسبت ۵۰ درصد بودند، در درون لایسمتر انجام گردید. لایسمترها در مهر ماه ۱۳۸۸ ساخته شدند و با یک خاک دو لایه پر گردیدند. لایه بالایی (۰-۳۰ سانتی‌متر) و لایه پایینی (۳۰-۷۰ سانتی‌متر) به ترتیب لوم شنی و لوم رسی شنی بودند. آبیاری لایسمترها پنج ماه بدون کشت گیاه صورت گرفت تا خاک به شرایط مطلوب برسد. در مجموع هشت آبیاری، با دوره یازده روزه صورت گرفت. پس از هر بار آبیاری نمونه‌های زه آب و فاضلاب ورودی جهت تعیین درصد انتقال عناصر سنگین (آهن، روی، مس، منگنز، سرب، نیکل و کادمیم) جمع‌آوری گردیدند. نتایج نشان داد که اثر تیمارهای آبیاری بر درصد انتقال عناصر سنگین معنی‌دار بوده و کمترین میانگین در فاضلاب خام مشاهده گردید. هم‌چنین بیشترین درصد انتقال عناصر آهن، مس، روی، سرب و نیکل در تیمار ترکیب فاضلاب خام و آب مشاهده گردید. روند تغییرات درصد انتقال عناصر سنگین با گذشت زمان در بیشتر موارد افزایشی مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه شده، آب زه‌کشی، عناصر سنگین، درصد انتقال، لایسمتر

۱. گروه آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۳. گروه باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: smarofi@yahoo.com

مقدمه

در شرایطی که کشور به شدت از لحاظ کمبود آب شیرین رنج می‌برد و مسأله بحران آب به صورت یک مسأله جدی مطرح می‌باشد، توجه به منابع نامتعارف آب (آب‌های با کیفیت نامطلوب) یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است، از سوی دیگر، تمرکز مراکز جمعیتی و صنعتی در نقاط مختلف، باعث شکل‌گیری حجم زیادی از پساب می‌گردد که عدم توجه به یافتن بهترین شیوه‌های دفع آن، دشواری‌های زیست محیطی زیادی در اطراف این مناطق به همراه خواهد آورد. بررسی‌ها نشان داده است که کاربرد پساب در کشاورزی، بهترین شیوه دفع آن است (۹). اجزای تشکیل‌دهنده فاضلاب عبارت‌اند از: ازت، فسفر، پتاسیم، نمک‌ها، عناصر ناچیز (فلزهای سنگین) و عوامل بیماری‌زا می‌باشد. ازت، فسفر و پتاسیم از عمده مغذی‌هایی هستند که برای رشد و تکثیر گیاهان ضروری هستند. عناصر ناچیز به عناصری گفته می‌شود که غلظت آنها در خاک به‌طور معمول خیلی کم است (مانند آهن، منگنز، مس و روی، کبالت و نیکل). این عناصر را خرده مغذی نیز می‌نامند چون مقادیر کم آنها برای گیاه ضروری و مقادیر بیشتر آنها برای گیاه سمی است. نمک‌ها شامل گستره‌ای از ترکیب‌ها هستند کاتیون‌ها (سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم) و آنیون‌ها (سولفات، کلر، کربنات، بی کربنات و نترات) با افزایش هدایت الکتریکی خاک اثر مشترکی (به نام شوری) بر خاک می‌گذارند (۸).

بررسی‌ها نشان داده که با عبور فاضلاب از منطقه غیراشباع زمین (حد فاصل آب زیرزمینی و سطح خاک)، امکان جدا شدن ذرات جامد شناور، مواد قابل تجزیه و میکروارگانیسم‌ها به‌صورت تقریباً کامل فراهم گردیده و به مقدار قابل توجهی غلظت نیتروژن، فسفر و فلزات سنگین موجود در آن کاهش می‌یابد. اگر چه عدم مدیریت صحیح تخلیه فاضلاب به اهداف گوناگون در خاک پیامدهای ناگواری مانند آلودگی منابع آب به ویژه آب‌های زیرزمینی، خاک و گیاه را به دنبال دارد (۱۹). هر چند غلظت عناصر سنگین در پساب ممکن است کم و ناچیز باشد، ولی تجمع آنها در داخل خاک می‌تواند سبب افزایش

غلظت عناصر سنگین در گیاهان کشت شده در این خاک‌ها شود. استفاده از پساب در کوتاه مدت ممکن است سمیتی در گیاه ایجاد نکند. ولی مصرف طولانی مدت فاضلاب‌ها یا به عبارتی ورود کنترل نشده عناصر سنگین به خاک‌ها سبب افزایش غلظت این عناصر در خاک شده و گیاهان کشت شده در این خاک‌ها این عناصر را جذب کرده و به آسانی وارد زنجیره غذایی می‌گردند. مثلاً بررسی‌ها نشان داده که آبیاری طولانی مدت اراضی جنوب تهران با پساب شهری باعث افزایش غلظت فلزات سنگین سرب، روی و مس در اراضی و گیاهان تحت آبیاری با فاضلاب نسبت به اراضی و گیاهان شاهد تحت آبیاری با فاضلاب شده است (۱۱). هم‌چنین بررسی‌ها نشان می‌دهند که خاک‌ها با دارا بودن ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی بسیار پیچیده، توانایی خوبی در حذف و پالایش انواع آلاینده‌ها، از جمله آلاینده‌های موجود در فاضلاب از خود نشان می‌دهند و هم‌چنین خاک‌ها به دلیل سطح ویژه زیاد و حضور گروه‌های عامل سطحی، عوامل مؤثری در جذب فلزات سنگین هستند (۱۵).

اچوریا و همکاران (۱۶) نتیجه گرفتند که تبادل کاتیونی با کلسیم اساسی‌ترین مکانیسم نگهداری در خاک‌های آهکی می‌باشد. خصوصیات فیزیکوشیمیایی و بیولوژیک خاک، نوع فاضلاب و درجه تصفیه آن، شرایط استفاده از فاضلاب مانند روش کاربرد فاضلاب، توپوگرافی و شرایط اقلیمی، نوع پوشش گیاهی و سطح آب زیرزمینی از جمله مواردی هستند که بر کارایی خاک در تصفیه فاضلاب تأثیر می‌گذارند (۱۹). آبیاری و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها از مهم‌ترین شیوه‌های دفع فاضلاب در خاک و استفاده مجدد از فاضلاب می‌باشند. استفاده از فاضلاب به منظور آبیاری سبب می‌گردد علاوه بر بهره‌گیری از اثرات مثبت آن بر خصوصیات خاک، به عنوان یک منبع آب نیز مورد استفاده قرار گیرد. در ایام غیر زراعی نیز با دفع فاضلاب در خاک می‌توان علاوه بر تصفیه بیشتر فاضلاب توسط خاک، امکان افزایش ذخیره آب در آبخوان‌های با مصرف کشاورزی (غیرشرب) را فراهم کرد. از طرفی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که به‌منظور بهبود کیفیت فاضلاب و جلوگیری از آلودگی آب‌های

آقابراتی و همکاران (۳) نشان دادند که استفاده از فاضلاب شهری (طی ۷ سال) در آبیاری زیتون کاری باعث افزایش معنی‌دار غلظت عناصر سنگین (روی و سرب) در خاک و برگ درخت زیتون شده است اما سبب افزایش غلظت این عناصر در میوه‌های زیتون نشده است. کاربرد طولانی مدت فاضلاب شهری ممکن است باعث افزایش عناصر سنگین در خاک و بافت‌های گیاهی شود. آقابراتی و همکاران (۲) در پژوهشی دیگر نتیجه گرفتند که آبیاری با فاضلاب شهری سبب افزایش معنی‌دار غلظت نیکل و کروم در خاک می‌شود. غلظت نیکل و کروم در برگ‌های درختان آبیاری شده با فاضلاب شهری بیش از غلظت این عناصر در برگ‌های درختان آبیاری شده با آب چاه بود، اما اختلاف معنی‌داری در غلظت فلزات سنگین در میوه‌های زیتون دیده نشد. حسین‌پور و همکاران (۶) بیان کردند که میانگین نیکل و کادمیم در زه آب‌های خروجی، همواره کمتر از میانگین مقدار آن در فاضلاب‌های ورودی به ستون‌های خاک است اما با استمرار کاربرد فاضلاب‌ها در طول زمان بر مقدار آنها افزوده شده است.

مطالعات ستونی طی دهه‌های اخیر در کشورهای مختلف جهان توجه زیادی را به خود معطوف داشته‌اند که از آن جمله می‌توان به بررسی آثار استفاده از فاضلاب‌های خانگی و پساب تصفیه‌خانه‌ها در آبیاری محصولات کشاورزی و تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی توسط حسن اقلی (۴)، بررسی روند حرکت عناصر سنگین کادمیم، سرب و روی در ستون‌های خاک دست‌نخورده و دست‌خورده و تأثیر مواد آلی در نمونه‌های دست‌خورده توسط امامی (۱)، آبشویی کربن آلی از لایسیمترهای آبیاری شده با پساب توسط فین و همکاران (۱۸) و آبشویی عناصر پرمصرف و فلزات از خاک‌های دست‌نخورده آمیخته شده با لجن فاضلاب توسط مک لارن و همکاران (۲۰) اشاره نمود. به هر حال با توجه به تفاوت در شرایط اقلیمی، گیاهی، اجتماعی، فرهنگی و نوع خاک هر منطقه، بهره‌گیری از نتایج محلی نیز امری ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به مطالب بیان شده هدف از این تحقیق بررسی اثر آبیاری با نسبت‌های مختلف

زیرزمینی در هنگام تخلیه فاضلاب در خاک، هر چه زمان عبور فاضلاب از بین ذرات خاک طولانی‌تر باشد، به دلیل تماس بیشتر و در نتیجه تأثیر بیشتر فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیک خاک بر کیفیت آن، امکان انتقال آلاینده‌ها به عمق خاک کاهش می‌یابد (۲۴). به‌طور کلی با افزایش pH، به دلیل کاهش پویایی فلزات سنگین، رقابت خاک‌ها برای جذب یون‌های فلزی زیاد می‌شود (۱۷). با افزایش pH، بار منفی خاک زیاد شده و مکان‌های اضافی برای جذب فعال روی فعال گشته و مقدار این عنصر در محلول کاهش می‌یابد (۲۲).

تاکنون در مورد اثرهای آبیاری با فاضلاب و پساب آن در برخی از کشورهای جهان و ایران پژوهش‌هایی انجام شده است. سهیلی (۷) نتیجه گرفت که عناصر در زه آب خروجی نسبت به آبیاری با فاضلاب بسیار ناچیز بوده و به لحاظ استفاده طولانی از فاضلاب نهر فیروز آباد به منظور آبیاری خاک‌های منطقه جنوب تهران، میزان فلزات سنگین روی، سرب، کادمیم و نیکل در این خاک‌ها از حد استاندارد بیشتر می‌باشد. بیشترین میزان تجمع را در عمق ۶۰-۹۰ سانتی‌متری خاک مشاهده نمود. موحدیان و همکاران (۱۲) به این نتیجه رسیدند که در اثر کاربرد پساب برای آبیاری، مقادیری از عناصر فوق در خاک مزارع تجمع یافته به‌طوری‌که میانگین غلظت سرب و کادمیم در خاک از مقدار طبیعی آن بیشتر بود. در بافت گیاهی، غلظت سرب در محدوده طبیعی و غلظت کادمیم بیشتر از محدوده طبیعی بود و غلظت نیکل در خاک و بافت گیاهی مزارع از محدوده طبیعی کمتر بود. همچنین معلوم شد گیاهان در جذب عناصر به‌صورت انتخابی عمل کرده و توانایی ذرت و گندم در جذب عناصر مختلف متفاوت است. کدخدائی (۱۰) دریافت که بین تیمارهای مورد بررسی از لحاظ مقدار عناصر سنگین تفاوت معنی‌داری وجود دارد به گونه‌ای که بیشترین آن مربوط به تیمار پساب خالص و کمترین آن مربوط به تیمار شاهد (آب چاه) می‌باشد. مقایسه بین غلظت عناصر سنگین موجود در خاک، قبل و پس از کاربرد تیمارهای آزمایشی، نشان داد که استفاده از پساب کارخانه ذوب‌آهن باعث افزایش عناصر سنگین در خاک می‌شود.

درشت دانه آن، از الک با قطر روزه‌های یک سانتی‌متر استفاده گردید (۵). ضمناً با توجه به خاک‌های منطقه، خاک مورد استفاده، دو لایه که شامل: لایه فوقانی (۰-۳۰ سانتی‌متر) با بافت لومی شنی و لایه زیرین (۳۰-۷۰ سانتی‌متر) با بافت لومی شنی بوده است. در نهایت کلیه لایسیمترها تا ارتفاع تقریبی ۱۰ سانتی‌متر پایین‌تر از قسمت فوقانی، از خاک پر شدند. پس از استقرار خاک در لایسیمترها (مهر ماه ۱۳۸۸)، عملیات آبیاری بدون کشت گیاه به‌طور منظم و پیوسته (هفتگی) در طی یک بازه زمانی پنج ماهه صورت گرفت تا شرایط طبیعی و ایجاد مجاری رخنه در خاک ایجاد گردد. عملیات آبیاری لایسیمترها با توجه به شرایط رطوبتی خاک که توسط بلوک‌های گچی کنترل می‌شد، به‌طور متوسط هر ۱۱ روز یکبار انجام گرفت. به همین منظور، برای هر دوره آبیاری، فاضلاب تصفیه‌خانه شهر سرکان (به‌صورت خام و تصفیه شده و به‌طور جداگانه) به محل اجرای تحقیق (گلخانه دانشکده کشاورزی) حمل شد. و با توجه به مشکلات ناشی از نگهداری فاضلاب، بلافاصله مورد استفاده قرار گرفت. حجم آب استفاده شده در هر مرحله حدود ۳۰ الی ۳۵ لیتر بود و در مجموع هشت آبیاری، برای تیمارها صورت گرفت. در جدول ۱ بافت و درصد ذرات تشکیل‌دهنده خاک در دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۷۰ سانتی‌متری و در شکل ۱ شمایی از لایسیمتر مورد استفاده ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که بافت خاک با توجه به روش هیدرومتری تعیین گردید.

اندازه‌گیری عناصر سنگین در آب آبیاری و زه آب خروجی
در فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه شده و زه آب خروجی بعد از آبیاری از تمامی تیمارها نمونه‌برداری گردید. نمونه‌برداری در ۷ مرحله و در هر مرحله ۱۶ نمونه (۴ نمونه آب آبیاری وارد شده به سطح خاک، ۱۲ نمونه زه‌آب) برداشت گردیدند. ظروف نمونه‌برداری ابتدا با مواد شوینده چندین بار شسته شده و در پایان نیز با آب مقطر شستشو داده شدند. غلظت عناصر سنگین (آهن، روی، منگنز، مس، کادمیم، نیکل و سرب) از روش

فاضلاب بر درصد انتقال عناصر سنگین آهن، روی، مس، منگنز، کادمیم، نیکل و سرب به عمق خاک تحت کشت سیب‌زمینی می‌باشد. همچنین تغییرات این عناصر در دوره مذکور بررسی گردید. با توجه به این‌که در مطالعات ذکر شده بیشتر اثر فاضلاب تصفیه شده و تا حدی فاضلاب خام بررسی گردیده بود و مطالعه بیشتر در زمینه خاک و گیاه بوده است لذا سعی گردید که تیمارها تا حدی از گستردگی مطلوبی برخوردار باشند، بنابراین علاوه بر فاضلاب تصفیه شده، فاضلاب خام و ترکیب این فاضلاب‌ها با آب معمولی نیز در نظر گرفته شد. مهم‌ترین فرض‌هایی که در این تحقیق به دنبال رد یا اثبات آنها هستیم شامل: ۱. درصد انتقال عناصر به اعماق خاک بستگی به نوع عنصر سنگین موجود در آب آبیاری دارد، ۲. در اثر کاربرد فاضلاب عناصر سنگین به اعماق خاک نفوذ می‌نمایند. ۳. میزان درصد انتقال به نوع کیفیت آب آبیاری بستگی دارد، می‌باشند.

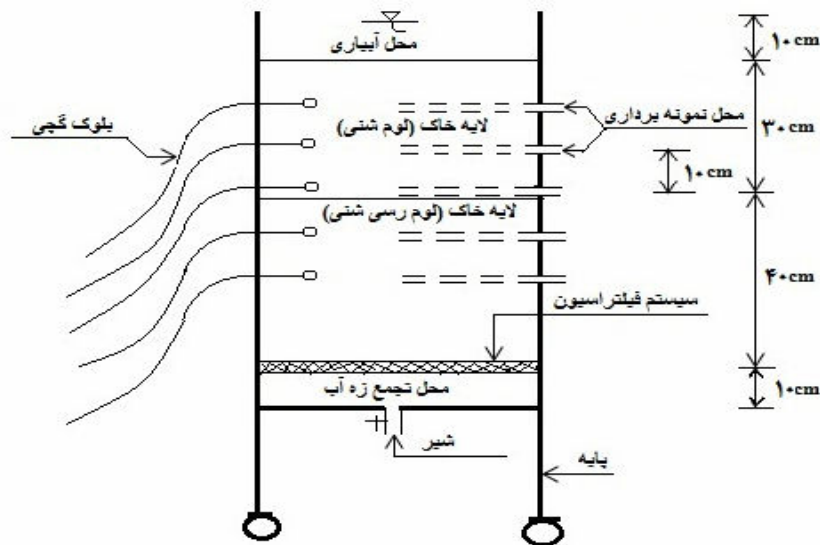
مواد و روش‌ها

آماده‌سازی بستر کشت

در اجرای این پژوهش به منظور کنترل هر چه مطلوب‌تر کلیه عوامل مؤثر، از لایسیمتر استفاده گردید. تعداد ۱۲ عدد لایسیمتر استوانه‌ای فلزی (عایق‌بندی شده) حجمی با ظرفیت ۲۲۰ لیتر (قطر ۶۰ و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر) استفاده شد. با توجه به اهمیت سیب‌زمینی در استان همدان و سطح وسیع زیر کشت آن، بدین منظور این گیاه انتخاب گردید. جهت زه‌کشی آب موجود در قسمت پایین لایسیمترها از یک سیستم زه‌کشی ویژه‌ای استفاده و زه‌آب‌ها در محفظه مخصوصی که بدین منظور تعبیه شده بود جمع‌آوری گردید. پس از طراحی، ساخت و استقرار لایسیمترها در محل مورد نظر، جهت حصول به شرایطی واقعی (نظیر خاک‌های منطقه)، پر نمودن آنها در طی چند مرحله و به تدریج صورت گرفت تا تراکم خاک لایسیمترها در حد شرایط طبیعی منطقه صورت گیرد. به منظور ایجاد شرایط یکنواخت در خاک مورد نظر و جداسازی ذرات

جدول ۱. درصد ذرات تشکیل دهنده خاک

بافت خاک	عمق خاک (سانتی متر)	شن (درصد)	سیلت (درصد)	رس (درصد)
لوم شنی	۰-۳۰	۶۰/۸	۲۰/۳	۱۸/۹
لوم رسی شنی	۳۰-۷۰	۵۲/۶	۲۱/۹	۲۵/۵



شکل ۱. شمایی کلی از لایسیمتر و لایه‌های خاک مورد استفاده در این تحقیق

نسبت ۵۰ درصد است، اجرا گردید.

تحلیل نتایج

آنالیز داده‌ها توسط نرم‌افزار اکسل (Excel2010) و SAS9.1 صورت گرفت. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن و در محیط نرم‌افزار SAS 9.1 صورت گرفت. ضمناً معنی‌داری در سطح پنج درصد ($P < 0.05$) در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های شیمیایی فاضلاب خام و تصفیه شده

در جدول ۲ غلظت عناصر سنگین به همراه مقادیر COD و BOD₅ در فاضلاب خام و پساب تصفیه شده همراه با مقادیر مجاز آنها (با توجه به استانداردهای سازمان حفاظت محیط زیست ایران و سازمان فائو) ارائه گردیده است. همان‌طورکه در

اسپکتروفتومتری جذب اتمی (با شعله)، اندازه‌گیری شدند. به دلیل وجود ذرات شناور در فاضلاب خام و تصفیه شده، برای تعیین غلظت عناصر سنگین در آنها، نمونه‌ها ابتدا با تیزاب سلطان (نسبت ۳ اسید کلریدریک غلیظ به ۱ اسید نیتریک غلیظ) هضم شدند و سپس قرائت انجام پذیرفت (۶). حجم زه آب خروجی نیز در چند مرحله در زمان آزمایش به وسیله یک بشر یک لیتری و یک استوانه مدرج به حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر اندازه‌گیری شد.

طرح آماری

این پژوهش به صورت یک طرح آماری با پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار و چهار سطح تیمار کاربرد آب که شامل: فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه شده، ترکیب فاضلاب تصفیه شده و آب چاه به نسبت ۵۰ درصد و ترکیب فاضلاب خام و آب چاه به

جدول ۲. کیفیت شیمیایی (میکروگرم بر لیتر) فاضلاب خام و فاضلاب تصفیه شده و مقایسه آنها با استانداردها

پارامتر	نوع فاضلاب		میزان مجاز استانداردها	
	فاضلاب خام	فاضلاب تصفیه شده	استاندارد کشاورزی*	فانو**
منگنز	۵۶	۲۸	۲۰۰	۲۰۰
مس	۷۰	۵۲	۲۰۰	۲۰۰
روی	۶۱۵	۳۷۵	۲۰۰۰	۲۰۰۰
آهن	۶۰۴	۲۶۲	۵۰۰۰	۵۰۰۰
کادمیوم	۱۴	۱۰	۵۰	۱۰
نیکل	۵۹	۳۴	۲۰۰۰	۲۰۰
سرب	۶۴	۳۴	۱۰۰۰	۵۰۰۰
BOD ₅ (mg/l)	۱۸۷/۷	۱۳/۹	۱۰۰	-
COD (mg/l)	۳۴۱/۷	۲۴/۶	۲۰۰	-

*: استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ایران ** : نقل از پסקات (۲۱)

درصد انتقال عناصر آهن، مس، روی، سرب و نیکل در تیمار ترکیب فاضلاب خام و آب و بیشترین درصد انتقال عناصر منگنز و کادمیم در ترکیب فاضلاب تصفیه شده و آب مشاهده گردید. هم‌چنین نتایج نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین تیمار فاضلاب خام و تیمار ترکیب فاضلاب خام و آب در سطح پنج درصد وجود دارد و درصد انتقال کلیه عناصر در تیمار فاضلاب خام کمتر از تیمار ترکیب فاضلاب خام و آب مشاهده گردید. مقایسه میان تیمار فاضلاب خام و تیمار فاضلاب تصفیه شده نشان داد که درصد انتقال عناصر به عمق خاک در تیمار فاضلاب تصفیه شده بیشتر بوده است اما اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد تنها در مورد عناصر آهن و نیکل بین دو تیمار فوق مشاهده شد (جدول ۴). که نشان می‌دهد بخشی از این عناصر سنگین موجود در فاضلاب تصفیه شده در اثر پیوند با مواد آلی منتقل شده‌اند. (۵) نیز افزایش درصد انتقال نیکل و کادمیم را در اثر کاربرد فاضلاب مشاهده کردند هم‌چنین آنان نتیجه گرفتند که درصد انتقال این عناصر در تیمار فاضلاب خام کمتر از فاضلاب تصفیه شده بوده است. که با نتایج این تحقیق مشابَهت دارد. (۷) نتیجه گرفت که عناصر به اعماق نفوذ کرده‌اند و میزان آنها در زه آب خروجی نسبت به آبیاری با فاضلاب بسیار ناچیز بوده است.

این جدول مشاهده می‌شود در فاضلاب تصفیه شده کلیه عناصر در حد مجاز می‌باشند. در فاضلاب خام نیز تمامی عناصر سنگین (به جزء کادمیوم) در حد مجاز قرار دارند. مقادیر BOD₅ و COD در فاضلاب خام بیش از مقادیر استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست مشاهده گردید.

نتایج تجزیه و تحلیل داده‌های درصد انتقال عناصر سنگین به عمق خاک

تجزیه و تحلیل آماری کلیه مقادیر درصد انتقال عناصر سنگین به عمق خاک (محاسبه شده براساس غلظت عناصر در زه آب خروجی و فاضلاب‌های ورودی) در جداول ۳ و ۴ به‌طور خلاصه ارائه گردیده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، اثر تیمارهای آب آبیاری بر درصد انتقال کلیه عناصر سنگین اندازه‌گیری شده در سطح یک درصد معنی‌دار مشاهده گردید (جدول ۳). بر طبق آزمون چند دامنه‌ای دانکن، کمترین میانگین درصد انتقال عناصر سنگین در تیمار فاضلاب خام مشاهده گردید که در مورد عناصر سنگین مس، روی و سرب اختلاف معنی‌دار بین تیمار فاضلاب خام، فاضلاب تصفیه شده و ترکیب فاضلاب خام و آب و در مورد عناصر سنگین منگنز و کادمیم اختلاف معنی‌داری در سطح پنج درصد بین فاضلاب خام و فاضلاب تصفیه شده دیده نشد. بیشترین

جدول ۳. نتایج تجزیه و تحلیل آماری داده‌های درصد انتقال فلزات سنگین در اثر اعمال تیمارهای آبیاری

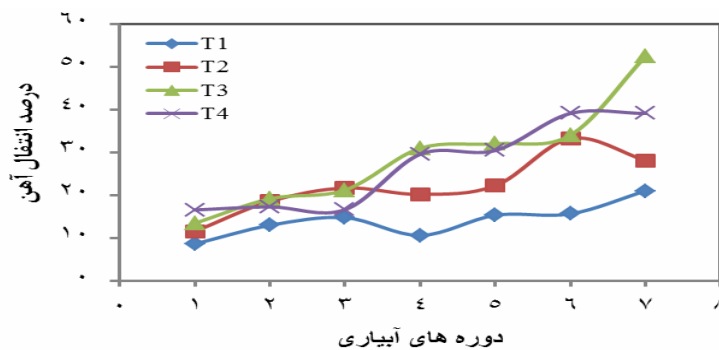
عناصر	مجموع مربعات	میانگین مربعات	ضریب تغییرات	R ² (%)
آهن	۳۶۶/۵	۱۲۲/۲**	۸/۹	۹۱/۵
روی	۱۵۸/۱	۵۲/۷**	۱۰/۷	۸۶/۹
مس	۲۸۳/۵	۹۴/۵**	۱۴/۲	۷۸/۳
منگنز	۵۲۲/۶	۱۷۴/۲**	۱۳/۲	۸۶/۲
سرب	۴۶۳/۹	۱۵۴/۷**	۱۳/۹	۸۳/۹
نیکل	۳۳۷/۵	۱۱۲/۵**	۷/۳	۹۲/۳
کادمیوم	۹۴۹/۹	۳۱۶/۴**	۱۱/۷	۹۰/۶

** : معنی داری در سطح یک درصد

جدول ۴. نتایج آزمون دانکن داده‌های مربوط به درصد انتقال عناصر سنگین به عمق خاک

تیمار	آهن	مس	روی	منگنز	سرب	نیکل	کادمیوم
فاضلاب خام	۲۸/۱ ^{c*}	۱۷/۹ ^b	۱۳/۲ ^b	۱۵/۸ ^b	۱۶/۸ ^b	۱۸/۱ ^c	۱۹ ^b
فاضلاب تصفیه شده	۲۲/۲ ^b	۱۸/۷ ^b	۱۴/۳ ^b	۲۰/۶ ^b	۲۲/۱ ^b	۲۴/۱ ^b	۲۴ ^b
فاضلاب خام + آب	۲۸/۴ ^a	۳۰/۲ ^a	۲۲/۴ ^a	۳۰/۹ ^a	۳۳/۹ ^a	۳۲/۷ ^a	۳۵/۳ ^a
تصفیه شده + آب	۲۷/۱ ^a	۲۱/۷ ^b	۱۴/۸ ^b	۳۱ ^a	۲۲/۷ ^b	۲۷/۶ ^b	۴۱/۳ ^a

* : میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حروف مشترک می‌باشند در سطح ۵٪ آزمون دانکن اختلاف معنی داری ندارند.

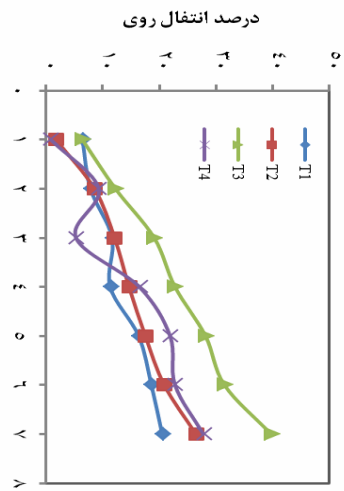


شکل ۲. درصد انتقال آهن از ستون‌های خاک به زه آب‌های خروجی در طول دوره‌های آبیاری

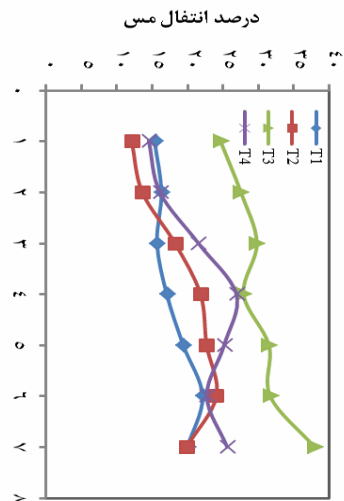
فاضلاب تصفیه شده و آب. از مشاهده این شکل‌ها می‌توان دریافت که عناصر سنگین به عمق خاک انتقال یافته‌اند و هم‌چنین درصد انتقال آن به عمق خاک در تیمارهای مختلف آبیاری متفاوت بوده به طوری که در بیشتر موارد فاضلاب خام کمترین درصد انتقال را دارد (۲۳) نیز افزایش انتقال فلزات سنگین به عمق خاک رو به دنبال کاربرد فاضلاب تصفیه شده گزارش کردند و دریافتند که علت افزایش تحرک فلزات

بررسی تغییرات درصد انتقال عناصر سنگین از ستون‌های خاک

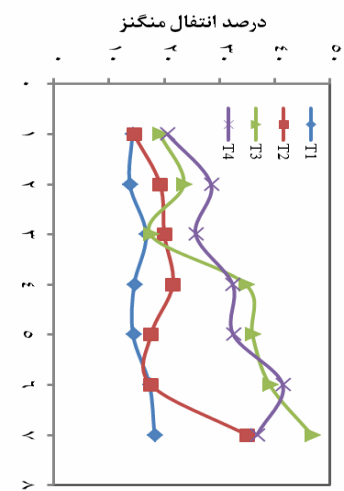
درصد انتقال عناصر سنگین (آهن، روی، مس، منگنز، کادمیم، سرب و نیکل) به زه آب‌های خروجی از ستون‌های خاک در طول هفت بار آبیاری در شکل‌های ۲ الی ۸ نشان داده شده است. در این شکل‌ها داریم: T₁: فاضلاب خام، T₂: فاضلاب تصفیه شده، T₃: ترکیب فاضلاب خام و آب، T₄: ترکیب



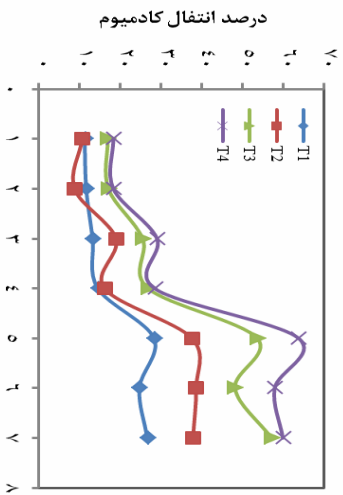
شکل ۵. درصد انتقال روی از ستون‌های خاک به زه آب‌های خروجی در طول دوره‌های آبیاری



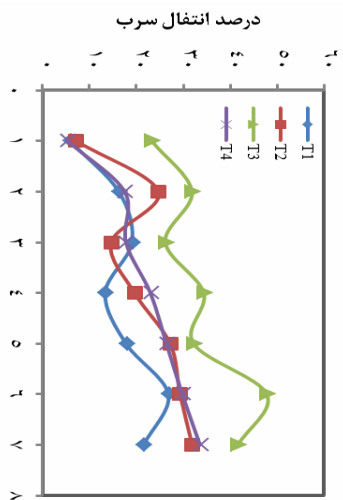
شکل ۴. درصد انتقال منگنز از ستون‌های خاک به زه آب‌های خروجی در طول دوره‌های آبیاری



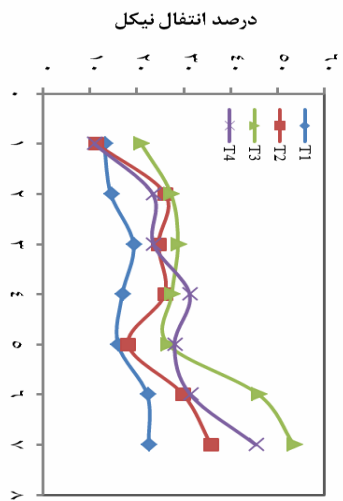
شکل ۳. درصد انتقال منگنز از ستون‌های خاک به زه آب‌های خروجی در طول دوره‌های آبیاری



شکل ۸. درصد انتقال کادمیوم از ستون‌های خاک به زه آب‌های خروجی در طول دوره‌های آبیاری



شکل ۷. درصد انتقال سرب از ستون‌های خاک به زه آب‌های خروجی در طول دوره‌های آبیاری



شکل ۶. درصد انتقال نیکل از ستون‌های خاک به زه آب‌های خروجی در طول دوره‌های آبیاری

فاضلاب وجود این عناصر در خاک نیز قابل انتظار است و هر چه بافت خاک سنگین تر باشد میزان نفوذپذیری این عناصر در خاک نیز کاهش می‌یابد (۱۴). هم‌چنین حرکت سریع آب در خاک، حرکت ترجیحی عنصر به همراه آب که از فاصله بین خاک و دیواره لایسیمتر در بخش‌های بالا ممکن است، صورت گرفته باشد، نیز می‌تواند از دلایل افزایش درصد انتقال عناصر به عمق خاک باشند. استفاده از فاضلاب در سطح ستون‌های خاک به صورت یکباره (آبیاری پیوسته) یکی دیگر از دلایل افزایش درصد انتقال این عناصر به عمق خاک می‌تواند باشد. حسین پور و همکاران (۵) نیز افزایش درصد انتقال نیکل را در شرایط کاربرد پیوسته از فاضلاب در سطح خاک در مقایسه با کاربرد متناوب گزارش کردند. هم‌چنین ون کویک و همکاران (۲۴) گزارش کردند که بین اجزای فاضلاب با ذرات خاک در طی کاربرد متناوب تماس بیشتری صورت می‌گیرد.

سنگین، افزایش مقدار TOC در اعماق سطحی خاک بوده هست. (۱۳) بیان کرد حرکت فلزات سنگین در خاک‌هایی که منافذ بزرگ دارند، می‌تواند به علت حرکت بخشی از رسوبات کلوئیدی و ذرات رس همراه با حرکت محلول خاک باشد که به سبب آن فلزات سنگین متصل به این ذرات نیز منتقل می‌گردند. در تحقیق حاضر درصد انتقال این عناصر به زه آب‌های خروجی با گذشت زمان در حالت کلی افزایش یافته‌اند. که این افزایش در ترکیب فاضلاب‌ها با آب بیشتر بوده است. هم‌چنین این افزایش در کاربرد فاضلاب تصفیه شده بیشتر از فاضلاب خام مشاهده گردید. جریان‌های تدریجی نسبتاً سریع می‌تواند یکی از دلایل نوسان در روند تغییرات درصد انتقال برخی از عناصر سنگین در طول دوره‌های آبیاری باشد.

وجود بافت سبک خاک می‌تواند یکی از دلایل درصد انتقال زیاد عناصر باشد. به علت غلظت زیاد عناصر سنگین در

منابع مورد استفاده

۱. امامی، ح. ۱۳۸۲. بررسی روند حرکت عناصر سنگین کادمیم، سرب و روی در ستون‌های خاک دست‌نخورده و دست‌خورده و تأثیر مواد آلی در نمونه‌های دست‌خورده. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
۲. آقابرانی، ا.، س.م. حسینی، ع. اسماعیلی، ن. بهرامی‌فر و ح. مارالیان. ۱۳۸۷. تأثیر کاربرد فاضلاب شهری بر تجمع عناصر سنگین (کروم و نیکل) در درخت زیتون و خاک. فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران ۱۶(۲): ۳۰۴-۳۱۳.
۳. آقابرانی، ا.، س.م. حسینی، ع. اسماعیلی و ح. مارالیان. ۱۳۸۷. تجمع فلزات سنگین سرب و روی در برگ و میوه درختان زیتون و خاک آبیاری شده با فاضلاب شهری. مجله محیط‌شناسی ۳۴(۴۷): ۵۱-۵۸.
۴. حسن‌اقلی، ع. ۱۳۸۱. استفاده از فاضلاب‌های خانگی و فاضلاب تصفیه‌شده تصفیه‌خانه‌ها در آبیاری محصولات کشاورزی و تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی. رساله دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
۵. حسین پور، ا.، غ. ح. حق‌نیا، ا. علیزاده و ا. فتوت. ۱۳۸۷. بررسی انتقال برخی عناصر به عمق خاک پس از آبیاری با فاضلاب خام و پساب شهری در دو شرایط غرقاب پیوسته و متناوب. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۲(۲): ۱۱۷-۱۳۲.
۶. حسین پور، ا.، غ. ح. حق‌نیا، ا. علیزاده و ا. فتوت. 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): ۴۵-۵۶.
۷. سهیلی، م. ۱۳۷۳. تأثیر کیفیت پساب در انباشتگی و انتقال فلزات سنگین در خاک‌های منطقه جنوب تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
۸. طباطبائی، م. ۱۳۷۷. پایداری در طرح‌های آبیاری با پساب. مجله آب و محیط زیست ۳۵: ۲۸-۳۱.

۹. عابدی، م.ج. و پ. نجفی. ۱۳۸۰. استفاده از فاضلاب تصفیه شده در کشاورزی. کمیته ملی آبیاری و زه‌کشی ایران، ۲۴۸ صفحه.
۱۰. کدخدائی، م. ۱۳۸۵. بررسی اثر پساب کارخانه ذوب‌آهن اصفهان روی برخی خصوصیات خاک‌های تحت کشت چند گونه درختی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی شیراز. ۹۰ صفحه.
۱۱. مرادمند، م. و ح. بیگی هرچگانی. ۱۳۸۷. اثر آبیاری با پساب تصفیه شده شهری بر توزیع سرب در اندام فلفل سبز و خاک، دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۱۲. موحیدیان، ح.، ب. بیبا و م. وحید دستجردی. ۱۳۸۱. تأثیر استفاده از پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شمال اصفهان بر تجمع فلزات سنگین سرب، نیکل و کادمیم در خاک و محصولات آبیاری شده با آن. مجله پژوهش در علوم پزشکی ۴(۲): ۱۱۷-۱۱۸.
13. Alloway, B.J. 1990. Heavy Metal in Soil. Blackie and Son Ltd., London.
14. Bahati, M. and G. Singh. 2003. Growth and mineral accumulation in Eucalyptus camaldulensis Seedlings irrigated with mixed industrial effluents. Bioresour. Technol. 88: 221-228.
15. Changrui, G. and R.J. Donahoe. 1997. An experimental study of heavy metal attenuation and mobility in sandy loam soils. J. Appl. Geochem. 12(3): 243-254.
16. Echeverria, J.C. M.T. Morera. C. Mazkarian. and J.J. Garrido. 1998. Competitive sorption of heavy metal by soils. Isotherms and fractional factorial experiments. J. Environ. Pollut. 101(2): 275-284.
17. Elzahabi, M. and R.N. Yong. 2001. pH influence on sorption characteristics of heavy metal in vadose zone. J. Eng. Geol. 60: 61-68.
18. Fine, P.A. Hass. R. Prost. and N. Atzmon. 2002. Organic carbon leaching from effluent irrigated lysimeters as affected by residence time. Soil Sci. Soc. Amer. J. 66: 1531-1539.
19. Gohil, M.B. 2000. Land Treatment of Wastewater. New Age International Ltd. Pub., New Delhi.
20. McLaren, R.G. L.M. Clucas. M.D. Taylor. and T. Hendry. 2003. Leaching of macronutrients and metals from undisturbed soils treated with metal-spiked sewage sludge. 1- Leaching of macronutrients. Aust. J. Soil Res. 41: 571-588.
21. Pescod, M.B. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO Irrig. Drain. Pap. 47, Rome, Italy.
22. Roney, N. 2005. Toxicological profile for zinc. <<<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp60-c9.pdf>>> (Jan. 21, 2005).
23. Sibe, C. and W.P. Fischer. 1996. Effect of long-term irrigation with untreated effluent on soil properties and heavy metal absorption of Leptosols and Vertisols in Central Mexico. Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd. 159:357-364.
24. VanCuyk, S. R. Siegrist, A. Logan, S. Masson, E. Fischer and L. Figueroa. 2001. Hydraulic and purification behaviors and their interactions during wastewater treatment in soil infiltration systems. Water Res. 35: 953-964.