

## بررسی انتقال برخی عناصر به عمق خاک پس از آبیاری با فاضلاب خام و پساب شهری در دو شرایط غرقاب پیوسته و متناوب

اعظم حسین پور\* - غلامحسین حق نیا - امین علیزاده - امیر فتوت<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۸۶/۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۸۷/۴/۱

### چکیده:

با توجه به لزوم استفاده مجدد از فاضلاب در مناطق خشک و همچنین اهمیت تحقیقات در زمینه سرنوشت مواد اضافه شده به خاک توسط فاضلاب از نظر انتقال به عمق خاک، آزمایشی در ستون‌های پلی‌اتیلنی به ارتفاع ۱۵۰ و قطر ۱۱ سانتی‌متر در ۷ دوره ۱۵ روزه در قالب طرح فاکتوریل انجام شد. فاضلاب خام و پساب تصفیه‌خانه پرکندآباد به ستون‌های پر شده از خاک لوم‌شنی در دو شرایط غرقاب پیوسته و متناوب به کار برده شدند. نتایج به دست آمده بیانگر توانایی خوب خاک در نگهداری دو عنصر فسفر و کادمیم است اما درصد زیادی از کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول، نیتروژن-نیتراتی، کربن‌آلی کل و همچنین بخشی از نیکل به زه‌آب‌های خروجی انتقال یافتند. نوع فاضلاب نیز تأثیر معنی‌داری بر درصد انتقال تمام پارامترها (بجز پتاسیم و منیزیم) گذاشت به طوری که درصد انتقال هر یک از آن‌ها (بجز نیتروژن-نیتراتی و فسفر-فسفاتی) در اثر کاربرد پساب بیشتر از فاضلاب خام گردید. نحوه کاربرد فاضلاب نیز تنها بر درصد انتقال کلسیم، بی‌کربنات و نیکل اثر معنی‌داری داشت. به طوری که کلسیم بیشتری در شرایط غرقاب متناوب منتقل شد و برای بی‌کربنات و نیکل عکس این حالت مشاهده شد. با توجه به درصد نسبتاً زیاد آبشویی کاتیون‌های محلول به ویژه کلسیم و منیزیم، نیتروژن-نیتراتی و کربن‌آلی کل از خاک، تخلیه فاضلاب‌ها از لحاظ پارامترهای فوق با مدیریت صحیح باید صورت گیرد. از طرفی با توجه به مقدار زیاد فلزات سنگین و همچنین کربن‌آلی کل در فاضلاب خام و خطراتی که انتقال آن‌ها به دنبال دارد باید در دراز مدت دقت ویژه‌ای در استفاده از فاضلاب خام مبذول گردد.

**واژه‌های کلیدی:** مطالعه ستونی، فاضلاب خام، پساب، غرقاب پیوسته، غرقاب متناوب و درصد انتقال

### مقدمه

افت شدید سطح آب زیرزمینی در این مناطق گردیده و این کشورها را با بحران آب روبرو کرده است. از طرف دیگر توسعه شهرنشینی و صنعتی شدن سبب گردیده همه ساله بخش قابل توجهی از منابع آب محدود به علت تغییر کیفیت از چرخه مصرف خارج شوند که نمونه بارز آن فاضلاب‌های شهری است. با توجه به حجم عظیم فاضلاب‌های تولیدی، تلاش برای دستیابی به نحوه دفع مناسب فاضلاب در محیط زیست ضرورت می‌یابد.

کمبود آب و تقاضای فزاینده آن به خصوص در کشورهای خشک و نیمه خشک فشار زیادی را بر منابع آب به ویژه منابع زیرزمینی وارد کرده است به طوری که سبب

۱- به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استادان گروه علوم و مهندسی آب و

استادیار علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

\* - نویسنده مسئول Email: azamhoseinpour@yahoo.com

فاضلاب از منطقه غیر اشباع زمین<sup>۱</sup> (حداصل آب زیرزمینی و سطح خاک)، امکان جدا شدن ذرات جامد شناور، مواد قابل تجزیه و میکروارگانیسم‌ها به صورت تقریباً کامل فراهم گردیده و به مقدار قابل توجهی غلظت نیترژن، 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 (۱۴). خصوصیات فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی 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 (۱۴). برای آگاهی از کارایی خاک در تصفیه فاضلاب، نیاز به روشی است تا بتوان از طریق آن اطلاعاتی را در مورد مکانیسم‌های موضعی انتقال و تجمع املاح و آلاینده‌ها به دست آورد. بدین منظور از مطالعات ستونی استفاده می‌گردد. این مطالعات در مقایسه با سایر روش‌های آزمایشگاهی از مزایایی زیادی برخوردارند که از مهمترین آن‌ها می‌توان استفاده از نسبت‌های کم خاک به محلول، عدم نیاز به جداسازی محلول از خاک، عدم نیاز به تکان دادن برای ترکیب خاک با محلول، شبیه سازی بهتر شرایط مزرعه‌ای و ارایه داده کافی برای مدل‌های پیش بینی با هزینه نسبتاً کم را نام برد (۲۴). مطالعات ستونی در طی دهه‌های اخیر در کشورهای مختلف جهان توجه زیادی را به خود معطوف داشته‌اند که از آن جمله می‌توان به بررسی اثرات استفاده از فاضلاب‌های خانگی و پساب تصفیه‌خانه‌ها در آبیاری محصولات کشاورزی و تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی توسط حسن اقلی (۳)، بررسی روند حرکت عناصر سنگین کادمیم، سرب و روی در ستون‌های خاک

پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تخلیه فاضلاب خام در محیط زیست خطرات بهداشتی و زیست محیطی زیادی را به دنبال دارد. کنترل کیفیت فاضلاب خام به لحاظ حفاظت از محیط زیست به ویژه منابع محدود آب در بسیاری از کشورها به صورت تصفیه فاضلاب و رهاسازی آن در محیط و یا مصرف دوباره در دهه‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. از طرفی تصفیه فاضلاب مستلزم صرف هزینه است که هزینه‌های آن با افزایش مراحل تصفیه افزایش می‌یابد. بسیاری از کشورهای جهان از جمله اکثر کشورهای در حال توسعه توانایی سرمایه‌گذاری کافی در این بخش را ندارند. بنابراین به رغم تصویب قوانین مختلف در لزوم تصفیه فاضلاب و سپس رهاسازی آن در محیط زیست، استفاده از فاضلاب خام و یا بسیار جزئی تصفیه شده در کشورهای در حال توسعه روند رو به رشدی دارد (۱۸). در کشور ما نیز بنا به گزارش شایگان و افشاری، از میزان ۳/۹ میلیارد مترمکعب فاضلاب شهری در کشور، تنها ۹ درصد تصفیه و بقیه بدون تصفیه وارد چاه‌های جذبی، رودخانه‌ها و زمین‌های کشاورزی شده است (۴). بنابراین با توجه به کمبود آب و حجم عظیم فاضلاب‌های تولیدی در مناطق مختلف جهان نیاز به یک روش مناسب تصفیه فاضلاب ضرورت می‌یابد که از لحاظ اقتصادی و کارایی قابل توجه باشد. این در حالی است که بررسی‌ها نشان می‌دهند تخلیه فاضلاب در خاک یکی از بهترین شیوه‌های دفع فاضلاب است (۲۹). مقدار زیاد ماده آلی در فاضلاب، تأثیر مثبت این مواد بر خصوصیات مختلف خاک و نیز در دسترس بودن خاک از جمله مهمترین دلایل تخلیه فاضلاب در خاک ذکر می‌گردد (۲۶). از طرفی مشخص شده است که خاک‌ها با دارا بودن خصوصیات فیزیک و شیمیایی و بیولوژیکی بسیار پیچیده، نقش بسیار مهمی در بهبود کیفیت انواع آلاینده‌ها از جمله فاضلاب ایفاء می‌کنند (۱۵). به طوری که با عبور

روزنه‌ای به قطر ۵ سانتی‌متر در وسط آن ایجاد شده بود به انتهای ستون‌ها پیچیده شد. استفاده از این لایه جهت کاهش حرکت جانبی آب در انتهای ستون‌ها در نظر گرفته شد تا آبی به خارج ظروف در نظر گرفته شده برای جمع‌آوری زه‌آب‌ها ریخته نشود و علاوه بر آن فلزها در تماس با زه‌آب‌های خروجی نباشند. سپس یک لایه توری پلاستیکی به منظور استحکام کافی بخش انتهایی کشیده شد. در این مطالعه به منظور پر نمودن ستون‌ها از خاک؛ پس از نمونه‌برداری از عمق سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) یک خاک لوم‌شنی، نمونه هواخشک شده و از الک با قطر روزنه‌های ۱ سانتی‌متری عبور داده شد. جداسازی ذرات بیش از حد درشت امکان یکنواختی بیشتر خاک را فراهم می‌آورد. وجود منافذ بیش از حد بزرگ سبب ایجاد جریان ترجیحی در ستون‌های خاک می‌گردد. بررسی منحنی دانه‌بندی خاک نشان داد که مقدار ذرات بزرگتر از ۲ میلی‌متر در آن برابر ۱۴ درصد نمونه اولیه خاک می‌باشد که براساس طبقه‌بندی کشاورزی (USDA)، این خاک به صورت لوم‌شنی ریگ‌دار طبقه‌بندی گردید. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد نظر در (جدول ۱) آورده شده است. پر شدن ستون‌ها با خاک طی مراحل زیر صورت پذیرفت. ابتدا ستون‌ها به ارتفاعی حدود ۱۵ سانتی‌متر با ذرات ریگ در اندازه‌های مختلف پر شدند. سپس مقدار خاک لازم برای پر نمودن ستون‌ها با توجه به جرم مخصوص ظاهری خاک محاسبه و به صورت تدریجی در طی چند مرحله بدون هیچگونه عملیات تراکمی خاصی اضافه گردید. در انتها ارتفاعی حدود ۵ سانتی‌متر شن‌ریز ریخته شد. ارتفاع نهایی خاک ۱۰۰ سانتی‌متر بود. فضای فوقانی ستون‌ها به ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر به صورت عمق آزاد جهت افزودن فاضلاب در نظر گرفته شد. از فاضلاب‌خام و فاضلاب تصفیه‌شده (پساب) تصفیه‌خانه پرکندآباد به عنوان منبع آب

دست نخورده و دست خورده و تأثیر مواد آلی در نمونه‌های دست خورده توسط امامی (۱)، آبتشویی کربن آلی از لایسیمترهای آبیاری شده با پساب توسط فین و همکاران (۱۱) و آبتشویی عناصر پرمصرف و فلزات از خاک‌های دست نخورده آمیخته شده با لجن فاضلاب توسط مک‌لرن و همکاران (۲۳) اشاره نمود. بنابراین با توجه به مسائل ذکر شده، تخلیه فاضلاب در خاک به هر هدفی که باشد نیازمند آگاهی از کارایی خاک در تصفیه اجزای مختلف موجود در فاضلاب می‌باشد. به همین منظور در این پژوهش تأثیر میزان تصفیه فاضلاب و همچنین نحوه کاربرد فاضلاب بر قابلیت تصفیه برخی عناصر موجود در فاضلاب، از طریق مطالعه میزان انتقال این عناصر به عمق خاک با گذشت زمان مورد بررسی قرار گرفته است.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش با دو تیمار نوع فاضلاب (فاضلاب‌خام و پساب) و نحوه کاربرد فاضلاب (غرقاب پیوسته و متناوب) در قالب طرح آماری فاکتوریل در ۳ تکرار به صورت تصادفی در مدت ۱۰۵ روز در گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی مشهد انجام گردید. برای اجرای آزمایش در مجموع ۱۲ عدد ستون از پلی‌اتیلن در نظر گرفته شد. ارتفاع ستون‌ها ۱۵۰ و قطر داخلی آن‌ها ۱۱ سانتی‌متر بود. به منظور استقرار و عدم حرکت ستون‌ها، از شبکه فلزی استفاده گردید. نمای کلی مجموعه شبکه فلزی و ستون‌های خاک در شکل (۱) مشخص می‌باشد. به منظور جلوگیری از انسداد بخش انتهایی ستون‌ها، از پارچه متقال، یک لایه پلاستیکی و توری پلاستیکی با قطر روزنه‌های یک میلی‌متری استفاده شد. نحوه انسداد انتهایی ستون‌ها به این ترتیب بود که ابتدا یک لایه پارچه متقال که قبلاً شسته شده بود، به انتهای ستون‌ها پیچیده شد. سپس یک لایه پلاستیک ضخیم که

استفاده گردید. سیستم تصفیه در این تصفیه‌خانه از نوع لاگون هوادهی با اختلاط کامل می‌باشد. نمونه‌برداری از فاضلاب‌خام از خروجی آشغال‌گیری اولیه و فاضلاب تصفیه‌شده به دلیل فعال نبودن واحد کلرزنی از خروجی استخر جلادهی انجام گرفت. با توجه به این که نگهداری فاضلاب به دلیل مشکلات متعدد عملاً امکان‌پذیر نبود، در هر مرحله آبیاری اقدام به تهیه و انتقال فاضلاب تازه به محل آزمایش گردید. با توجه به درصد تخلخل و حجم کل خاک، حجم فاضلاب لازم برای غرقاب نمودن خاک (۳/۷۲ لیتر) محاسبه گردید که در عمل حجم فاضلاب مورد استفاده، ۵ لیتر در هر دوره در نظر گرفته شد. با توجه به تبخیر فاضلاب از سطح خاک و همچنین لزوم عبور حجم یکسانی از فاضلاب از تمامی ستون‌ها، لذا افزایش میزان فاضلاب به عنوان یک ضریب اطمینان عمل می‌کند به طوری که اگر در این شرایط نتایج قابل قبولی از نظر میزان انتقال مواد موجود در فاضلاب‌ها به عمق خاک حاصل شود، در شرایط طبیعی به دلیل یک‌پارچگی و پیوستگی خاک و اراضی نتایج بهتری به دست می‌آید. در حقیقت با این کار سعی شد تا در اجرای آزمایش، عملاً بدترین و بحرانی‌ترین شرایط ممکن در نظر گرفته شود. نحوه کاربرد فاضلاب‌ها به این صورت بود که در شرایط کاربرد پیوسته فاضلاب، فاضلاب در سطح ستون‌های خاک به یک‌باره به کار برده می‌شد و در انتهای ۱۵ روز زه‌آب‌ها جمع‌آوری می‌گردیدند. در اعمال کاربرد متناوب فاضلاب‌ها، همان مقدار فاضلاب در نظر گرفته شده (۵ لیتر) به ۳ قسمت تقسیم شده و هر ۵ روز به کار برده می‌شد و مانند شرایط قبلی زه‌آب‌ها جمع‌آوری می‌گردیدند به طوری که در انتهای ۱۵ روز حجم ثابتی از فاضلاب از تمامی ستون‌ها عبور می‌کرد. آزمایش در ۷ دوره ۱۵ روزه انجام شد و در هر دوره نمونه‌های زه‌آب‌ها جمع‌آوری و برای تجزیه شیمیایی به

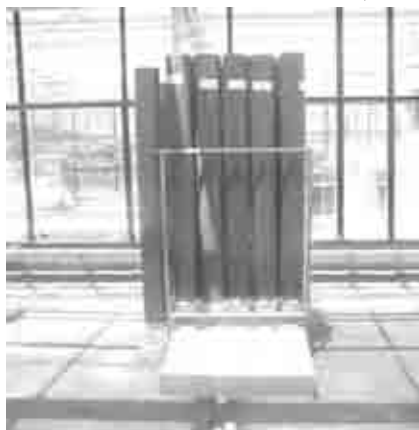
آزمایشگاه انتقال داده شدند. پارامترهایی مانند pH، غلظت کاتیون‌های محلول (سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم)، آنیون‌های محلول (کلر، بی‌کربنات و سولفات)، نیتروژن-نیتراتی، فسفر-فسفاتی، کربن آلی کل و دو فلز سنگین نیکل و کادمیم در بخش محلول خاک قبل از انجام آزمایش اندازه‌گیری شدند. در فاضلاب‌خام، پساب و نمونه‌های زه‌آب جمع‌آوری شده، این پارامترها در هر دوره انجام آزمایش اندازه‌گیری شدند. به طوری که pH توسط دستگاه pH متر کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون با EDTA ۰/۰۱ نرمال، کلر به روش تیتراسیون با نیترات نقره ۰/۰۱ نرمال، بی‌کربنات به روش تیتراسیون با اسید سولفوریک ۰/۰۱ نرمال، سدیم و پتاسیم با دستگاه فلایم‌فوتومتر مدل (-Jenway PFP7)، سولفات به روش توریدومتري توسط دستگاه اسپکتروفوتومتر، نیترات با استفاده از دستگاه کج‌دال، فسفر محلول با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر به روش اولسن، کربن آلی کل توسط دستگاه مدل (-Shimadzu TOC<sub>CPH</sub>)، و غلظت دو فلز سنگین نیکل و کادمیم به وسیله دستگاه جذب اتمی مجهز به کوره گرافیتی<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شدند. غلظت نیکل و کادمیم در فاضلاب‌خام و پساب به دلیل وجود ذرات شناور ابتدا با تیزاب سلطانی<sup>۲</sup> (نسبت ۳ اسید کلریدریک غلیظ به ۱ اسید نیتریک غلیظ) هضم و سپس خوانده شدند. به منظور تعیین و بررسی میزان تغییرات به‌وجود آمده در انتقال اجزای مختلف موجود در فاضلاب‌خام و پساب به عمق خاک در طول دوره کاربرد فاضلاب، از فاکتور درصد انتقال استفاده گردید. درصد انتقال بیانگر نسبت میانگین غلظت خروجی عنصر از ستون خاک به میانگین غلظت ورودی آن عنصر به ستون خاک می‌باشد.

1 - Graphite Furnace

2 - Aqua Regia

**نتایج و بحث:**

کیفیت شیمیایی فاضلاب خام و پساب از نظر پارامترهای مورد بررسی و نیز مقادیر مجاز آن‌ها بر طبق استانداردهای موجود در (جدول ۲) آمده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد مقدار بسیاری از ترکیبات موجود در فاضلاب خام در طول دوره تصفیه کاهش یافته است که مقدار کربن آلی کل و دو فلز سنگین نیکل و کادمیم کاهش بیشتری را نشان می‌دهند.



(شکل ۱) نمای کلی مجموعه شبکه فلزی و ستون‌های خاک

(جدول ۱) - برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک مورد استفاده

پارامتر	واحد	مقدار
شن	%	۵۸/۷۲
سیلت	%	۲۲/۰۹
رس	%	۱۹/۱۹
جرم مخصوص ظاهری	g/cm <sup>3</sup>	۱/۵۲
جرم مخصوص حقیقی	g/cm <sup>3</sup>	۲/۵۰
تخلخل	%	۳۹/۲۰
آهک	%	۱۱/۰۰
pH	--	۷/۹۰
شوری	dS/m	۰/۸۵
سدیم	meq/l	۲/۱۷
پتاسیم	meq/l	۰/۱۸
کلسیم	meq/l	۵/۰۰
منیزیم	meq/l	۳/۱۰
کلر	meq/l	۶/۰۰
بی‌کربنات	meq/l	۴/۰۰
سولفات	meq/l	۲/۰۸
نیتروژن-نیتراتی	mg/l	۱/۸۹
فسفر-فسفاتی	mg/l	۰/۰۱۱۵
کربن آلی کل	mg/l	۲۵/۰۰
نیکل	mg/l	۰/۰۰۵
کادمیم	mg/l	۰/۰۰

(جدول ۲) - کیفیت شیمیایی فاضلاب خام و پساب و مقایسه آن‌ها با استانداردهای ارایه شده

پارامتر	واحد	نوع فاضلاب		میزان مجاز استاندارد	
		فاضلاب خام	پساب	ایران <sup>۱</sup>	FAO <sup>۲</sup>
pH	--	۷/۶۰	۷/۴۰	۶/۵ - ۸/۵	۶/۳ - ۸/۴
شوری	dS/m	۱/۶۸	۱/۵۴	--	<۳
سدیم	meq/l	۱۳/۲۰	۱۲/۰۰	--	۳ - ۹
پتاسیم	meq/l	۰/۷۸	۰/۷۵	--	--
کلسیم	meq/l	۳/۰۰	۲/۵۰	--	--
منیزیم	meq/l	۲/۵۰	۲/۰۰	۴/۱	--
کلر	meq/l	۷/۶۰	۶/۰۰	۱۶/۹	۴ - ۱۰
بی‌کربنات	meq/l	۱۰/۱۶	۸/۹۱	--	۰/۱۴
سولفات	meq/l	۳/۲۸	۳/۴۸	۴/۱۶	--
نیتروژن-نیتراتی	mg/l	۲۶/۳۷	۳۳/۷۵	۱۰	۵ - ۳۰
فسفر-فسفاتی	mg/l	۲/۳۱	۱/۷۵	--	--
کربن آلی کل	mg/l	۱۸۶/۵۰	۴۴/۴۷	--	--
نیکل	mg/l	۱/۵۳۱	۰/۱۸۷	۲	۰/۰۶
کادمیم	mg/l	۰/۰۳۵	۰/۰۱۱	۰/۱	۰/۰۱

۱- برگرفته از سازمان محیط زیست ایران (به نقل از ۲)

۲- برگرفته از فانو (۱۰)

خاک دلالت دارد. در ادامه، روند تغییرات درصد انتقال کاتیون‌های محلول مانند سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم، آنیون‌های محلول مانند کلر، بی‌کربنات و سولفات، نیتروژن-نیتراتی، فسفر-فسفاتی، کربن آلی کل و دو فلز سنگین نیکل و کادمیم از ستون‌های خاک در طول دوره آزمایش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### بررسی تغییرات درصد انتقال کاتیون‌های محلول (سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم) از ستون‌های خاک:

اگر چه کاتیون‌هایی مانند کلسیم، منیزیم و پتاسیم به‌طور مستقیم تهدیدی برای سلامتی افراد و یا محیط زیست نیستند، آبتیوی آن‌ها از خاک می‌تواند نشان دهنده خروج عناصر مفید از خاک باشد. همچنین با توجه به نقش مثبت کاتیون‌های دو ظرفیتی در خاک، خروج آن‌ها از خاک می‌تواند خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک را زیر تأثیر قرار دهد (۲۳). اگر چه خروج سدیم از خاک نقش بسیار موثری در کاهش قلیایی بودن خاک ایفاء می‌کند. (شکل ۲- قسمت‌های الف، ب، ج و د) درصد انتقال هر یک از کاتیون‌های محلول از ستون‌های خاک را در طول زمان آزمایش نشان می‌دهد. با گذشت زمان و کاربرد مقدار بیشتر فاضلاب بر درصد انتقال آن‌ها در زه‌آب‌های خروجی خاک افزوده شده است به‌طوری که روند تغییر مقدار آن‌ها در طول زمان همواره افزایشی است. فوین نیز افزایش غلظت کاتیون‌های محلول در آب‌های زیرزمینی مناطق شهری را به علت نفوذ مستمر فاضلاب به آن‌ها گزارش کرد (۱۲). در بررسی تأثیر نوع فاضلاب بر درصد انتقال کاتیون‌های محلول نیز مشاهده می‌گردد که میانگین درصد انتقال کاتیون‌های محلول در زه‌آب ستون‌هایی که در آن‌ها از پساب استفاده شده بیشتر از فاضلاب‌خام است که این تأثیر

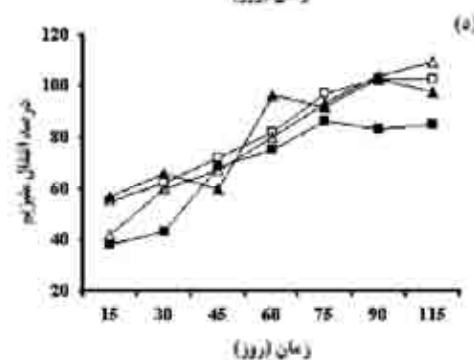
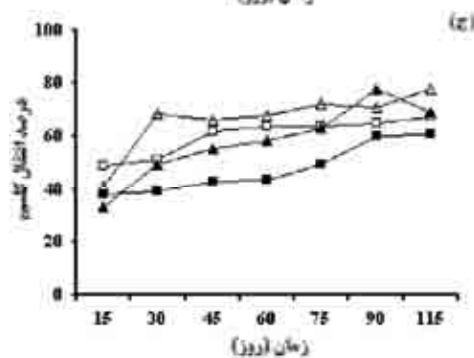
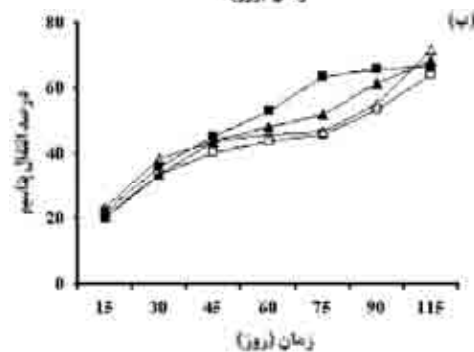
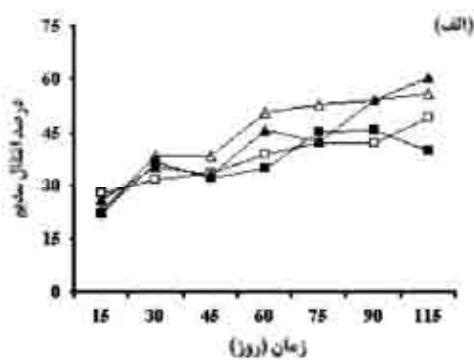
در طول دوره تصفیه فاضلاب مقدار نیتروژن-نیتراتی افزایش یافته است. افزون بر آن در طول مدت تصفیه فاضلاب مقدار اسیدیته نیز اندکی کاهش یافته است. افزایش مقدار نیتروژن-نیتراتی در پساب می‌تواند به علت هوادهی گسترده فاضلاب باشد. کاهش مقدار اسیدیته نیز احتمالاً به دلیل تولید گازهای اسیدی در طول تصفیه فاضلاب است که در اثر تجزیه بخشی از مواد آلی آزاد شده‌اند. کاربرد فاضلاب‌خام در مصارف مختلف به ویژه در کشاورزی و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها معمول نیست، لذا استاندارد برای آن ارایه نشده است. برای آگاهی از کیفیت فاضلاب‌خام، مقادیر اجزای مختلف موجود در آن با استانداردهای ارایه شده برای پساب مقایسه شده است. از مقایسه نتایج تجزیه شیمیایی فاضلاب‌خام و پساب با استانداردهای ارایه شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که مقدار سدیم، بی‌کربنات، نیکل و کادمیم در فاضلاب‌خام و پساب و همچنین مقدار نیتروژن-نیتراتی در پساب بیشتر از مقدار مجاز ارایه شده توسط استاندارد فائو می‌باشند. کیفیت شیمیایی فاضلاب‌خام و پساب از لحاظ همه پارامترها بجز نیتروژن-نیتراتی که برای تخلیه به چاه‌های جاذب که خود نوعی تغذیه مصنوعی به شمار می‌رود بسیار بالاتر از حد مجاز می‌باشد، در مقایسه با استاندارد ایران در حد مجاز قرار می‌گیرد. همان‌طور که در قسمت بالا ذکر شد به منظور تعیین و بررسی میزان تغییرات به‌وجود آمده در انتقال اجزای مختلف موجود در فاضلاب‌خام و پساب به عمق خاک در طول دوره کاربرد فاضلاب، از فاکتور درصد انتقال استفاده گردید. درصد انتقال کمتر عناصر نشان دهنده توانایی زیاد خاک در نگهداری آن عنصر است. مقادیر زیاد درصد انتقال برای هر عنصر، بر پویایی زیاد و یا توانایی کم خاک در نگهداری آن عنصر به دلیل ورود مقادیر زیادی از آن به

کلسیم در شرایط غرقاب متناوب می‌تواند به این دلیل باشد. به‌طور کلی صرف نظر از نوع و نحوه کاربرد فاضلاب، میانگین مقدار درصد انتقال هر یک از کاتیون‌های سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در طول دوره آزمایش از ستون‌های خاک به ترتیب برابر ۴۰/۵۷، ۴۶/۷۴، ۶۰/۴۳ و ۷۷/۸۸ به‌دست آمد. از مقایسه اعداد درصد انتقال می‌توان دریافت که درصد انتقال کاتیون‌های دو ظرفیتی در مقایسه با کاتیون‌های یک ظرفیتی بیشتر است. درصد انتقال کم پتاسیم قابل توجه است زیرا مقدار آن هم در خاک و هم در فاضلاب خام و پساب کم است. اما با وجود مقدار زیاد سدیم نسبت به دو کاتیون کلسیم و منیزیم در فاضلاب خام و پساب ورودی، درصد انتقال کم آن از خاک گواه بر این مطلب است که تخلیه فاضلاب سرشار از سدیم، تعادل طبیعی کاتیون‌های خاک را بر هم زده و منجر به جایگزینی سدیم با کاتیون‌های دیگر، به ویژه کلسیم و منیزیم موجود بر روی سطوح قابل تبادل خاک گردیده است که به موجب آن مقدار بیشتری کاتیون دو ظرفیتی وارد بخش محلول خاک شده و بر اثر آبشویی منتقل شده است که این نتیجه مطابق با یافته‌های کاس و همکاران (۲۰) است. از مقایسه اعداد درصد انتقال نتیجه دیگری نیز استنباط می‌گردد و آن اینکه در مقایسه با کلسیم، منیزیم بیشتری منتقل شده است. با توجه به این که مقدار اولیه منیزیم هم در خاک و هم در فاضلاب‌های ورودی کمتر از کلسیم است، به نظر می‌رسد انتقال کمتر کلسیم در مقایسه با منیزیم به دلیل اتصال قوی‌تر آن به ذرات خاک باشد. مک‌لرن و همکاران نیز در بررسی آبشویی کاتیون‌های محلول از خاک‌های آمیخته شده با لجن فاضلاب دریافتند با توجه به نسبت بیشتر کلسیم به منیزیم در لجن فاضلاب، منیزیم بیشتری از خاک آبشویی شده است (۲۳).

بر درصد انتقال سدیم و کلسیم از خاک معنی‌دار گردید (جدول ۳). در (جدول ۲) ملاحظه شد که مقدار کاتیون‌های محلول در پساب اندکی کمتر از مقدار آن‌ها در فاضلاب خام است، بنابراین درصد انتقال بیشتر کاتیون‌ها از خاک در شرایطی که از پساب استفاده گردید، می‌تواند به دلیل وجود مواد آلی کمتر در پساب باشد که به موجب آن پساب با سرعت بیشتری در خاک حرکت کرده و کاتیون‌های بیشتری را نیز با خود منتقل کرده است. مگسن و همکاران گزارش کردند که نسبت C:N در فاضلاب تأثیر مهمی بر آبشویی عناصر از خاک دارد، به طوری که با کاهش این نسبت مقدار آبشویی عناصر بیشتر می‌گردد (۲۱). وجود مواد آلی زیاد به ویژه به شکل شناور در فاضلاب خام علاوه بر این که به‌طور مستقیم در انسداد بخشی از منافذ خاک اثر می‌گذارد، به‌طور غیر مستقیم با تحریک فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک و افزایش تولید میکروبی آن‌ها نیز سبب انسداد بخشی از منافذ خاک شده که به موجب آن نفوذ فاضلاب به تدریج کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد درصد انتقال کمتر کاتیون‌ها در اثر کاربرد فاضلاب خام به دلیل کاهش سرعت نفوذ و در نتیجه امکان بیشتر جذب سطحی آن‌ها باشد. صرف نظر از نوع فاضلاب، میانگین درصد انتقال هر یک از کاتیون‌های محلول به زه‌آب‌های خروجی (به جز پتاسیم) در شرایط حرکت متناوب فاضلاب‌ها بیشتر از شرایط پیوسته است البته این تأثیر از لحاظ آماری تنها بر درصد انتقال کلسیم اثر معنی‌داری در برداشت (جدول ۳). وایت و همکاران دریافتند که واکنش‌های تبدلی در سرعت جریان آهسته آب رخ می‌دهند و در شرایطی که غلظت کاتیون‌های تک ظرفیتی در بخش محلول خاک زیاد است، کلسیم معمولاً مهمترین کاتیونی است که از جایگاه‌های تبدلی وارد بخش محلول خاک می‌گردد (۳۱). از این رو افزایش معنی‌دار غلظت

### بررسی تغییرات درصد انتقال آنیون‌های محلول (کلر، بی‌کربنات و سولفات) از ستون‌های خاک:

به‌طور کلی پایش مقدار آنیون‌ها در فاضلاب ضروری است زیرا مقادیر زیاد آن‌ها سبب کاهش کیفیت خاک و همچنین افت کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌گردد. به‌طوری که واکنش کربنات و بی‌کربنات با کلسیم و منیزیم محلول سبب افزایش SAR<sup>۱</sup> و سدیم تبادلی در خاک گشته و کاهش نفوذپذیری خاک را به دنبال دارد (۷). آنیون‌های غیر آلی موجود در محلول خاک همچنین با تشکیل پیوند با فلزات سنگین جذب آن‌ها در خاک را زیر تأثیر قرار می‌دهند (۸). همان‌طور که در (شکل ۳ - قسمت‌های الف، ب و ج) مشاهده می‌گردد روند تغییر درصد انتقال آنیون‌های محلول در زه‌آب‌های خروجی از خاک لوم‌شنی در طول زمان همواره افزایشی است. در این خاک، شیب تغییرات درصد انتقال دو آنیون کلر و سولفات در طول زمان زیاد است ولی برای آنیون بی‌کربنات تا زمان ۶۰ روز، شیب خاصی وجود ندارد و درصد افزایش بسیار جزئی است اما پس از آن درصد افزایش بی‌کربنات در زه‌آب‌ها با شدت بیشتری ادامه یافته است. در مقایسه اثر نوع فاضلاب بر درصد انتقال هر یک از آنیون‌های محلول نیز مشخص گردید (جدول ۳) که درصد انتقال آن‌ها مانند کاتیون‌های محلول در ستون‌هایی که از پساب استفاده شده به‌طور معنی‌داری بیشتر از فاضلاب خام است که می‌تواند به همان دلیلی باشد که در قسمت کاتیون‌های محلول در مورد آن بحث شد. تأثیر نحوه کاربرد فاضلاب تنها بر درصد انتقال بی‌کربنات معنی‌دار گردید (جدول ۳) به‌طوری که درصد بیشتری از آن در شرایط کاربرد پیوسته منتقل شد. بدون در نظر گرفتن نوع و نحوه کاربرد فاضلاب، میانگین درصد انتقال آنیون‌های کلر، بی‌کربنات و سولفات از ستون‌های



(شکل ۲) - درصد انتقال کاتیون‌های محلول از ستون‌های خاک به زه‌آب‌های خروجی در طول زمان

فاضلاب خام - غرقاب پیوسته (filled square)      پساب - غرقاب پیوسته (filled triangle)  
 فاضلاب خام - غرقاب متناوب (open square)      پساب - غرقاب متناوب (open triangle)

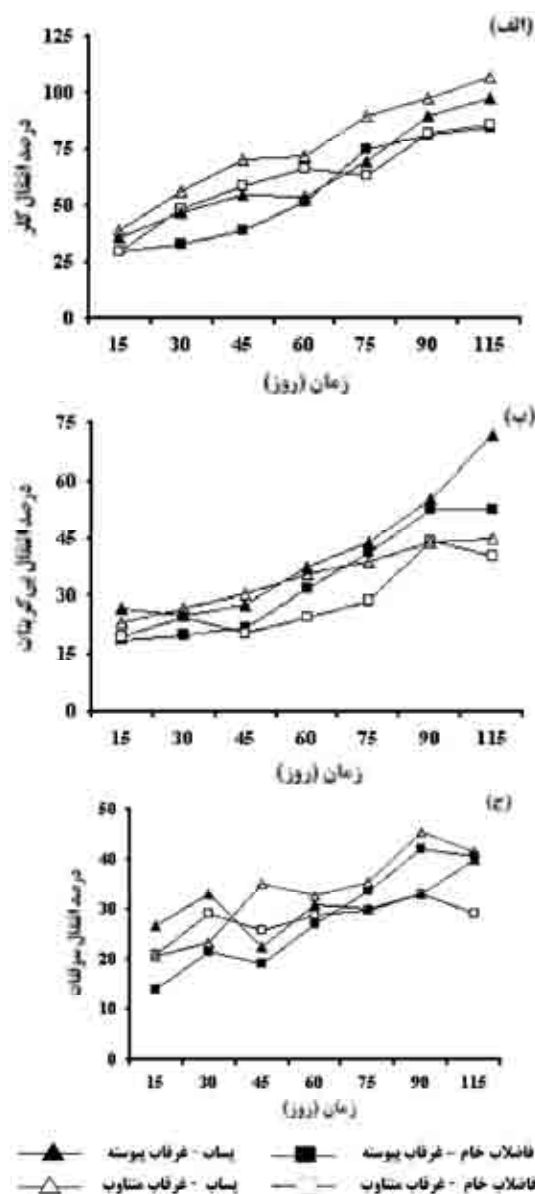
1 - Sodium Adsorption Ratio



### بررسی تغییرات درصد انتقال نیتروژن- نیتراتی از ستون‌های خاک

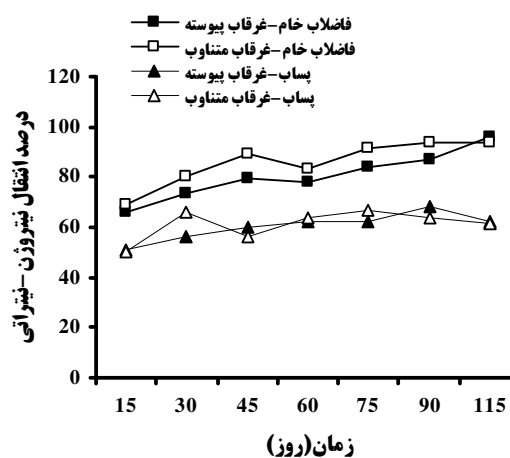
در نتیجه تخلیه فاضلاب، مقادیر قابل توجهی نیتروژن به خاک افزوده می‌شود که میزان آن بستگی به مقدار نیتروژن موجود در فاضلاب و پساب و همچنین حجم آب کاربردی دارد. یکی از شکل‌های نیتروژن، نترات است. یون نترات به دلیل داشتن بار منفی از پویایی بسیار زیادی برخوردار است و حرکت آن همانند حرکت آب در خاک است و اگر به وسیله گیاهان و یا میکروارگانیسم‌ها جذب نگردد به سرعت وارد آب‌ها شده و خطرات بهداشتی را به دنبال خواهد داشت. (شکل ۴)، بیانگر درصد انتقال نیتروژن- نیتراتی است. مطابق شکل، درصد انتقال آن از خاک به تدریج با گذشت زمان افزایش یافته است. هارووی گزارش کرد که درصد آبشویی نیتروژن از خاک پس از کاربرد فاضلاب، به مقدار آن در فاضلاب و مقدار جذب گیاه بستگی دارد (۱۷). بنابراین با توجه به عدم پوشش گیاهی در سطح خاک و همچنین مقدار زیاد نیتروژن-نیتراتی در فاضلاب‌های ورودی، درصد آبشویی نیتروژن- نیتراتی در طول آزمایش زیاد می‌باشد. در مقایسه تأثیر نوع فاضلاب نیز مشاهده می‌گردد که درصد انتقال آن به‌طور مشخصی در ستون‌هایی که فاضلاب خام نفوذ کرده است بیشتر از پساب می‌باشد (جدول ۳). افزایش درصد انتقال نیتروژن-نیتراتی در زه‌آب ستون‌های آبیاری شده با فاضلاب خام، به‌رغم مقدار کمتر آن در مقایسه با پساب می‌تواند به علت پدیده نیتراتی‌شدن باشد که به موجب آن نترات بیشتری وارد سیستم خاک شده است. در بررسی تأثیر نحوه کاربرد فاضلاب بر درصد انتقال نیز مشخص می‌گردد که میانگین درصد انتقال در شرایط کاربرد متناوب بیشتر از کاربرد پیوسته است که البته تأثیر آن از لحاظ آماری معنی‌دار نگردید (جدول ۳). افزایش انتقال نیتروژن-نیتراتی در شرایط کاربرد متناوب می‌تواند به علت تجزیه بیشتر مواد آلی در

خاک به ترتیب برابر ۶۴/۶۲، ۳۴/۹ و ۳۰/۱۷ است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد کلر از بیشترین و سولفات از کمترین درصد انتقال برخوردار می‌باشد. از آن جایی که آنیون کلر نه بر شرایط فیزیکی خاک تأثیر دارد و نه اصولاً به‌وسیله بخش جامد خاک جذب می‌شود، تحرک بسیار زیادی دارد.



(شکل ۳) - درصد انتقال آنیون‌های محلول از ستون‌های خاک به زه‌آب‌های خروجی در طول زمان

نتیجه آزاد شدن آمونیوم و به دنبال آن تولید نیترات در خاک باشد. در مجموع صرف نظر از نوع فاضلاب و نحوه کاربرد فاضلاب، میانگین درصد انتقال نیتروژن-نیتراتی از خاک برابر ۷۱/۹۹ به دست آمد. درصد انتقال زیاد نیتروژن از خاک می تواند به دلیل بافت سبک و وجود منافذ بزرگ در این خاک باشد که به موجب آن مقدار بیشتری فاضلاب به عمق خاک انتقال یافته است. علاوه بر آن شرایط برای نفوذ بیشتر اکسیژن به خاک و رخداد پدیده نیتراتی شدن مساعدتر گردیده است.

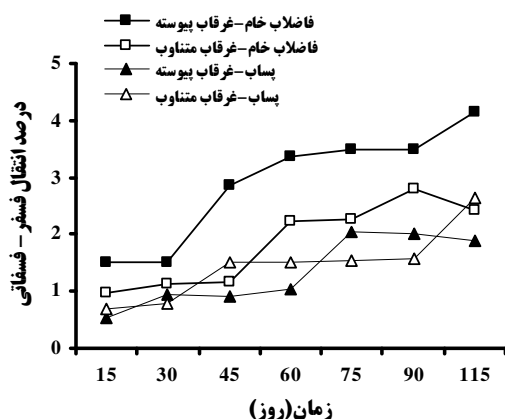


(شکل ۴) - درصد انتقال نیتروژن-نیتراتی از ستون‌های خاک به زه‌آب‌های خروجی در طول زمان

### بررسی تغییرات درصد انتقال فسفر- فسفات‌های از ستون‌های خاک

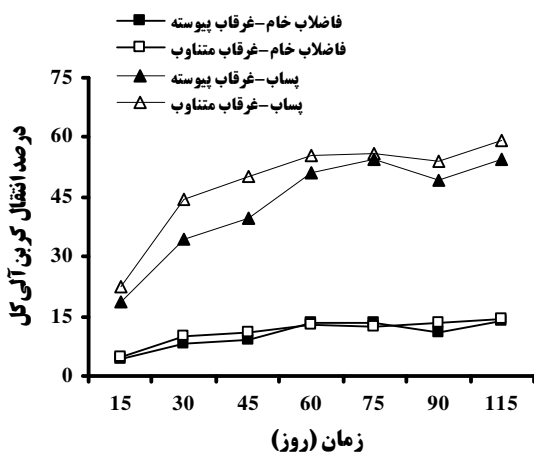
فسفر به عنوان یک عامل تغذیه‌ای مؤثر در وقوع پدیده اوتروفیکاسیون<sup>۱</sup> به شمار می‌رود که انتقال آن به آب‌های سطحی و زیرزمینی کاهش کیفیت آن‌ها را به دنبال دارد. (شکل ۵)، بیانگر روند تغییرات درصد انتقال فسفر-فسفات‌های از ستون‌های خاک به زه‌آب‌های خروجی در طول زمان است. مطابق شکل به جز در تیمار فاضلاب خام در شرایط غرقاب پیوسته که در زمان ۳۰ و ۴۵ روز تفاوت مشخصی در درصد انتقال را نشان می‌دهد، در سایر موارد تفاوت مشخصی از لحاظ

تأثیر زمان بر درصد انتقال مشاهده نمی‌گردد. افزون بر آن مشاهده می‌گردد که به طور کلی درصد انتقال فسفر به زه‌آب‌های خروجی از خاک بسیار ناچیز است به طوری که میانگین درصد انتقال فسفر از ستون‌های خاک برابر ۱/۸۹ به دست آمد. این نتیجه بیانگر آن است که خاک نقش مهمی در نگهداری فسفر فاضلاب‌ها ایفا کرده است. سوزوکی و همکاران گزارش کردند خاک‌ها توان زیادی در تصفیه و نگهداری فسفر پساب‌ها دارند به طوری که ستون خاکی به عمق ۲۵ سانتی‌متر می‌تواند فسفر پساب را تا ۹۰ درصد کاهش دهد (۲۸). در مقایسه تأثیر نوع فاضلاب بر درصد انتقال فسفر، تفاوت مشخصی بین فاضلاب خام و پساب مشاهده گردید (جدول ۳). انتقال بیشتر فسفر از ستون‌هایی که در آن‌ها فاضلاب خام به کار برده شده است می‌تواند به دلیل مقدار بیشتر آن در فاضلاب خام و همچنین آزاد شدن بخشی از فسفر آلی در اثر تجزیه مواد آلی باشد. در بررسی تأثیر نحوه کاربرد فاضلاب بر درصد انتقال فسفر نیز مشخص گردید که مقدار فسفر بیشتری در شرایط کاربرد پیوسته فاضلاب منتقل گردیده است، که تأثیر آن از لحاظ آماری معنی‌دار نگردید (جدول ۳). درصد انتقال بیشتر فسفر در شرایط کاربرد پیوسته دلالت بر تماس کمتر فاضلاب با ذرات خاک در این شرایط دارد.



(شکل ۵) - درصد انتقال فسفر-فسفات‌های از ستون‌های خاک به زه‌آب‌های خروجی در طول زمان

در پساب به صورت DOC (کربن آلی محلول) بوده است که به سرعت به عمق خاک منتقل شده است. پژوهشگران متعددی از جمله مهیدا گزارش کردند که بخش زیادی از مواد آلی موجود در فاضلاب خام نامحلول و به شکل شناور است (۲۲). از طرفی الیوت و استیونسون گزارش کردند که در طول تصفیه زیستی مقدار مواد آلی فاضلاب به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (۹). بنابراین با توجه به مطالب فوق چنین استنباط می‌گردد که احتمالاً مقدار DOC در فاضلاب خام و پساب بسیار نزدیک به یکدیگر بوده است که در فاضلاب خام به نسبت مقدار TOC خروجی، درصد انتقال کاهش یافته است. بدون توجه به نوع فاضلاب و نحوه کاربرد فاضلاب، میانگین درصد انتقال TOC از خاک برابر ۲۸/۳۶ به دست آمد که این عدد گواه بر درصد انتقال تقریباً زیاد آن می‌باشد. به نظر می‌رسد بافت خاک نقش مؤثری در درصد انتقال زیاد TOC ایفا کرده است. به طوری که کوانتراد و همکاران گزارش کردند انتقال مواد آلی به عمق در خاک‌های با بافت سبک بیشتر از خاک‌های با بافت سنگین است (۲۵).



(شکل ۶) - درصد انتقال کربن آلی کل از ستون‌های خاک به زه‌آب‌های خروجی در طول زمان

## بررسی تغییرات درصد انتقال کربن آلی کل (TOC) از ستون‌های خاک

وجود مواد آلی محلول در خاک می‌تواند بیانگر حضور ترکیبات میکروبی و همچنین ترکیبات آلی مقاوم به تجزیه باشد که در خاک تجزیه نشده‌اند. ترکیب‌های آلی مقاوم به تجزیه خاصیت انباشتگی زیستی دارند که برای میکروارگانیزم‌های خاک و گیاهان سمی بوده و در انسان اثرات سرطان‌زایی دارند. با توجه به فواید بی‌شمار مواد آلی، وجود TOC در محلول خاک می‌تواند سبب افزایش پویایی فلزات سنگین در اعماق زیرین خاک و همچنین تغییر در پتانسیل اکسایش و کاهش خاک گردد (۱۱). افزون بر آن پیوند ترجیحی ترکیبات آلی محلول با کلسیم و منیزیم، افزایش پراکندگی ذرات خاک را به دنبال دارد (۱۴). شکل (۶)، بیانگر درصد انتقال TOC از ستون‌های خاک در طول زمان است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد با گذشت زمان بر درصد انتقال TOC به زه‌آب‌های خروجی افزوده شده است که این افزایش در شرایط استفاده از پساب به‌طور چشمگیری بیشتر از فاضلاب خام است. افزون بر آن تفاوت مشخصی از لحاظ نحوه کاربرد فاضلاب‌ها بر درصد انتقال TOC مشاهده نمی‌گردد. کوانتراد و همکاران معتقدند که توانایی حذف مواد آلی موجود در فاضلاب با گذشت زمان یا به دلیل تخریب زیستی مواد آلی و یا افزایش توانایی جذب آن‌ها توسط خاک بر اثر انباشتگی مواد آلی، افزایش می‌یابد (۲۵). بنابراین افزایش مقدار TOC در طول زمان می‌تواند به علت زمان کوتاه تجزیه و همچنین خروج مواد آلی مقاوم به تجزیه باشد. در خاک با توجه به مقدار بیشتر TOC در فاضلاب خام، تفاوت بسیار چشمگیری در درصد انتقال TOC به زه‌آب‌های خروجی بین فاضلاب‌ها می‌تواند بیانگر آن باشد که احتمالاً بخش زیادی از TOC موجود

## بررسی تغییرات درصد انتقال فلزات سنگین از ستون‌های خاک:

فلزات سنگین در عرصه‌های مختلف فعالیت‌های شهری، خدماتی، کشاورزی و صنعتی دارای مصرف روزافزون می‌باشند و در فرآیند مصرف آب این مواد می‌توانند وارد فاضلاب گردند. فلزات سنگین در طبیعت اثرات سوئی بر کیفیت محصولات کشاورزی، حاصلخیزی خاک و آب‌های زیرزمینی می‌گذارند (۳). گالکوز و همکاران دریافتند که خصوصیات مختلف خاک، ترکیب و درجه تصفیه فاضلاب و روش آبیاری نقش مهمی بر انتقال فلزات سنگین به آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کنند (۱۳). با توجه به اینکه مقدار دو فلز سنگین نیکل و کادمیم در فاضلاب خام و پساب ورودی بیشتر از حد مجاز استاندارد فائو می‌باشد، تأثیر این فاکتورها بر درصد انتقال دو فلز فوق از خاک مورد بررسی قرار گرفته است.

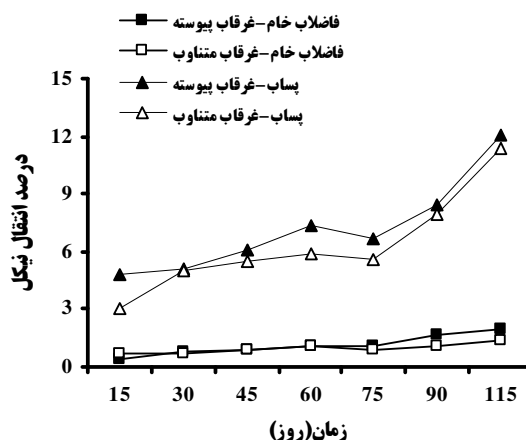
### نیکل:

(شکل ۷)، درصد انتقال نیکل به زه‌آب‌های خروجی از خاک و روند تغییرات آن را با گذشت زمان نشان می‌دهد. از مشاهده این شکل می‌توان دریافت که با توجه به pH قلیایی خاک، نیکل به عمق خاک انتقال یافته است و همچنین درصد انتقال آن به زه‌آب‌های خروجی با گذشت زمان افزایش یافته است که این افزایش در شرایط کاربرد پساب بسیار چشمگیر است. نوع بافت خاک و وجود منافذ بزرگ در این خاک (همان‌طور که ذکر شد ۱۴ درصد نمونه اولیه خاک از ذرات بزرگتر از ۲ میلی‌متر تشکیل شده‌اند)، می‌تواند یکی از عوامل مؤثر بر افزایش درصد انتقال نیکل به زه‌آب‌های خروجی از خاک با افزایش کاربرد فاضلاب در طول زمان باشد. به‌طوری که آلووی دریافت حرکت فلزات سنگین در خاک‌هایی که منافذ

بزرگ دارند، به علت حرکت بخشی از رسوبات کلوئیدی و ذرات رس همراه با حرکت محلول خاک، سبب انتقال فلزات سنگین متصل به این ذرات می‌گردد (۵). از سوی دیگر انتقال TOC و روند افزایش درصد انتقال آن به عمق خاک در طول زمان، نیز می‌تواند یکی دیگر از عوامل مؤثر بر انتقال باشد. به‌طوری که کاسچل و همکاران، افزایش پویایی فلزات سنگین در خاک‌های با pH قلیایی را به علت پیوند آن‌ها با مواد آلی محلول گزارش کردند (۱۹). سیبه و فیسچر نیز افزایش انتقال فلزات سنگین به عمق خاک را به دنبال کاربرد پساب گزارش کردند و دریافتند که علت افزایش تحرک فلزات سنگین، افزایش مقدار TOC و DOC در اعماق سطحی خاک بوده است (۲۷). در بررسی تأثیر نوع فاضلاب بر درصد انتقال مشخص می‌گردد که تأثیر نوع فاضلاب بر درصد انتقال نیکل مانند TOC است (جدول ۳). به‌گونه‌ای که درصد انتقال نیکل در شرایط کاربرد پساب به‌طور چشمگیری بیشتر از فاضلاب خام است که نشان می‌دهد بخش زیادی از نیکل موجود در پساب در اثر پیوند با مواد آلی منتقل شده است. در بررسی تأثیر نحوه کاربرد فاضلاب نیز مشخص می‌گردد که درصد انتقال نیکل در وضعیت حرکت متناوب فاضلاب‌ها کمتر از شرایط پیوسته است که این تأثیر از لحاظ آماری معنی‌دار گردید (جدول ۳). ون کوئیک و همکاران بیان کردند در طی کاربرد متناوب فاضلاب، تماس بیشتری بین اجزاء فاضلاب با ذرات خاک صورت می‌گیرد (۳۰). به نظر می‌رسد این شرایط در کاهش میزان انتقال نیکل به عمق خاک مؤثر بوده است. به‌طور کلی با توجه به میانگین درصد انتقال نیکل از ستون‌های خاک در دو تیمار آبیاری با فاضلاب خام و پساب که به ترتیب برابر ۱/۰۳ و ۶/۷۸ درصد می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که بخش زیادی از نیکل افزوده شده توسط فاضلاب‌ها در خاک انباشته شده است.

**کادمیم:**

در پژوهش حاضر مقدار کادمیم در بسیاری از نمونه‌های زه آب قابل تشخیص نبود که می‌تواند نشان‌دهنده جذب زیاد این فلز توسط ذرات خاک باشد. علاوه بر آن عامل دیگری که می‌تواند در این خصوص مؤثر باشد اینکه ممکن است بخشی از کادمیم با مواد آلی محلول پیوند تشکیل داده باشد ولی ثابت پایداری پیوند کم بوده است و مقدار بسیار ناچیزی از آن انتقال یافته است که قابل تشخیص نبوده است. آشورد و آلووی نیز ثابت پایداری کم پیوند کادمیم با مواد آلی را علت انتقال ناچیز کادمیم از ستون‌های خاک آمیخته به لجن فاضلاب گزارش کردند (۶).



(شکل ۷) - درصد انتقال نیکل از ستون‌های خاک به زه‌آب‌های خروجی در طول زمان

(جدول ۳) - تأثیر نوع و نحوه کاربرد فاضلاب بر درصد انتقال عناصر

پارامتر	نوع فاضلاب			
	فاضلاب خام	پساب	غرقاب پیوسته	غرقاب متناوب
سدیم	۳۷/۴۳*	۴۳/۷۱*	۳۹/۶۵ <sup>ns</sup>	۴۱/۴۹ <sup>ns</sup>
پتاسیم	۴۶/۶۹ <sup>ns</sup>	۴۶/۷۹ <sup>ns</sup>	۴۸/۶۶ <sup>ns</sup>	۴۴/۸۲ <sup>ns</sup>
کلسیم	۵۳/۹۶*	۶۲/۲۷*	۵۲/۹۱**	۶۳/۳۳**
منیزیم	۷۵/۲۲ <sup>ns</sup>	۸۰/۵۶ <sup>ns</sup>	۷۵/۰۵ <sup>ns</sup>	۸۰/۷۳ <sup>ns</sup>
کلر	۵۹/۱۵**	۷۰/۰۹**	۶۰/۱۳ <sup>ns</sup>	۶۹/۱۱ <sup>ns</sup>
بی‌کربنات	۳۱/۶۷*	۳۸/۱۴*	۳۷/۸۱*	۳۲/۰۰*
سولفات	۲۸/۱۸*	۳۲/۱۷*	۲۹/۵۴ <sup>ns</sup>	۳۰/۸۱ <sup>ns</sup>
نیتروژن-نیتراتی	۸۳/۲۸*	۶۰/۷۰*	۷۰/۴۹ <sup>ns</sup>	۷۳/۴۹ <sup>ns</sup>
فسفر-فسفاتی	۲/۳۸*	۱/۴۰*	۲/۱۳ <sup>ns</sup>	۱/۶۶ <sup>ns</sup>
کربن آلی کل	۱۰/۸۳*	۴۵/۹۰*	۲۶/۷۷ <sup>ns</sup>	۲۹/۹۷ <sup>ns</sup>
نیکل	۱/۰۳*	۶/۷۸*	۴/۱۷*	۳/۶۵*

\* نشان دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ درصد    \*\* نشان دهنده معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ درصد    <sup>ns</sup> نشان دهنده عدم معنی‌داری

**نتیجه**

از بررسی مقادیر درصد انتقال پارامترهای مورد بررسی می‌توان دریافت که با استمرار کاربرد فاضلاب بر درصد انتقال هر یک از آنان (بجز کادمیم و فسفر) به عمق خاک افزوده گردیده است. به‌طور کلی خاک توانایی خوبی در نگهداری فسفر و کادمیم نشان داده است اما درصد زیادی از

کاتیون‌ها و آنیون‌های محلول، نیتروژن-نیتراتی، کربن آلی کل و همچنین بخشی از نیکل به زه‌آب‌های خروجی انتقال یافته است. با توجه به درصد زیاد انتقال نیتروژن-نیتراتی و TOC، اگر زه‌آب‌های خروجی از این خاک به آب‌های زیرزمینی به‌ویژه آب‌های زیرزمینی تأمین کننده آب شرب شهرها نفوذ کنند سلامتی افراد به خطر

پژوهش‌هایی امکان مطالعه دقیق‌تر تخلیه فاضلاب را فراهم می‌آورند تا بتوان در حد امکان هم از فواید استفاده مجدد از فاضلاب بهره برد و هم خطرات زیست محیطی ناشی از تخلیه فاضلاب به‌ویژه در آب‌های زیرزمینی را کاهش داد.

### سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد، مسئولان محترم تصفیه‌خانه پرکنندآباد، گلخانه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی و همچنین آزمایشگاه خاک‌شناسی برای در اختیار قرار دادن امکانات انجام پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

می‌افتد. از طرفی با توجه به اینکه در بررسی تأثیر نوع فاضلاب بر درصد انتقال اجزای مختلف در بسیاری از موارد درصد انتقال در اثر کاربرد پساب بیشتر از فاضلاب‌خام گردید، با وجود این به دلیل مقدار زیاد فلزات سنگین و همچنین TOC در فاضلاب‌خام و خطراتی که انتقال آن‌ها به دنبال دارد باید دقت ویژه‌ای در استفاده از فاضلاب‌خام مبذول گردد زیرا با گذشت زمان و تجزیه مواد آلی، مقدار فلزات سنگین متصل به مواد آلی و همچنین TOC در محلول خاک افزایش می‌یابد. در بررسی تأثیر نحوه کاربرد فاضلاب‌ها در بسیاری از موارد تفاوت چشمگیری بین کاربرد پیوسته و متناوب فاضلاب‌ها مشاهده نشد لیکن به منظور کاهش پویایی فلزات سنگین، کاربرد متناوب فاضلاب‌ها پیشنهاد می‌گردد. بدون شک انجام این چنین

### منابع

- ۱- امامی، ح. ۱۳۸۲. بررسی روند حرکت عناصر سنگین کادمیم، سرب و روی در ستونهای خاک دست نخورده و دست خورده و تأثیر مواد آلی در نمونه‌های دست خورده. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- ۲- توکلی، م. و م. طباطبایی. ۱۳۷۸. آبیاری با فاضلاب تصفیه شده. نشریه کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۲۸، ص ۲۶-۱.
- ۳- حسن اقلی، ع. ۱۳۸۱. استفاده از فاضلاب‌های خانگی و پساب تصفیه‌خانه‌ها در آبیاری محصولات کشاورزی و تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی. رساله دکتری، دانشگاه تهران.
- ۴- شایگان، ج. و ع. افشاری. ۱۳۸۳. بررسی وضعیت فاضلاب‌های شهری و صنعتی در ایران. مجله آب و فاضلاب. شماره ۴۹، ص ۶۹-۵۸.
- 5- Alloway, B.J. 1990. Heavy Metal in Soil. Blackie and Son Ltd. Glasgow and London.
- 6- Ashworth, D.J., and B.J. Alloway. 2004. Soil mobility of sewage sludge-derived dissolved organic matter, copper, nickel and zinc. Environmental Pollution. 127: 137-144.
- 7- Beltran, J.M. 1999. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. Agriculture Water Management. 40: 183-194.
- 8- Bolan, N.S., M.A.R. Khan, R. Naidu, R.W. Tillaman, and J.K. Syers. 1998. The effects of anion sorption on sorption and leaching cadmium. Australian Journal of Soil Research. 37: 445-460.
- 9- Elliott, L.F., and F.J. Stevenson. 1986. Soils for management of organic wastes and wastewaters. Second printing. Soil Sci. Soc. Am, Inc, Publisher. Madison, Wisconsin, USA.
- 10- FAO. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nation, Rome, FAO 47.
- 11- Fine, P., A. Hass, R. Prost and N. Atzmon. 2002. Organic carbon leaching from effluent irrigated lysimeters as affected by residence time. Soil Science of American Journal. 66:1531-1539.
- 12- Foppen, J.W.A. 2002. Impact of high-strength wastewater infiltration on groundwater and drinking water supply: the case of Sanaa, Yemen. Journal of Hydrology. 263: 198-216.

- 13- Gallegos, E., A. Warren, E. Robles, E. Campoy, A. Calderon, Ma. G. Sainz, P. Bonilla, and O. Escolero. 1999. The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico. *Water Science and Technology*. 40: 45-52.
- 14- Gohil, M.B. 2000. *Land Treatment of Wastewater*. New Age International Ltd., Publishers, New Dehli.
- 15- Gong, C., and R.J. Donahoe. 1997. An experimental study of heavy metal attenuation and mobility in sandy loam soils. *Applied Geochemistry*. 12: 243-254.
- 16- Halliwell, D.J., K.M. Barlow, and D.M. Nash. 2001. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. *Australian Journal of Soil Research*. 39: 1259-1267.
- 17- Haruvy, N. 1998. Wastewater reuse-regional and economic considerations. *Resource, Conservation and Recycling*. 23: 57-66.
- 18- Hussain, I., L. Rachid, M.A. Hanjra, F. Marikar, and W. Vander Hoek . 2002. Wastewater use in agriculture: Review of impacts and methodological issues in valuing impacts. With an extended list of bibliographical references- Working Paper 37. Colombo, Sri Lanka, International Water Management Institute.
- 19- Kaschl, A., V. Romheld, and Y. Chen. 2002. The influence of soluble organic matter from municipal solid waste compost on trace metal leaching in calcareous soils. *The Science of the Total Environment*. 291: 45-57.
- 20- Kass, A., I. Gavrieli, Y. Yechieli, A. Vengosh, and A. Starinsky. 2004. The impact of freshwater and wastewater irrigation on the chemistry of shallow ground water: a case study from the Israeli Coastal Aquifer. *Journal of Hydrology*. 1-18.
- 21- Magesan, G.N., J.C. Williamson, G.W. Yeates, and A.Rh. Lloyd-Jones. 2000. Wastewater C:N ratio effects on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery. *Bioresource Technology*. 71: 21-27.
- 22- Mahida, U.N., 1981. *Water Pollution and Disposal of Wastewater on Land*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited New Dehli.
- 23- 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. *Australian Journal of Soil Research*. 41: 571-588.
- 24- McLean, J.E., and B.E. Bledsoe. 1992. *Ground Water Issue: Behavior of Metals in Soils*. United States Environmental Protection Agency, EPA/ 540/ S-92/ 018.
- 25- Quanrud, D.M., R.G. Arnold, L.G. Wilson, and M.H. Conklin. 1996. Effect of soil type on water quality improvement during soil aquifer treatment. *Water Science and Technology*. 33: 419-431.
- 26- Shen, Y., G.H. Jones, and J. Olsen. 1980. Soil as a medium for dairy liquid waste disposal. *Journal of Environmental Quality*. 9: 370-372.
- 27- 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. In: *Organic carbon leaching from effluent irrigated lysimeters as affected by residence time*. Ed: P. Fine, A.Hass, R. Prost, and N. Atzmon. 2002. *Soil Science Society of America Journal*. 66:1531-1539.
- 28- Suzuki, T., k. katsuno, and G. Yamaura. 1992. Land application of wastewater using three types of trenches set in lysimeters and its mass balance of nitrogen. *Water Research*. 26: 1433-1444.
- 29- Tillaman, R.W., and A.Surapaneni. 2002 Some soil-related issues in the disposal of effluent on land. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 42: 225-235.
- 30- 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 Research*. 35: 953-964.
- 31- White, R.E., L.K. Heng, and R.W. Tillaman. 1999. Anion and cation leaching through undisturbed soil cores under different flow regimes. 1. Experimental results. *Australian Journal of Soil Research*. 37: 711-726.

## Transport of some elements to depth of a soil following irrigation with raw and treated municipal wastewaters under continuous and intermittent flood conditions

A. Hosseinpour\* - G.H. Haghnia - A. Alizadeh- A. Fotovat<sup>1</sup>

### Abstract

Due to the necessity of wastewater reuse in arid regions and the necessity of investigation on the fate of added materials into the soil, a greenhouse experiment was carried out with polyethylene columns (150 cm in length and 11 cm in diameter) filled with a sandy loam soil during 7 periods of 15 days. A statistical factorial design was used. Raw and treated wastewaters from Parkandabad treatment plant were applied to the columns under continuous and intermittent flood irrigations. The results showed that  $\text{PO}_4\text{-P}$  and Cd were retained by the soil while a large portion of soluble cations and anions,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and TOC as well as a part of Ni were leached out. The type of wastewater had a significant effect on transport percentage of elements except K and Mg. The transport percentage of all elements (with the exception of  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{PO}_4\text{-P}$ ) was higher for treated as compared to raw wastewater. Ca,  $\text{HCO}_3$  and Ni were significantly affected by the mode of application. For the intermittent flood conditions more Ca was leached out, while a reverse case was observed for the other two elements. Due to relatively rapid leaching of soluble cations especially Ca and Mg,  $\text{NO}_3\text{-N}$  and TOC from the soil, and also high amount of heavy metals and TOC in raw wastewater, disposal of wastewaters (especially raw wastewater) should be managed carefully.

**Key words:** Column study, Raw and treated wastewater, Continuous flooding, Intermittent flooding, Transport percentage

---

\* - Corresponding Author Email: azamhoseinpour@yahoo.com

1 - College of Agriculture Ferdowsi University