

آلوده‌زدایی آب زیرزمینی آلوده به شیرابه به وسیله لایه نفوذپذیر فعال

محمد بهشتیان اردکانی*^۱

mbeheshtian@aut.ac.ir

تقی عبادی^۲

تاریخ دریافت: ۹۰/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۱/۵/۲۲

چکیده

زمینه و هدف: یکی از چالش‌های مهم در بهره‌برداری از محل‌های دفن زباله شهری، جمع‌آوری و تصفیه شیرابه است. از آن جا که بیش‌تر نقاط ایران به دلیل اقلیم خشک و نیمه خشک با مشکل محدودیت منابع آب روبه‌رو است، مطالعه در زمینه آلوده‌زدایی از آب زیرزمینی آلوده به شیرابه حاصل از محل دفن زباله نیز دارای اهمیت فراوان می‌باشد.

در دهه اخیر، فعالیت‌های گسترده‌ای در خصوص توسعه و پیاده‌سازی موانع واکنش‌دهنده نفوذپذیر (PRB) صورت گرفته است که در این میان کاربرد این روش جهت آلوده‌زدایی از آب زیرزمینی آلوده به شیرابه هم‌چنان نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر است. به همین منظور در این مقاله ضمن بررسی این روش، نقش کربن فعال گرانولی و ژئولیت طبیعی به عنوان بسترهای رایج جهت حذف آلاینده آلی در آب زیرزمینی بررسی گردید.

روش بررسی: جهت انجام آزمایش، آب آلوده به شیرابه با CODهای ۶۹۰، ۱۹۱۰ و ۳۱۰۰ (mg/L) از مدل آزمایشگاهی مانع واکنش-دهنده نفوذپذیر پرشده با ماسه شسته شده، ژئولیت طبیعی و کربن فعال گرانولی، عبور داده شد و میزان حذف COD در هر یک از شرایط محاسبه گردید.

یافته‌ها: بیش‌ترین میزان حذف COD توسط کربن فعال گرانولی و بهترین عملکرد آن در غلظت آلاینده (mg/L) ۶۹۰ مشاهده گردید. هم‌چنین، اختلاف محسوسی در میزان کارایی حذف COD توسط ژئولیت، با ماسه مشاهده نشد.

نتیجه‌گیری: بنابراین، به منظور ایجاد شرایط بهینه مصرف مواد واکنش‌دهنده، پیشنهاد می‌شود این سیستم با ترتیب لایه‌های ژئولیت و کربن فعال، در فاصله‌ای مناسب از منبع آلودگی قرار گیرد تا علاوه بر حذف مناسب آلاینده توسط هر لایه، بتوان از حذف آلاینده توسط خاک بیش‌ترین استفاده را نمود.

واژه‌های کلیدی: لایه واکنش‌دهنده نفوذپذیر، آب زیرزمینی، شیرابه، ژئولیت، کربن فعال.

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر* (مسئول مکاتبات).

۲- استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Landfill Leaching-Contaminated Groundwater Remediation by Permeable Reactive Barrier

Mohammad Beheshtian Ardakani¹

mbeheshtian@aut.ac.ir

Taghi Ebadi²

Abstract

Background and Objective: Collection and treatment of landfill leaching is one of the most important challenges in the operation of municipal solid waste landfills. Since the most parts of Iran, due to the arid and semi-arid climate, are faced with the limited water resources, the study of landfill leaching-contaminated groundwater remediation is also very important.

In recent decades, extensive work has been done regarding the development and implementation of permeable reactive barriers (PRBs) but application of this method needs more investigations for landfill leaching-contaminated groundwater remediation. For this purpose, the groundwater remediation method by permeable reactive barriers was investigated in this paper. In addition, the granular activated carbon and natural zeolite were studied as a common media for the removal of organic pollutants in water.

Method: For the experiment, leaching-contaminated water with a COD of 690, 1910 and 3100 (mg/l) was passed from the experimental model of permeable reactive barrier, filled with washed sand, granular activated carbon and natural zeolite, and COD removal rate was calculated in each condition.

Findings: The highest COD removal was obtained by granular activated carbon and the best performance was in the 690 (mg/l) concentration pollutants. Also, significant differences were not observed in the rate of COD removal efficiency by zeolite compare to sand.

Discussion and Conclusions: Therefore, in order to optimize the use of reactive media, the system must be arranged with layers of zeolite and activated carbon respectively and in a suitable distance from pollution source so that removal of pollutants by the soil can be used in addition to the proper removal of pollutants by each layer.

Key words: Permeable Reactive Barrier, Groundwater, Landfill Leachate, Zeolite, Activated Carbon

1- PhD student of Civil-Environmental Engineering, Amir Kabir University of Technology (AUT), *(Corresponding Author)

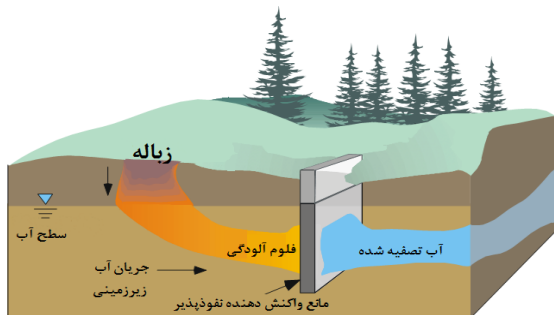
2- Assistant Professor, Amir Kabir University of Technology (AUT)

مقدمه

پایه سازی PRBها صورت گرفته است (۱۱ و ۱۰)، که در این میان کاربرد این روش جهت آلوده زدایی از آب زیرزمینی آلوده به شیرابه همچنان نیازمند بررسی های دقیق تر است. به همین منظور در این مقاله به بررسی روش آلوده زدایی از آب زیرزمینی آلوده، به وسیله موانع واکنش دهنده نفوذپذیر پرداخته شده و ضمن تشریح فرآیند، به نقش بسترهای رایج جهت حذف آلاینده های متفاوت در آب زیرزمینی اشاره شده است.

شرح تکنولوژی

لایه نفوذپذیر فعال (PRB)، که هم چنین دیواره تصفیه، دیواره تصفیه فعال و یا مانع نفوذپذیر نامیده می شود، تکنولوژی تصفیه ای است که به منظور تجزیه یا تثبیت آلاینده های موجود در آب زیرزمینی هنگام عبور جریان از میان مانع طراحی می گردد (شکل ۱). لایه به وسیله ساختن ترانشه ای در مقابل جریان عبوری آب زیرزمینی آلوده و پرکردن آن با بستر واکنش دهنده، در محل قرار داده می شود. با عبور آب زیرزمینی آلوده از میان PRB، آلاینده های موجود در آن تثبیت و یا به مواد غیر سمی تبدیل می شوند (۱۶-۱۲). بنابراین، PRB مانعی برای آب نیست، بلکه به عنوان مانعی برای عبور آلاینده ها می باشد.



شکل ۱- مانع نفوذپذیر واکنش دهنده برای تصفیه آب

زیرزمینی (۱۴).

Fig1- Permeable reactive barrier for groundwater treatment (14)

بسترهای واکنش دهنده موجود در موانع، شامل لایه هایی جهت تجزیه مواد آلی فرار، تثبیت فلزات و یا مواد مغذی و

آب زیرزمینی منبع محیط زیستی محدود و با ارزشی است که تنها درصد کوچکی از کل توزیع آب را تشکیل می دهد (۲ و ۱). در صورتی که مدیریت مناسبی صورت نگیرد، این منابع به میزان زیادی مستعد پذیرش آلودگی هستند (۳). گزارش های بسیاری از حوادث جدی آلودگی آب زیرزمینی به سبب سرریز شدن های اتفاقی مواد نفتی، دفع غیر رضایت بخش مواد شیمیایی صنعتی، فعالیت های کشاورزی، فعالیت های معدنی، دفع نامناسب پسماندهای شهری و غیره تاکنون ارائه گردیده است (۴ و ۵).

یکی از چالش های مهم در بهره برداری از محل های دفن زباله شهری، جمع آوری و تصفیه شیرابه است (۶). عدم کنترل و مدیریت مناسب شیرابه حاصل از محل های دفن زباله می تواند اثرات مخرب زیست محیطی را برای محیط های پذیرنده از جمله آب های زیرزمینی و سطحی به دنبال داشته باشد (۷). از آن جا که بیش تر نقاط ایران به دلیل اقلیم خشک و نیمه خشک و کمبود بارش های جوی با مشکل محدودیت منابع آب روبه رو است، مدیریت صحیح شیرابه به عنوان یکی از مهم ترین آلاینده های منابع آب زیرزمینی همواره بسیار قابل توجه بوده و از این رو، مطالعه در زمینه آلوده زدایی از آب زیرزمینی آلوده به شیرابه حاصل از محل دفن زباله نیز حایز اهمیت فراوان می باشد.

تلاش های اولیه در پاک سازی آب زیرزمینی با مقیاس بزرگ در اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز گردید. نتایج حاصل از این تلاش ها به ندرت کاهش مورد انتظار در سطوح آلودگی را ارائه می کردند. مطالعات انجام شده توسط آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده (EPA) (۸ و ۹) مشخص نمود که تکنولوژی های پمپاژ و تصفیه متداول (P&T) (پمپاژ نمودن آب و تصفیه آن روی سطح) به ندرت سبب بازگرداندن سایت های حاوی آب زیرزمینی آلوده به شرایط اولیه گردیده اند. یکی از تکنولوژی های آلوده زدایی نوید بخش، استفاده از موانع واکنش دهنده نفوذپذیر (PRBs) پر شده با مواد واکنش دهنده، جهت به دام انداختن و حذف آلودگی از فولوم آلوده در زیر سطح است. در دهه اخیر، فعالیت های گسترده ای در خصوص توسعه و

فعال هستند. محصولات می که به صورت غیر محلول در آب زیرزمینی در حرکتانند، در داخل مانع پایین آمده و ته نشین می‌شوند (۱۸). به طور کلی، انواع مواد واکنش‌دهنده استفاده شده برای ساخت موانع واکنش‌دهنده نفوذپذیر، عبارتند از آن‌هایی که موجب تغییرات pH یا پتانسیل اکسیداسیون و احیاء می‌گردند، آن‌هایی که موجب ترسیب می‌شوند، موادی با ظرفیت جذب بالا و آن‌هایی که مواد مغذی/اکسیژن را به منظور ارتقاء تجزیه بیولوژیکی به سیستم وارد می‌کنند (۱۹). مطالعه انجام شده توسط USEPA (۱۴)، مواد واکنش‌دهنده را بر اساس آلاینده هدف و مکانیزم حذف دسته‌بندی کرده است (جدول ۱).

اکسیژن به منظور تسریع فرایند آلوده‌زدایی بیولوژیکی بوده (۱۷) و اغلب به صورت ترکیب شده با مواد متخلخل نظیر ماسه به منظور بالابردن جریان آب زیرزمینی در داخل مانع به کار می‌روند. موانع نفوذپذیر ممکن است به صورت مانع فعال پیوسته و یا به صورت سیستم قیف و دروازه کار گذاشته شوند (۱۴).

انتخاب بسترهای واکنش‌دهنده به نوع آلاینده مورد نظر برای تصفیه بستگی دارد. تصفیه به وسیله بسترهای واکنش-دهنده از طریق فرآیندهای جذب، ترسیب و تجزیه انجام می‌شود. فرآیند جذب سبب حذف آلاینده‌ها از آب زیرزمینی به وسیله جذب شدن فیزیکی آلاینده بر روی سطوح بسترهای فعال می‌گردد. نمونه‌هایی از این مواد جاذب زئولیت‌ها و کربن

جدول ۱- مواد واکنش‌دهنده دسته‌بندی شده بر اساس آلاینده هدف و مکانیزم حذف (۱۴).

Table 1- Classified reactive substances based on the pollutant target and removal mechanism (14)

آلاینده هدف و مکانیزم حذف	مواد واکنش‌دهنده
مواد غیر آلی - موانع جذب‌کننده یا جایگزین‌کننده	کربن فعال، آلومینیای فعال، با اکسیت، رزین جایگزین‌کننده، اکسیدهای فریک و اکسی هیدرواکساید، مگنتایت، کودگیاهی، هیومیت، ذغال، ذغال سنگ، فسفات‌ها، دی‌اکسید تیتانیوم، زئولیت
مواد غیر آلی - موانع ترسیب‌کننده	مواد گیاهی، دی‌تیونیت، هیدرواکسیدهای فروس، فروس کربونیت‌ها، فروس سولفاید، گاز هیدروژن سولفاید، آهک، خاکستر، سنگ آهک، میسلانوس، $Mg(OH)_2$ ، $MgCO_3$ ، $CaSO_4$ ، $BaSO_4$ ، $BaCl_2$ ، فلزات با ظرفیت صفر
مواد غیر آلی - موانع تجزیه‌کننده	مواد گیاهی، فلزات با ظرفیت صفر
مواد آلی - موانع تجزیه‌کننده	فروس‌های معدنی، آزادکننده‌های اکسیژن، باکتری‌های بسیار ریز، فلزات با ظرفیت صفر
مواد آلی - موانع جذب‌کننده	زئولیت، کربن فعال، رس‌ها

ساختار سه بعدی آلومینوسیلیکات‌های حاوی مولکول‌های آب، فلزات زمینی آلکانی و آلکالین در چهارچوب ساختاری خود هستند (۲۳). این مواد معدنی دارای ظرفیت‌های بسیار بالای تعویض یونی، جذب‌کنندگی، کاتالیستی، غربال‌کنندگی مولکولی هستند که پتانسیل مفید بودن آن‌ها را به عنوان ماده معدنی تصفیه‌کننده برای استفاده در PRB‌ها بالا می‌برد (۲۴ و ۲۵). با توجه به مطالعه پیشینه استفاده از کربن فعال و زئولیت در رفع آلودگی از آب‌های زیرزمینی، مشاهده گردید تحقیقات چندانی در خصوص استفاده از این مواد جهت حذف آلودگی آلی، ناشی از ورود شیرابه به آب زیرزمینی، صورت

کربن‌های فعال مواد شیمیایی پایداری هستند که به طور گسترده به عنوان جاذب مناسب برای تصفیه آب زیرزمینی آلوده در سایت یا خارج از آن مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۰). این ماده ظرفیت جذب‌کنندگی بالایی را برای بسیاری از آلاینده‌های آلی و غیر آلی، بیش‌تر به دلیل مساحت سطح بالایی که دارد (حدود $1000 \text{ m}^2/\text{g}$) و وجود انواع مختلفی از گروه‌های فعال سطحی (هیدروکسیل، کربنیل، لاکتن، اسید کربوکسیلیک و غیره)، ایجاد می‌نماید (۲۱). به شکل گرانولی، کربن فعال به صورت بسیار مؤثری برای استفاده در موانع نفوذپذیر ظاهر می‌شود (۲۲). زئولیت‌ها تکتوسیلیکات‌هایی با

نگرفته است. بنابراین در این مقاله، از آزمایش ستونی به منظور مطالعه میزان کارایی این مواد استفاده شد.

آلی بهره‌برداری گردید. آنالیز شیمیایی زئولیت استفاده شده در این تحقیق در جدول (۴) ارائه گردیده است.

روش بررسی

۱. مواد به کار رفته

به منظور تهیه نمونه آزمایشگاهی، شیرابه زباله (جدول ۲) از مرکز دفن زباله کهریزک، واقع در جنوب شهر تهران، تهیه گردید و با توجه به غلظت آلاینده آلی مورد نظر برای آزمایش، با آب چاه ترکیب شد. جهت تهیه بستر، از ماسه شسته شده غیر یکنواخت (۲۶)، با قطر متوسط 0.76 ± 2 mm استفاده گردید. هم‌چنین از کربن فعال گرانولی و زئولیت طبیعی (جدول ۳) به عنوان لایه واکنش‌دهنده نفوذپذیر جهت حذف آلاینده

جدول ۲- مشخصات شیرابه به کاررفته جهت تهیه نمونه

آب زیرزمینی

Table 2- Specifications of landfill leachate used to prepare the groundwater sample

ویژگی	مقدار
COD	۵۲۳۰۰ (mg/L)
BOD ₅	۱۸۰۰۰ (mg/L)
pH	۶/۸۴
TDS	۲۹۵۰۰ (mg/L)
EC	۳۴/۷ (mS/cm)

جدول ۳- مشخصات مواد به کاررفته جهت تهیه بستر

Table 3- Specifications of the materials used to prepare the media of the reactor

ماده	ماسه شسته شده	کربن فعال گرانولی	زئولیت طبیعی (۲۳)
مشخصات	<ul style="list-style-type: none"> جهت تهیه بستر خاک $d_{50} = 0.76 \pm 2$ mm $\rho = 2.64$ (gr/cm³) n = 0.4 تخلخل 	<ul style="list-style-type: none"> جهت تهیه بستر واکنش-دهنده $d_{50} = 1.85 \pm 2$ mm $\rho = 1.43$ (gr/cm³) در آب n = 0.4 تخلخل 	<ul style="list-style-type: none"> جهت تهیه بستر واکنش‌دهنده $d_{50} = 0.70 \pm 2$ mm $\rho = 2.16$ (gr/cm³) n = 0.4 تخلخل

جدول ۴- آنالیز شیمیایی کانی زئولیت استفاده شده

Table 4- Chemical analysis of the zeolite used in this research

عنصر	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	L.O.I.*
درصد	۶۸	۱۱/۵	۱/۸	۱/۹	۲/۵	۱/۵	۱۲/۲

* Loss in Ignition

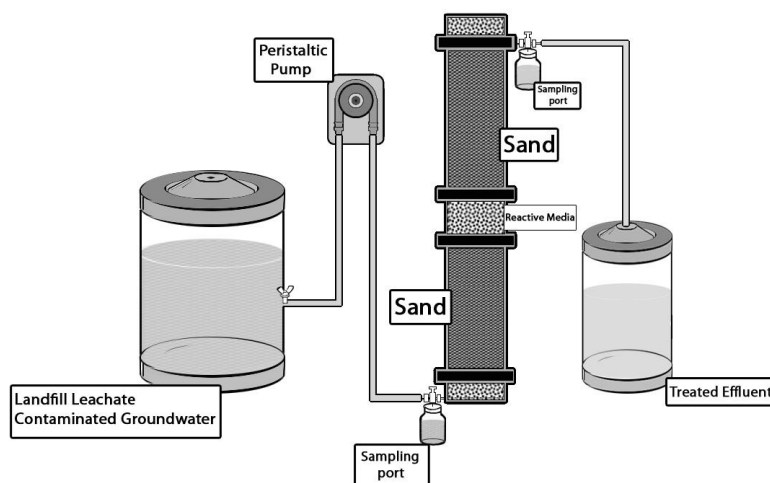
۲. وسایل به کار رفته

راکتور شبیه‌ساز موانع واکنش‌دهنده نفوذپذیر استفاده شده در این پژوهش، از جنس پلکسی گلاس (Plexiglass) (۲۷)، با سطح مقطع دایره‌ای شکل به قطر ۵cm، به منظور جلوگیری از اثر دیواره‌ها (۲۸)، مطابق شکل (۲)، از سه بخش مجزا تشکیل گردیده است. دو بخش ابتدا و انتهای آن به طول ۱۵cm، حاوی ماسه شسته شده با تخلخل مشخص، به منظور مشابه-

سازی رفتار بستر خاک و بخش میانی آن به طول ۵cm، حاوی بستر واکنش‌دهنده مورد بررسی در این پژوهش است. جهت مشابه‌سازی سرعت آب زیرزمینی از پمپ پرستاتیک (Peristaltic) (۲۳)، با دبی (۰/۵۵ l/h) استفاده شد. میزان اکسیژن خواهی شیمیایی نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکتروفتومتر

(HACH, DR 4000, USA) و مقادیر pH نیز توسط

pHسنج (340i, WTW, Germany) کنترل گردید.



شکل ۲- طرح نمونه‌وار مانع نفوذپذیر واکنش‌دهنده استفاده شده برای تصفیه آب زیرزمینی

Fig 2- Schematic design of permeable reactive barrier used for the treatment of groundwater

واکنش‌دهنده، میزان COD موجود در پساب خروجی به ازای هر واحد حجم خالص (PVN)، که نشان‌دهنده نسبت حجم آب تجمع‌یافته با زمان به حجم خالص بستر است (۳۰)، مطابق استاندارد متد آنالیز آب و فاضلاب انجام گرفت (۳۱).

یافته‌ها

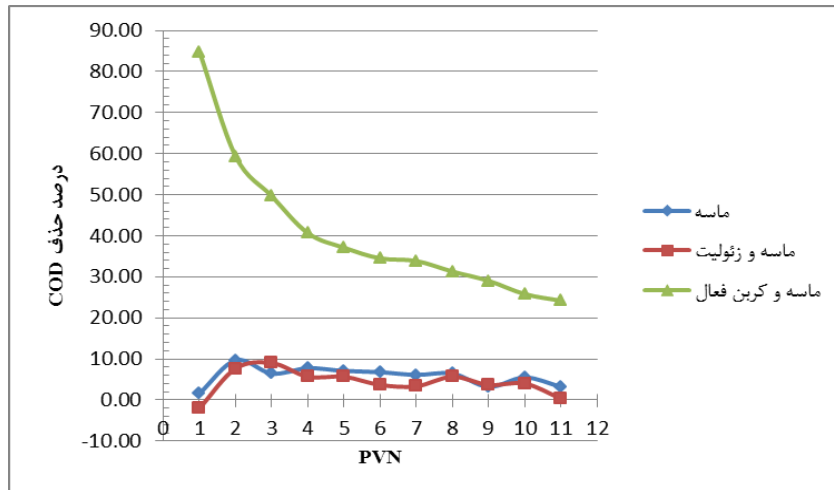
غلظت COD خروجی از مدل آزمایشگاهی برای هر سه غلظت ۶۹۰، ۱۹۱۰ و ۳۱۰۰ (mg/L)، به ترتیب در نمودارهای (۱، ۲ و ۳) نشان داده شده است. جهت اطمینان و بررسی قابلیت تکرارپذیری داده‌های به‌دست آمده، آزمایشات سه مرتبه تکرار گردید و اختلاف کم‌تر از $\pm 3\%$ گویای شرایط مطلوب برای بررسی نتایج به دست آمده است. در ادامه میانگین حاصل از آزمایشات انجام شده به عنوان نتیجه نهایی آزمایش لحاظ گردید و مشاهده شد که میزان حذف COD توسط کربن فعال گرانولی، به واسطه تمایل بالای آن به حذف مواد آلی، در تمامی غلظت‌ها بیش‌تر از میزان حذف COD توسط زئولیت و ماسه می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که میزان حذف آلاینده توسط زئولیت، در غلظت‌های بررسی شده، تفاوت چندانی با میزان حذف صورت گرفته توسط ماسه شسته شده نداشته و تنها با کاهش غلظت آلاینده، میزان حذف توسط زئولیت اندکی

۳. طرح و عملیات آزمایشگاهی

در این مطالعه، نمونه آب زیرزمینی با سه غلظت ۶۹۰، ۱۹۱۰ و ۳۱۰۰ (mg/L)، بر مبنای اکسیژن خواهی شیمیایی (COD)، به وسیله اختلاط نمونه شیرابه و آب چاه تهیه شد. سپس برای هر یک از این نمونه‌ها، سه آزمایش با ترکیب متفاوت از بسترهای موجود انجام گردید. در آزمایش اول، تنها از ماسه شسته شده استفاده شد، به‌گونه‌ای که راکتور مذکور با ماسه دانه‌بندی شده پر شده و جهت رسیدن به میزان تخلخل مورد نظر کوبیده شد. در آزمایش‌های دوم و سوم، مطابق آزمایش اول، از ماسه برای پر نمودن قسمت‌های ابتدا و انتهای راکتور استفاده گردید و در قسمت میانی، به منظور بررسی میزان کارایی لایه واکنش‌دهنده، به ترتیب از کربن فعال گرانولی و زئولیت طبیعی استفاده شد. به منظور مشابه‌سازی رفتار آب زیرزمینی و اطمینان از توزیع یکنواخت جریان در راکتور، نمونه آب به صورت جریان رو به بالا (۲۹)، با دبی ثابت (۰/۵۵ l/h) توسط پمپ پرستالتیک وارد راکتور گردید. هم‌چنین در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی سیستم از ماسه شسته‌شده با دانه‌بندی ۲/۳۶ mm و صفحه مشبک با قطر حفرات ۲ mm برای توزیع مطلوب‌تر جریان استفاده شد. جهت بررسی کارایی موانع

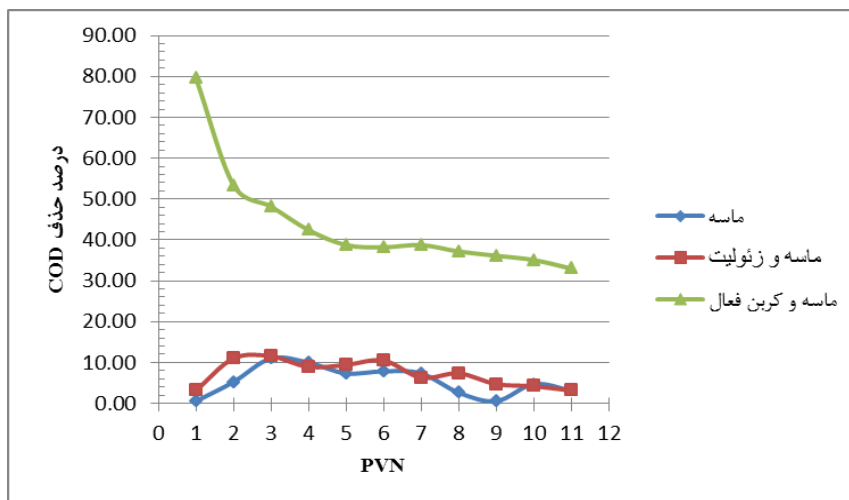
غلظت آلودگی جهت حذف آلاینده آلی از طریق جذب آن بر روی سطح زئولیت باشد.

افزایش یافته است (نمودار ۲ و ۳). این امر می‌تواند ناشی از عدم مدت زمان کافی برای تماس زئولیت با آب آلوده و نیز بالا بودن



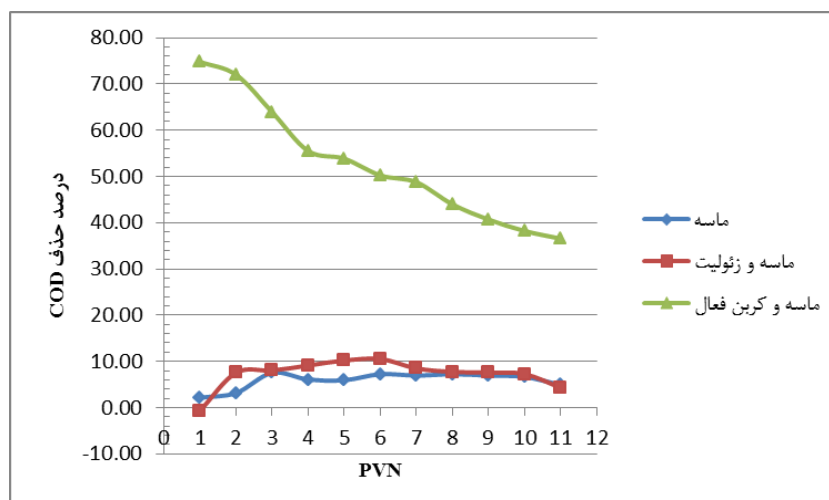
نمودار ۱- درصد حذف COD خروجی از سیستم با غلظت ورودی (mg/L) ۳۱۰۰

Diagram 1- The COD removal percent of the system output with input concentrations of 3100 (mg/L)



نمودار ۲- درصد حذف COD خروجی از سیستم با غلظت ورودی (mg/L) ۱۹۱۰

Diagram 2- The COD removal percent of the system output with input concentrations of 1910 (mg/L)

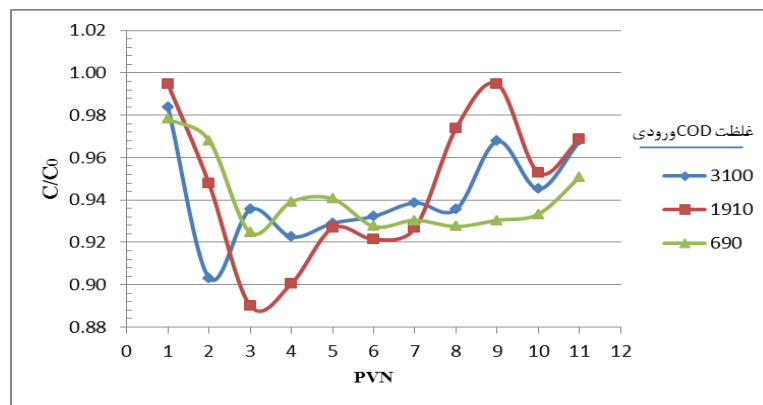


نمودار ۳- درصد حذف COD خروجی از سیستم با غلظت ورودی (mg/L) ۶۹۰

Diagram 3- The COD removal percent of the system output with input concentrations of 690 (mg/L)

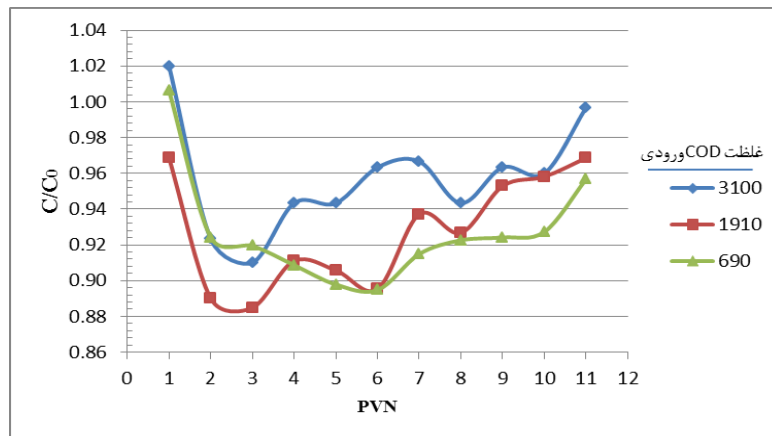
یابد. همچنین این نوسانات با افزایش میزان غلظت آلاینده ابتدایی تشدید می‌شود. بیش‌ترین میزان حذف آلودگی توسط بستر پرشده با کربن فعال مشاهده گردید، به‌گونه‌ای که مطابق نمودار (۶)، در ابتدا بازدهی حذف آلاینده در تمامی غلظت‌ها بالا بوده و به تدریج با کاهش واکنش‌پذیری سطح کربن فعال به کار رفته به عنوان بستر واکنش‌دهنده، از کارایی سیستم کاسته می‌شود. در نهایت مشاهده می‌شود که کربن فعال به کار رفته برای غلظت آلودگی (mg/L) ۶۹۰ بهترین بازدهی را به نسبت سایر غلظت‌ها دارا می‌باشد. تفاوت موجود در روند حذف آلاینده آلی توسط کربن فعال با زئولیت و ماسه به این دلیل است که حذف آلاینده آلی توسط کربن فعال به واسطه جذب شیمیایی آن روی سطح کربن صورت گرفته و در نتیجه روند تغییرات سینتیک حذف با استفاده از کربن فعال در مقایسه با سینتیک حذف صورت گرفته توسط ماسه و زئولیت، که فرایند غالب حذف در آن‌ها غربال شدن فیزیکی است، کاملاً متفاوت می‌باشد (۳۳)

نمودار (۴) نشان‌دهنده روند تغییرات COD خروجی به ورودی، در بستر پرشده با ماسه شسته شده، با افزایش نسبت حجم آب تجمع‌یافته با زمان به حجم خالص بستر (PVN) در غلظت‌های مختلف است. مشاهده گردید که در تمامی غلظت‌ها، سیستم در ابتدا بازدهی اندکی داشته است. این امر ناشی از خروج مواد آلی موجود در دانه‌بندی استفاده شده در بستر بوده و با شسته شدن سیستم، پس از عبور دو تا سه واحد حجم خالص آب (PVN)، بازدهی سیستم افزایش می‌یابد. این روند به طور مشابه در خصوص بستر پرشده با زئولیت طبیعی نیز مشاهده گردید (نمودار ۵). در ادامه، روند حذف آلودگی تقریباً پایدار شده و با گرفتنی بستر، به تدریج از بازدهی سیستم کاسته می‌شود (۳۲). همچنین، با توجه به نمودارهای (۴ و ۵) مشاهده می‌شود که پدیده واجذبی موجب پدیدار شدن نوساناتی در حذف آلاینده آلی توسط این مواد شده است، به‌گونه‌ای که پس از حذف ابتدایی آلاینده، با پرشدن ظرفیت بستر، از کارایی سیستم کاسته شده و پس از طی یک دوره زمانی، با خارج شدن آلاینده‌ها، مجدداً بازدهی حذف بهبود می‌-



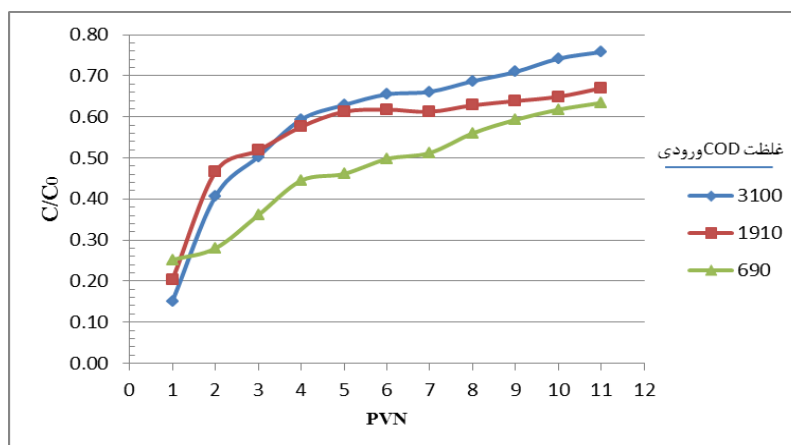
نمودار ۴- تغییرات COD خروجی به ورودی در بستر پرشده با ماسه شسته شده

Diagram 4- The COD variations between the output and input of the system in the bed media filled with washed sand



نمودار ۵- تغییرات COD خروجی به ورودی در بستر پرشده با زئولیت

Diagram 5- The COD variations between the output and input of the system in the bed media filled with zeolite



نمودار ۶- تغییرات COD خروجی به ورودی در بستر پرشده با کربن فعال

Diagram 6- The COD variations between the output and input of the system in the bed media filled with activated carbon

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، آب آلوده به شیرابه با CODهای ۶۹۰، ۱۹۱۰ و (mg/L) ۳۱۰۰، از مدل آزمایشگاهی مانع واکنش‌دهنده نفوذپذیر، پرشده با ماسه شسته شده، زئولیت طبیعی و کربن فعال گرانولی، عبور داده شد و میزان حذف COD در هریک از شرایط محاسبه گردید. نتایج حاصل از این آزمایشات نشان داد که بیشترین میزان حذف COD توسط کربن فعال گرانولی و بهترین عملکرد آن در غلظت آلاینده (mg/L) ۶۹۰ بوده است. همچنین، اختلاف محسوسی در میزان کارایی حذف COD توسط زئولیت، با ماسه مشاهده نشد. بنابراین، به منظور ایجاد شرایط بهینه مصرف مواد واکنش‌دهنده، پیشنهاد می‌شود این سیستم با ترتیب لایه‌های زئولیت و کربن فعال، در فاصله‌ای مناسب از منبع آلودگی قرار گیرد تا علاوه بر حذف مناسب آلاینده توسط هر لایه، بتوان از حذف آلاینده توسط خاک بیشترین استفاده را نمود.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با مساعدت و همکاری کارشناس آزمایشگاه محیط زیست دانشگاه صنعتی امیرکبیر، خانم لیدا عزالدین لو انجام گردید. نویسندگان این مقاله بدین وسیله مراتب تقدیر و سپاس‌گذاری خود را از ایشان و شرکت افرازند جهت تهیه زئولیت استفاده شده در این تحقیق اعلام می‌نمایند.

منابع

- Natural Environment Research Council (NERC).
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1990, *Civilian's Guide to Groundwater Protection*, EPA 440/6-90-004.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2002, *Field Applications of In Situ Remediation Technologies: Permeable Reactive Barriers*, Washington, DC.
- Woinarski, A.Z., 2004, *Development of a natural zeolite permeable reactive barrier for the treatment of contaminated waters in Antarctica*, PhD thesis, University of Melbourne.
- Gupta, S. K., Singh, G., 2007, *Assessment of the efficiency and economic viability of various methods of treatment of sanitary landfill leachate*, Environmental Monitoring and Assessment, Vol.135, pp.107-117.
- Fatta, D., Papadopoulou, A., Loizidou, M., 1999, *A study on the landfill leachate and its impact on the groundwater quality of the greater area*, Environmental Geochemistry and Health, Vol. 21, pp. 175-190.
- USEPA, 1989, *Evaluation of Groundwater Extraction Remedies*, vol. 1 and 2, EPA Office of Emergency and Remedial Responses, Washington, DC.
- USEPA, 1992, *Evaluation of Groundwater Extraction Remedies: Phase II*, vol.1, Summary Report, Publication 9355.4-05, EPA Office of Emergency and Remedial Responses, Washington, DC.
- Scherer, M.M., Richter, S., Valentine, R.L., Alvarez, P.J.J., 2000, *Chemistry and microbiology of permeable reactive barriers for in situ*
- Foster, S.S.D., Sililo, O., 2000, *Groundwater-Past Achievements and Further Challenges*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.27.
- UNEP, 2003, *Groundwater and its susceptibility to degradation: a global assessment of the problem and options for management*, early warning and assessment report series, UNEP/DEWA/RS, 03-3, joint publication from United Nations Environment Programme, Department for International Development and the

18. Sharma, Hari D., Reddy, Krishna R., 2004, *Geoenvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Contaminant, and Emerging Waste Technologies*, John Wiley & Sons, Inc.
19. PEREBAR, 2002, 5th Framework Programme Research and Technology Development Project on Long-term Performance of Permeable Reactive Barriers Used for the Remediation of Contaminated Groundwater, PEREBAR EVK1-CT-1999-00035, National Technical University of Athens, Greece.
20. Foo, K.Y., Hameed, B.H., 2009, *An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process*, Review, Journal of Hazardous Materials, Vol. 171, pp. 54–60.
21. Corapcioglu, M.O., Huang, C.P., 1987, *the Surface Acidity and Characterization of Some Commercial Activated Carbons*, Carbon, Vol. 25, pp. 569-578.
22. Han, I., Schlautman, M.A., Batcherlor, B., 2000, *Removal of Hexavalent Chromium from Groundwater by Granular Activated Carbon*, Water and Environmental Research, Vol. 72 (1), pp. 29-39.
23. Woinarski, A. Z., Stevens, G.W., Snape, I., 2006, A natural zeolite permeable reactive barrier to treat heavy metal contaminated waters in Antractica, Kinetic and Fixed-bed Studies, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 84(B2): pp. 109–116.
24. Roehl, K.E., Meggyes, T., Simon, F.G., Stewart, D.I., 2005, *Long-term Performance of Permeable Reactive Barriers*, Elsevier Publishers.
25. ITRC, 2005, *Permeable Reactive Barriers: Lessons Learned/New groundwater cleanup*, Environmental Science. Technology, Vol. 30 (3), pp. 363-411.
11. Thriuvenkatachari, R., Vigneswaran, S., Naidu, R., 2008, *Permeable reactive barrier for groundwater remediation*, Review, Industrial Engineering Chemistry, Vol. 14, pp. 145-156.
12. USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1995c, *Assessment of barrier containment technologies*, presented at the International Containment Technology Workshop, Baltimore, MD, Aug. 29-31.
13. USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1996c, *A Citizen's Guide to Treatment Walls*, EPA 542-F-96-016, USEPA, Washington, DC, Sept.
14. USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1998c, *Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation*, EPA/600/R-98/125, Office of Research and Development, USEPA, Washington, DC.
15. USACE (U.S. Army Corps of Engineers), 1997b, *Design Guidance for Application of Permeable Barriers to Remediate Dissolved Chlorinated Solvents*, CEMP DG 1110-345-117, U.S. Department of the Army, Washington, DC, Feb.
16. Vidic, R.D., and Pohland, F.G., 1996, *Technology Evaluation Report: Treatment Walls*, Groundwater Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA.
17. Bowman, R., 1999, *Pilot-scale testing of a surfactant-modified zeolite PRG*, Groundwater Currents.

30. Jun, D., Yongsheng, Z., Weihong, Z., Mei, H., 2009, *Laboratory study on sequenced permeable reactive barrier remediation for landfill leachate-contaminated groundwater*, Journal of Hazardous Materials, Vol. 161, pp. 224-230.
31. APHA, AWWA, WPCF, 1992, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th Ed, Washington DC, USA.
32. Ansari Mahabadi, A., Hajabbasi, M.A., Khademi, H., Kazemian, H., 2007, *Soil cadmium stabilization using an Iranian natural zeolite*, Geoderma Vol. 137, pp. 388-393.
33. Metcalf and Eddy, 2004, *Wastewater Engineering, treatment and Reuse*, 4th ed, McGraw Hill.
- Directions. Technical/Regulatory Guidelines, ITRC, Washington, DC.
26. Mossa Hosseini, S., Ataie Ashtiani, B., Kholghi, M, 2011, *Bench-Scaled Nano-Fe⁰ Permeable Reactive Barrier for Nitrate Removal*, Ground Water Monitoring & Remediation.
27. Gavaskar, Arun R., 1999, Design and construction techniques for permeable reactive barriers, Journal of Hazardous Material, Vol. 68, pp. 41-71.
28. Helfferich, F., 1962, *Ion Exchange* (McGraw-Hill, Japan).
29. Chi-Hui Yeh, Chi-Wen Lin, Chih-Hung Wu, 2010, *A permeable reactive barrier for the bioremediation of BTEX-contaminated groundwater: Microbial community distribution and removal efficiencies*, Journal of Hazardous Materials, Vol.178, pp. 74-80.