



پایش حرکت MTBE در محیط متخلخل با استفاده از مدل آزمایشگاهی

مهران قهرمانی تبار^۱، حسین خلفی^۲، کیومرث ابراهیمی^{۳*}، زهرا مردانی^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه تهران

۲- دانشیار پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای ایران

۳- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول: EbrahimiK@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۰۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۳

چکیده

نتایج به دست آمده از مطالعه آزمایشگاهی حمل و جابجایی متیل ترشیو بوتیل اتر در محیط خاک غیر اشباع با استفاده از یک مدل دوبعدی قائم ارائه شده است. متیل ترشیو بوتیل اتر با غلظت ۲۰۰ میلی گرم در لیتر از نقطه میانی مرز بالایی مدل رها سازی شد و غلظت جابجایی آن در زمان های مختلف با روش کروماتوگرافی گازی اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که حرکت عمودی آلودگی بیشتر از حرکت افقی آن است. به طور مثال در فاصله عمودی ۵ سانتی متری از نقطه رها سازی پس از ۱۰ دقیقه از شروع آزمایش غلظت ماده مذکور برابر ۱۳۵ میلی گرم در لیتر ثبت و در همین نقطه پس از ۱۳۳ دقیقه غلظت به ۱۸۸ میلی گرم بر لیتر افزایش یافت. در نقطه دیگری در فاصله عمودی ۱۵ سانتی متر پس از ۲۵ دقیقه از شروع آزمایش غلظت ۱۲۰ میلی گرم بر لیتر و در زمان ۱۳۳ دقیقه ای به ۱۸۵ میلی گرم در لیتر رسید. همچنین در نقطه ای به فاصله عمودی ۳۰ سانتی متر پس از ۱۰۰ دقیقه غلظت آلودگی ۱۲۷ میلی گرم بر لیتر و در انتهای آزمایش ۱۴۸ میلی گرم در لیتر ثبت شد. در یک جمع بندی پس از ۱۰ الی ۲۵ دقیقه ظرفیت جذب آلاینده توسط خاک به حداکثر رسید و آلودگی به همراه آب جابجا شد و غلظت آلاینده در نقاط نمونه گیری اندازه گیری شد. با شروع حرکت آلودگی در جهت افقی و عمودی، میزان غلظت آلاینده رها سازی شده افزایش می یابد و این روند افزایشی در جهت حرکت عمودی بیشتر از افقی است. بنابراین MTBE بیشتر تمایل به جابجایی با آب دارد تا در خاک جذب شود.

واژه های کلیدی: آلودگی نفتی، انتقال آلاینده، شبیه سازی فیزیکی، کروماتوگرافی، MTBE.

مقدمه

(al., 2009). حرکت نسبتاً کند مواد آلی در آب های زیرزمینی بر اساس مکانیسم های متعددی از قبیل جذب سطحی مواد به ذرات خاک می باشد. ترکیبات آلی همانند متیل ترشیو بوتیل اتر، خصوصاً زمانی که ذرات خاک حاوی مقدار زیادی کربن آلی باشند به سرعت جذب آب خواهند شد. بر اساس یک بررسی انجام شده تنها ۸ درصد از متیل ترشیو بوتیل اتر موجود در سفره های آب جذب خاک و ذرات جامد می گردد (اسدالله فردی

متیل ترشیو بوتیل اتر با فرمول شیمیایی $C_5H_{12}O$ یکی از ترکیبات نفتی است که به عنوان مکمل سوخت اکسیژن دار برای بهسوزی و نیز جایگزینی تترائیل سرب به منظور دستیابی به احتراق بهتر استفاده می شود (Aivalioti et al., 2012). از ویژگی های آن می توان به سخت تجزیه پذیر بودن، حلالیت بالا و قابلیت نفوذ پذیری در آب های زیرزمینی اشاره کرد (Adave et

و همکاران، ۱۳۸۹). در سال‌های اخیر آژانس حفاظت محیط زیست ایالات متحده^۵ مطالعاتی را در مورد خطرات متیل ترشیو بوتیل اتر انجام داده و این ماده را به‌عنوان یک ماده مضر با احتمال سرطان‌زایی بالا طبقه‌بندی کرده است (بارگف و همکاران، ۲۰۱۰). ورود این آلاینده به منابع آب و خاک از راه های مختلف از جمله: نشت از تانک‌های زمینی ذخیره مواد نفتی، تصادفات جاده‌ای حین حمل و نقل، نشت این ماده از تأسیسات پتروشیمی‌ها، نشت از پمپ بنزین‌ها، فرآیندهای تولید محصولات در پالایشگاه و خطوط لوله انجام می‌شود (Liga et al., 2004). تابع بردبار و همکاران (۱۳۹۲) خاک رسی کائولینیت را در آزمایشگاه با غلظت‌های مختلف متیل ترشیو بوتیل اتر ترکیب و سپس تأثیر پارامترهای مختلف را بر ظرفیت جذب این ماده به وسیله خاک بررسی نمودند. با افزایش غلظت آن ظرفیت جذب در ابتدا با تغییرات زیاد افزایش یافت تا اینکه مقدار آن ثابت شد. مقدار ظرفیت جذب نهایی به‌وسیله خاک رسی کائولینیت ۱/۱۵ گرم ماده در ۱ کیلوگرم خاک تعیین شد. نتایج نشان داد که استفاده از خاک رسی کائولینیت، همانند سایر کانی‌های رسی، در پاک‌سازی آب آلوده به متیل ترشیو بوتیل اتر مناسب نیست. بازده پاک‌سازی آب آلوده به‌وسیله کائولینیت از کانی‌های رسی دیگر، مانند بنتونیت و ورمیکولیت، به دلیل کمتر بودن سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک کائولینیت در مقایسه با سایر کانی‌های رسی پایین‌تر است. ملک‌حسینی و مهدوی (۱۳۹۳) حذف متیل ترشیو بوتیل اتر از آب را در دمای ثابت و شرایط تماس با هوا به روش عاری‌سازی در راکتور ساکن دارای همزن، با آنالیز نمونه‌ها در فواصل زمانی مناسب، مورد بررسی قرار دادند. در روش عاری‌سازی با تماس هوا، مولکول‌های ماده مذکور تجزیه نمی‌شوند، بلکه به صورت گازی آلودگی هوا را افزایش می‌دهند. حلالیت بنزین حاوی متیل ترشیو بوتیل اتر، اتانول و متانول در آب بررسی شد و نتایج نشان داد که حضور ماده متیل ترشیو

بوتیل اتر در مقایسه با اتانول و متانول، حلالیت بنزین در آب را ۸ برابر افزایش می‌دهد. علی‌حمزه و رضاپورطبری (۱۳۹۳) ارزیابی و شبیه‌سازی رفتار کیفی مخزن را که در شرایط ورود بار آلاینده ناگهانی می‌تواند به مدیران و تصمیم‌گیران در اتخاذ سیاست‌های کارا در مواجهه با بحران‌های کیفی کمک نماید مورد مطالعه قرار دادند. به طور مثال ورود بار آلاینده حاوی متیل ترشیو بوتیل اتر در سد قشلاق سنندج، وارد شدن ناگهانی بار آلاینده مشتقات نفتی در رودخانه زاینده‌رود و همچنین در رودخانه کرخه، نمونه‌ای از این قبیل بحران‌ها می‌باشد. بریانی و همکاران (۱۳۹۳) برای بررسی حذف در جای متیل ترشیو بوتیل اتر و بنزن از آب‌های زیرزمینی، آزمایش‌هایی در ستون خاک یک بعدی با شرایط فیزیکی و شیمیایی مشابه منطقه جنوب تهران انجام دادند. برای حذف آلاینده‌های مورد نظر به روش اکسیداسیون شیمیایی، از واکنش فنتون^۶ و نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پایدار شده^۷ به منزله کاتالیزور استفاده کردند. طبق نتایج تحقیق ایشان، برای حذف غلظت‌های حدود ۲ میلی‌گرم در لیتر متیل ترشیو بوتیل اتر و ۱ میلی‌گرم در لیتر بنزن در آب زیرزمینی، غلظت‌های بهینه نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پایدار شده و هیدروژن پراکسید در شرایط محیطی شبیه‌سازی شده در پایلوت به ترتیب برابر ۳۰۰ میلی‌گرم در لیتر و ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به دست آمد که به حذف ۷۸ درصد متیل ترشیو بوتیل اتر و ۸۷ درصد بنزن منجر شد. تابع بردبار و همکاران (۱۳۹۴) پاک‌سازی یک نمونه خاک رسی آلوده به متیل ترشیو بوتیل اتر را، به روش الکتروکینتیک مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور نمونه‌های خاک آلوده را تهیه نمودند و در یک سلول قرار دادند و در آن از آب مقطر و محلول کمپلکس‌ساز اتیلن دی آمین تترا استیک اسید^۸، به عنوان الکترولیت استفاده کردند. نتایج نشان داد که راندمان پاک‌سازی خاک تابعی از نوع الکترولیت، گرادیان پتانسیل الکتریکی و مدت زمان آزمایش می‌باشد. با افزایش

⁷ S-NZVI

⁸ EDTA

⁵ United State Environmental Protection Agency

⁶ H₂O/Fe

همگن جذب بالاتری دارد و ناهمگنی لایه‌ها می‌تواند شدت آلودگی را تقلیل دهد در نتیجه در محیط متخلخل ناهمگن انتقال املاح کندتر است و زمان تماس آلاینده با محیط طولانی‌تر می‌شود. بالسرینو و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیق خود، خاک و آب‌های زیرزمینی اطراف یک ایستگاه توزیع سوخت در تومینو در شمال غربی اسپانیا را مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، از خاک تا عمق ۶/۴ متری از سطح زمین و از آب‌های زیرزمینی اطراف ایستگاه تقریباً در شعاع ۶۰ متری نمونه‌برداری کردند و نمونه‌ها را با استفاده از نرم‌افزار *MS-SPME-GC-HS* به منظور شناسایی و تعیین مقدار ترکیبات آلی فرار سوخت متیل ترشیو بوتیل اتر، بوتیل ترشیو بوتیل اتر و BTEX و دامنه مواد آلی سوختی تجزیه و تحلیل کردند. نتایج نشان داد که آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی ناشی از نشت سوخت از مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی می‌باشد.

تحقیقات انجام شده پیشین به منظور بررسی روش‌های حذف متیل ترشیو بوتیل اتر از آب و خاک آلوده، استفاده از مواد جایگزین ماده آلاینده متیل ترشیو بوتیل اتر، شبیه‌سازی رفتار کیفی مخازن در شرایط ورود بار آلاینده ناگهانی این ماده، همچنین بررسی تأثیر دو محیط متخلخل همگن و ناهمگن بر انتقال آن بوده است. با توجه به تحقیقات پیشین و اهمیت آلودگی منابع آب به خصوص آب‌های زیرزمینی، حرکت این ماده به همراه آب در محیط متخلخل کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

لذا هدف مقاله حاضر مطالعه حرکت متیل ترشیو بوتیل اتر به همراه آب در محیط متخلخل با استفاده از مدل آزمایشگاهی دو بعدی قایم می‌باشد. نتایج مقاله حاضر می‌تواند راهنمای مناسبی در رفتارسنجی حرکت متیل ترشیو بوتیل اتر در آب‌های زیرزمینی و موارد مشابه باشد. مقاله حاضر نسخه بروز شده، اصلاح شده و توسعه داده شده ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۲) می‌باشد.

مواد و روش‌ها

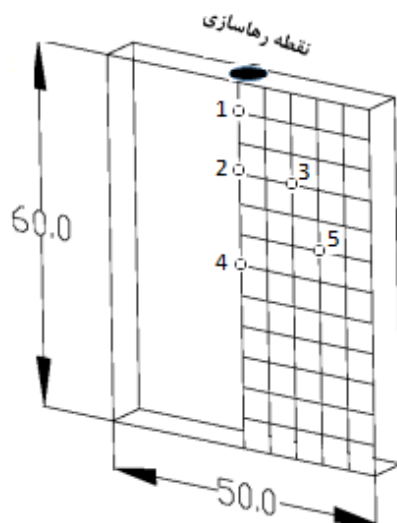
اختلاف پتانسیل الکتریکی اعمال شده، راندمان پاک‌سازی متیل ترشیو بوتیل اتر افزایش یافت و با افزایش زمان آزمایش، میزان بیشتری از آن، حدود ۲۱٪ حذف گردید. در نهایت مشخص شد که استفاده از اتیلن دی آمین تترا استیک اسید به عنوان الکترولیت به منظور پاک‌سازی متیل ترشیو بوتیل اتر از خاک رس کائولینیت گزینه ایده‌آلی نمی‌باشد و تحقیقات بیشتری به منظور ارتقاء بازده پاک‌سازی با استفاده از شوینده الکترولیت‌های مناسب مورد نیاز است.

آیتی و رضایی (۱۳۹۴) قابلیت سیستم وضعیت، پیشینه، ارزیابی، توصیه در تصفیه ماده سرطان‌زای متیل ترشیو بوتیل اتر را در مقیاس آزمایشگاهی با تأکید بر مشخصات بیوگرانول‌های هوازی بررسی نمودند و در بررسی قابلیت این سیستم و بیوگرانول‌های هوازی در حذف ترکیب این ماده دریافتند که تشکیل سریع گرانول‌هایی با رنگ قهوه‌ای بعد از یک هفته بهره‌برداری از ویژگی‌های خاص این سیستم است. لذا نتایج تحقیق ایشان نشان داد که روش مذکور می‌تواند سیستم مناسبی در حذف ترکیب متیل ترشیو بوتیل اتر باشد. میرتین و همکاران (۲۰۰۹) مدل عددی جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی را برای پیش‌بینی میزان متیل ترشیو بوتیل اتر که در جهت جریان عمودی آب آشامیدنی در خاک انتشار می‌یابد، توسعه دادند. ایشان حادثه تخلیه ناگهانی متیل ترشیو بوتیل اتر در رودخانه‌ای در ایسلند را به عنوان یک مطالعه موردی بررسی کرده و حرکت توده آلودگی را با استفاده از نرم‌افزار ژئوسیستم و Rockflow که توأم با به جریان آب رودخانه و حرکت آلاینده به عنوان یک پدیده می‌پردازد، شبیه‌سازی کردند.

ژانگ و وو (۲۰۱۶) در مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی حرکت متیل ترشیو بوتیل اتر در محیط متخلخل همگن و ناهمگن از سدیم کلرید و متیل ترشیو بوتیل اتر به ترتیب به عنوان یک ردیاب غیر واکنشی و ترکیب آلی فرار استفاده کردند. نتایج نشان داد که حرکت متیل ترشیو بوتیل اتر تا حد زیادی وابسته به ناهمگنی محیط متخلخل است که در مقایسه با محیط‌های

روز اندازه‌گیری شد. همچنین چگالی خاک مورد آزمایش ۱/۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. برای رهاسازی آب و آلاینده متیل ترشیو بوتیل اتر، حفره کوچکی در مرز بالایی مدل ایجاد (به شکل ۱ نگاه شود) و محلول آب و ماده متیل ترشیو بوتیل اتر با غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر به‌وسیله نازلی با دبی ثابت رهاسازی شد. پیاز رطوبتی ایجاد شده و نمونه‌گیری در زمان‌های ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۳۳ دقیقه و در ۳ تکرار انجام شد تا از صحت نتایج اطمینان حاصل شود. شکل ۱ نمای مدل آزمایشگاهی و نقطه ورود آلودگی و آرایش نقاط نمونه‌گیری که نسبت به خط قرینه عمودی مدل انتخاب شدند را نشان می‌دهد.

در مقاله حاضر به منظور رفتارسنجی حرکت متیل ترشیو بوتیل اتر در محیط متخلخل از رویکرد کاربرد مدل‌های آزمایشگاهی استفاده شد. مدل ساخته شده طی تحقیق حاضر به صورت یک مکعب مستطیل شیشه‌ای قائم با عرض ۵۰ سانتی‌متر، ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر و به پهنای ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. با انجام آزمایش‌های دانه‌بندی و هیدرومتری در آزمایشگاه مکانیک خاک گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران، درصد شن، سیلت و رس خاک مورد استفاده به ترتیب ۸۲، ۱۰ و ۸ درصد تعیین شد. با توجه به درصد شن، سیلت و رس و همچنین بر اساس مثلث بافت خاک، نوع خاک مورد آزمایش لومی شنی می‌باشد و ضریب آبگذری آن ۰/۰۰۴ سانتی‌متر بر



شکل ۱- ابعاد مدل آزمایشگاهی و نقاط نمونه‌گیری (ابعاد به سانتی‌متر).

اگر به نقطه ورود آب و متیل ترشیو بوتیل اتر (نقطه رهاسازی) مختصات $X=0$ و $Y=0$ اختصاص داده شود، مختصات پنج نقطه نمونه‌گیری و فاصله آن‌ها از نقطه رهاسازی برحسب سانتی‌متر مطابق جدول ۱ می‌باشد.

جدول ۱- نقاط نمونه‌گیری و فاصله آن‌ها از نقطه رهاسازی (ابعاد به سانتی‌متر).

شماره نقطه	X	Y	فاصله مستقیم
۱	۰	۵	۵
۲	۰	۱۵	۱۵
۳	۱۰	۱۵	۱۸
۴	۰	۳۰	۳۰
۵	۱۵	۲۵	۲۹

۲۰ دقیقه در سانتریفیوژ قرار گرفت تا با استفاده از خاصیت گریز از مرکز، دو فاز جامد و مایع نمونه مورد نظر از هم جدا شوند. محلول آب و متیل ترشیو بوتیل اتر توسط یک سرنگ از سر شیشه نمونه استخراج شد و در شیشه دیگری که حاوی نمک و یک عدد مگنت (آهنربایی به اندازه یک دانه برنج) شده بود، تخلیه شد (شکل ۲). برای انتقال متیل ترشیو بوتیل اتر از فاز آبی به فاز آلی به منظور امکان اندازه‌گیری‌های کروماتوگرافی گازی از روش استخراج محلول میکروحلل استفاده شد. در این روش شرایطی ایجاد می‌شود تا متیل ترشیو بوتیل اتر از آب جدا شده و جذب یک ماده آلی به نام بنزیل الکل بشود. مگنت در این روش به عنوان یک همزن عمل کرده و باعث حل شدن نمک در آب و جداسازی ماده متیل ترشیو بوتیل اتر از محلول می‌شود. برای جداسازی متیل ترشیو بوتیل اتر آزاد شده از محلول آب از یک سرنگ همیلتون و مقدار جزئی بنزیل الکل کمک گرفته شد. با استفاده از سرنگ بلند همیلتون، ۲ میلی‌میکرون بنزیل الکل را جدا کرده و سوزن سرنگ را داخل نمونه حاوی محلول آب، متیل ترشیو بوتیل اتر و نمک کرده و این سیستم طوری تنظیم شد که قطره‌ای از بنزیل الکل در سر سوزن همیلتون قرار بگیرد. پس از گذشت زمان ۳۰ دقیقه، بنزیل الکل حاوی متیل ترشیو بوتیل اتر به داخل سرنگ کشیده شد و به سرعت وارد دستگاه کروماتوگرافی گازی شد (شکل ۳).

برای نمونه‌گیری از شیشه‌های کوچک دردار استفاده شد. دلیل استفاده از این شیشه‌ها، درپوش لاستیکی آن‌ها بود که به صورت یک جدار محافظ عمل کرده و از تبخیر متیل ترشیو بوتیل اتر موجود در نمونه جلوگیری کرد و میزان خطا در آزمایش‌های به حداقل ممکن برسد. برای استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی جهت تعیین غلظت آلاینده متیل ترشیو بوتیل اتر لازم است این ماده به صورت آلی و نه محلول با آب باشد، بنابراین لازم است که این ماده از آب و خاک جدا شده و به فاز آلی انتقال یابد تا میزان غلظت در دستگاه کروماتوگرافی گازی با دقت بالا قابل اندازه‌گیری باشد. روش استخراج متیل ترشیو بوتیل اتر از محیط متخلخل در سه مرحله زیر انجام گرفت:

۱- جداسازی آب و متیل ترشیو بوتیل اتر از خاک ۲- انتقال آلاینده از فاز محلول به فاز آلی ۳- اندازه‌گیری مقدار متیل ترشیو بوتیل اتر توسط دستگاه کروماتوگرافی گازی.

جداسازی آب و متیل ترشیو بوتیل اتر از خاک

نمونه‌های مورد نظر به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک قرار داده شد تا سه ماده آب و خاک و متیل ترشیو بوتیل اتر در اثر لرزش‌های ریز ایجاد شده توسط امواج ماوراء صوت، به طور کامل با هم مخلوط شده و ماده متیل ترشیو بوتیل اتر تا جایی که امکان دارد در آب حل شود و به صورت یک مخلوط کاملاً همگن به دست آید. سپس نمونه مورد نظر به مدت



(ب)

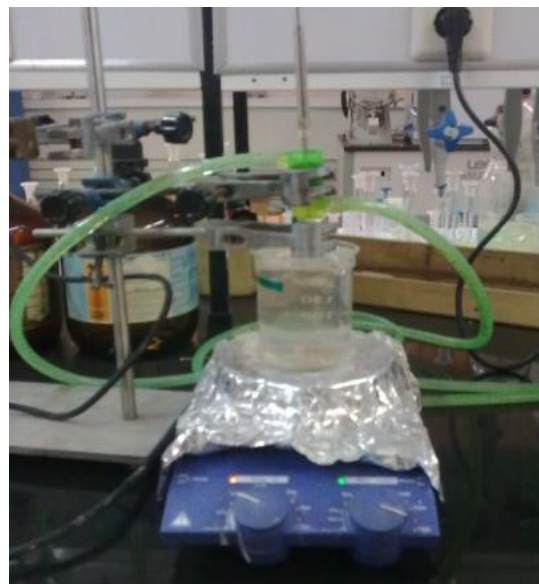


(الف)

شکل ۲- نمونه‌گذاری در دستگاه التراسونیک (الف) و (ب) دستگاه سانتریفیوژ



(ب)



(الف)

شکل ۳- (الف) استخراج محلول میکرو حلال و (ب) کروماتوگرافی گازی

یافته است. به بیان دیگر در نقطه شماره ۱ نسبت به زمان ۱۰ دقیقه افزایش غلظتی معادل ۱۰ تا ۲۰ میلی گرم در لیتر به ثبت رسیده است. همچنین پس از گذشت ۵۰ دقیقه از شروع آزمایش جبهه آلودگی به نقطه شماره ۳ رسیده است. این نقطه دارای اهمیت خاصی از لحاظ پیشروی آلاینده به صورت افقی است. نقطه شماره ۳ در فاصله مستقیم ۱۸ سانتی متری از مرکز پخش آلودگی قرار دارد یعنی در جهت قائم ۱۵ سانتی متر و در جهت افقی ۱۰ سانتی متر با مرکز رهاسازی آلودگی فاصله دارد. نقطه شماره ۲ در فاصله ۱۵ سانتی متری قائم و هم راستا با نقطه رهاسازی آلودگی قرار داشته، فاصله نقطه شماره ۳، ۳ سانتی متر بیشتر از فاصله نقطه شماره ۲ از مرکز پخش آلودگی می باشند ولی فاصله افقی نقطه شماره ۳ از مرکز پخش آلودگی موجب شده است که آلودگی دیرتر به این نقطه برسد و نشان می دهد که پیشروی آلودگی در جهت عمودی بیشتر از جهت افقی است.

نتایج و بحث

نتایج غلظت متیل ترشیو بوتیل اتر در پنج نقطه مشاهده ای: همان طور که قبلاً اشاره شد، غلظت ماده مورد آزمایش در پنج نقطه انتخابی و در زمان های ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۳۳ دقیقه و در سه تکرار اندازه گیری شد، نتایج اندازه گیری ها در جدول ۲ ارائه شده است. همان طور که از اعداد جدول ۲ مشخص است پس از گذشت ۱۰ دقیقه از شروع آزمایش، جریان آب و آلودگی فقط به نقطه شماره ۱ رسیده است که در جهت قائم ۵ سانتی متر با مرکز رهاسازی آلودگی فاصله دارد و مقادیر اندازه گیری شده ۱۳۰، ۱۴۰ و ۱۳۵ میلی گرم در لیتر می باشد (همچنین به شکل ۱ نگاه شود). همان طور که از اعداد جدول مشخص است در زمان ۲۵ دقیقه جبهه آب و آلودگی فقط به نقاط شماره ۱ و ۲ رسیده و مقادیر اندازه گیری شده در نقطه ۲ از ۱۱۰ تا ۱۳۰ میلی گرم در لیتر متغیر است در حالی که در نقطه شماره ۱ غلظت به ۱۵۵ افزایش

جدول ۲- مقادیر غلظت متیل ترشیو بوتیل اتر اندازه‌گیری شده در نقاط نمونه‌برداری.

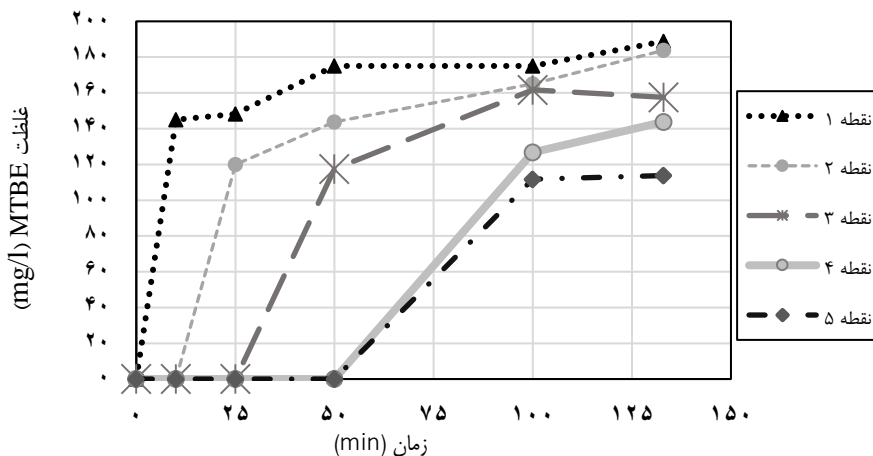
شماره نقطه	زمان(دقیقه)	مقادیر غلظت در ۳ تکرار (میلی گرم بر لیتر)			میانگین غلظت (میلی گرم بر لیتر)
		۱	۲	۳	
۱	۱۰	۱۳۰	۱۴۰	۱۳۵	۱۳۵
	۲۵	۱۴۰	۱۵۵	۱۵۰	۱۴۸
	۵۰	۱۸۰	۱۷۵	۱۷۰	۱۷۵
	۱۰۰	۱۹۰	۱۸۰	۱۵۵	۱۷۵
	۱۳۳	۱۹۰	۱۹۰	۱۸۵	۱۸۸
۲	۱۰	۰	۰	۰	۰
	۲۵	۱۳۰	۱۱۰	۱۲۰	۱۲۰
	۵۰	۱۶۰	۱۳۵	۱۴۰	۱۴۵
	۱۰۰	۱۹۰	۱۷۵	۱۷۰	۱۷۸
	۱۳۳	۱۸۵	۱۸۰	۱۹۰	۱۸۵
۳	۱۰	۰	۰	۰	۰
	۲۵	۰	۰	۰	۰
	۵۰	۱۴۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۷
	۱۰۰	۱۷۰	۱۶۰	۱۵۵	۱۶۲
	۱۳۳	۱۷۰	۱۶۰	۱۶۵	۱۶۵
۴	۱۰	۰	۰	۰	۰
	۲۵	۰	۰	۰	۰
	۵۰	۰	۰	۰	۰
	۱۰۰	۱۳۵	۱۲۰	۱۲۵	۱۲۷
	۱۳۳	۱۴۰	۱۴۵	۱۶۰	۱۴۸
۵	۱۰	۰	۰	۰	۰
	۲۵	۰	۰	۰	۰
	۵۰	۰	۰	۰	۰
	۱۰۰	۹۰	۱۰۰	۹۰	۹۳
	۱۳۳	۱۱۰	۱۲۵	۱۳۰	۱۲۲

با مقایسه غلظت این ماده در نقاط ۴ و ۵ نتیجه می‌شود که حرکت آن در جهت افقی کندتر از حرکت آن در جهت قائم بوده است. در انتهای آزمایش و در زمان ۱۳۳ دقیقه غلظت آلودگی در تمام نقاط مشاهده‌ای اندازه‌گیری شد. در این زمان نقطه شماره ۱ بیشترین مقدار غلظت برابر ۱۸۸ میلی‌گرم در لیتر اندازه‌گیری شد و به ترتیب در نقاط ۳، ۲ و ۴ غلظت برابر ۱۸۵، ۱۶۵ و ۱۴۸ میلی‌گرم در لیتر و کمترین غلظت نیز در نقطه شماره ۵ و برابر ۱۲۲ میلی‌گرم در لیتر ثبت شد.

پس از گذشت ۱۰۰ دقیقه از شروع آزمایش، آلودگی به تمام نقاط مشاهده‌ای رسیده است. در نقطه شماره ۵ کمترین غلظت برداشت شده تا این قسمت از آزمایش، یعنی ۹۰ میلی‌گرم در لیتر در یکی از ۳ تکرار آن ثبت شد. نقطه شماره ۵ از مرکز پخش آلودگی ۲۹ سانتی‌متر فاصله دارد یعنی در جهت محور Yها ۲۵ سانتی‌متر و در جهت محور Xها ۱۵ سانتی‌متر با مرکز پخش آلودگی فاصله دارد و نقطه‌ای است که برای کنترل حرکت افقی ماده مورد آزمایش در نظر گرفته شده است.

برابر ۱۸۵ میلی گرم در لیتر می باشد. رفتار آلودگی در نقطه ۳ از زمان ورود آلودگی به این نقطه با غلظت ۱۲۷ میلی گرم در لیتر تا انتهای آزمایش با مقدار غلظت برابر ۱۶۵ میلی گرم در لیتر روند افزایش غلظت در این نقطه را نشان می دهد. اما به دلیل کند بودن حرکت افقی آلودگی، مقادیر غلظت در این نقطه در مقایسه با نقطه ۲ کمتر می باشد. همچنین غلظت آلودگی در نقاط ۴ و ۵ با گذشت زمان افزایش یافته و در شکل نقطه ۵ حرکت افقی آلودگی را نشان می دهد که کمترین غلظت آزمایش مربوط به نقطه ۵ و برابر ۱۲۲ میلی گرم بر لیتر می باشد.

با گذشت زمان کوتاهی ظرفیت جذب آلاینده توسط خاک به حد اشباع رسیده و آلودگی به همراه آب در محیط متخلخل رها شده است که این مؤید خاصیت آبدوست بودن متیل ترشیو بوتیل اتر و بقای این ماده توسط آب و جذب کمتر آن در خاک است. با توجه به شکل ۴، تغییرات غلظت در فاصله نقاط ۲ تا ۳ و ۳ تا ۴، حرکت افقی آلاینده در خاک را نشان می دهد (همچنین به شکل ۱ نگاه شود) و تغییرات غلظت در فاصله نقاط ۱، ۲ و ۳ و همچنین ۳ و ۵ حرکت عمودی آن را نشان می دهد.



شکل ۴- تغییرات غلظت متیل ترشیو بوتیل اتر با زمان.

واقع پس از ۱۰ الی ۲۵ دقیقه ظرفیت جذب آلاینده توسط خاک به حد اشباع رسیده و آلودگی به همراه آب جابه جا شد و غلظت آلاینده در نقاط نمونه گیری اندازه گیری شد. با شروع حرکت آلودگی در جهت افقی و عمودی، میزان غلظت آلاینده رهاسازی

رفتارسنجی حرکت متیل ترشیو بوتیل اتر با آب در محیط متخلخل:

در شکل ۴، محور عمودی میزان غلظت متیل ترشیو بوتیل اتر بر حسب میلی گرم در لیتر و محور افقی زمان را بر حسب دقیقه نشان می دهد. همان طور که در شکل ملاحظه می شود، در همه نمونه ها در ابتدای تماس متیل ترشیو بوتیل اتر و خاک، شیب یا تغییرات ظرفیت جذب زیاد است و علت آن تغییرات ناگهانی و برخورد بیشتر مولکول های این ماده و سطح ذرات خاک در زمان های ابتدایی است اما بعد از گذشت مدت زمان ۱۳۳ دقیقه در مقادیر ظرفیت جذب تغییر چشمگیری ایجاد نشده است. در نقطه ۱، در زمان های ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۱۳۳ دقیقه مقادیر غلظت آلاینده در آب به ترتیب برابر ۱۳۵، ۱۴۸، ۱۷۵، ۱۷۵ و ۱۸۸ میلی گرم در لیتر می باشد.

منحنی نقطه ۲ نشان می دهد که آلودگی پس از ۱۰ دقیقه از شروع آزمایش با غلظت ۱۲۰ میلی گرم در لیتر به این نقطه رسیده است و با شیب تندی که نشان دهنده افزایش غلظت متیل ترشیو بوتیل اتر می باشد ادامه یافته و عدد نهایی غلظت در این نقطه

نتیجه گیری

در یک جمع بندی ابتدا با ورود آلاینده متیل ترشیو بوتیل اتر، این ماده به سرعت جذب خاک شده و با گذشت زمان، افزایش غلظت آلاینده در نقاط نمونه گیری مشاهده می شود در

تابع بردبار، ع.، غازیانی، ف.، رئیسی استبرق، ع.، لیاقت، ع.، ۱۳۹۲. ظرفیت جذب، روش جداسازی و تعیین غلظت MTBE در خاک رس کائولینیت آلوده به MTBE. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۴۴، شماره ۴، ۳۵۵-۳۴۷.

علی حمزه، م.، رضاپور طبری، م.م.، ۱۳۹۳. شناسایی رفتار کیفی مخازن سطحی در صورت تزریق ناگهانی بار آلاینده، مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال دهم، شماره ۱، ۵۰-۳۹.

ملک حسینی، م.، مهدوی، و.، ۱۳۹۳. مطالعه سینتیکی حذف متیل ترشیو بوتیل اتر از آب به روش عاری سازی. مجله آب و فاضلاب، شماره ۵، ۶۶-۶۰.

Adave, S.S., Lee, D-J. & Lai, J-Y., 2009. Treating

chemical industries influent using aerobic granular sludge: Recent Development. J.the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 40, 333-336.

Aivalioti, M., Despina, P., Panagiotis, P. & Evangelos, G., 2012. Removal of BTEX, MTBE and TAME from aqueous solutions by adsorption onto raw and thermally treated lignite. J. Hazardous Material, 207-208, 136-146.

Balseiro-Romero, M., Macías, F. & Monterroso, C., 2016. Characterization and fingerprinting of soil and groundwater contamination sources around a fuel distribution station in Galicia (NW Spain). Journal of Environmental Science and Pollution Research, 188:292.

Liga, M. & Slask, D., 2004. A Design model for subsurface drip irrigation in Arizon, Dep. Agri.Biosys.Arizona.

Myrntinen, A., T. & Kolditz, O., 2009. Modeling of an MTBE plume at Pascoag, Rhode Island. Journal of Environmental geology, 57, 1197.

Borghoff, S., Parkinson, H. & Leavens, T., 2010. Physiologically based pharmacokinetic rat model for methyl tertiary-butyl ether; comparison of selected dose metrics following various MTBE exposure scenarios used for toxicity and carcinogenicity evaluation. Journal of Toxicology, 275, 79-91.

Zhang, X. & Wu, Y., 2016. Laboratory experiments and simulations of MTBE transport in layered heterogeneous porous media. Journal of Environmental Earth Sciences, 75, 836.

شده افزایش می‌یابد. تغییرات غلظت آلاینده در خاک نشان داد که با گذشت زمان میزان غلظت آلاینده رهاسازی شده افزایش می‌یابد ولی این روند افزایشی در جهت حرکت عمودی بیشتر نمایان است در واقع سرعت پخش آلودگی در جهت عمودی بیشتر از سرعت پخش آن در جهت افقی است. در واقع ضریب پراکندگی طولی مقدار بیشتری نسبت به ضریب پراکندگی عرضی است. MTBE ماده‌ای آب‌دوست است و تمایل دارد که در جهت جریان آب حرکت کند و حرکت آن متأثر از سرعت آب می‌باشد.

قدردانی و تشکر

بدین وسیله از دانشگاه تهران و پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای ایران که انجام این تحقیق و تهیه مقالات مربوطه با امکانات آن‌ها میسر شد، تشکر می‌شود.

منابع

ابراهیمی، ک.، خلفی، ح.، قهرمانی تبار، م.، ۱۳۹۲. مطالعه آزمایشگاهی انتقال آلودگی نفتی (MTBE) در خاک. مجموعه مقالات ۳۵ امین کنگره جهانی IAHR، چین، چنگدو، ۱۳-۸ سپتامبر.

اسدالله فردی، غ.، خدادادی، ا.، یعقوبی، م.، ۱۳۸۹. بررسی پارامتریک انتقال MTBE از مخازن سوخت تهران بزرگ به منابع آب زیرزمینی. مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال ششم، شماره ۳، ۱۱-۱.

آیتی، ب.، رضایی، م.، ۱۳۹۴. قابلیت سیستم SBAR در حذف متیل ترشیواری بوتیل اتر: مشخصات بیوگرانول‌ها. مجله آب و فاضلاب، شماره ۶، ۵۸-۵۰.

بریانی، ع.، پرداختی، ع.، اردستانی، م.، امینی، س.، ۱۳۹۳. بررسی حذف درجای MTBE و بنزن از آب‌های زیرزمینی جنوب تهران در مقیاس پایلوت آزمایشگاهی از طریق اکسیداسیون شیمیایی با استفاده از نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی پایدار شده. مجله محیط‌شناسی، دوره ۴۰، شماره ۲، ۲۷۵-۲۶۱.

تابع بردبار، ع.، رئیسی استبرق، ع.، غازیانی، ف.، ۱۳۹۴. استفاده از روش الکتروکینتیک در پاک‌سازی یک خاک رسی آلوده به MTBE. مجله مهندسی عمران و محیط‌زیست، جلد ۴۵، شماره ۲، ۳۳-۲۵.