

بررسی و مدل سازی عددی انتقال گازوئیل در ماسه اصلاح شده با کمپوست زباله شهری

پویا زعفرانی^۱، نادر مختارانی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

mokhtarani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۶

چکیده

بررسی تأثیر اصلاح کننده های آلی بر رفتار و گسترش آلاینده های مایع غیرآبی سبک (LNAPL) در خاک برای ارزیابی خطر آلودگی آب های زیرزمینی، امری مفید است. هدف از این پژوهش بررسی اثر کمپوست زباله شهری به عنوان اصلاح کننده آلی بر چگونگی انتقال گازوئیل درون ماسه بوده که در مقیاس آزمایشگاهی انجام پذیرفته است. در این پژوهش از ستون های با ارتفاع ۳۰ و قطر ۲/۴ سانتی متر از جنس پلکسی گلاس و سه نوع ماسه ریز، متوسط و درشت دانه استفاده شد. ستون ها تا ارتفاع ۲۴ سانتی متر با ماسه و سپس لایه رویی به ارتفاع ۴ سانتی متر با ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم کمپوست که معادل ۱۰۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ تن بر هکتار بوده، به طور همگن مخلوط و پر شد. در ادامه نیمی از لایه ماسه مخلوط با کمپوست در هر ستون به گازوئیل با غلظت ۲۰ میلی گرم بر گرم ماسه آغشته گردید. برای شبیه سازی بارش، آب با سه نرخ جریان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ میلی لیتر بر دقیقه بر ستون ها اعمال شد. شبیه سازی عددی داده های آزمایشگاهی و تعیین پارامترهای انتقال، توسط مدل انتقال UTCHEM انجام پذیرفت. مطابق نتایج، مدل عددی حاصل، دارای همپوشانی قابل قبولی با داده های آزمایشگاهی بود. همچنین با افزایش میزان کمپوست در پارامتر ضریب پراکندگی تغییرات قابل ملاحظه ای مشاهده نشد. در این پژوهش ضریب پخش با افزایش دو برابری مقدار کمپوست، ۱۱۰ درصد افزایش یافته و به عنوان نمونه، در ستون حاوی مخلوط ماسه ریزدانه و کمپوست با افزایش دو برابری مقدار کمپوست در نرخ های جریان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ میلی لیتر بر دقیقه، فاکتور تأخیر به ترتیب به میزان ۷۸، ۱۰۰ و ۸۰ درصد افزایش یافت.

واژگان کلیدی: آلودگی نفتی، انتقال آلودگی، آلودگی خاک، کمپوست، مدل عددی انتقال

۱- مقدمه

سطحی شده است. این موضوع تهدیدی جدی برای کیفیت

ماسه و آب، زندگی گیاهان و جانوران و سلامت انسان محسوب می شود [1]. آلودگی محیط زیست با محصولات نفتی

افزایش تولید و مصرف هیدروکربن های نفتی در سراسر جهان موجب افزایش خطر نشت نفت در خاک، آب های زیرزمینی و

ممکن است در طول استخراج، بازسازی، حمل‌ونقل، ذخیره‌سازی و یا استفاده از آنها رخ دهد. بخش عمده‌ای از آلودگی نفتی روی زمین ناشی از نشت سوخت از خطوط انتقال و همچنین مخازن ذخیره‌سازی زیرزمینی و روزمینی است [2].

فرآورده‌های نفتی (از جمله نفت سفید، بنزین، گازوئیل، پارافین و آسفالت) مخلوط پیچیده‌ای از هیدروکربن‌ها هستند که طیف گسترده‌ای از حلالیت، فراریت، سمیت و وزن مولکولی را شامل می‌شوند. به طور کلی بنزین و گازوئیل بیش از سایر سوخت‌های مایع مورد استفاده قرار گرفته و به همین دلیل در بیشتر مطالعات، از یکی از این دو سوخت برای بررسی آلودگی نفتی خاک‌ها استفاده می‌شود [3].

علاوه بر آن، ترکیبات بنزین و گازوئیل دارای حلالیت محدود در آب بوده و حضور این دو نوع سوخت در محیط خاک به صورت مایعات غیرآبی (NAPLs) خواهد بود. مایعات غیرآبی به آلاینده‌هایی اطلاق می‌شود که در فازهای جداگانه مخلوط‌نشده با آب درون لایه‌های زیرسطحی وجود دارند. حرکت و گسترش NAPLها و سرنوشت نهایی آنها تحت تأثیر عوامل گوناگونی چون: ۱- حجم NAPL ریخته شده و ناحیه درگیر با آلودگی، ۲- خواص و ترکیب آن مانند: نوع ترکیب هیدروکربن، قطبیت، آب‌گریزی، حلالیت، فراریت و غیره، ۳- ویژگی‌های خاک مانند: pH، رطوبت، بار آلی، مقدار رس، تخلخل و هدایت هیدرولیکی، و ۴- شرایط محیطی مانند: فعالیت میکروبی، دما، بارش و غیره قرار دارد [4].

هنگامی که یک آلاینده NAPL وارد محیط خاک شود، نیروی گرانش موجب حرکت عمودی آن می‌شود. در این حالت گسترش جانبی نیز به دلیل ناهمگونی خاک و نیروهای مویرگی وجود خواهد داشت. گسترش جانبی آلاینده موجب تشکیل لکه یا گره NAPL بالای لایه‌های دارای نفوذپذیری کم شده و حرکت رو به پایین NAPL را مختل می‌کند [5]. علاوه بر آن ممکن است بخشی از آلاینده با اجزای خاک واکنش داده یا به صورت فیزیکی وارد منافذ بین ذرات آن شود. در نتیجه آلودگی درون محیط باقی مانده و تبدیل به یک منبع انتشار دراز مدت می‌شود. در این شرایط آلاینده باقی‌مانده درون خاک

خطر مهمی برای آلودگی آب‌های زیرزمینی محسوب خواهد شد [6]. آلاینده‌های NAPL با توجه به آنکه دانسیته به ترتیب کمتر یا بیشتر نسبت به آب داشته باشند، به دو دسته آلاینده مایع غیر آبی سبک (LNAPL) و آلاینده مایع غیر آبی سنگین (DNAPL) تقسیم بندی می‌شوند.

در تحقیقی فرآیند نفوذ هیدروکربن‌های نفتی در لایه مرزی و آثار ویژگی‌های خاک بر تنوع ترکیبات باقی‌مانده در لایه مرزی، توسط آزمایش ستون، شبیه‌سازی و نتیجه‌گیری شد که جذب و تجزیه بیولوژیکی، دو فرآیند غالب در کنترل حرکت آلاینده است [7]. در پژوهشی دیگر اثر سه اصلاح‌کننده آلی (کمپوست) بر انتقال نوعی علف کش درون دو ستون حاوی خاک آهکی و ماسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق نتایج، اصلاح‌کننده‌ها در انواع متفاوت خاک، آثار متضادی بر انتقال آلاینده داشته‌اند به طوری‌که افزودن کمپوست به خاک آهکی موجب کاهش میزان نفوذ آلاینده و در ماسه باعث تسهیل در انتقال آن شده است [10]. Smaranda و همکاران [11] در سال ۲۰۱۶، اثر ارتفاع ستون خاک، نرخ جریان ورودی و غلظت اولیه رنگزا (رنگ سرخ کنگو به عنوان آلاینده آلی) را بر فرآیند انتقال آلاینده در خاک مورد مطالعه قرار داده و پس از شبیه‌سازی داده‌های آزمایشگاهی به کمک مدل BDST نتیجه گرفته‌اند که منحنی واجذب آلاینده در طی یک دقیقه ابتدایی فرآیند به بیشترین مقدار رسیده و پس از آن کاهش یافته و در نهایت به صفر می‌رسد. Lenharda و همکاران [12] در سال ۲۰۱۷ مدلی برای پیش‌بینی پارامتر حجم بر واحد سطح LNAPL باقی‌مانده و به دام افتاده در خلل و فرج محیط متخلخل در ترازهای مختلف، ارائه کرده‌اند. این مدل اثر نوسان‌های تراز سفره آب زیرزمینی را در نظر می‌گیرد. شبیه‌سازی و پیش‌بینی فرضی برای محیط‌های گوناگون از جمله ماسه‌ای و رسی، ترازهای متفاوت سیال در چاه‌ها و سطوح مختلف سفره‌های آب زیرزمینی ارائه شده است. انتقال LNAPL تا حد زیادی به سطح مایع فعلی در چاه‌ها و نه به سطح تاریخی آنها بستگی دارد. نتایج این مدل با استفاده از شبیه‌سازی انتقال می‌تواند به بازیابی LNAPL کمک کند.

می‌دهد که افزودن کمپوست به خاک موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن از جمله: دانه‌بندی، درجه تراکم و ویژگی‌های هیدرولیکی می‌شود [16].

تهیه کمپوست از زیاله شهری موجب کاهش خطر ناشی از دفن زیاله شده و درک مناسب از قابلیت‌های کمپوست در موارد گوناگون سبب افزایش انگیزه و ارزش‌گذاری برای ساخت این ماده و توسعه‌ی پایدار می‌شود. بنابراین برای کسب اطلاعات بیشتر در مورد تأثیر افزودن کمپوست بر چگونگی گسترش گازوئیل درون محیط متخلخل، انجام این پژوهش ضروری است.

با توجه به موارد فوق تأثیر استفاده از کمپوست به عنوان اصلاح‌کننده بر نگهداشت گازوئیل در خاک ماسه‌ای به عنوان هدف اصلی این پژوهش انتخاب شد. در این پژوهش ضمن ارزیابی تأثیر کمپوست بر انتقال گازوئیل درون ماسه، پارامترهای هیدرودینامیکی انتقال گازوئیل درون خاک با استفاده از نرم‌افزار UTCHEM تعیین شده است.

۲- مواد و روش بررسی

۲-۱- مواد و تجهیزات

در این پژوهش، از ماسه ریخته‌گری از جنس سیلیس بدون رس و لای با سه دانه‌بندی مختلف که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده، به عنوان محیط متخلخل استفاده شد. پس از انتقال مصالح به آزمایشگاه آزمایش دانه‌بندی روی آنها انجام شد، که شکل (۱) نتایج آن را نشان می‌دهد.

سپس ماسه‌ها توسط آب مقطر شستشو داده شده و در نهایت به منظور اطمینان از حذف آلودگی میکروبی و آلاینده‌های دیگر به مدت ۲۰ دقیقه در کوره با دمای ۵۸۰ درجه سلسیوس حرارت داده شدند.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی ماسه

Type of Sand	Size of Grain (mm)	Dry Density (g/cm ³)	Porosity (%)
Fine	0.1-0.25	2.21	52
Medium	0.25-0.5	1.95	43
Coarse	0.5-1	1.83	36

Table 1. Physical specification of sand

Gharedaghloo و Price [13] در سال ۲۰۱۹، با شبیه‌سازی چگونگی جریان و حرکت تک بعدی آب و گازوئیل در خاک مخلوط با کود گیاهی، نشان داده‌اند که میزان باقی‌مانده‌ی گازوئیل در خاک با افزایش دانسیته حجمی خاک مخلوط با کود گیاهی، افزایش می‌یابد. Pan و همکاران [14] در سال ۲۰۲۰، حرکت و نشست نفت خام در لایه‌های ناهمگن خاک در اثر تغییر تراز آب و بارندگی را بررسی کرده و سپس سازوکارهای مربوطه را بر اساس مقاومت در برابر تجزیه و تصاویر سه بعدی وارونه، آنالیز و مدل‌سازی کرده‌اند. نتایج حاکی از آن است که نوسانات سطح آب باعث افزایش دامنه انتشار نفت خام به درون لایه کم عمق خاک می‌شود؛ همچنین نفوذ باران باعث بالا رفتن سطح آب، و پخش یکنواخت نفت خام در لایه‌های بالای بخش موبینگگی خاک شده است. با مقایسه نتایج مدل و ویژگی‌های شهودی انتقال نفت خام، می‌توان تأیید کرد که روش مدل‌سازی بر پایه مقاومت محیط متخلخل در برابر حرکت آلودگی، به طور دقیق و شهودی ویژگی‌های حرکت نفت خام را ارائه می‌دهد.

Alazaiza و همکاران [15] در سال ۲۰۲۱ آزمایش‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر نفوذ آب در گسترش LNAPL درون محیط متخلخل انجام داده‌اند. در این پژوهش از روش ساده تحلیل تصاویر برای شبیه‌سازی حرکت آلاینده درون آب استفاده شده که نتایج حاکی از دقت مناسب و کارآمدی این روش است. هنگامی که مرحله نفوذ LNAPL آغاز شده، LNAPL به سرعت وارد ناحیه غیر اشباع می‌شود و اگر حجم آلاینده زیاد باشد به درون ناحیه موبیرگی می‌رود. هر چه شدت نفوذ آب بیشتر باشد، نیروی هیدرودینامیکی وارد بر LNAPL محصور شده درون خلل و فرج خاک، افزایش یافته و موجب حرکت بیشتر آن درون بخش موبیرگی و بخش اشباع خواهد شد.

همان‌گونه که بیان شد پژوهش‌های گذشته بیشتر بر تأثیر غلظت اولیه آلاینده، نوع خاک و شرایط محیطی بر حرکت آلاینده‌ها درون خاک متمرکز بوده است. این در حالیست که مواد آلی موجود در خاک نیز از عوامل موثر بر حرکت آلاینده در خاک هستند. در این میان کمپوست به عنوان یک افزودنی و اصلاح‌کننده آلی، ارزان و مناسب در خاک شناخته می‌شود. پژوهش‌ها نشان

در دستگاه یاد شده هیدروکربن های موجود در آب مانند گازوئیل می توانند با استفاده از یک حلال مناسب که در این پژوهش از تتراکلرواتیلن، محصول شرکت Merck آلمان استفاده شده است، از آب استخراج شوند.

جدول ۲. مشخصات کمپوست مورد استفاده

Parameters	Value
Density (kg/m ³)	420
Organic Carbon (%)	34.14
Total Nitrogen (%)	2
Carbon to Nitrogen (C/N)	17
Size of Grain (mm)	<2
Electrical Conductivity (ds/m)	5.7
pH	6.8

Table 2. Used compost specification

برای ممانعت از مداخله و تاثیر آب روی نتیجه آنالیز، سدیم سولفات ساخت شرکت Merck آلمان، به مخلوط نمونه و حلال افزوده شد. TPH شاخص مربوط به تمام هیدروکربن های نفتی شامل مواد روغنی و مواد آلی قطبی است بنابراین منشاء اختلاف بین TPH (مجموع هیدروکربن های نفتی) و TOG (مجموع مواد روغنی و گریس)، مواد آلی قطبی هستند که با استفاده از سیلیکاژل ۶۰ ساخت شرکت Merck آلمان، از محلول استخراج شده حذف می شوند. هیدروکربن های استخراج شده انرژی مادون قرمز را در طول موج های مخصوصی جذب نموده و مقدار انرژی جذب شده متناسب با غلظت گازوئیل در حلال است. اندازه گیری TPH با توجه به توضیحات ارائه شده در دستورالعمل دستگاه، انجام شد و غلظت نمونه های خروجی از هر ستون با استفاده از منحنی کالیبراسیون که بدین منظور تهیه شده بود، تعیین شد [17]. در این پژوهش همچنین برای آزمایش ردیاب از کلرید سدیم استفاده شد.

۲-۲- آزمایش جریان آب و انتقال گازوئیل

پایلوت: پایلوت استفاده شده در این پژوهش که مشخصات آن در شکل (۲) ارائه شده شامل ستون های ساخته شده از جنس

در این پژوهش همچنین از کمپوست زباله شهری تولیدی در مجتمع دفع آرادکوه شهر تهران به عنوان افزودنی به ماسه استفاده شد. لازم به ذکر است در ابتدا با عبور کمپوست از الک شماره ۱۶ ناخالصی های همراه آن مانند ذرات شیشه و سنگ ریزه جداسازی شد. سپس مواد عبوری از الک با آب شستشو داده شده و به مدت ۲۴ ساعت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار گرفت تا از وجود هرگونه آلودگی میکروبی عاری شود. مشخصات کمپوست استفاده شده بر اساس اطلاعات موجود در آزمایشگاه این مجتمع، در جدول (۲) ارائه شده است.

شکل ۱. منحنی دانه بندی سه ماسه ریز، متوسط و درشت دانه

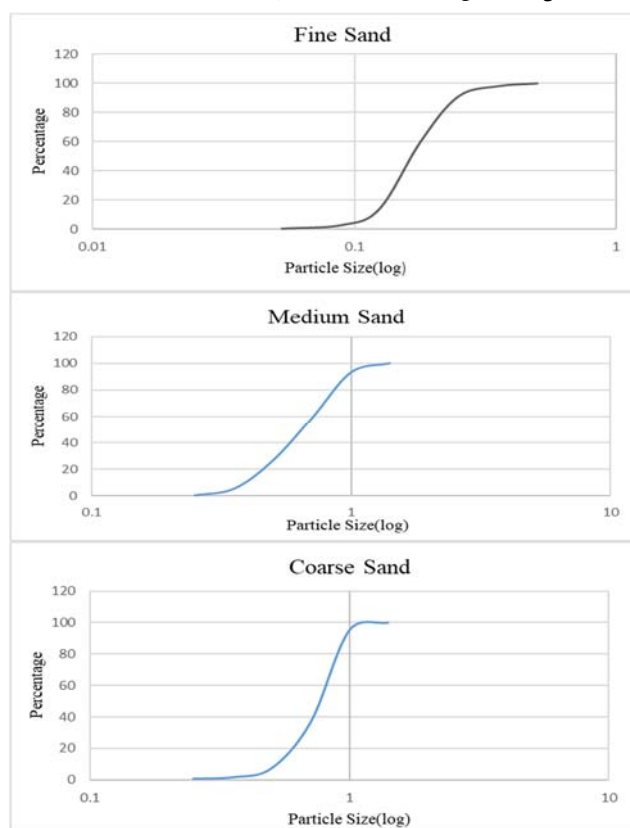


Fig. 1. A Granulation diagram of three Fine, Medium and Coarse sands

تجهیزات مورد استفاده در این پژوهش شامل ترازوی دیجیتال Mettler مدل PJ300 با دقت ۰/۰۰۱ گرم برای توزین مواد، pH متر دیجیتالی Metrohm مدل ۶۹۱ به منظور سنجش pH، دستگاه EC متر ساخت شرکت WTW برای تعیین غلظت نمک و دستگاه TOG/TPH Analyzer Infracal مدل CVH ساخت شرکت WILKS Infracal برای اندازه گیری TPH بود.

آنالیز انتقال آلاینده: پیش از شروع هر آزمایش برای آماده‌سازی پایلوت، ستون‌ها کاملاً شسته و خشک شدند تا از آلودگی‌های احتمالی عاری شوند. سپس برای جلوگیری از خروج ماسه از انتهای ستون، فیلتر پارچه‌ای به اندازه روزنه ۰/۰۷۵ میلی‌متر (Mesh-۲۰۰)، به شکل دایره بریده شده و در انتهای هر ستون قرار گرفت. در ادامه ستون‌ها روی شیکر قرار گرفته و تا ارتفاع مورد نظر با خاک پر شدند تا تراکم و یکنواختی لازم به دست آید. برای آلوده سازی ماسه، بر اساس تحقیق Yang و همکاران [7] در سال ۲۰۱۳، مقدار ۲۰ میلی‌گرم گازوئیل بر گرم ماسه به عنوان مقدار اولیه آلودگی انتخاب شد. بدین منظور، ابتدا ستون تا ارتفاع ۲۴ سانتی‌متر با ماسه تمیز پر شد. سپس ۳۰ گرم دیگر از ماسه تمیز با گازوئیل مخلوط شده و روی ماسه تمیز درون ستون اضافه شد تا ارتفاع ماسه در ستون به ۲۸ سانتی‌متر برسد.

در ستون‌های حاوی مخلوط ماسه و کمپوست، ابتدا ستون تا ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر از ماسه تمیز پر شده، سپس به طور جداگانه سه مقدار ۵۵، ۵۰ و ۴۵ گرم ماسه تمیز برای سه آزمایش مجزا به ترتیب با ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم کمپوست که معادل با میزان ۱۰۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ تن بر هکتار بوده، به طور همگن مخلوط شده و در نهایت مقدار ۶۰ گرم مخلوط ماسه و کمپوست برای هر ستون تهیه شد؛ که ۳۰ گرم از آن به درون ستون منتقل شد. در ادامه نیز مخلوط ماسه و کمپوست باقیمانده به گازوئیل آغشته شده و به درون ستون (تا ارتفاع ۲۸ سانتی‌متری) منتقل شد. در پایان نیز برای جلوگیری از اغتشاش سطحی خاک، ۲ سانتی‌متر شن ریز روی خاک هر ستون اضافه شد.

برای شبیه‌سازی شرایط طبیعی بارش، با توجه به محدوده شدت بارش‌های تحقیق Yang و همکاران [18] در سال ۲۰۱۶، سه شدت بارش ۳/۳۱، ۶/۶۳ و ۱۳/۲۷ میلی‌لیتر بر ساعت معادل با نرخ جریان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه، انتخاب شد.

پس از آماده‌سازی ستون‌ها بدون گذشت زمان، جریان درون هر ستون اعمال شده و آلودگی به واسطه جریان آب و نیروی گرانش از قسمت بالایی ستون‌ها حرکت نموده و در

پلکسی گلاس با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۲/۴ سانتی‌متر بوده است. ستون‌ها روی یک صفحه تخت از جنس پلکسی گلاس محکم شده و به منظور استحکام و سهولت در نمونه‌برداری بر روی یک پایه فلزی قرار گرفتند. همچنین در انتهای هر ستون سوراخی به قطر ۰/۵ سانتی‌متر برای خروج آب و جمع‌آوری نمونه تعبیه شد.

شکل ۲. شماتیک و تصویر واقعی از پایلوت آزمایشگاهی مورد استفاده

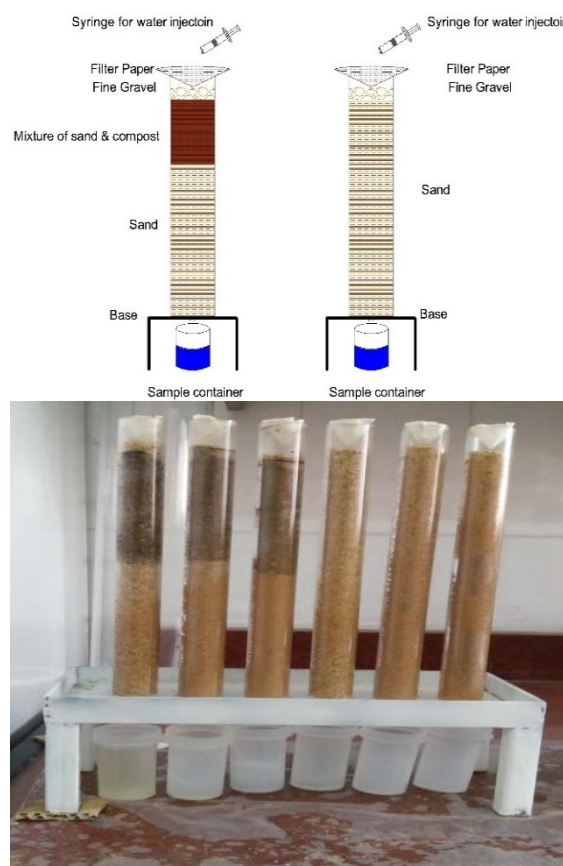


Fig. 2. Schematic diagram and real image of the used laboratory column

آنالیز ردیاب: در این پژوهش از آزمایش انتقال ردیاب با استفاده از محلول کلرید سدیم برای تعیین ضریب پراکندگی ماسه استفاده شد. بدین منظور ۵۰۰ میلی‌لیتر محلول کلرید سدیم با غلظت اولیه ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و با نرخ جریان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه به هر ستون تزریق و سپس در فواصل زمانی مشخص از خروجی ستون‌ها نمونه‌برداری و غلظت نمک در آنها اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است غلظت نمک در نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری هدایت الکتریکی با استفاده از منحنی کالیبراسیونی که بدین منظور تهیه شده بود انجام پذیرفت.

صورت رابطه (۳) توصیف می شود [20]:

$$D_h = \frac{D_d}{\theta} + D_m \quad (3)$$

که در آن؛ D_d : ضریب انتشار مولکولی (L^2T^{-1})، θ : رطوبت حجمی (L^3L^{-3}) و D_m : ضریب پراکندگی هیدرودینامیکی (L^2T^{-1}) است.

شار آلودگی تحت پدیده پراکندگی نیز توسط قانون فیک

به صورت رابطه (۴) در مدل تعریف شده است [19]:

$$\overrightarrow{D_{kl,x}} = \phi S_l \overrightarrow{K_{kl}} \cdot \nabla C_{kl} \quad (4)$$

که در آن؛ K_{kl} : تانسور پراکندگی که شامل دیفیوژن مولکولی (D_{kl}) نیز می شود، C_{kl} : غلظت جزء k در فاز مایع (ML^{-3})، S_l : درجه اشباع فاز مایع (بدون بعد) و ϕ : تخلخل خاک (بدون بعد) است.

بقای جرم برای جزء k در ارتباط با قانون دارسی، توسط رابطه بین حجم جزء k در هر حجم بین حفره ای بیان می شود، که به صورت رابطه (۵) محاسبه می شود [19]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi C_k \rho_k) + \nabla \cdot [\sum_{l=1}^n \rho_k (C_{kl} \overrightarrow{u_l} - \overrightarrow{D_{kl}})] = R_k \quad (5)$$

در رابطه (۵) حجم کل جزء k در واحد حجم میان حفره ای برابر با مجموع کل فازهای موجود از جمله فاز جذب شده نیز هست. این موضوع در رابطه (۶) بیان شده است [19]:

$$C_k = (1 - \sum_{c=1}^{n_{cv}} C_c) \sum_{l=1}^n S_l C_{kl} + C_k \quad \text{for } k=1, \dots, n_c \quad (6)$$

که در دو رابطه (۵ و ۶)؛ n_{cv} : تعداد کل اجزای موجود در سیستم شامل آب، آلاینده و هوا (بدون بعد)، $\overrightarrow{u_l}$: شار دارسی (LT^{-1})، ϕ : تخلخل خاک (بدون بعد)، n_p : تعداد فازهای موجود (بدون بعد)، C_k : غلظت جزء k جذب شده (ML^{-3})، ρ_k : چگالی جزء k در فشار استاندارد یک اتمسفر (ML^{-3})، D_{kl} : ضریب نفوذپذیری جزء k (L^2T^{-1})، C_{kl} : غلظت جزء k در فاز مایع (ML^{-3}) و S_l : درجه اشباع فاز مایع (بی بعد) است. در این پژوهش شرایط اولیه و مرزی به شرح زیر در حل رابطه (۵) مورد استفاده قرار گرفته است (C_0 : غلظت کل گازوئیل، h : ارتفاع کل ستون، z : پارامتر مکان، t : پارامتر زمان):

نهایت از درون سوراخ تعبیه شده در کف ستون خارج شد. در همه آزمایش ها نمونه خروجی از ستون جمع آوری و میزان غلظت گازوئیل درون آن اندازه گیری شد. برای اندازه گیری TPH ابتدا دستگاه با غلظت های معلوم از آلاینده مورد استفاده کالیبره شده، سپس با استفاده از منحنی کالیبراسیون، غلظت هر نمونه محاسبه شد.

۳-۲- روش ارزیابی عددی

در این پژوهش از نرم افزار UTCHEM (نسخه ۹) برای شبیه سازی استفاده شد. این نرم افزار قادر به مدل سازی فشار موئینگی^۳، نفوذپذیری سه فازه (مایع/ گاز/ فاز آلی و یا مایع/ فاز آلی/ فاز میکرومولسیون)، پراکندگی، انتشار مولکولی، جذب، واکنش های شیمیایی، انتقال جرم بین فازها و دیگر مسائل مشابه است. همچنین این مدل برای همه پارامترهای دبی، زمان و بعد مکان از روش تفاضل محدود با درجه دوم و سوم استفاده می کند. این نرم افزار برای مدل سازی جریان دو فازه آب و گازوئیل درون ستون و محاسبه توزیع آب و آلاینده رابطه (۱) را مورد استفاده قرار می دهد [13]:

$$\phi \rho_f \frac{\partial S_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho_f \frac{k_{rf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial P_f}{\partial z} - \rho_f g \right) \right) + q_f \quad (1)$$

که در آن؛ f : بیانگر فازهای آب و گازوئیل بین حفرات، S_f : درصد اشباع سیال (بدون بعد)، P_f : فشار سیال ($ML^{-1} T^{-2}$)، k_{rf} : نفوذپذیری نسبی سیال (بدون بعد)، k : نفوذپذیری ماسه (L^2)، ϕ : تخلخل (بدون بعد)، ρ_f : چگالی سیال (ML^{-3})، q_f : ترم تراوش سیال ($ML^{-3}T^{-1}$)، z : تراز ارزیابی (L) و g : شتاب ثقل (LT^{-2}) می باشد.

همچنین فلاکس آلودگی توسط قانون دارسی به کمک

رابطه (۲) محاسبه می شود [19]:

$$\overrightarrow{u_l} = - \frac{k_{rl} \overrightarrow{K}}{\mu_l} (\nabla P_l - \gamma_l \nabla h) \quad (2)$$

که در آن؛ $\overrightarrow{K}$: تانسور نفوذپذیری (L^2)، k_{rl} : نفوذپذیری نسبی فاز l (بدون بعد)، γ_l : وزن مخصوص فاز l ($ML^{-2}T^{-2}$)، μ_l : گرانیوی (ویسکوزیته) فاز l ($ML^{-1}T^{-1}$) و h : عمق محیط متخلخل (L) است.

ضریب پراکندگی هیدرودینامیکی آلاینده (D_h) نیز به

میلی گرم بر لیتر بوده که نشان از اثر کاهنده کمپوست بر غلظت بیشینه گازوئیل خروجی دارد.

همچنین نرخ افزایش غلظت گازوئیل در خروجی ستون‌ها به ترتیب برابر با: ۵۰/۸۷، ۲۶/۶۱، ۱۷/۸۷ و ۸/۲۱ میلی گرم بر لیتر بر ساعت بوده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار کمپوست، نرخ خروج آلاینده از ستون نیز کاهش یافته که این موضوع به سبب افزایش میزان جذب گازوئیل و همچنین توانایی نگهداشت آن توسط کمپوست بوده است [21]. در ادامه با اشباع شدن ستون توسط سیال (آب همراه با گازوئیل)، سطح تماس بین آب آلوده و ذرات ماسه افزایش یافته و در نتیجه نرخ جذب آلاینده روی ذرات ماسه افزایش به تبع آن به تدریج غلظت آلاینده خروجی از ستون کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج نرخ کاهش غلظت برای ستون حاوی ماسه تنها، مخلوط ماسه و ۵ گرم کمپوست، مخلوط ماسه و ۱۰ گرم کمپوست و مخلوط ماسه و ۱۵ گرم کمپوست به ترتیب ۵۲/۷۱، ۲۲/۴۷، ۱۶/۷۳، ۸/۵ میلی گرم بر لیتر بر ساعت برآورد شده است. نتایج حاکی از آن است که حضور کمپوست موجب کاهش نرخ جذب آلودگی توسط محیط متخلخل نیز شده است. در ادامه به سبب تداوم بارش، آلودگی جذب شده به ذرات محیط متخلخل دوباره به فاز مایع بازگشته و مرحله سوم یا فرآیند واجذب رخ داده است. در این مرحله مجدداً غلظت آلاینده‌ی خروجی از ستون با کمی افزایش همراه بوده است.

همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود هر چه مقدار کمپوست مخلوط با ماسه افزایش یافته، مرحله کاهش غلظت، طولانی‌تر شده به گونه‌ای که در هنگام استفاده از مخلوط ماسه و ۱۵ گرم کمپوست نمودار به شکل زنگوله‌ای با تنها یک بیشینه درآمده است. در حقیقت حضور کمپوست موجب کاهش مقدار و زمان مرحله واجذب (مرحله کاهش و سپس افزایش غلظت خروجی آلاینده) شده به شکلی که در ستون حاوی مخلوط ماسه و ۱۵ گرم کمپوست، مرحله واجذب آلاینده از ذرات ماسه به فاز سیال، تقریباً از بین رفته است.

پس از مرحله واجذب با تداوم بارندگی، گازوئیل باقی‌مانده درون ستون به تدریج شسته شده (مرحله اشباع) و از انتهای ستون خارج می‌شود. با این وجود مقداری از آلودگی تا پایان

- شرایط اولیه: $C(z, 0) = 0, \text{ for } z = h$

$C(z, t) = C_0, \text{ for } z = 0 \text{ \& } t = 0$

- شرایط مرزی: $\frac{\partial C}{\partial z} = 0, \text{ for } z = \infty$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر کمپوست بر انتقال گازوئیل درون ماسه

در این بخش اثر کمپوست زباله شهری به عنوان یک افزودنی و اصلاح کننده آلی بر انتقال و جذب گازوئیل در ماسه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۳) تأثیر کمپوست بر انتقال گازوئیل درون ماسه ریزدانه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار کمپوست میزان جذب گازوئیل به محیط متخلخل افزایش یافته و در خروج گازوئیل از انتهای ستون تاخیر ایجاد شده است.

تغییرات غلظت آلودگی در خروجی ستون در طول زمان به چهار مرحله مختلف قابل تفکیک بوده که می‌توان آنها را با فرایندهای توزیع، جذب، واجذب و اشباع تحلیل نمود [7]. همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود در ابتدا با ورود جریان آب به داخل ستون، به دلیل نیروی گرانش آلاینده همراه با آب حرکت کرده و به سمت پایین ستون حرکت می‌کند. در این مرحله غلظت آلودگی خروجی به مرور افزایش یافته تا به مقدار بیشینه خود برسد.

شکل ۳. تغییر در غلظت گازوئیل تخلیه شده از ستون‌های در طی زمان

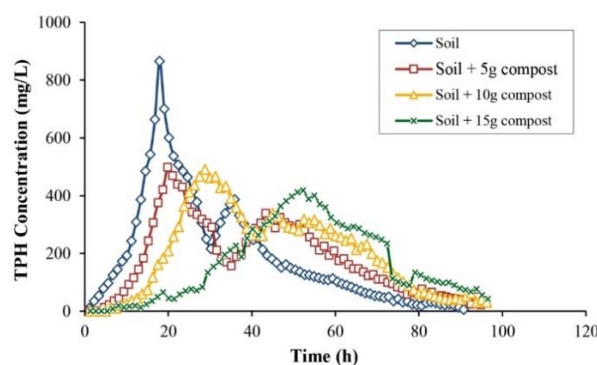


Fig. 3. Changes in the concentration of diesel discharged from different columns over time

در این پژوهش مقدار بیشینه غلظت گازوئیل خروجی برای ستون حاوی ماسه خالص، مخلوط ماسه و ۵ گرم کمپوست، مخلوط ماسه و ۱۰ گرم کمپوست و مخلوط ماسه و ۱۵ گرم کمپوست به ترتیب برابر با: ۴۱۸، ۴۹۱، ۴۹۸، ۸۶۵

آزمایش در بین ذرات ماسه و کمپوست به دام افتاده و از ستون خارج نمی شوند که به آن ظرفیت نگهداشت ناحیه مرزی اطلاق می شود. بر اساس تحقیق Fernandez-Bayo و همکاران [22] در سال ۲۰۰۹ و Thevenot و Dousset [10] در سال ۲۰۱۵، مواد آلی توانایی جذب آلاینده ها را داشته و حضور کمپوست در ماسه موجب افزایش نگهداشت آلودگی درون محیط متخلخل شده و مدت زمان خروج آلودگی از ستون را افزایش می دهد.

۳-۲- بررسی ویژگی های هیدرولیکی خاک

همان گونه که اشاره شد در این پژوهش از سدیم کلراید به عنوان ماده ردیاب برای تعیین ویژگی های هیدرودینامیکی ماسه بدون کمپوست استفاده شد. میزان پراکندگی نیز با مقایسه

جدول ۳. پارامترهای ورودی مدل عددی انتقال ردیاب

Type of Sand	Density (g/cm ³)	Porosity (n)	Water Density (g/cm ³)	Water Viscosity (mm ² /s)	NaCl Concentration (mg/l)	Flow Rate (mL/min)	Permeability (cm/min)	Time Step(h)
Fine	2.21	0.52	1	1	1000	0.25,0.5,1	0.00001	1.1,2.3,4.6
Medium	1.95	0.43	1	1	1000	0.25,0.5,1	0.0001	1.1,2.2,4.5
Coarse	1.83	0.38	1	1	1000	0.25,0.5,1	0.001	1.2,1.2,4.5

Table 3. Input parameters of the numerical model of the tracer transport

توسط مدل UTCHEM در همه موارد با تقریب خوبی با داده های آزمایشگاهی هماهنگی داشته است. بر اساس نتایج حاصل هر چه اندازه ذرات ماسه درشت تر باشد، میزان پراکندگی مؤثر نیز بیشتر بوده که این به دلیل افزایش خلل و فرج و امکان عبور بیشتر سیال از لابه لای ذرات آن است.

جدول ۴. مقادیر پراکندگی در آزمایش های مختلف

Type of Sand	Flow Rate (0.25 mL/min)		Flow Rate (0.5 mL/min)		Flow Rate (1 mL/min)	
	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	R ²	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	R ²	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	R ²
Fine	1.8	0.996	2	0.996	2.3	0.994
Medium	2	0.992	2.2	0.996	2.6	0.996
Coarse	2.3	0.997	2.5	0.995	2.8	0.996

Table 4. Dispersion values of all experiment

مطابق اطلاعات جدول (۴) هر چه نرخ جریان افزایش یافته حرکت آلاینده نیز راحت تر شده و در نتیجه میزان پراکندگی افزایش یافته است [4]. از آنجا که بافت و ویژگی های فیزیکی ماسه تأثیر ویژه ای بر مقادیر ضرایب پراکندگی ندارد [24] بنابراین مقادیر ضرایب پراکندگی به دست آمده در جدول (۳)

تغییرات غلظت خروجی اندازه گیری و شبیه سازی شده ردیاب نسبت به زمان در هر ستون در شکل (۴) ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می شود هر چه میزان پراکندگی افزایش یافته، شیب نمودار نیز افزایش یافته و در مدت زمان کمتری، میزان غلظت نسبی به مقدار ۱ (خروج کامل آلاینده از ستون) رسیده است. همچنین جدول (۴) به طور خلاصه مقادیر پراکندگی به دست آمده برای سه ماسه با دانه بندی ریز، متوسط و درشت را در سه نرخ جریان ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی لیتر بر دقیقه نمایش می دهد. در این راستا ابتدا با توجه به نتایج تحقیق Berlin و همکاران [4] یک محدوده برای پراکندگی در نظر گرفته شد. سپس به کمک روش سعی و خطا بین مقادیر محدوده ای در نظر گرفته شده، مقدار پراکندگی مربوط به هر ستون مشخص شد.

با مقایسه ضریب همبستگی (R²) در آزمایش های مختلف، مشاهده می شود که مقدار غلظت ماده ردیاب به دست آمده

داشته ولی درون روغن، حلال‌های آلی غیر قطبی و کربن آلی فاز جامد که در طبیعت به راحتی یافت می‌شوند، محلول هستند. ضریب پخش کربن آلی (K_{oc}) که توزیع آلاینده بین فاز آبی و بار آلی را توصیف می‌کند، بیشتر برای بررسی جذب هیدروکربن‌ها درون خاک استفاده می‌شود [3].

سرعت ماده شیمیایی در حال حرکت درون آب زیرزمینی در اثر جذب کاهش می‌یابد و یا در حرکت آن تأخیر ایجاد می‌شود. درجه تأخیر برای یک ماده شیمیایی به ضریب پخش (K_d) آن بستگی دارد. به همین دلیل رابطه انتقال باید با استفاده از پارامتر فاکتور تأخیر (R) اصلاح شود. این پارامتر مقاومت محیط متخلخل در برابر جابه‌جایی مولکول‌های آلاینده در خاک را ارزیابی می‌کند. فاکتور تأخیر (R) که پارامتری بدون بعد است، توسط رابطه (۷) تعریف می‌شود [20]:

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{n} K_d \quad (7)$$

که در آن ρ_b : دانسیته حجمی خاک (ML^{-3}), K_d : ضریب پخش آلاینده (L^3M^{-1}), n : تخلخل (بدون بعد) است.

پس از بررسی و تعیین پراکندگی به عنوان مهم‌ترین پارامتر هیدرودینامیکی انتقال، برای بررسی پارامترهای جذب مانند: ضریب پخش و فاکتور تأخیر، که مربوط به ارتباط بین آلاینده و محیط متخلخل هستند، انتقال گازوئیل درون ماسه مدل‌سازی شد. برای شبیه‌سازی انتقال در مدل UTCHEM، پایلوت آزمایشگاهی تا ارتفاع ۲۲ سانتی‌متر از ماسه تنها و سپس به عمق ۶ سانتی‌متر با مخلوط ماسه و کمپوست پر شد. همچنین پارامترهای مربوط به نوع ماسه و نوع آلاینده، پارامترهای جریان در محیط غیر اشباع و به دلیل چند فاز بودن جریان، پارامترهایی چون ویسکوزیته و دانسیته گازوئیل به عنوان فاز NAPL و ضرایب انتشار مولکولی هوا و گازوئیل، جداگانه برای مدل UTCHEM تعریف شد. جداول (۵ و ۶) به ترتیب پارامترهای هیدرولیکی محیط متخلخل برای ۱۲ ستون مختلف و پارامترهای مدل انتقال گازوئیل در ماسه مورد استفاده را نمایش می‌دهند. لازم به ذکر است مقدار هر یک از پارامترهای تخلخل و دانسیته ماسه با توجه به جدول (۱)، بار آلی خاک بر اساس مقدار کمپوست مخلوط شده با ماسه در هر ستون، نرخ جریان و گام زمانی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، پراکندگی

را می‌توان برای مدل‌سازی انتقال گازوئیل در مخلوط ماسه (ریز، متوسط و درشت‌دانه) با کمپوست مورد استفاده قرار داد.

شکل ۴: مقادیر غلظت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده ردیاب در ماسه ریز، متوسط و درشت‌دانه در نرخ‌های جریان مختلف

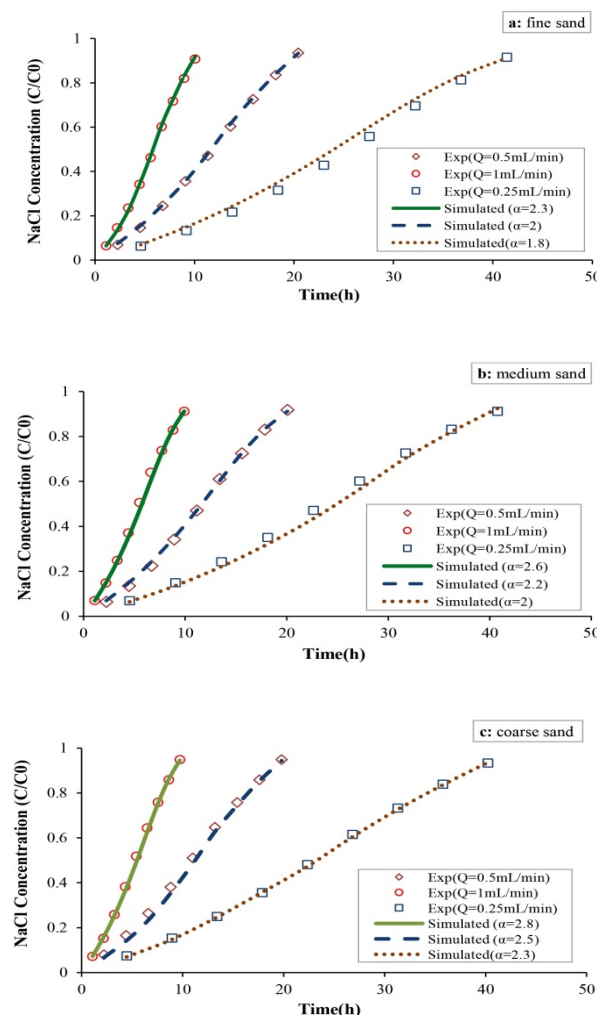


Fig.4. Laboratory and simulated tracer concentration values in fine, medium and coarse sand at various flow rates

۳-۳- ارزیابی پارامترهای انتقال گازوئیل در ماسه

جذب توسط ذرات خاک یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر انتقال آلاینده‌های آلی است. این فرآیند می‌تواند موجب کاهش تحرک و در نتیجه تجزیه زیستی، فراریت و نشت آلاینده شود. بنابراین فرآیند جذب نیز باید در بررسی انتقال جرم و نگهداشت آلودگی در محیط‌های متخلخل مد نظر قرار گیرد. مواد آلی با قطبیت کم مانند هیدروکربن‌ها بیشتر توسط مواد آلی خاک جذب می‌شوند. این مواد حلالیت کمی درون آب

بر اساس جدول (۴) و نفوذپذیری با استفاده از منابع و تحقیقات گذشته، انتخاب شده‌اند.

جدول ۵. پارامترهای هیدرولیکی محیط متخلخل

Column*	Porosity (n)	Density (g/cm ³)	Organic Content (f _{oc})	Flow Rate (mL/min)	Dispersion (cm ⁻¹)	Time Step(h)	Permeability (cm/min)
1	0.52	2.21	0.001	0.25,0.5,1	1.8, 2, 2.2	4.6, 2.27, 1.1	0.00001
2	0.53	2.04	0.028	0.25,0.5,1	1.8, 2, 2.2	4.67, 2.33, 1.17	0.00001
3	0.57	1.98	0.057	0.25,0.5,1	1.8, 2, 2.2	5, 2.5, 1.25	0.00001
4	0.62	1.8	0.085	0.25,0.5,1	1.8, 2, 2.2	5.35, 2.67, 1.33	0.00001
5	0.43	1.95	0.001	0.25,0.5,1	2, 2.2, 2.6	4.53, 2.23, 1.1	0.0001
6	0.43	1.82	0.028	0.25,0.5,1	2, 2.2, 2.6	4.53, 2.27, 1.13	0.0001
7	0.47	1.69	0.057	0.25,0.5,1	2, 2.2, 2.6	4.75, 2.37, 1.18	0.0001
8	0.5	1.44	0.085	0.25,0.5,1	2, 2.2, 2.6	5.15, 2.47, 1.28	0.0001
9	0.38	1.83	0.001	0.25,0.5,1	2.3, 2.5, 2.8	4.47, 2.2, 1.08	0.001
10	0.39	1.64	0.028	0.25,0.5,1	2.3, 2.5, 2.8	4.4, 2.2, 1.1	0.001
11	0.41	1.5	0.057	0.25,0.5,1	2.3, 2.5, 2.8	4.6, 2.3, 1.15	0.001
12	0.45	1.32	0.085	0.25,0.5,1	2.3, 2.5, 2.8	4.95, 2.47, 1.23	0.001

* Fine-grained sand column (1), Column of fine-grained sand mixed with 5 grams of compost(2), Column of fine-grained sand mixed with 10 grams of compost(3), Column of fine-grained sand mixed with 15 grams of compost(4), Medium-grained sand column(5), Column of Medium-grained sand mixed with 5 grams of compost(6), Column of Medium-grained sand mixed with 10 grams of compost(7), Column of Medium-grained sand mixed with 15 grams of compost(8), Coarse-grained sand column(9), Column of coarse-grained sand mixed with 5 grams of compost(10), Column of coarse-grained sand mixed with 10 grams of compost(11), Column of coarse-grained sand mixed with 15 grams of compost(12)

Table 5. Hydraulic parameters of porous media

جدول ۶. پارامترهای مدل انتقال گازوئیل

Density of Water & Diesel (g/cm ³)	Viscosity of Water and Diesel (mm ² /s)	Surface Tension Water/Diesel (mN/m)	Mass of Diesel (g)	Solubility (mg/l)	Inflow Discharge (mL/min)
1, 0.8223	1, 3.5	22	3.6	12	15,30,60

Table 6. Parameters of diesel transport model

شکل (۵)، منحنی داده‌های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده انتقال گازوئیل درون ستون‌های مختلف را نشان می‌دهد. برای محاسبه ضریب پخش در ستون حاوی ماسه و در نرخ جریان‌های ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی لیتر بر دقیقه، مدل عددی تهیه و از مقادیر پراکندگی به دست آمده در جدول (۴) به عنوان ورودی نرم افزار استفاده شد. سپس برای هر مدل با توجه به مطالعات کتابخانه‌ای، محدوده‌ای از ضریب پخش در نظر گرفته شده و به کمک روش سعی و خطا مقدار ضریب پخش با بیشترین هماهنگی با نتایج آزمایشگاهی به دست آمد. همچنین برای ستون حاوی ماسه و کمپوست، به طور جداگانه لایه رویی به عمق ۶ سانتی متر حاوی مخلوط خاک و کمپوست و لایه زیرین به عمق ۲۲ سانتی متر خاک بدون کمپوست مدل

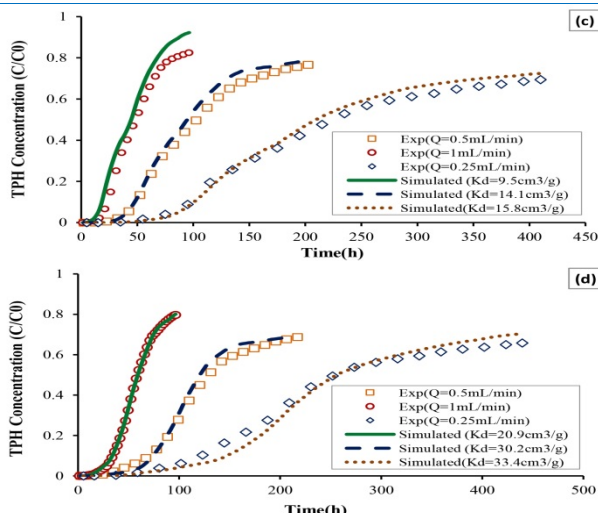


Fig. 5. Laboratory and simulated concentrations of diesel transfer in (a): fine-grained sand, (b): fine-grained sand mixed with 5 grams of compost, (c): fine-grained sand mixed with 10 grams of compost and (d): fine-grained sand mixed with 15 grams of compost at flow rates of 0.25, 0.5, 1 mL/min

همچنین با افزایش قطر ذرات از میزان ضریب پخش کاسته شده که این موضوع به سبب افزایش خلل و فرج و کاهش توانایی محیط متخلخل برای جذب آلاینده آلی از فاز مایع به فاز جامد است [24]. در پژوهشی مشابه، افزایش میزان چسبندگی آلاینده به ذرات خاک و به تبع آن افزایش میزان جذب آلودگی در مسیر جریان به دلیل کاهش سرعت جریان سیال گزارش شده است [26].

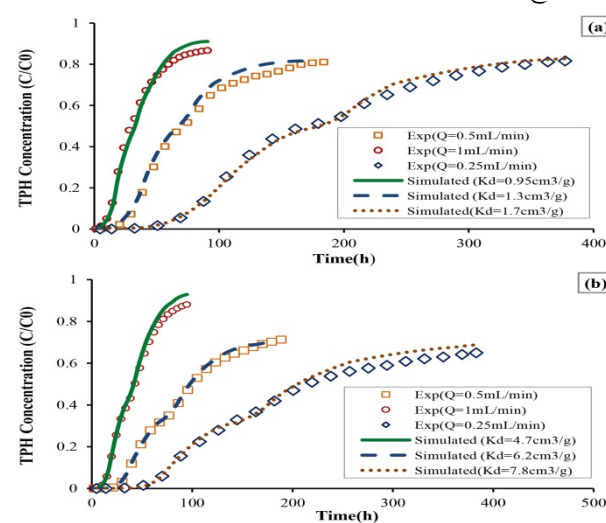
نتایج شبیه‌سازی ستون ۱ تا ۱۲ و مقادیر ضریب پخش ماسه (K_d) که به کمک مدل UTCHEM برآورد شده و همچنین فاکتور تأخیر (R) در جدول (۷) آورده شده است. مقادیر R^2 نیز حاکی از تقریب مناسب بین داده‌های اندازه‌گیری شده انتقال گازوئیل و مقادیر به دست آمده با استفاده از مدل UTCHEM در همه ستون‌ها است. این تقریب مناسب به دلیل داده‌های اندازه‌گیری شده جریان آرام آب بوده که وقوع هیچ گونه جریان آشفته‌ای را نشان نمی‌دهد [26].

شده است. تخلخل هر لایه متفاوت بوده و اطلاعات لازم برای مدل‌سازی به طور جداگانه برای هر لایه به نرم‌افزار ارائه شده است.

در این بخش پس از مدل‌سازی ستون با دو بخش دارای تخلخل و دانسیته متفاوت، مقدار ضریب پخش و فاکتور تأخیر مخلوط سه ماسه با دانه‌بندی ریز، متوسط و درشت و سه مقدار ۵، ۱۰ و ۱۵ گرم کمپوست، به کمک روش سعی و خطا تعیین شد. در این پژوهش برای ماسه بدون کمپوست از ضرایب پخش به دست آمده از ستون ماسه بدون کمپوست استفاده شد. برای ماسه مخلوط با کمپوست بازه‌های متفاوتی از ضریب پخش به کمک روش سعی و خطا به کار گرفته شده و در پایان ضریب پختی که بیشترین هماهنگی را با نتایج آزمایشگاهی داشت، مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به شکل (۵)، مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ جریان، میزان ضریب پخش کاهش یافته است. افزایش نرخ جریان در محیط متخلخل موجب کاهش زمان تماس آلاینده و ذرات ماسه و در نتیجه کاهش جذب آلودگی می‌شود [25].

شکل ۵. مقادیر غلظت آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده انتقال گازوئیل در (الف): ماسه ریز، (ب): مخلوط ۵ گرم کمپوست با ماسه ریز، (پ): مخلوط ۱۰ گرم کمپوست با ماسه ریز و (ت): مخلوط ۱۵ گرم کمپوست با ماسه ریز در نرخ‌های جریان ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه



می‌توان به افزایش توانایی نگهداشت گازوئیل درون ستون در اثر افزایش مواد آلی (کمپوست) نسبت داد [10]. همان‌گونه که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، فاکتور تأخیر در مخلوط ماسه ریزدانه و کمپوست با افزایش دو برابری مقدار کمپوست به ترتیب در نرخ‌های جریان ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵، به میزان ۷۸، ۱۰۰ و ۸۰ درصد افزایش یافته است. همچنین در مخلوط ماسه متوسط و کمپوست با افزایش دو برابری مقدار کمپوست به ترتیب در نرخ‌های جریان ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵، به میزان ۶۸، ۸۹ و ۷۲ درصد و در مخلوط ماسه درشت‌دانه و کمپوست به میزان ۷۶، ۸۲ و ۷۳ درصد افزایش یافته است. در شکل (۷) نیز تغییرات فاکتور تأخیر نسبت به نرخ جریان در ستون‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

روابط ریاضی بین نرخ جریان سیال و فاکتور تأخیر برای هر یک از حالت‌های مورد بررسی در جدول (۸) ارائه شده است. با مقایسه این روابط در حالت‌های مختلف، مشاهده می‌شود که در خصوص هر سه نوع ماسه مورد استفاده، بین نرخ جریان و فاکتور تأخیر برای ماسه بدون کمپوست و مخلوط ماسه و ۵ گرم کمپوست رابطه نمایی حاکم است. این در حالیست که برای مخلوط ماسه با ۱۰ و ۱۵ گرم کمپوست، رابطه خطی دقیق‌ترین رابطه است.

شکل ۶. تأثیر محتوای کربن آلی بر ضریب پخش در سه نوع ماسه ریز، متوسط و درشت‌دانه و نرخ‌های جریان مختلف

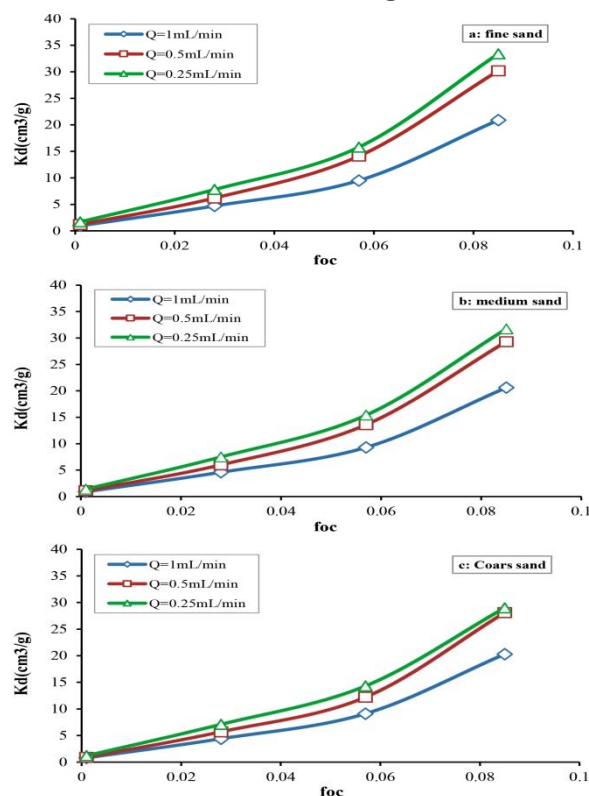


Fig. 6. The effect of organic carbon content on the distribution coefficient in three types of fine, medium and coarse sand and different flow rates

نتایج آزمایش‌ها در جدول (۷) همچنین نشان دهنده اثر افزایش کمپوست مخلوط با ماسه، بر ضریب پخش است. در این پژوهش، مقدار ضریب پخش در نرخ جریان ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه، با افزایش دو برابری مقدار کمپوست، ۱۱۰ درصد و در نرخ جریان ۰/۵ میلی‌لیتر بر دقیقه و ۰/۲۵ میلی‌لیتر بر دقیقه با افزایش دو برابری مقدار کمپوست، حدود ۱۲۰ درصد افزایش یافته است. لازم به ذکر است که بر اساس نتایج، ضریب پخش بیشترین تأثیر را از محتوای کربن آلی درون ستون می‌گیرد. تأثیر محتوای کربن آلی بر ضریب پخش برای هر سه نوع ماسه مورد استفاده و نرخ‌های جریان مختلف در شکل (۶) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در همه آزمایش‌ها با افزایش محتوای کربن (ناشی از افزودن کمپوست) میزان ضریب پخش نیز افزایش یافته است. در این پژوهش افزایش مقدار کمپوست بر فاکتور تأخیر که پارامتری وابسته به ضریب پخش است، نیز تأثیرگذار بوده و موجب افزایش آن شده است. دلیل این امر را

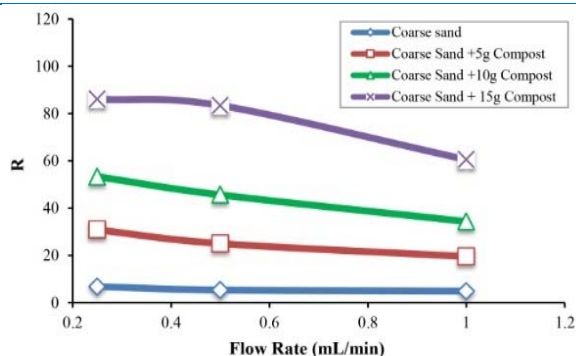
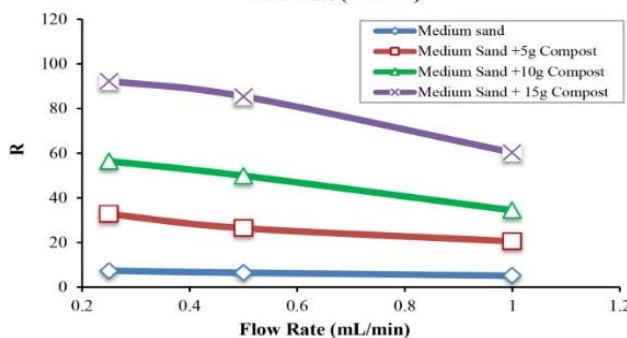
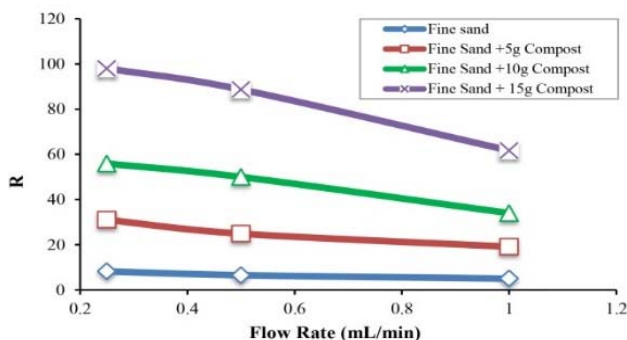


Fig. 7. Comparison between fluid flow rate and retardation factor in sand mixed with compost

شکل ۷. مقایسه بین نرخ جریان سیال و فاکتور تأخیر در ماسه مخلوط با کمپوست



جدول ۷. پارامترهای جذب شیمیایی و ضریب تعیین (R^2) مدل UTCHEM

Column *	Flow Rate (1 mL/min)			Flow Rate (0.5 mL/min)			Flow Rate (0.25 mL/min)		
	Distribution Coefficient K_d (cm ³ /g)	Retardation Factor (R)	R^2	Distribution Coefficient K_d (cm ³ /g)	Retardation Factor (R)	R^2	Distribution Coefficient K_d (cm ³ /g)	Retardation Factor (R)	R^2
1	0.95	5	0.964	1.3	6.52	0.926	1.7	8.22	0.967
2	4.7	19.1	0.931	6.2	24.9	0.944	7.8	31	0.932
3	9.5	34	0.912	14.1	50	0.938	15.8	55.9	0.918
4	20.9	61.7	0.937	30.2	88.7	0.902	33.4	98	0.893
5	0.9	5.1	0.966	1.2	6.44	0.914	1.4	7.34	0.907
6	4.6	20.5	0.935	6	26.4	0.896	7.5	32.7	0.899
7	9.3	34.4	0.894	13.6	49.9	0.917	15.4	56.4	0.905
8	20.6	60.3	0.912	29.3	85.4	0.887	31.7	92.3	0.913
9	0.8	4.85	0.918	0.9	5.33	0.913	1.2	6.78	0.895
10	4.4	19.5	0.923	5.7	25	0.897	7.1	30.8	0.902
11	9.1	34.3	0.893	12.2	45.6	0.904	14.3	53.3	0.911
12	20.3	60.5	0.910	28.1	83.4	0.884	29	86.1	0.889

* Fine-grained sand column (1), Column of fine-grained sand mixed with 5 grams of compost(2), Column of fine-grained sand mixed with 10 grams of compost(3), Column of fine-grained sand mixed with 15 grams of compost(4), Medium-grained sand column(5), Column of Medium-grained sand mixed with 5 grams of compost(6), Column of Medium-grained sand mixed with 10 grams of compost(7), Column of Medium-grained sand mixed with 15 grams of compost(8), Coarse-grained sand column(9), Column of coarse-grained sand mixed with 5 grams of compost(10), Column of coarse-grained sand mixed with 10 grams of compost(11), Column of coarse-grained sand mixed with 15 grams of compost(12)

Table 7. Chemical adsorption parameters and coefficient of determination (R^2) of the UTCHEM model

جدول ۸. روابط ریاضی بین نرخ جریان و فاکتور تأخیر

Type of Sand	Fine Grained	Medium Grained	Coarse Grained
Sand without Compost	$R = 5.0282Q^{-0.359}$ $R^2 = 0.9985$	$R = 5.1879Q^{-0.263}$ $R^2 = 0.9743$	$R = 4.7332Q^{-0.242}$ $R^2 = 0.9403$
Sand mixed with 5 grams of Compost	$R = 19.247Q^{-0.349}$ $R^2 = 0.997$	$R = 20.633Q^{-0.337}$ $R^2 = 0.9977$	$R = 19.63Q^{-0.33}$ $R^2 = 0.9975$
Sand mixed with 10 grams of Compost	$R = -29.6Q + 63.9$ $R^2 = 0.9951$	$R = -29.571Q + 64.15$ $R^2 = 0.9983$	$R = -24.943Q + 58.95$ $R^2 = 0.9934$
Sand mixed with 15 grams of Compost	$R = -49.2Q + 111.5$ $R^2 = 0.9929$	$R = -43.743Q + 104.85$ $R^2 = 0.9839$	$R = -35.8Q + 97.55$ $R^2 = 0.9447$

Table 8. Mathematical equation between flow rate and retardation factor

در ماسه در کند شدن حرکت گازوئیل و کاهش ریسک ورود آن به آب‌های زیرزمینی نقش به سزایی دارد. لازم به ذکر است آزمایش‌های بیشتری برای تکمیل این مطالعه و گسترش نتایج به دست آمده نیاز خواهد بود تا انتقال گازوئیل در ماسه مخلوط با کمپوست در دراز مدت بررسی و نیز اثر تجزیه بیولوژیکی در انتقال و سرنوشت گازوئیل تعیین شود.

۵- مراجع

- [1] Van der Perk M. 2006. Soil and Water Contamination: From Molecular to Catchment Scale. Taylor & Francis Group, London.
- [2] Balseiro-Romero, M, Monterroso, C, Casares, J.J, 2018. Environmental Fate of Petroleum Hydrocarbons in Soil: Review of Multiphase Transport, Mass Transfer, and Natural Attenuation Processes, *Pedosphere* 28(6), 833-847.
- [3] Hemond, H.F., Fechner, E.J., 2015. Chemical Fate and Transport in the Environment, third edition, Elsevier.
- [4] Berlin, M, Vasudevan, M, Kumar, G.S, Nambi, I.M, 2016. Numerical Modelling on Fate and Transport of Petroleum Hydrocarbons in an Unsaturated Subsurface System for Varying Source Scenario, *Journal of Earth system science* (124), 655-674.
- [5] Chrysikopoulos, C.V., Voudrias, E.A., Fyrrillas, M.M., 1994. Modeling of Contaminant Transport Resulting from Dissolution of Nonaqueous Phase Liquid Pools in Saturated Porous Media. *Transport in Porous Media*, 16:122-145.
- [6] Zalidis, G.C., Annable, M.D., Wallace, R.B., Hayden, N.J., Voice, T.C., 1991. A Laboratory Method for Studying the Aqueous Phase Transport of Dissolved Constituents from Residually Held NAPL in Unsaturated Soil Columns. *Journal of Contaminant Hydrology*,

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش امکان ارتقای ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک ماسه‌ای توسط کمپوست مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج، حضور کمپوست و افزایش میزان آن درون ماسه تغییر قابل توجهی در پارامترهای فیزیکی ماسه (دانسیته خشک) و پارامترهای هیدرولیکی حاصل از آنالیز عددی جریان آب و ردیاب درون ستون‌ها ایجاد نکرد. اما به وضوح افزایش مقدار کمپوست درون خاک، موجب کاهش حرکت گازوئیل و افزایش ظرفیت نگهداشت آن درون محیط متخلخل شد. این نتایج به سبب افزایش نرخ جذب آلودگی درون محیط متخلخل به واسطه حضور کمپوست است. با توجه به این که طبق نتایج، افزایش میزان کمپوست موجب افزایش پارامتر درصد کربن آلی محیط متخلخل شده است، این پارامتر نقش مهمی در فرایند جذب ایفا می‌کند. بررسی نتایج مربوط به توزیع و حرکت گازوئیل درون ستون‌ها، تغییرات چشمگیری در پارامترهای جذب مانند ضریب پخش و فاکتور تأخیر را نشان داد. در این پژوهش افزایش دو برابری میزان کمپوست مخلوط با ماسه، موجب افزایش ۱۱۰ درصدی میزان ضریب پخش محیط شد. فاکتور تأخیر نیز با افزایش دو برابری مقدار کمپوست در مخلوط ماسه ریزدانه و کمپوست، به ترتیب در نرخ جریان ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌لیتر بر دقیقه، به مقدار ۷۸، ۱۰۰ و ۸۰ درصد افزایش یافت. همچنین این فاکتور در مخلوط ماسه متوسط و کمپوست با افزایش دو برابری مقدار کمپوست به ترتیب در نرخ جریان‌های ۱، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌لیتر بر دقیقه، به مقدار ۶۸، ۸۹ و ۷۲ درصد و در مخلوط ماسه درشت‌دانه و کمپوست به ترتیب به مقدار ۷۶، ۸۲ و ۷۳ درصد افزایش یافت. نتایج کیفی و عددی حاصل از این پژوهش نشان داد که حضور کمپوست

- 109-118.
- [19] Kazemi Nia Korrani, A., Sepehrmoori, K., Delshad, M., 2013. Coupling IPhreeqc with UTCHEM to model reactive flow and transport, *Computers & Geosciences*, (82), 152-169.
- [20] Richter O, Dieckkrüger B, Nörtersheuser P. 1996. Environmental Fate Modelling of Pesticides. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- [21] Fenoll, J., Vela, N., Navarro, G., Perez-Lucas, G. and Navarro, S. 2014. Assessment of agro-industrial and composted organic wastes for reducing the potential leaching of triazine herbicide residues through the soil. *Sci. Total Environ.* 493: 124(132).
- [22] Fernandez-Bayo, J. D., Nogales, R. and Romero, E. 2009. Assessment of three vermicomposts as organic amendments used to enhance diuron sorption in soils with low organic carbon content. *Eur. J. Soil Sci.* 60: 935(944).
- [23] Sharma, R.S, Mohamed, M.H, 2003. An experimental investigation of LNAPL migration in an unsaturated/saturated sand, *Engineering Geology* (70) 305– 313.
- [24] Godoy, V. A., Zuquette, L.V. and Gómez-Hernández, J. J., 2019. Spatial variability of hydraulic conductivity and solute transport parameters and their spatial correlations to soil properties. *Geoderma*. 339: 59-69.
- [25] Wei1, X., Shao, M., Du, L., Horton, R., 2014. Humic acid transport in saturated porous media: Influence of flow velocity and influent concentration. *Journal of Environmental Science*, vol. 2554 – 2561.
- [26] Zhang, H, Ke, S., Zhang, S., Shao, J., Chen, H., 2020. Reactive transport modeling of pollutants in heterogeneous layered paddy soils: a) Cadmium migration and vertical distributions, *Journal of Contaminant Hydrology*. (235), 103735.
- 8:143-156.
- [7] Yang M, Yang Y S, Du X, Cao Y, Lei Y. 2013. Fate and transport of petroleum hydrocarbons in vadose zone: Compound specific natural attenuation. *Water Air Soil Pollution*. 224: 1439.
- [8] Pan, Y, Yang, J, Jia, Y, Xu, Z, 2015. Experimental study on non-aqueous phase liquid multiphase flow characteristics and controlling factors in heterogeneous porous media, *Environmental Earth Science*, 75-75.
- [10] Thevenot, M. and Dousset, S., 2015, Compost Effect on Diuron Retention and Transport in Structured Vineyard Soils, *Pedosphere*, 25(1). 25–36.
- [11] Smaranda, C., Popescu, M.C., Bulgariu, D., Malutan, T., Gavrilescu, M., 2016. Adsorption of organic pollutants onto a Romanian soil: Column dynamics and transport. *Process Safety and Environment Protection*, S0957-5820(16)30114-8.
- [12] Lenhard, R.J., Rayner, J.L., Davis, G.B., 2017. A practical tool for estimating subsurface LNAPL distributions and transmissivity using current and historical fluid levels in groundwater wells Effects of entrapped and residual LNAPL. *Journal of Contaminant Hydrology* (205), 1-11.
- [13] Gharedaghloo, B., Price, J.S., 2019. Characterizing the immiscible transport properties of diesel and water in peat soil. *Journal of Contaminant Hydrology* S0169-7722(18)30229-8.
- [14] Pan, Y., Zhang, Q., Yu, Y., Tong, Y., Wu, W., Zhou, Y., Hou, W., Yang, J., 2020. Three-dimensional migration and resistivity characteristics of crude oil in heterogeneous soil layers, *Environmental Pollution*, (268), 115309.
- [15] Alazaiza, M.Y.D., Ramli, M.H., Coptly, N.K., Ling, M.C., 2021. Assessing the impact of water infiltration on LNAPL mobilization in sand column using simplified image analysis method, *Journal of Contaminant Hydrology*, (238), 103769.
- [16] Kodešová, R, Kočárek, M, Hajková, T., Hýbner, M., Drábek, O., Kodeš, V., 2012. Chlorotoluron mobility in compost amended soil, *Soil & Tillage Research*, (118), 88-96.
- [17] User-Guide of Infracal TOG/TPH, CVH Model
- [18] Yang T., Wang Q., Xu D., Lv J., Lei Y. 2016. A method for estimating the interaction depth of surface soil with simulated rain. *Catena*. 124:

Investigation and Numerical Modeling of Diesel Fuel Transport in Sand Amended with Municipal Waste Compost

P. Zaferani¹, N. Mokhtarani^{2*}

1- Master's degree graduate, Civil & Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Associate Professor, Civil and Environmental Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

mokhtarani@modares.ac.ir

Abstract

In today's world, due to the production and extensive use of oil and its derivatives, soil pollution with oil compounds is a challenging subject. In Iran and many other countries, the soil around oil exploration reservoirs, refineries, etc., has been polluted by oil pollution and may also pollute groundwater. The greatest concern and danger are when the oil contaminant reaches the groundwater aquifer, its solvent dissolves in the water and contaminates the environment with groundwater. Therefore, the importance of studying how the contamination moves and spreads in the soil is clear and valuable. The purpose of this study is to investigate the effect of an organic amendment such as municipal waste compost on behavior and emission of diesel as a light non-aqueous phase liquid (LNAPL) in the sand and to use an efficient model to predict the distribution of pollutants in mixed sand with compost. Also, the effect of grain parameters and rainfall intensity on the way of diesel emission into the sand without compost and the sand mixed with compost was investigated. In this regard, in this study, 30 cm long columns with a diameter of 2.4 cm made of Plexiglas were used to simulate a one-dimensional environment of transmission. Three types of sand with the particle size of 0.1-0.25mm (fine-grained sand), 0.2-0.5mm (medium-grained sand), and 0.5-1.0mm (coarse-grained sand), prepared and after decontamination was entered into columns. The columns were filled to a height of 24 cm with sand, and the top layer to a height of 4 cm was filled with a mixture of sand and compost with specified ratios. Then, half a layer of mixed sand and compost in each column was soaked in diesel at a concentration of 20 mg per 1 gr of the sand. The distilled water was entered into the column at three flow rates of 1, 0.5, and 0.25 mL/min (equal to the intensity of 13.27, 6.33, and 3.31 cm/h, respectively) to simulate the process of transfer of diesel into the columns. Laboratory data have been simulated using a UTCHEM numerical model. UTCHEM is a three-dimensional and multi-phase model that simulates the process of flow and chemical transfer in homogeneous and heterogeneous porous media. Increasing rainfall intensity and particle diameter has led to an increase in the flow rate of contamination within the sand and reduce the time of contamination. There are no significant changes were observed in the parameter of the dispersion coefficient by increasing the amount of compost. As the amount of compost in the sand has increased, the soil distribution coefficient and the retardation factor, which are the two effective parameters on the absorption of pollutants, have increased. As an example, by doubling the amount of compost at flow rates of 0.25, 0.5, and 1 mL/min, the retardation factor increased by 78, 100, and 80 percent, respectively. These values for the mixture of medium sand and compost were 70, 79, and 71 percent, respectively, and in the mixture of coarse sand with compost were 76, 82, and 73 percent respectively. The amount of distribution coefficient has increased by 110% with doubling the amount of compost in all three types of sand. There is an exponential relationship between the intensity of the rainfall and the distribution coefficient in the mixture of fine-grained sand, medium-grained sand, and coarse-grained sand and three amounts of 5, 10, and 15 grams of compost. In a mixture of the three types of sand, there is an exponential relationship between flow intensity and retardation factor for sand without compost and sand mixture and 5 grams of compost. In the case of mixing all three types of sand with 10 grams and 15 grams of compost, the linear relationship is the most accurate mathematical equation between flow intensity and retardation factor.

Keywords: petroleum pollution, contaminant transport, soil pollution, compost, numerical transmission model