Archive of SID

مجله پژوهش آب ایران
جلد ۹/ شماره ۲/ پیاپی ۱۷/ تابستان ۱۳۹۴ (۱۳۷ ۱۴۷)

استفاده از تصفیه زمینی در کاهش برخی از ترکیبات پساب شهری با استفاده از ستون خاک

حمید رضا جوانی[۱*]، عبدالمجید لیاقت[۲]، علیرضا حسن‌اقلی[۳] و مهدی نادری درباغشاهی[۴]

چکیده

تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها با استفاده از فاضلاب تصفیه شده به‌عنوان یکی از روش‌های مهم و کاربردی در استفاده دوباره از فاضلاب به شمار می‌آید. در این پژوهش برای شبیه‌سازی فیزیکی شرایط حوضچه‌های تغذیه مصنوعی، از ستون‌های استوانه‌ای شکل PVC به قطر ۳۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۵۰ سانتی‌متر استفاده شد. ستون‌ها از خاک لوم شنی پر شد و از فاضلاب تصفیه شده شهری منطقه ماهدشت در استان البرز استفاده شد. راهبردهای استفاده از پوشش ژئوتکستایل و پوشش بقایای مصالح ساختمانی درشت دانه برروی سطح خاک، برای کاهش نفوذ آلاینده‌ها به خاک در شرایط غرقاب دائم ارزیابی شد. مقادیر مواد جامد معلق، BOD_5، COD، pH و EC در پساب ورودی و نمونه‌های آب خروجی از عمق‌های یک و دو متری ستون‌ها و همچنین مقادیر pH و EC خاک مورد استفاده در ستون‌ها در مرحله قبل از انجام آزمایش و پس از آن اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده نشان از کارایی بالای ستون خاک با پوشش ژئوتکستایل، در حذف مقادیر مواد جامد معلق، BOD_5 و COD با میانگین ۶۷/۷، ۸۴/۷ و ۷۷ درصد دارد. این مقدارها برای پوشش مصالح به‌ترتیب ۵۱/۱، ۷۷/۵ و ۷۲/۱ و برای تیمار شاهد، ۵۵/۳، ۷۰/۴ و ۶۷/۳ درصد بود. علاوه بر ارزان بودن و سهولت تهیه پوشش ژئوتکستایل و بقایای مصالح ساختمانی، امکان تعویض و یا اصلاح این مواد، برای بهبود وضعیت نفوذ خاک وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: انتقال آلاینده‌ها، تغذیه مصنوعی، ستون خاک، فاضلاب تصفیه شده.

ارجاع: جوانی ح. ر. لیاقت ع. حسن‌اقلی ع. و نادری درباغشاهی م. ۱۳۹۴. استفاده از تصفیه زمینی در کاهش برخی از ترکیبات پساب شهری با استفاده از ستون خاک. مجله پژوهش آب ایران. ۱۷:۱۳۷-۱۴۷.

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
۲- استاد گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.
۳- عضو هیأت علمی آبیاری و زهکشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
* نویسنده مسئول: hr_javani@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۲۰

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

با توجه به غلبه اقلیم خشک و نیمه‌خشک بر بخش وسیعی از اراضی ایران و محدودیت روز افزون منابع آب قابل بهره‌برداری، استفاده بهینه از تمامی منابع آب موجود از جمله آب‌های نامتعارف (آب زیرزمینی شور، زهاب و فاضلاب تصفیه شده)، به امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. با رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی، افزایش سطح اراضی فاریاب و روند توسعه صنایع در بیشتر منطقه‌ها، تقاضا برای مصرف آب در بخش‌های مختلف افزایش یافته و سبب افزایش فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه‌ها شده است. فاضلاب از منابع مهم آب است که حدود ۹۹/۹ درصد آن را آب و ۰/۱ درصد باقیمانده را سایر مواد معلق معدنی، آلی و گازها تشکیل می‌دهد (حسن‌اقلی، ۱۳۸۱). تخلیه فاضلاب خام در محیط‌زیست خطرات بهداشتی و زیست‌محیطی زیادی را به دنبال دارد. بنابراین نیاز به یک روش مناسب تصفیه فاضلاب، که از نظر اقتصادی و کارایی مناسب باشد، ضرورت می‌یابد (حسین‌پور و همکاران، ۱۳۸۷). تغذیه مصنوعی با استفاده از فاضلاب تصفیه شده از روش‌های کم هزینه‌ای است که موجب بهبود کیفیت این قبیل آب‌های نامتعارف برای مصرف‌های غیرشرب مانند کشاورزی می‌شود. در این روش با جمع‌آوری آب‌های نامتعارف و مازاد مانند فاضلاب‌های شهری در حوضچه‌های خاکی، نفوذ آب از کف حوضچه‌ها به داخل خاک اتفاق افتاده و با عبور از ناحیه غیراشباع و اشباع خاک و آب‌های زیرزمینی، ضمن تصفیه و حذف بسیاری از مواد موجود در آب، سبب افزایش ذخیره‌های فصلی و بلندمدت آب‌های زیرزمینی می‌شود (حسن‌اقلی، ۱۳۸۱ و فوکس و همکاران، ۲۰۰۶). از طرفی با استفاده از فاضلاب برای تغذیه منابع آب زیرزمینی، ضمن افزایش کیفیت آب، سبب ممانعت از افت سطح آب‌های زیرزمینی شده و بدین وسیله از بروز پیامدهای ناگواری مانند نشست زمین، خشک شدن چاه‌ها، کاهش کیفیت و شور شدن آب در اثر ورود آب‌های شور به داخل سفره‌های آب شیرین نیز جلوگیری می‌شود (توکلی و طباطبایی، ۱۳۷۸). با عبور فاضلاب از خاک، واکنش‌های فیزیکوشیمیایی و بیولوژیک اتفاق افتاده و سبب کاهش در مقادیر مواد آلی و غیرآلی شامل نیتروژن، فسفر، مواد جامد معلق و فلزات سنگین می‌شود (چا و همکاران، ۲۰۰۶ و بدور و همکاران، ۲۰۰۹).

یکی از مشکلات اصلی تغذیه مصنوعی با فاضلاب، کاهش نفوذپذیری لایه سطحی خاک در اثر تجمع ذرات موجود در فاضلاب است که با ایجاد خراش بر روی لایه سطحی، تا حدودی از این مشکل کاسته می‌شود (حسن‌اقلی، ۱۳۸۱). البته باید توجه داشت که عدم مدیریت صحیح تخلیه فاضلاب با هر هدفی در خاک، پیامدهای ناگوار زیست‌محیطی مانند آلودگی منابع آب و به دنبال آن به خطر افتادن سلامت افراد را به دنبال خواهد داشت.

پژوهش‌های زیادی در زمینه کارایی خاک برای کاهش آلاینده‌های فاضلاب در منطقه‌های مختلف انجام شده است. بوور و همکاران (۱۹۸۰) گزارش کردند که عبور پساب از منطقه غیراشباع خاک سبب حذف کامل BOD و COD، کاهش ۳۰ تا ۶۵ درصدی میزان نیتروژن و حذف ۴۰ تا ۸۰ درصدی فسفات از پساب شده است. آن‌ها همچنین نشان دادند که ویروس‌ها و کلیفرم‌های مدفوعی نیز با عبور از منطقه غیراشباع تقریباً به طور کامل حذف شده‌اند. کانارک و همکاران (۱۹۹۳) با اجرای پروژه تغذیه مصنوعی با فاضلاب در فلسطین اشغالی دریافتند که BOD و مواد جامد معلق موجود در فاضلاب با عبور از آبخوان عمیق به طور کامل حذف شده‌اند، در حالیکه فسفر و نیتروژن کاهش ۵۰ و ۹۹ درصدی از خود نشان داده‌اند. حسین‌پور و همکاران (۱۳۸۷) با مطالعه روی ستون‌های پلی‌اتیلنی به ارتفاع ۱۵۰سانتی‌متر و قطر ۱۱ سانتی‌متر در ۷ دوره ۱۵ روزه با استفاده از خاک لوم شنی، تأثیر خاک را در کاهش برخی از عناصر موجود در فاضلاب خام و تصفیه شده نشان دادند. در پژوهش آن‌ها کاهش نیترات، فسفات، نسبت جذبی سدیم و برخی از فلزات سنگین فاضلاب در زهاب خروجی از ستون‌های خاک گزارش شده است. حسن‌اقلی و لیاقت (۱۳۸۸) نیز به مطالعه تأثیر تغذیه مصنوعی با فاضلاب تصفیه شده شهرک اکباتان بر انتقال آلاینده‌های معدنی و بیولوژیک به آبخوان کم عمق طی سه گزینه مدیریتی متفاوت از نظر طول مدت دوره غرقابی و خشکی پرداختند. در این مطالعه مقادیر فسفر، نیتروژن کل، کلیفرم مدفوعی و کلیفرم کل در زهاب خروجی در بهترین حالت، به‌ترتیب به میزان ۷۵، ۴۰/۴، ۹۹/۵ و ۹۹/۲ درصد کاهش یافته است.

www.SID.ir

Archive of SID

در ایران، عملیات تغذیه مصنوعی بیشتر مربوط به غنی‌سازی ذخیره آبخوان‌ها با به کارگیری چاه‌های تغذیه مصنوعی و آب‌های با کیفیت نه‌چندان مطلوب (آب‌های شور، لب‌شور و سیلاب‌ها) و گاهی پخش سیلاب‌ها بر روی اراضی مستعد است و اطلاعات زیادی از اجرای عملیات تغذیه مصنوعی با استفاده از فاضلاب و از طریق حوضچه‌های تغذیه مصنوعی در دسترس نیست. نظر به هزینه‌بر بودن و وجود تجربه‌های انگشت‌شمار در این خصوص در کشور، لازم دیده شد در قالب آزمایش‌های مقدماتی، پارامترهای اصلی و مؤثر بر این پدیده شناسایی شده و برخی از عامل‌های آلاینده‌ای که بیشترین احتمال را در انتقال به عمق دارند مشخص شوند.

هدف از انجام این پژوهش، بررسی و ارزیابی تأثیر اعمال رویکردهای مختلف در کاهش انتقال برخی از آلاینده‌ها به داخل خاک و تغییرات آن‌ها درنتیجه اجرای عملیات تغذیه مصنوعی از جمله بررسی میزان انتقال املاح و تغییرات آن به آب‌های زیرزمینی (شاخص شده توسط EC) به همراه تغییرات pH در طول زمان و مطالعه روند تغییرات مواد جامد معلق، BOD_5 و COD به عمق خاک و آب‌های زیرزمینی با گذشت زمان است.

مواد و روش‌ها

برای شبیه‌سازی حوضچه‌های تغذیه مصنوعی و بررسی میزان عامل‌های آلاینده‌ای که بیشترین کمیت انتقال به عمق خاک را دارند، از سه ستون خاک بهره گرفته شد (در این پژوهش تکراری برای آزمایش درنظر گرفته نشد.). مدل‌ها به شکل استوانه و از جنس PVC، به ارتفاع ۲۵۰ سانتی‌متر و قطر ۳۰ سانتی‌متر ساخته شدند. برای نمونه‌برداری از آب عبوری از خاک در بخش تحتانی ستون‌ها و در فاصله یک‌متری از کف اقدام به نصب زهکش‌هایی باریک از جنسPVC به قطر ۲/۵ سانتی‌متر شد و برای جلوگیری از انسداد این لوله‌های سوراخ‌دار درنتیجه ورود خاک به داخل آن‌ها، از یک لایه فیلتر ژئوتکستایل نازک از نوع بافته در اطراف زهکش‌ها استفاده شد. همچنین برای دوری از وقوع جریان ترجیحی در دیواره‌های ستون خاک، بدنه داخلی ستون‌ها قبل از پر شدن با خاک، با چسب و ذرات شن پوشش داده شد.

برای پرکردن مدل‌ها، از خاک مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران (عمق ۵۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متری) استفاده شد. این خاک براساس طبقه‌بندی کشاورزی (USDA) دارای بافت لوم شنی است. همه مدل‌ها از کف تا ارتفاع ۲۰۰ سانتی‌متری با این خاک پر شدند. در پر کردن ستون‌ها، هیچ‌گونه عملیات تراکمی بر روی خاک انجام نشد و فقط با افزایش هر متر خاک به ستون‌ها، مقداری آب (۱۰ لیتر) اضافه شد تا سبب نشست خاک شود. عدم انجام عملیات تراکمی و استفاده از خاک با بافت سبک، برای اعمال شرایط بحرانی انجام شده است. در جدول‌های ۱ و ۲ مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این آزمایش نشان داده شده است. از آنجا که به مرور زمان درنتیجه تجمع مواد روی سطح خاک، میزان نفوذ و کارایی سیستم کاهش می‌یابد، پس از دو رویکرد مختلف در بهبود کارایی سیستم در بهبود حذف عامل‌های آلاینده استفاده شد. در ستون اول هیچ‌گونه پوششی بر روی سطح خاک قرار نگرفت و به‌عنوان شاهد درنظر گرفته شد. در ستون دوم از دو لایه پوشش ژئوتکستایل (به ضخامت مجموع ۱/۵ سانتی‌متر، اندازه منافذ ۴۵ تا ۹۰ میکرون و نفوذپذیری ۰/۰۴ سانتی‌متر بر ثانیه) بر روی سطح خاک استفاده شد و در ستون سوم نیز از پوشش ۲۰ سانتی‌متری بقایای مصالح ساختمانی درشت دانه، شامل خرده‌های آجر (سفالی) با ابعاد متوسط ۲ سانتی‌متر استفاده شد. خرده‌های آجر قبل از انجام آزمایش خیسانده و به‌صورت کامل شسته شدند تا مواد زاید چسبیده به آن‌ها حذف شود. شمای کلی مدل‌های فیزیکی ساخته شده برای شبیه‌سازی حوضچه‌های تغذیه مصنوعی در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده

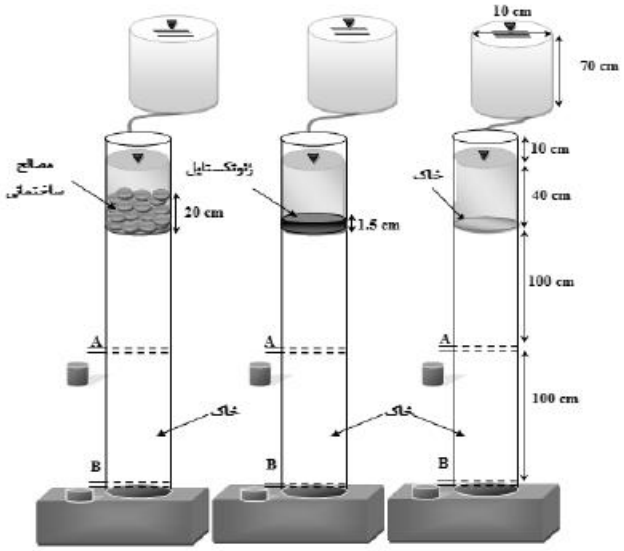
پارامتر	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	تخلخل (%)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3)	جرم مخصوص واقعی (g/cm^3)
مقدار	۵۸/۵	۲۳/۲	۱۸/۳	۰/۴۱	۱/۵۴	۲/۶۱

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲ مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده

پارامتر	pH	EC (dS/m)	پتاسیم (meq/l)	سدیم (meq/l)	کلسیم (meq/l)	منیزیم (meq/l)	سولفات (meq/l)	کربنات (meq/l)	بی‌کربنات (meq/l)	نیترات (meq/l)
مقدار	۷/۹۵	۰/۹۷	۰/۲۱	۳/۵۰	۷/۳۰	۳/۰۰	۳/۸۰	-	۵/۰۰	۲/۱۱



شکل ۱ شمای کلی مدل فیزیکی ساخته شده در اجرای عملیات تغذیه مصنوعی با فاضلاب

در اجرای این پژوهش از فاضلاب تصفیه شده خروجی از تصفیه‌خانه ماهدشت، در استان البرز استفاده شد. سیستم تصفیه در این تصفیه‌خانه از نوع برکه تثبیت است. مقادیر برخی از پارامترهای پساب مورد استفاده در مرحله‌های مختلف در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ متوسط مشخصات پساب ورودی به ستون‌ها در طول دوره زمانی

زمان نمونه‌برداری (روز)	BOD_5 (mg/l)	COD (mg/l)	TSS (mg/l)	فسفر (mg/l)	نیترات (mg/l)	EC (ds/m)	pH
۱	۲۸	۴۹	۱۵/۳	۳/۳۲	۱۸/۱۳	۱/۰۷	۷/۳۹
۱۰	۳۱	۵۷	۱۹/۶	۲/۱۹	۱۵/۶۱	۱/۲۲	۷/۴۱
۲۰	۲۵	۴۷	۱۵/۸	۲/۴۱	۱۶/۳۶	۱/۳۲	۷/۳۵
۳۰	۲۲	۴۰	۱۶/۳	۱/۶۹	۱۱/۱۰	۱/۲۷	۷/۴۳
۴۰	۲۴	۴۵	۲۲/۵	۱/۴۳	۱۰/۲۳	۱/۳۵	۷/۳۸

برای نزدیک شدن به شرایط واقعی از نظر نحوه اجرای عملیات تغذیه مصنوعی، کاربرد پساب در ستون خاک به‌صورت غرقاب دائم بود، به نحوی که از ابتدای آزمایش در تمامی ستون‌ها سطح ایستابی به ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر روی سطح خاک برقرار شد. در کل دوره انجام آزمایش از ۶۷۸ لیتر پساب در ستون بدون پوشش، ۶۶۱ لیتر در ستون با پوشش ژئوتکستایل و ۶۷۰ لیتر در ستون با پوشش مصالح ساختمانی استفاده شد. نمونه‌برداری از فاضلاب تصفیه شده ورودی و نمونه‌های خروجی طی ۵ مرحله انجام شد، به‌صورتی که نمونه‌برداری اول پس از خروج زهاب اولیه از زهکش‌ها و بقیه نمونه‌برداری‌ها در فاصله‌های زمانی ۱۰ روزه و در ۴ مرحله (به مدت ۴۰ روز) انجام شد. نمونه‌های جمع‌آوری شده بلافاصله برای تجزیه شیمیایی و بیولوژیک به آزمایشگاه منتقل شد.

www.SID.ir

Archive of SID

پارامترهایی مانند BOD_5، COD، مواد جامد معلق (TSS)، pH و EC در پساب ورودی و همچنین نمونه زهاب‌های جمع‌آوری شده از ستون‌ها اندازه‌گیری شد. نمونه‌برداری از خاک برای تعیین تغییرات EC و pH خاک، از عمق‌های ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری همه ستون‌ها در مرحله‌های قبل از شروع آزمایش و همچنین با گذشت ۴۰ روز از حالت غرقابی و با توقف تغذیه انجام گرفت.

مقادیر pH توسط دستگاه pHمتر الکترونیکی مدل JENWAY-3010، EC با دستگاه هدایت‌سنج الکترونیکی مدل JENWAY-4010، مقادیر BOD با استفاده از دستگاه BODسنج مدل-HACH و مقادیر COD با دستگاه CODسنج مدل-45600-HACH و کلیه آزمایش‌های مربوط بر طبق دستورالعمل[1] APHA انجام شد (۱۹۹۵).

تجزیه و تحلیل آماری برروی داده‌های آزمایشگاهی به روش آزمون مقایسه میانگین‌ها (t-test) در سطح احتمال ۹۵ درصد، با نرم‌افزار Minitab انجام شد. برای ترسیم شکل‌ها نیز از نرم‌افزار EXCEL استفاده شده است. برای تعیین راندمان حذف آلاینده‌ها از رابطه زیر استفاده شده است.

$$E(\%)=\frac{C_f-C_i}{C_i}\times 100 \qquad (1)$$

در رابطه بالا E درصد حذف پارامتر، C_fغلظت پساب ورودی و C_iغلظت پساب خروجی از انتهای ستون‌ها است.

نتایج و بحث

تغییرات مقادیر انتقال یافته مواد جامد معلق (TSS) به عمق خاک درعملیات تغذیه مصنوعی

مواد جامد معلق بیشتر به‌صورت مواد آلی هستند که روی سطح خاک حوضچه‌های تغذیه مصنوعی جمع شده و فقط مقدار کمی از آن‌ها به داخل خاک نفوذ می‌کند (حسن‌اقلی، ۱۳۸۱). در جدول ۴ محدوده تغییرات و میانگین مواد جامد معلق موجود در پساب ورودی و زهاب‌های خروجی از زهکش‌ها آورده شده است.

مقادیر میانگین TSS در پساب ورودی، ۱۷/۹ میلی‌گرم بر لیتر (۲۲/۵-۱۵/۳ میلی‌گرم بر لیتر) است. ستون خاک با پوشش ژئوتکستایل با میانگین حذف مواد جامد معلق به میزان ۶۷/۷ درصد، بیشترین مقدار حذف را نسبت به ستون‌های دیگر داشت، زیرا منافذ کوچک ژئوتکستایل تا حد زیادی از انتقال مواد جامد معلق به ستون خاک جلوگیری کرده و همانند فیلتر عمل کرده است. ستون خاک با پوشش مصالح ساختمانی نیز با میانگین ۵۱/۱ درصد کمترین مقدار حذف مواد جامد معلق را، نسبت به ستون‌های دیگر داشت اما تفاوت معنی‌داری در میزان درصد حذف این مواد در این ستون نسبت به ستون بدون پوشش مشاهده نشد. نتایج بررسی آماری مقادیر راندمان حذف مواد جامد معلق در جدول ۵ آمده است. بیشترین مقدار حذف مواد جامد معلق در یک متر اول خاک اتفاق افتاد زیرا خاک‌ها مانند صافی‌های مؤثری هستند که در یک متر لایه بالایی خود، ذرات جامد معلق موجود فاضلاب را جذب می‌نمایند (توکلی و طباطبایی، ۱۳۷۸ و فائو، ۱۹۹۹). در دو ستون خاک بدون پوشش و خاک با پوشش ژئوتکستایل، بیشتر حذف مواد جامد معلق در یک متر اول اتفاق افتاد. در حالیکه در ستون خاک همراه با پوشش مصالح ساختمانی، میزان کاهش مواد جامد معلق در یک متر اول کمتر بود. در شکل ۲ روند تغییرات درصد حذف مواد جامد معلق در مدت انجام آزمایش نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار مواد جامد معلق خروجی از زهکش‌ها در ابتدا بیشتر بوده و کم‌کم و با تداوم عملیات تغذیه مصنوعی کاهش یافته و به طور تقریبی به مقدار ثابتی می‌رسد.

این وضعیت تا حدودی به شرایط ویژه خاک مورد استفاده در ستون‌ها و عبور پساب از آن‌ها نیز مربوط می‌شود زیرا به دلیل وجود خلل و فرج درشت در خاک و دست خورده بودن آن، امکان جابجایی و انتقال بخشی از ذرات کلوئیدی موجود در خاک و مشخص شدن آن در آب زهکشی شده (علاوه بر عامل‌های منشأ گرفته از خود پساب) نیز وجود دارد (حسن‌اقلی، ۱۳۸۱).

1- American Public Health Association

www.SID.ir

Archive of SID

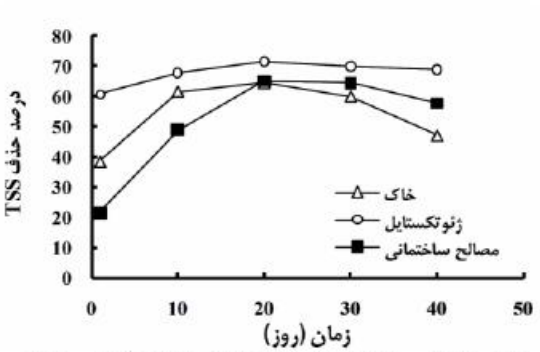
جدول ۴ مقادیر مواد جامد معلق پساب ورودی به ستون‌های تغذیه مصنوعی و خروجی از زهکش‌ها

نوع پوشش سطح خاک	پساب ورودی (mg/l)		زهاب عمق ۱۰۰ سانتی‌متر (mg/l)		زهاب عمق ۲۰۰ سانتی‌متر (mg/l)		درصد حذف کل TSS (%)
	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	
بدون پوشش	۱۷/۹	۱۵/۳-۲۲/۵	۱۱/۳	۱۰/۱-۱۶/۴	۷/۹	۵/۶-۱۰/۹	۵۵/۳
پوشش ژئوتکستایل	۱۷/۹	۱۵/۳-۲۲/۵	۹/۰	۷/۸-۱۵/۳	۵/۷	۴/۵-۷/۰	۶۷/۷
پوشش مصالح	۱۷/۹	۱۵/۳-۲۲/۵	۱۳/۶	۹/۵-۱۶/۵	۸/۷	۵/۰-۱۲/۰	۵۱/۱

جدول ۵ نتایج حاصل از ارزیابی آماری مقادیر راندمان حذف مواد جامد معلق (TSS) در ستون‌های مختلف

نوع پوشش سطح خاک ستون‌ها	P-value	
	بدون پوشش	ژئوتکستایل
بدون پوشش		
ژئوتکستایل	۰/۰۲۰*	
مصالح ساختمانی	۰/۶۱۶	۰/۰۴۹*

* معنی‌دار در سطح ۵٪



شکل ۲ تغییرات درصد حذف مواد جامد معلق نسبت به زمان در ستون‌ها

تغییرات مقادیر BOD_5 و COD انتقال یافته در عملیات تغذیه مصنوعی

امروزه تعیین پارامترهای BOD_5 و COD از کاربردی‌ترین روش‌ها در تعیین مقادیر آلاینده‌های موجود در فاضلاب است. در جدول‌های ۶ و ۷ محدوده تغییرات و میانگین BOD_5 و COD پساب ورودی به ستون‌های تغذیه مصنوعی و زهاب خروجی از زهکش‌های اول و دوم در کل دوره انجام آزمایش‌ها نشان داده شده است.

همان‌طور که از جدول‌های ۶ و ۷ برمی‌آید از نظر مقادیر BOD_5 و COD پساب ورودی به تمامی ستون‌ها شرایط یکسانی دارد و ستون خاک با پوشش ژئوتکستایل به‌طور معنی‌داری عملکرد بهتری را در حذف COD و BOD_5 پساب داشته است. در جدول‌های ۸ و ۹ نتایج حاصل از ارزیابی آماری مقادیر راندمان حذف BOD_5 و COD در ستون‌های مختلف نشان داده شده است. میانگین BOD_5 خروجی از زهکش اول (در یک متری از سطح خاک) در ستون خاک با پوشش ژئوتکستایل و زهکش دوم (در دو متری از سطح خاک) در این ستون به‌ترتیب ۹/۶ (۱۱/۸- ۶) و ۳/۸ (۷/۱-۲) میلی‌گرم بر لیتر بود. همچنین در این ستون میانگین COD خروجی از زهکش اول ۱۸/۵ (۲۱- ۱۵/۵) و از زهکش دوم ۱۰/۷ (۱۶/۳-۶) میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد. ستون خاک با پوشش ژئوتکستایل با میانگین حذف ۸۴/۷ درصد BOD_5 و ۷۷ درصد از COD ورودی، وضعیت بهتری نسبت به ستون‌های دیگر از نظر حذف این دو پارامتر نشان داد. پس از آن ستون حاوی پوشش مصالح ساختمانی با میانگین درصد حذف BOD_5 و COD به‌ترتیب برابر با ۷۷/۵ و ۷۲/۱ و ستون بدون پوشش سطحی با ۷۰/۴ و ۶۷/۳ درصد قرار دارند. اما تفاوت معنی‌داری بین ستون خاک با پوشش مصالح ساختمانی و ستون بدون پوشش مشاهده نشد. نکته مهم این است که با توجه به مقادیر BOD_5 و COD خروجی از زهکش

www.SID.ir

Archive of SID

اول در همه ستون‌ها، بیشترین مقدار حذف BOD_5 و COD در لایه سطحی خاک اتفاق افتاده است. لایه سطحی خاک به‌عنوان فیلتری کارآمد در حذف آلاینده‌ها عمل می‌کند. اساندوه و همکاران (۲۰۱۱) در بررسی حذف آلاینده‌ها از پساب با استفاده از ستون خاک گزارش کردند، با توجه به اینکه کاهش BOD_5 و COD در خاک ناشی از وجود اکسیژن محلول و شرایط تجزیه هوازی در خاک بوده و در ۱۰ سانتی‌متر اول بیشترین مقدار اکسیژن محلول در خاک وجود دارد، درنتیجه بیشترین حذف BOD_5 و COD نیز در این ناحیه اتفاق می‌افتد. ژائو و همکاران (۲۰۰۷) نیز در پژوهش خود بر روی کاهش آلاینده‌های پساب در مقیاس آزمایشگاهی با استفاده از ستون خاک، بیشترین میزان حذف مواد آلی را در عمق ۵/ متری از سطح خاک گزارش کردند.

جدول ۶ مقادیر BOD_5 پساب ورودی به ستون‌های تغذیه مصنوعی و خروجی از زهکش‌ها

نوع پوشش سطح خاک	پساب ورودی (mg/l)		زهاب عمق ۱۰۰ سانتی‌متر (mg/l)		زهاب عمق ۲۰۰ سانتی‌متر (mg/l)		درصد حذف کل BOD_5 (%)
	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	
بدون پوشش	۲۶	۲۲/۳-۳۱/۷	۱۳	۷ -۱۷/۸	۷/۳	۴-۱۲/۲	۷۰/۴
پوشش ژئوتکستایل	۲۶	۲۲/۳-۳۱/۷	۹/۶	۶-۱۱/۸	۳/۸	۲-۷/۱	۸۴/۷
پوشش مصالح	۲۶	۲۲/۳-۳۱/۷	۱۲/۸	۹-۱۶/۱	۵/۶	۴-۸/۳	۷۷/۵

جدول ۷ مقادیر COD پساب ورودی به ستون‌های تغذیه مصنوعی و خروجی از زهکش‌ها

نوع پوشش سطح خاک	پساب ورودی (mg/l)		زهاب عمق ۱۰۰ سانتی‌متر (mg/l)		زهاب عمق ۲۰۰ سانتی‌متر (mg/l)		درصد حذف کل COD (%)
	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	
بدون پوشش	۴۷/۶	۴۰-۵۷	۲۱/۸	۱۷/۶ -۲۵/۳	۱۴/۹	۹/۰-۲۱/۸	۶۷/۳
پوشش ژئوتکستایل	۴۷/۶	۴۰-۵۷	۱۸/۵	۱۵/۵ -۲۱/۰	۱۰/۷	۶/۰-۱۶/۳	۷۷/۰
پوشش مصالح	۴۷/۶	۴۰-۵۷	۱۹/۷	۱۷/۱-۲۳/۴	۱۲/۸	۹/۱-۱۹/۰	۷۲/۱

جدول ۸ نتایج حاصل از ارزیابی آماری مقادیر راندمان حذف BOD_5 در ستون‌های مختلف

نوع پوشش سطح خاک ستون‌ها	P-value	
	بدون پوشش	ژئوتکستایل
بدون پوشش		
ژئوتکستایل	۰/۰۲۹*	
مصالح ساختمانی	۰/۰۹۶	۰/۰۱۷*

جدول ۹ نتایج حاصل از ارزیابی آماری مقادیر راندمان حذف COD در ستون‌های مختلف

نوع پوشش سطح خاک ستون‌ها	P-value	
	بدون پوشش	ژئوتکستایل
بدون پوشش		
ژئوتکستایل	۰/۰۳۴*	
مصالح ساختمانی	۰/۰۶۱	۰/۱۰۹

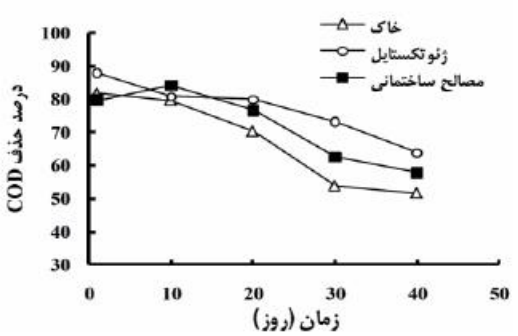
* معنی‌دار در سطح ۵٪

www.SID.ir

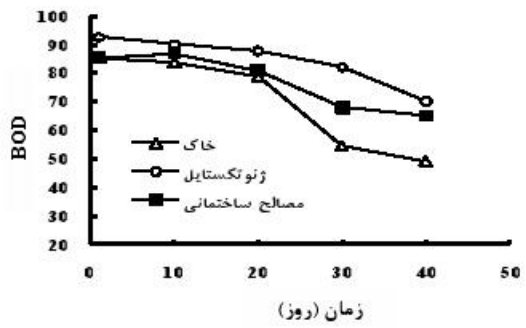
Archive of SID

در شکل‌های ۳ و ۴ میزان تغییرات درصد حذف کل BOD_5 و COD نسبت به زمان نشان داده شده است. در بیشتر مرحله‌های انجام آزمایش، ستون خاک با پوشش ژئوتکستایل کارایی بهتری در حذف BOD_5 و COD داشته است. همچنین ستون خاک با پوشش سطحی مصالح ساختمانی، کارایی قابل قبولی را نسبت به ستون بدون پوشش سطحی در حذف این پارامترها از خود نشان می‌دهد. این امر ممکن است به‌دلیل افزایش فعالیت بیولوژیکی و میزان تجزیه و یا جذب توده زنده به‌صورت بیوفیلم بر روی ژئوتکستایل و دانه‌های مصالح موجود در سطح خاک باشد. کارلسون و سیلور استین (۱۹۹۸) نیز چنین پدیده‌ای را در پژوهش‌های خود در اطراف دانه‌های ماسه مشاهده کردند.

همچنین دیده می‌شود که با گذشت ۲۰ روز از شروع عملیات تغذیه مصنوعی، مقدار BOD_5 و COD خروجی از زهکش‌ها اندکی افزایش می‌یابد که این افزایش در ستون خاک بدون پوشش سطحی بیشتر از سایر ستون‌ها است. کاهش حذف مواد آلی با گذشت زمان، ممکن است به دلیل افزایش شرایط غیرهوازی در ستون خاک باشد. ستون با پوشش ژئوتکستایل با گذشت زمان قابلیت بیشتری در حذف مواد آلی از خود نشان داده است.



شکل ۳- تغییرات درصد حذف کل BOD_5 نسبت به زمان در ستون‌ها



شکل ۴- تغییرات درصد حذف COD نسبت به زمان در ستون‌ها

تغییرات pH نمونه‌های زهاب خروجی از ستون‌های خاک با گذشت زمان

غلظت یون هیدروژن فاضلاب مانند دیگر محلول‌ها با pH نشان داده می‌شود که بیانگر شدت اسیدی یا بازی بودن یک محلول است. فاضلاب به طور معمول قلیایی بوده که از طریق مصرف‌های شهری آب، نفوذ آب‌های زیرزمینی به شبکه و موادی که در طول استفاده‌های خانگی به آب اضافه می‌شود، به دست می‌آید. اندازه‌گیری pH مهم است زیرا بسیاری از واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی در یک pH مشخص و یا دامنه کوچکی از آن رخ می‌دهد (حسن‌اقلی، ۱۳۸۱). مقادیر میانگین pH پساب ورودی و نمونه زهاب خروجی از زهکش‌های واقع در یک متر اول و انتهای ستون‌ها و همچنین مقادیر pH عصاره اشباع خاک (میانگین pH عمق‌های ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از سطح خاک) قبل از انجام آزمایش‌ها و پس از توقف تغذیه مصنوعی در جدول ۱۰ قابل مشاهده است. با ادامه روند تغذیه مصنوعی، میزان pH خاک در همه ستون‌ها کاهشی جزئی داشت زیرا اگر چه اکسیداسیون مواد آلی و معدنی پساب پیدایش یون هیدرونیوم را در پی دارد، ولی خاک و پساب هر دو بافری توانا بوده و در برابر تغییرات pH مقاومت می‌کنند (کاردوس و هوک، ۱۹۷۴). در شکل ۵ مقادیر pH پساب ورودی و نمونه‌های زهاب خروجی از همه ستون‌ها در مرحله‌های مختلف انجام آزمایش‌های نشان داده شده است. با گذشت زمان مقدار pH نمونه‌های خروجی از زهکش‌ها نسبت به مقادیر پساب ورودی آن کاهش می‌یابد. علاوه بر آن تجزیه مواد آلی موجود در فاضلاب‌ها با گذشت زمان و همچنین پدیده نیتریفیکاسیون، از جمله عامل‌های مؤثر دیگری هستند که می‌توانند سبب کاهش pH نمونه‌های خروجی در طول زمان شوند. بنابراین از روند تغییرات مقادیر pH در طول زمان می‌توان چنین نتیجه گرفت که، تجزیه مواد آلی و نیتریفیکاسیون در مقایسه با خاصیت بافری خاک و پدیده رقت، تأثیر بیشتری بر تغییرات pH نمونه‌ها در طول زمان داشته‌اند و سبب کاهش pH نمونه‌های زهاب خروجی از ستون‌ها شده است. در جدول ۱۱ نتایج حاصل از ارزیابی آماری مقادیر تغییرات pH در ستون‌های مختلف نشان داده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

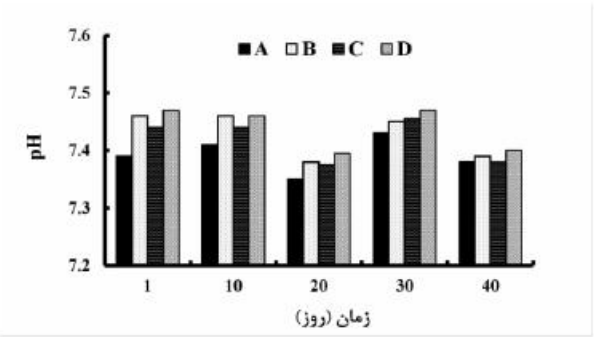
جدول ۱۰ دامنه و میانگین مقادیر pH پساب ورودی، نمونه آب خروجی و خاک در ابتدا و انتهای تغذیه مصنوعی

نوع پوشش سطح خاک	pH پساب		pH نمونه (A*)		pH نمونه (B**)		pH*** خاک قبل از تغذیه مصنوعی	pH*** خاک بعد از تغذیه مصنوعی
	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه		
بدون پوشش	۷/۳۸	۷/۴۲-۷/۳۵	۷/۴۲	۷/۵۱-۷/۳۷	۷/۴۵	۷/۵۳-۷/۴۱	۷/۹۳	۷/۸۳
پوشش ژئوتکستایل	۷/۳۸	۷/۴۲-۷/۳۵	۷/۴۱	۷/۴۸-۷/۳۷	۷/۴۳	۷/۴۹-۷/۳۹	۷/۹۳	۷/۸۵
پوشش مصالح	۷/۳۸	۷/۴۲-۷/۳۵	۷/۴۴	۷/۵۳-۷/۳۸	۷/۴۶	۷/۵۲-۷/۴۲	۷/۹۳	۷/۸۸

* A زهکش در یک متر اول ستون خاک ** B زهکش در بخش انتهایی ستون خاک
*** میانگین pH عمق‌های ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از سطح خاک

جدول ۱۱ نتایج حاصل از ارزیابی آماری مقادیر تغییرات pH در ستون‌های مختلف

نوع پوشش سطح خاک ستون‌ها	P-value	
	بدون پوشش	ژئوتکستایل
بدون پوشش		
ژئوتکستایل	۰/۰۱۸*	
مصالح ساختمانی	۰/۰۳۸*	۰/۰۰۱*



شکل ۵ مقادیر میانگین pH پساب ورودی (A) و خروجی از انتهای ستون بدون پوشش (B)، ستون دارای پوشش ژئوتکستایل (C) و ستون با پوشش مصالح (D) در طول دوره آزمایش

تغییرات شوری (EC) نمونه‌های خروجی از ستون‌های خاک با گذشت زمان

از دیگر پارامترهای مهم و شاخص کیفیت فاضلاب، غلظت کلریدها است. فاضلاب‌های کشاورزی، صنعتی و خانگی حاوی کلریدها هستند. فضولات انسانی نیز دارای مقدار زیادی از کلریدها است. بدن انسان روزانه ۸ تا ۱۵ گرم کلرید سدیم دفع می‌کند، بنابراین فاضلاب بیش از آب آشامیدنی شهر نمک دارد. شوری توسط هدایت الکتریکی (EC) بیان می‌شود و به تنهایی مهمترین پارامتر در تعیین مناسب بودن کیفیت فاضلاب برای آبیاری محصولات کشاورزی است. هدایت الکتریکی به طور مستقیم با مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها ارتباط دارد (حسن‌اقلی،۱۳۸۱). مقادیر میانگین EC پساب ورودی و نمونه زهاب‌های خروجی از زهکش‌های واقع در یک متر اول و انتهای ستون‌ها و همچنین مقادیر EC عصاره اشباع خاک (میانگین EC عمق‌های ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از سطح خاک) قبل از انجام آزمایش‌ها و پس از توقف تغذیه مصنوعی در جدول ۱۲ دیده می‌شود.

با توجه به این جدول، همه ستون‌ها از نظر EC پساب ورودی و خاک مورد استفاده، دارای شرایط یکسان بوده و مقدار EC در پساب ورودی و خاک به‌ترتیب ۱/۲۴ و ۰/۹۷ دسی‌زیمنس بر متر است. همان‌گونه که در جدول نشان داده شده است، بیشتر کاهش EC پساب در یک متر اول ستون خاک رخ داده است. ستون خاک با پوشش ژئوتکستایل بهترین عملکرد را از نظر کاهش EC پساب ورودی در هر دو عمق نمونه‌برداری داشت اما این میزان کاهش معنی‌دار نبود. نتایج حاصل از بررسی آماری تغییرات مقادیر EC در جدول ۱۳ آمده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱۲ میانگین مقادیر EC پساب ورودی، نمونه آب خروجی و خاک در ابتدا و انتهای تغذیه مصنوعی

نوع پوشش سطح خاک	EC پساب (dS/m)		EC نمونه (*A) (dS/m)		EC نمونه (**B) (dS/m)		EC خاک قبل از تغذیه مصنوعی (dS/m)	EC*** خاک بعد از تغذیه مصنوعی (dS/m)
	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه	میانگین	دامنه		
بدون پوشش	۱/۲۴	۱/۳۲-۱/۰۷	۱/۱۵	۱/۲۷-۰/۹۶	۱/۱۱	۱/۲۸-۰/۹۲	۰/۹۷	۱/۰۹
پوشش ژئوتکستایل	۱/۲۴	۱/۳۲-۱/۰۷	۱/۱۲	۱/۱۸-۱/۰۱	۱/۰۹	۱/۲۱-۰/۹۱	۰/۹۷	۱/۰۷
پوشش مصالح	۱/۲۴	۱/۳۲-۱/۰۷	۱/۲۲	۱/۲۸-۰/۹۴	۱/۱۷	۱/۲۳-۰/۹۶	۰/۹۷	۱/۰۳

*A زهکش در یک متر اول ستون خاک **B زهکش در انتهای ستون خاک

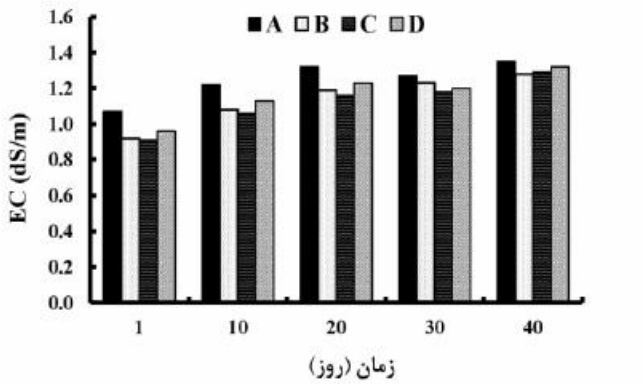
*** میانگین EC عصاره اشباع خاک در عمق‌های ۵۰ سانتی‌متر و یک متر

جدول ۱۳ نتایج حاصل از ارزیابی آماری مقادیر تغییرات EC در ستون‌های مختلف

نوع پوشش سطح خاک ستون‌ها	P-value	
	بدون پوشش	ژئوتکستایل
بدون پوشش		
ژئوتکستایل	۰/۱۱۶	
مصالح ساختمانی	۰/۱۲۸	۰/۰۹۰

میانگین EC خروجی از زهکش اول (در یک متری از سطح خاک) در ستون با پوشش ژئوتسکتایل ۱/۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و میانگین EC خروجی از زهکش دوم (در دو متری از سطح خاک) ۱/۰۹ دسی‌زیمنس بر متر است.

کارایی ستون خاک بدون پوشش و ستون‌های خاک با پوشش مصالح ساختمانی در کاهش EC پساب نزدیک به ستون خاک با پوشش ژئوتکستایل بود و کمتر از ۱۰ درصد با آن اختلاف داشتند و از نظر آماری نیز معنی‌دار نمی‌باشند. در شکل ۶ مقادیر EC پساب ورودی به ستون‌ها و نمونه‌های خروجی از انتهای آن‌ها در مرحله‌های مختلف نمونه‌برداری دیده می‌شود. با توجه به این شکل، با گذشت مدت زمان غرقابی، مقدار نسبی EC نمونه‌های خروجی افزایش می‌یابد. با درنظر گرفتن این نکته و افزایش مقدار EC خاک پس از ۴۰ روز، می‌توان نتیجه گرفت که با گذشت زمان بر تجمع نمک در خاک افزوده می‌شود و با افزایش زمان کاربرد فاضلاب، مقدار شوری نمونه‌های خروجی افزایش می‌یابد.



شکل ۶ مقادیر میانگین EC پساب ورودی (A) و خروجی از انتهای ستون بدون پوشش (B)، ستون دارای پوشش ژئوتکستایل (C) و ستون با پوشش مصالح (D) در طول دوره آزمایش

www.SID.ir

Archive of SID

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که:

- خاک توانایی مناسبی در کاهش مقادیر مواد جامد معلق، BOD_5 و COD دارد.
- مقدار pH نمونه‌های خروجی نسبت به مقادیر پساب ورودی آن کاهش یافت. تجزیه مواد آلی موجود در فاضلاب‌ها با گذشت زمان و همچنین پدیده نیتریفیکاسیون، از جمله عامل‌های مؤثری هستند که می‌توانند سبب کاهش pH نمونه‌های خروجی در طول زمان شوند. مقدار pH در زهاب‌های خروجی از عمق‌های مختلف نیز تا حدودی با افزایش روبرو شد که ناشی از بالاتر بودن مقدار آن در خاک در مقایسه با پساب است.
- استفاده از لایه‌ای از ژئوتکستایل روی سطح خاک، تأثیر زیادی در حذف آلاینده‌ها به‌خصوص مواد جامد معلق، BOD_5 و COD دارد.

منابع

۱. توکلی م. و طباطبایی م. ۱۳۷۸. آبیاری با فاضلاب تصفیه شده. مجموعه مقالات همایش جنبه‌های زیست‌محیطی استفاده از پساب‌ها در آبیاری. وزارت نیرو، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱ آذرماه ۱۳۷۸، تهران. ۳۵-۵۲.

۲. حسن‌اقلی ع. ۱۳۸۱. استفاده از فاضلاب‌های خانگی و پساب تصفیه‌خانه‌ها در آبیاری محصولات کشاورزی و تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی. رساله دکتری، دانشگاه تهران. ۳۸۵ ص.

۳. حسن‌اقلی ع. و لیاقت ع. ۱۳۸۸. تأثیر اجرای عملیات تغذیه مصنوعی با فاضلاب تصفیه شده شهرک اکباتان بر انتقال آلاینده‌های معدنی و بیولوژیک به آبخوان کم‌عمق. مجله علوم آب و خاک. ۱: ۱۴۳-۱۵۱.

۴. حسین‌پور ا. حق‌نیا غ. علیزاده ا. و فتوت ا. ۱۳۸۷. بررسی انتقال برخی عناصر به عمق خاک پس از آبیاری با فاضلاب خام و پساب شهری در دو شرایط غرقاب پیوسته. نشریه آب و خاک ۲۲: ۱۱۷-۱۳۲.

۵. حسین‌پور ا. حق‌نیا غ. علیزاده ا. و فتوت ا. ۱۳۸۸. بررسی تغییرات کیفیت شیمیایی فاضلاب خام و پساب شهری در اثر عبور از ستون‌های خاک. نشریه آب و خاک. ۲۳: ۴۵-۵۶.

6. Anonymous. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th edition, American Public Health Association (APHA), USA. 362 p.
7. Bdour A. M. N. Hamdi M. R. and Tarawneh Z. 2009. Perspectives on sustainable wastewater treatment technologies and reuse options in the urban areas of the Mediterranean region. Desalination. 237 (1-3):162-174.
8. Bouwer H. Rice R. C. Lance J. C. and Gilbert R. G. 1980. Rapid-infiltration research at flushing meadows project, Arizona. Journal of Water Pollutant. Control Federation. 52:2457-2470.
9. Carlson G. and Silverstein J. 1998. Effect of molecular size and charge on biofilm sorption of organic matter. Water Research. 32(5):1580-1592
10. Cha W. Kim J. and Choi H. 2006. Evaluation of steel slag for organic and inorganic removals in soil aquifer treatment. Water Research. 40(5):1034-1042.
11. Essandoh H. M. K. Tizaoui C. Mohamed M. H. A. Amy G. and Brdjanovic D. 2011. Soil aquifer treatment of artificial wastewater under saturated conditions. Water Research 45(11):4211-4226.
12. FAO. 1999. Wastewater treatment and use in agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, FAO. 47:276-292
13. Fox P. Houston S. Westerhoff P. Nellor M. Yanko W. Baird R. Rincon M. Gully J. Carr S. Arnold R. Lancey K. Quanrud D. Ela W. Amy G. Reinhard M. and Drewes J. E. 2006. Advances in soil aquifer treatment research for sustainable water reuse. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, Denver, CO. 58 p.
14. Kanarek A. Arohi A. and Michail M. 1993. Municipal wastewater reuse via soil aquifer treatment for no potable purposes. Water Science Technology. 27:53-61.
15. Kardos L. T. and Hook J. E. 1974. Phosphorous balance in a sewage effluent treated soil. Journal of Environmental Quality. 5(1):87-90.
16. Zhao Q. L. Wang L. N. Xue S. Liu Z. G. You S. J. and Wang S. H. 2007. Migration and removal of organic Matters in reclaimed wastewater during groundwater recharge. Applied Ecology. 18(7):1661-1664.

www.SID.ir