

مدل سازی فیلتر خاکی بیولوژیکی در مقیاس پایلوت برای حذف نیترات محلول

محمد پروین نیا* (استادیار)

سمیه سیروس پور (کارشناس ارشد)

منصور پرویزی (استادیار)

گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه یاسوج

مهندسی عمران شهریه (پاییز ۱۳۹۶)
دوری ۲ - ۳، ۳۳، شماره ۱/۳، ص. ۱۱۳-۱۲۳، (پادداشت ثنی)

در پژوهش حاضر، لایه های متناوب از فیلترهای ژئوتکستایل بافته نشده و ترکیب خاک اره و مصالح دانه یی (PRB) برای حذف نیترات بررسی شده است. نسبت وزنی مواد برای ساخت PRB به صورت ۲۵٪ ماسه، ۲۵٪ آنتراسیت، ۲۰٪ زئولیت، ۲۰٪ براده ی آهن و ۱۰٪ خاک اره ی چوب سپیدار در نظر گرفته شده است. جهت تعیین منحنی رخنه برای فیلتر با تزریق پساب مصنوعی با غلظت اولیه ی ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نیترات، آشکار سازی نیترات در زمان ۲۵ دقیقه از شروع آزمایش اتفاق افتاده است. منحنی رخنه ی حاصل از آزمایش ستون، یک منحنی نرمال محسوب شده و ضریب انتشار طولی 1×10^{-7} مترمربع بر ثانیه به دست آمده است. فیلتر قادر است نیترات را به میزان ۹۹٪ بعد از ۹ روز کاهش دهد. با استفاده از نرم افزار CTRAN/W برآورد منطقی از روند حرکت آلاینده در فیلتر مدل سازی شده است که البته منحنی رخنه ی به دست آمده برآورد خوبی از زمان کل تشکیل منحنی شکست در شرایط آزمایشگاهی نیست؛ ولی زمان رخنه ی نیترات را نزدیک به مدل آزمایشگاهی محاسبه کرده است.

واژگان کلیدی: انتقال آلودگی، فیلتر خاکی، مدل سازی، حذف نیترات، مواد جاذب ارزان قیمت.

mparvinnia@yu.ac.ir
s.sirospor@gmail.com
parvizi@yu.ac.ir

۱. مقدمه

نیتروز آمین ها باعث تومورهای معده، مغز، سیستم عصبی، پوست و استخوان و نیز باعث تومورهای کبد، کلیه، ریه و مثانه می شوند. از دیگر اختلالات بهداشتی می توان به فشارخون بالا، افزایش مرگ و میر نوزادان، گواتر، نواقص سیتوژنیک و تولد نوزاد نارس اشاره کرد.^[۱] بر این اساس سازمان حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA)، بیشینه ی مقدار مجاز نیترات در آب آشامیدنی را 10 mg/L براساس نیترژن پیشنهاد کرده است.^[۲] مؤسسه ی استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، بیشینه ی مجاز نیترات در آب آشامیدنی را 50 mg/L بر حسب نیترات و 10 mg/L بر حسب نیترژن تعیین کرده است.^[۳] روش های مختلفی برای حذف نیترات از آب های آلوده پیشنهاد شده است که ایده ی استفاده از لایه های نفوذپذیر فعال^۲ (PRB) در پژوهش حاضر بررسی شده است.

برای اولین بار در دهه ی ۱۹۹۰، استفاده از لایه های نفوذپذیر فعال در آمریکای شمالی برای تصفیه ی آب های زیرزمینی استفاده شده است. فناوری جدید ذکر شده شامل ایجاد یک منطقه ی فعال و نفوذپذیر در مسیر آب های زیرزمینی آلوده است و بسته به نوع آلودگی، یک سری فعالیت های بیولوژیکی، شیمیایی یا هر دوی آن ها اتفاق می افتد و دامنه ی وسیعی از مواد محلول آلی و معدنی تصفیه و در نهایت از حرکت ابر آلودگی در آب زیرزمینی جلوگیری می شود.^[۴] بیش از ۱۱ مورد مطالعات پایلوتی و صحرایی در رابطه با استفاده از PRB در جهان انجام شده است.^[۵-۱۴]

ذائقه ی مصرف کنندگان آب به آلاینده هایی که نمود و تأثیر آبی دارند، مانند: طعم و بوی نامطبوع آب، تیرگی و کدورت، ذرات معلق، سختی و سنگینی آب حساسیت نشان می دهد؛ اما نسبت به آلاینده هایی نظیر نیترات که تأثیر آن دست کم ۱۵ سال بعد آشکار می شود،^[۱] و به مراتب خطرناک تر است، بی توجه است. آلودگی آب های زیرزمینی و سطحی به نیترات در بسیاری از مناطق دنیا به صورت یک مشکل جدی مطرح است.^[۲] استفاده از کودهای شیمیایی، عدم کنترل فاضلاب ها اعم از شهری، صنعتی و به خصوص فاضلاب های کارخانجات تولید مواد غذایی و فضولات حیوانی از منابع مهم ورود نیترات به آب های زیرزمینی است.^[۳] یون نیترات غیرسمی است؛ اما احیاء آن توسط میکروارگانیسم ها به نیتریت می تواند خطرات بهداشتی جدی برای انسان ها ایجاد کند.^[۴] در میان این خطرات بهداشتی می توان به بیماری سندرم کودک آبی^۱ که در نوزادان اتفاق می افتد اشاره کرد،^[۵] که نیترات موجود در رژیم غذایی عامل اصلی این نوع بیماری است و باعث اختلال در سیستم تنفسی و کاهش اکسیژن خون نوزادان و لذا باعث کبود شدن آن ها می شود. همچنین غلظت بالای آن می تواند باعث سقط جنین در زنان شود. محصول نیتروز آمین از نیترات سرچشمه می گیرد که یکی از عوامل و علت های سرطان دستگاه گوارش است.^[۱]

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۳/۱۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۶/۲۴، پذیرش ۱۳۹۴/۱۰/۱۴.

شیوهی استفاده از PRB برای حذف نیترات در آب زیرزمینی منطقه‌یی در کشور ژاپن به‌کار گرفته شده است. در روش PRB با استفاده از یک لایه‌ی نفوذپذیر که در مسیر جریان آب زیرزمینی قرار داده می‌شود، واکنش‌های لازم بی‌هوازی برای حذف نیترات صورت می‌گیرد. یک نوع پلاستیک ویژه که قابل مصرف توسط میکروارگانیسم‌های موجود است، وظیفه‌ی تأمین الکترون لازم در واکنش بی‌هوازی نیترات‌زدایی را بر عهده دارد و پودر آهن نیز هیدرولیز پلاستیک و حذف اکسیژن جهت بی‌هوازی شدن واکنش را انجام می‌دهد. نتیجه‌ی به‌دست آمده بعد از ۴ ماه، ایجاد لایه‌ی موردنظر حذف کامل نیترات در چاه‌های مشاهده‌یی پایین دست بوده است.^[۸]

در مطالعه‌ی دیگری در زیر مزرعه‌یی در گیفو^۳ ژاپن (۲۰۰۰) برای تصفیه‌ی آب زهکش‌هایی که آلوده به نیترات بودند، از یک لایه به ضخامت ۵/۵ متر PRB استفاده شده است که برای تعیین ماده‌ی مناسب ۴ ترکیب مختلف انتخاب شده است: قسمت اول، فقط با پودر آهن پر شده است که در زیر آن آمونیاک مشاهده شده است؛ قسمت دوم، فقط با ماده‌ی آلی؛ قسمت سوم، با خاک معمولی که در ۲ قسمت اخیر، هیچ‌گونه کاهش نیتراتی مشاهده نشده است؛ و بالاخره قسمت چهارم که مخلوطی از ماده‌ی آلی و پودر آهن بوده، توانسته است غلظت نیترات را در آب زهکشی شده به صفر برساند.^[۸]

مدل سازی پدیده‌ی انتقال آلودگی در محیط متخلخل، یک موضوع گسترده‌ی مطالعاتی است که حائز اهمیت است. برای نمونه، در مطالعه‌یی در هند به بررسی رفتار انتقال محلول از یک محیط متخلخل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی پرداخته شده است. آزمایش‌ها بر روی انواع متفاوتی از ماسه‌ها انجام و از محلول کلراید به‌عنوان آلاینده استفاده شده و نتایج آن حاکی از آن بوده است که منحنی‌های رخنه‌ی به‌دست آمده از آزمایش‌ها و مدل عددی تا حد زیادی هم‌خوانی دارند.^[۱۵] همچنین در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۳)، نتایج مدلی آزمایشگاهی و عددی برای بررسی رفتار انتقال محلول از طریق منحنی رخنه استفاده شده است که در آن از دو محلول فلوراید (محلول واکنشی) و کلراید (محلول غیرواکنشی) استفاده شده است. مقادیر ضریب انتشار هیدرودینامیکی و ضریب تأخیر با شبیه‌سازی آزمایشگاهی منحنی‌های رخنه تخمین زده شده و نتایج نشان داده است که نقطه‌ی بیشینه‌ی منحنی‌های رخنه برای محلول غیرواکنشی در مقایسه با محلول واکنشی بالاتر است و اطلاعات آزمایشگاهی می‌تواند به مدل‌های عددی که با روش اجزاء محدود انجام می‌شوند، اعتبار ببخشد.^[۱۶]

در پژوهش حاضر، لایه‌های متناوب از فیلترهای ژئوتکستایل غیربافته شده و خاک دانه‌یی برای کاهش و حذف آلودگی به‌کار رفته‌اند که از نظر قابلیت نفوذپذیری و قدرت جذب حائز اهمیت بوده و جهت کاهش کدورت و آلودگی‌های جذب‌شده استفاده شده‌اند. در انتخاب مواد به نکاتی از جمله کارایی آن: در حذف آلودگی، در دسترس بودن و تا حد امکان ارزان قیمت بودن توجه شده است. هدف اصلی پژوهش حاضر، مدل سازی پدیده‌ی انتقال آلودگی در محیط متخلخل (فیلتر طراحی شده) بوده است.

۲. مشخصات مصالح فیلتر

با توجه به اهمیت میزان نفوذپذیری در طراحی فیلتر بیولوژیک، در ابتدا به تعیین نسبت اختلاط مناسب مواد فیلتر از نظر نفوذپذیری، پس از انجام آزمایش‌های بار افتان پرداخته شده است. بدین منظور درصد وزنی مواد موردنظر برای ساخت فیلتر انتخاب و ضریب نفوذپذیری محاسبه و ارزیابی شده است. این مواد و همچنین

نسبت اختلاط آن‌ها باید به گونه‌یی باشد که علاوه بر داشتن تخلخل و نفوذپذیری کافی برای عبور آب حاوی آلودگی، زمان ماند کافی در فیلتر را نیز برای آن فراهم سازند. مشخصات مواد استفاده شده در ساخت PRB در پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

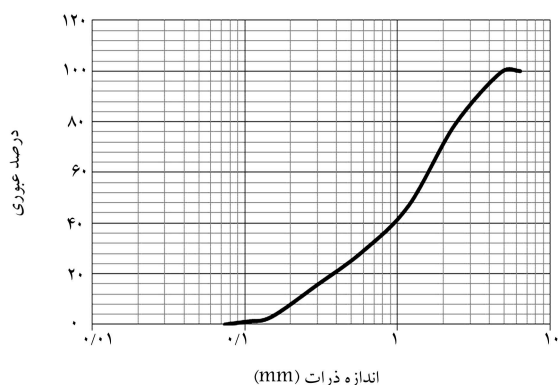
۱. کانی زئولیت: زئولیت‌ها، آلومینوسیلیکات‌های معدنی کریستالی و هیدراته‌ی فلزات قلیایی و قلیایی خاکی با شبکه‌ی سه‌بعدی هستند و به ۲ گروه عمده تقسیم می‌شوند:

۱. طبیعی مانند: کلینوپتیلولیت، آنالسیم، لامومتایت، فلیپسیت، موردنیت. در پژوهش حاضر از زئولیت طبیعی معدن سمنان با ساختار شیمیایی مشخص (جدول ۱) در ساخت PRB استفاده شده است.

۲. مصنوعی یا سنتزی مانند: Zeolon، ZSM-۵، F، Gamma. زئولیت در طبیعت ممکن است منشأ ماگمایی به همراه سنگ‌های آذرین داشته باشد و یا به صورت کانی ثانویه در اثر دگرسازی تشکیل شود. ظرفیت زیاد زئولیت‌ها در جذب آلاینده‌های کاتیونی، زمینه‌ی استفاده از آب‌ها را در فرایندهای تصفیه آب و فاضلاب گسترش داده است. با توجه به نتایج حاصل، استفاده از کلینوپتیلولیت در فرایند تصفیه‌ی آب‌ها اعم از فاضلاب‌های صنعتی، شهری و نیز در تصفیه‌ی آب شرب و در زمینه‌های مختلف کشاورزی و دام‌پروری توصیه می‌شود. ارزان بودن، بی‌خطر بودن برای خاک و محیط زیست و راندمان بالا در حذف آلاینده‌ها می‌تواند از جمله موارد مهم در انتخاب این کانی طبیعی به‌عنوان اصلاح‌کننده خاک و نیز تصفیه‌کننده‌ی آب‌های آلوده و فاضلاب‌ها در ایران به‌شمار آید.^[۱۷] با توجه به مطالعات پیشین، زئولیت معدن سمنان کارایی خوبی در حذف آلاینده از محیط آبی داشته است، بنابراین زئولیت مصرفی رد شده از الک ۱/۴ اینچ و مانده روی الک ۲۰۰ است. منحنی دانه‌بندی زئولیت استفاده شده در فیلتر، در شکل ۱ ارائه شده است.

۲. ماسه: ماسه‌ی استفاده شده از معادن شن و ماسه‌ی اطراف شهرستان یاسوج و از نوع شسته و شکسته و کاملاً تیز گوشه تهیه شده است. ماسه‌ی به‌کار رفته در ساخت PRB رد شده از الک ۱۶ و مانده بر روی الک ۲۰۰ است. از ماسه‌ی رد شده از الک ۸ و مانده روی الک ۱۶ نیز برای استفاده در لایه‌ی بالایی و پایینی فیلترها به‌عنوان زهکش استفاده شده است. ماسه‌ها روی الک ۲۰۰ به صورت کامل با آب شسته شده‌اند. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده در فیلتر، در شکل ۲ ارائه شده است.

۳. آتراسیت^۴: زغالی سخت، سیاه و براق است که شامل آب و مواد فرار به میزان



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی زئولیت استفاده شده در PRB.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی ژئولیت کلینوپتیلولیت سمنان.

Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O	کاهش درصد وزنی در اثر احتراق
۱۱٫۸	۶۶٫۵	۰٫۲۱	۱٫۳	۳٫۱۱	۰٫۷۷	۲٫۰۱	۳٫۱۲	۰٫۰۴	۰٫۰۱	۱۲٫۰۵*

* مقادیر بر حسب درصد (%) هستند.

جدول ۲. مشخصات لایه‌ی ژئوتکستایل.

واحد	خصوصیات
پلی پروپیلن و پلی استر	جنس مواد
۸۲۸	جرم واحد سطح
۶٫۷	میانگین ضخامت
۰٫۰۸	اندازه‌ی منافذ
۳٫۸۲	ضریب نفوذپذیری

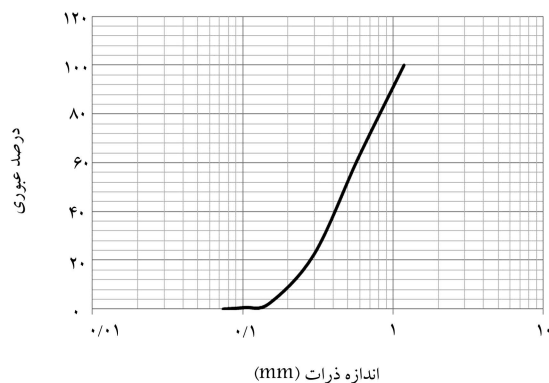
استفاده از روش‌های افت فشار، حد مجاز کدورت خروجی و روش کنترل زمان تعیین شده است. روش شست‌وشوی بیش‌بینی شده در پایلوت پژوهش حاضر، شست‌وشوی معکوس با آب بوده است.

۴. خاک اره: برای پایین آمدن هزینه‌ی لایه‌ی نفوذپذیر فعال و همچنین استفاده از موادی که به‌عنوان ضایعات در طبیعت رها می‌شوند یا سوزانده می‌شوند از خاک اره به‌عنوان یکی از مواد جاذب نیترات استفاده می‌شود. خاک اره‌ی مورد استفاده در پژوهش حاضر از کارگاه‌های چوب‌بری سطح شهر یاسوج جمع‌آوری شده و شامل خاک اره‌ی درختان سپیدار بوده است. تولید عمده‌ی خاک اره در کارخانه‌ی چوب‌بری است و این کارخانه‌ها معمولاً با یک نوع چوب سروکار دارند و خاک اره‌ی حاصل مخلوطی از چند نوع چوب نیست. بنابراین اگر نیاز به تأمین خاک اره باشد، به علت تولید زیاد در کارخانه‌های چوب‌بری باید از آنجا تأمین شود و تأمین آن از مغازه‌های نجاری مشکل است. خاک اره معمولاً در کارگاه چوب‌بری، یک زباله محسوب می‌شود و در حال حاضر بدون قیمت است و با مراجعه به کارگاه‌های مذکور به هر میزان که موجود باشد در اختیار قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر، اندازه‌ی ذرات خاک اره‌ی مصرفی در آزمایش‌های مختلف، کوچک‌تر از الک ۱۶ با چشمه‌ی ۱٫۱۸ میلی‌متر بوده است.

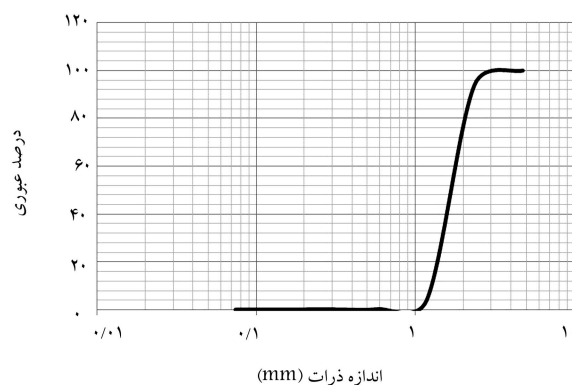
۵. براده‌ی آهن: از دورریز کارگاه‌های تولید در و پنجره‌ی فولادی تهیه شده است. ذرات درشت آن جداسازی، و سپس از الک ۱۶ با چشمه‌ی ۱٫۱۸ میلی‌متر عبور داده شده و روی الک ۲۰۰ شسته شده است. به‌منظور پاک کردن چربی سطح براده‌ی آهن از مواد شوینده برای شست‌وشوی آن استفاده شده است.

۶. ژئوتکستایل: ژئوتکستایل‌ها صفحاتی نازک، قابل‌انعطاف و نفوذپذیر هستند که از الیاف (رشته) مصنوعی ساخته شده‌اند و برای بهبود رفتار خاک در مهندسی عمران استفاده می‌شوند. ژئوتکستایل‌ها که نسبت به عبور سیالات و گاز نفوذپذیر هستند در بین ژئوستتیک‌ها، بیشترین کاربرد را دارند. ژئوتکستایل‌ها در یک دسته‌بندی کلی به ۲ دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: ژئوتکستایل‌های بافته^۵ که از الیاف بافته تولید می‌شوند و ژئوتکستایل‌های نبافته^۶ که به‌صورت سوزنی و با استفاده از دستگاه‌های پانچ تولید می‌شوند.^[۲۰] در پژوهش حاضر، از لایه‌های ژئوتکستایل بافته‌نشده‌ی ساخت شرکت نانو^۷ استفاده شده است. خصوصیات ژئوتکستایل به‌کار برده شده در پژوهش حاضر در جدول ۲ ارائه شده است.

۷. الیاف پلی‌استر: در پژوهش حاضر از الیاف پلی‌استر جهت پخش منظم و



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده در PRB.



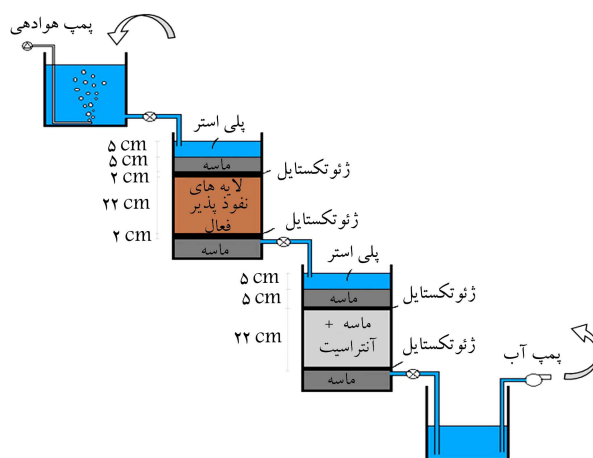
شکل ۳. منحنی دانه‌بندی آنتراسیت مصرفی در فیلتر.

کمینه و نیز کربن به میزان بیشینه (بین ۹۱ الی ۹۸ درصد) است. آنتراسیت به علت داشتن خصوصاتی مانند: داشتن خاصیت جذب سطحی بالا، حذف کدورت در حد بسیار عالی، مقاومت بالا به مواد شیمیایی و ... به‌عنوان ماده‌ی مناسب در ترکیب بستر صافی‌های دو بستری به منظور تصفیه‌ی آب به‌شمار می‌رود. چون شکل دانه‌ها در لایه‌ی آنتراسیت کاملاً بی‌قاعده و نامرتب است و دانه‌ها با یکدیگر تفاوت دارند، پس جرم لایه‌ی مذکور سبک‌تر است و لایه‌ی صافی به آسانی سفت و فشرده نمی‌شود. بنابراین صاف‌سازی نه فقط در لایه‌های سطحی، بلکه در لایه‌های عمیق‌تر نیز انجام می‌شود. براین اساس، افت فشار نسبتاً کمتر و تعداد دفعات شست‌وشو نیز کاهش پیدا می‌کند.^[۱۸] مهم‌ترین ویژگی فیزیکی این ماده‌ی جاذب (آنتراسیت)، سطح مخصوص قابل‌توجه آن است که به لحاظ ساختمان متخلخلی که دارد، ایجاد می‌شود. سطح مؤثر در ژئولیت و آنتراسیت ۳۰۰ تا ۷۵۰ مترمربع در گرم در نظر گرفته می‌شود.^[۱۹] آنتراسیت مصرفی در پژوهش حاضر، رده‌ی ۴ و مانده روی الک ۲۰۰ بوده و از معادن سمنان تهیه شده است. منحنی دانه‌بندی آنتراسیت مصرفی در فیلتر، در شکل ۳ ارائه شده است. زمان شست‌وشو در پژوهش حاضر با

یکسان پساب مصنوعی آلوده به نیترات بر روی فیلتر آشغال گیر برای جلوگیری از ورود مواد معلق بزرگ به درون فیلتر (در مقیاس صنعتی) جلوگیری از خروج مواد تشکیل دهنده لایه زهکش و همچنین ایجاد محیطی برای رشد میکروارگانیسم ها استفاده شده است. برای درصد های مختلف از ترکیب مواد مورد نظر، ضریب نفوذ پذیری به دست آمده است. ضریب نفوذ پذیری با استفاده از آزمایش نفوذ پذیری با بار افتان و براساس روش استاندارد ASTM ۴۳۴-۸۷ D تعیین شده است.

۳. آزمایش های ستون

در پژوهش حاضر، از آزمایش ستون برای تعیین منحنی رخنه برای لایه نفوذ پذیر فعال و بررسی تصفیه پذیری پساب مصنوعی حاوی نیترات استفاده شده است. بدین منظور از دو ستون مشابه ساخته شده از فایبرگلاس شفاف با قطر ۲۲/۵ سانتی متر به صورت سری استفاده شده است. ستون ها از بالا رو باز و از پایین یک شیر خروجی دارند. سیستم به صورتی طراحی شده است که نمونه پساب مصنوعی مورد آزمایش بتواند با جریان یکنواخت در فیلتر جریان داشته باشد. به این منظور از یک پمپ آب استفاده شده است. سیستم دو مخزن مجزا دارد که نمونه آب آلوده در مخزن اولی هوادهی و سپس به ستون اول وارد می شود؛ پس از خروج نمونه از ستون دوم، به داخل مخزن دوم ریخته می شود و توسط پمپ به مخزن اول بر می گردد (شکل ۴). دمای نمونه مورد آزمایش مستقیماً توسط دماسنجی که در ستون اول قرار دارد، قرائت می شود. آزمایش بیان شده در آزمایشگاه ژئوتکنیک دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه یاسوج انجام شده است. پس از انجام آزمایش های نفوذ پذیری و بررسی نتایج آن و همچنین با توجه به میزان در دسترس بودن مواد انتخابی در عمل، نسبت اختلاط وزنی مواد به صورت ۲۵٪ ماسه، ۲۵٪ آنتراسیت، ۲۰٪ زئولیت، ۲۰٪ براده آهن و ۱۰٪ خاک اره ی چوب سپیدار در نظر گرفته شده است. ستون های اول و دوم به صورت متفاوتی از مواد موجود پر شده اند. ستون اول از بالا شامل پلی استر، ۵ سانتی متر ماسه ی درشت یکنواخت، یک لایه ۲ سانتی متری ژئوتکستایل، ۲۲ سانتی متر PRB با نسبت اختلاط بهینه، سپس یک لایه ۲ سانتی متری دیگر از ژئوتکستایل و ۵ سانتی متر ماسه ی درشت یکنواخت است. ستون دوم نیز از بالا شامل: پلی استر، ۵ سانتی متر ماسه ی درشت یکنواخت، یک لایه ۲ سانتی متری ژئوتکستایل، ۲۲ سانتی متر مخلوط ماسه ی ریز (ماسه ی مشابه مخلوط به کار رفته



شکل ۴. سیستم فیلتر مورد استفاده در پژوهش حاضر.

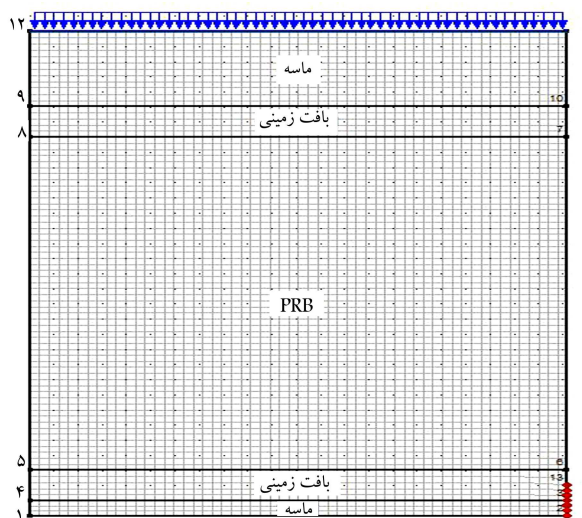
در ستون اول) و آنتراسیت، یک لایه ژئوتکستایل ۲ سانتی متری در پایین آن و در نهایت ۵ سانتی متر ماسه ی درشت یکنواخت بوده است. پس از آماده کردن فیلتر برای اندازه گیری تخلخل اجزاء مختلف آن و از آنجایی که فیلتر باید کاملاً اشباع شود، ستون از پایین آبگیری و حجم آب مصرف شده برای هر جزء، اندازه گیری شده است. تخلخل به دست آمده برای PRB ستون اول ۵۷/۵٪ بوده است، در حالی که این مقدار برای ماسه ی معادل آن در ستون دوم ۳۳/۷٪ به دست آمده است. طبق مطالعاتی در سال ۱۳۸۹ توده ی بیولوژیکی جهت تشکیل در محیط فیلتر به حدود ۱ ماه زمان سازگارسازی نیاز دارد.^[۱۲] بنابراین به دلیل ایجاد زمان مورد نیاز برای رشد توده ی بیولوژیکی در فیلتر، سیستم فیلتر در پژوهش حاضر با آب شرب راه اندازی شده و حدود ۱ ماه با شدت جریان ثابت در فیلتر جریان داشته است. بنابراین نحوه ی طراحی این سیستم به گونه یی بوده است که در ابتدا آب شرب و سپس نمونه ی پساب مصنوعی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نیترات به صورت پیوسته و با شدت جریان ثابت در فیلتر جریان داشته باشد. گردش پساب مصنوعی نیترات در سیستم مورد نظر حدود ۱ ماه بررسی و مشخص شده است که به دلیل رشد بیولوژیکی، دبی جریان خروجی از هر دو ستون کاهش یافته است ولی فیلتر در مدت آزمایش مسدود نشده است که دلیل آن می تواند دانه بندی یکنواخت آنتراسیت باشد که ۲۵٪ وزنی PRB را شامل می شود.

۴. مدل سازی عددی ستون آزمایشگاهی

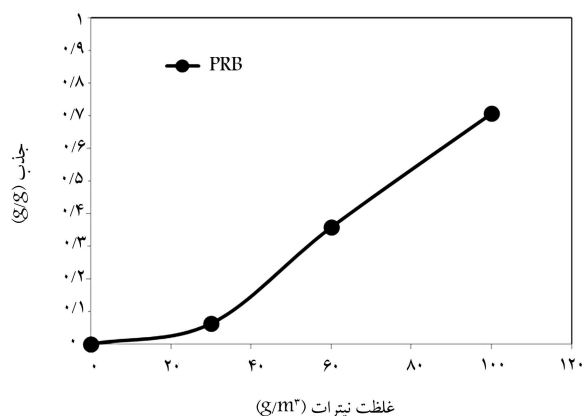
منحنی رخنه با استفاده ی هم زمان از نرم افزار های CTRAN/W و SEEP/W به دست می آید. نرم افزار SEEP/W سرعت دارسی یا دبی ویژه را محاسبه می کند و برنامه ی CTRAN/W سرعت جریان درون فیلتر را از برنامه ی SEEP/W می گیرد.

۱.۴. نرم افزار SEEP/W

به منظور تحلیل تراوش از بدنه ی محیط متخلخل مطابق با طرح در نظر گرفته شده برای مدل آزمایشگاهی از زیر برنامه ی SEEP/W-۲۰۰۷ نرم افزار GEO-Studio استفاده شده است. زیر برنامه ی SEEP/W یک محصول نرم افزاری با المان های متناهی است که از آن می توان در مدل سازی نحوه ی جابه جایی و توزیع فشار آب منفذی در داخل مواد متخلخل مثل خاک و صخره استفاده کرد و امکان آنالیز مسائل ساده و پیچیده ی نشت آب را فراهم آورد. نرم افزار مذکور در آنالیز و طراحی پروژه های ژئوتکنیکی، عمرانی، هیدرولوژیکی و معدن کاربرد دارد و نیز قابلیت آنالیز جریان های اشباع و غیر اشباع را دارد. برای مدل سازی جریان درون محیط متخلخل توسط این برنامه باید نقاط مختلف بدنه ی فیلتر و شکل هندسی تمام اجزاء آن و نیز تراز آب بالادست و پایین دست به صورت مختصات کارتزین به برنامه معرفی شوند. همچنین باید ضریب نفوذ پذیری (k) بدنه ی محیط به برنامه معرفی شود. در برنامه ی مذکور، قابلیت معرفی نفوذ پذیری به صورت تابعی از فشار وجود دارد. همچنین می توان درصد رطوبت حجمی را نیز به صورت تابعی از فشار و نسبت نفوذ پذیری در دو راستای X و Y به برنامه معرفی کرد. برنامه ی SEEP/W واقع معادله ی لاپلاس را به روش المان های محدود حل می کند. بنابراین لازم است تا اجزاء محیط متخلخل با دقت مناسبی المان بندی شوند. همچنین با تعریف شرایط مرزی در برخی گره ها، وضعیت های خاص مانند سنگ بستر (دبی عبوری صفر) به برنامه معرفی می شوند.



شکل ۵. هندسه‌ی مسئله، شرایط مرزی و المان‌بندی مدل عددی فیلتر در SEEP/W.



شکل ۶. تغییرات جذب بر حسب غلظت نیترات برای PRB (در مدت زمان ۳ روز و در pH بهینه در حضور ۱۰۰ گرم جاذب).

برای اینکه مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار CTRAN/W نزدیک به واقعیت عمل کند، نمودار جذب بر حسب غلظت نیترات برای PRB، ماسه و ژئوتکستایل که از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است، به نرم‌افزار داده شده است. شکل ۶، نمودار جذب بر حسب غلظت نیترات برای PRB در نرم‌افزار CTRAN/W است. تغییرات جذب بر حسب غلظت‌های مختلف نیترات برای ژئوتکستایل و ماسه، صفر است. در پژوهش حاضر، شرایط مرزی در هر الحاقیه‌ی SEEP/W و CTRAN/W مطابق مدل آزمایشگاهی تعریف شده است.

۳.۴. نحوه‌ی اجرا و لینک کردن الحاقیه‌های SEEP/W و

CTRAN/W

ابتدا برای حل جریان آب درون ستون، نرم‌افزار SEEP/W اجرا و نتایج لازم که شامل فشار، سرعت و دبی جریان بوده است از آن اخذ شده است. سپس با تعریف شرایط مرزی مناسب، مدل CTRAN/W اجرا شده است که مقادیر سرعت جریان در هر گره از طریق الحاقیه‌ی SEEP/W دریافت و با تعریف و اعمال شرایط مرزی

همچنین برنامه‌ی مذکور قادر به محاسبه‌ی میزان دبی عبوری از هر مقطع موردنظر و نیز رسم خط اشباع آب در درون محیط متخلخل است. البته به دلیل تحت فشار بودن جریان درون فیلتر پژوهش حاضر، مدل خط اشباع ندارد. جریان در مدل پژوهش حاضر، به صورت یک بعدی و عمود بر لایه‌هاست. به منظور تحلیل تراوش آب منطبق با طرح ارائه شده برای محیط متخلخل، وضعیت هندسی محیط متخلخل به طور کامل به برنامه معرفی و اجزاء محیط با دقت مناسب المان‌بندی شده‌اند. ابتدا محاسبات مربوط به ریز کردن شبکه تا رسیدن به شبکه‌ی بهینه انجام شده است. بعد از تکرار المان‌های متعدد، نهایتاً تعداد ۴۵۰۰ المان به عنوان شبکه‌ی بهینه انتخاب شده است، زیرا ریز کردن بیشتر و افزایش تعداد المان‌ها تأثیری در نتایج ایجاد نمی‌کند، بنابراین سایر شبیه‌سازی‌ها بر این اساس همان ۴۵۰۰ المان صورت گرفته است. شکل ۵، تصویری از هندسه‌ی مسئله، شرایط مرزی و شبکه‌ی المان‌های مربعی تعریف شده را نشان می‌دهد. معادله‌ی حاکم بر نشت دوبعدی در نرم‌افزار SEEP/W به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن: H هد کل، k_x هدایت هیدرولیکی در جهت x ، k_y هدایت هیدرولیکی در جهت y ، Q جریان مرزی، θ میزان رطوبت حجمی است. مقدار هد کل در لایه‌ی بالایی ستون اول، در مدت زمان آزمایش ستون در آزمایشگاه با زمان متغیر است. بنابراین تغییرات هد نسبت به زمان در آزمایشگاه اندازه‌گیری و به عنوان شرط مرزی به نرم‌افزار SEEP/W داده شده است. تغییرات هد کل نسبت به زمان، مطابق جدول ۳ است. مقادیر ضرایب نفوذپذیری و چگالی خشک برای هر ماده (جدول ۴) در آزمایشگاه به دست آمده و در مدل استفاده شده است تا نتایج مدل با واقعیت هم‌خوانی بیشتری داشته باشد.

۲.۴. نرم‌افزار CTRAN/W

این نرم‌افزار برای بررسی مسیر حرکت انتقال املاح در درون محیط متخلخل به کار می‌رود. معادله‌ی انتقال و انتشار یک بعدی در نرم‌افزار CTRAN/W به صورت رابطه‌ی ۲ است:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

که در آن: u سرعت متوسط خطی جریان، C غلظت آلایند، D ضریب پخش هیدرودینامیکی طولی. مقادیر $D_L = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ و $\alpha_L = 0.97$ و

جدول ۳. تغییرات هد نسبت به زمان در SEEP/W (شرط مرزی بالادست).

زمان (s)	۰	۲۷۰۰	۵۴۰۰	۸۱۰۰	۱۰۸۰۰
هد آب بالادست (m)	۰/۳۲۵	۰/۳۲۴	۰/۳۲۳	۰/۳۲۲۵	۰/۳۲۲

جدول ۴. ضرایب نفوذپذیری و چگالی خشک مصالح فیلتر در SEEP/W.

مصالح فیلتر	K-sat (m/sec)	چگالی خشک (gr/m³)
ژئوتکستایل	۰/۰۰۳۸۲	$7/8 \times 10^{+5}$
PRB	۰/۰۰۰۰۴	$1/53 \times 10^{+6}$
ماسه	۰/۰۰۰۰۷۴	۸۲۸

مناسب، معادله‌ی انتقال و انتشار یک بعدی متغیر با زمان حل شده و غلظت املاح (نیترات) با زمان در هر نقطه‌ی دلخواه از هندسه‌ی مدل قابل محاسبه بوده است.

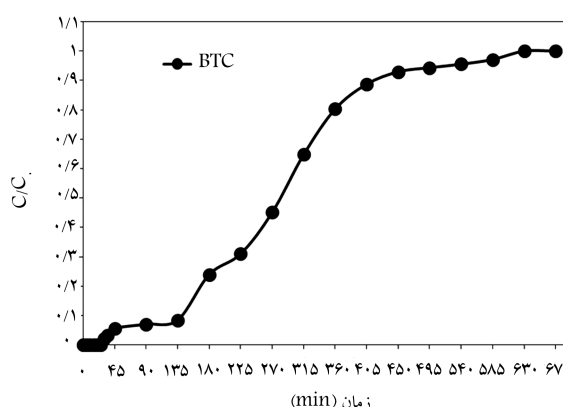
۵. بحث و نتایج

۱.۵. منحنی رخنه (BTC)

در این بخش، نحوه‌ی تعیین منحنی رخنه برای پساب مصنوعی با غلظت اولیه‌ی ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نیترات به عنوان نمونه تشریح شده است. نمونه برداری از خروجی ستون اول در مدت زمان کل ۶۷۵ دقیقه (تا رسیدن به زمان متناظر با $C/C_0 = 1$)، ابتدا با فاصله‌ی زمانی ۵ دقیقه تا رسیدن به زمان آشکارسازی نیترات و سپس با فاصله‌ی زمانی ۴۵ دقیقه انجام شده است که نتایج آن در شکل ۷ جمع بندی شده است. دقت برداشت و تعداد قرائت‌ها نسبت به زمان باید طوری باشد که منحنی رخنه با دقت خوبی قابلیت تشکیل داشته باشد. در شکل ۷، C غلظت متناظر با زمان t در خروجی فیلتر و C_0 غلظت اولیه‌ی تزریق نیترات است. به دلیل اینکه وجود پلی استر موجب تأخیر در رسیدن پساب مصنوعی به فیلتر می شود، آزمایش بدون وجود پلی استر (مشابه مدل شبیه سازی شده در نرم افزار) بر روی فیلتر انجام شده است.

در بررسی‌های حاوی جاذب (مربوط به مواد جاذب)، تعیین ناحیه‌ی انتقال جرم اهمیت دارد. این ناحیه بخشی از بستر ستون است که در آن پدیده‌ی جذب اتفاق می افتد. پس از اینکه آب آلوده به نیترات از این ناحیه از ستون عبور کرد آلودگی به مقدار کمی می‌تواند کاهش پیدا خواهد کرد و میزان جذب در مناطق پایینی ناحیه‌ی مذکور کاهش می‌یابد. با اشباع شدن لایه‌های فوقانی جاذب، ناحیه‌ی انتقال جرم به طرف پایین حرکت می‌کند تا هنگامی که پدیده‌ی رخنه^۸ یا در کل عمق اتفاق افتد. مطابق شکل ۷، آشکارسازی و رخنه‌ی نیترات در زمان حدود ۲۵ دقیقه اتفاق افتاده است. منحنی‌های رخنه‌ی برداشت شده به وسیله‌ی داده‌های صحرایی از حالت گوسی انحراف دارد و بازوی پایین رونده‌ی منحنی چولگی دارد؛ که این امر نشان می‌دهد که نمی‌توان مقدار واحدی را برای ضریب انتشار پیشنهاد کرد.^[۲۱]

تعیین چولگی در این شرایط مشکل است و البته روابط آماری خاصی برای تعیین ضریب چولگی وجود دارد، در شکل ۷، غیریکنواختی در منحنی رخنه‌ی PRB وجود دارد و می‌توان با تقریب مهندسی منحنی رخنه را به صورت شبه گوسی



شکل ۷. منحنی رخنه‌ی نیترات فیلتر (مواد جاذب بهینه (زئولیت، براده‌ی آهن و خاک اره به ترتیب ۱۵، ۱۰ و درصد وزنی)، هدایت هیدرولیکی 0.4×10^{-4} سانتی متر بر ثانیه و غلظت اولیه‌ی نیترات 100 میلی گرم بر لیتر).

طبقه بندی کرد. انتقال املاح در شرایط صحرایی نیازمند گذشت زمان است تا منحنی رخنه به حالت متقارن نزدیک شود. اما از آنجا که برداشت‌های صحرایی قبل از حصول شرایط ذکر شده صورت می‌گیرد، لذا این منحنی‌ها از حالت نرمال دور می‌شوند و ضریب انتشار به حالت مجانب^۹ نزدیک نمی‌شود. طبیعی است وقتی چنین شرایطی محقق نشود، انتقال املاح یک رفتار غیر فیک^{۱۰} از خود بروز می‌دهد. از این رفتار در مراجع با عنوان رفتار غیر فیک^{۱۱}، رفتار نامتعارف^{۱۱} و یا رفتار غیر گوسی یاد می‌شود.^[۲۲] بنابراین اگر زمان معادل نقطه‌ی $C/C_0 = 0.5$ ، نصف زمان متناظر با $C/C_0 = 1$ باشد، منحنی رخنه یک منحنی نرمال محسوب می‌شود و می‌توان یگانه مجهول مسئله یعنی ضریب انتشار طولی (D_L) را از معادله‌ی ۳ با سعی و خطا به دست آورد. با استفاده از درون یابی، زمان معادل $C/C_0 = 0.5$ حدود ۲۸۲ دقیقه به دست آمده است. زمان دقیق معادل $C/C_0 = 1$ در بازه‌ی زمانی ۵۸۵ تا ۶۳۰ قرار دارد، که حد اختلاف بین زمان معادل نقطه‌ی $C/C_0 = 0.5$ و نصف زمان متناظر با $C/C_0 = 1$ قابل صرف نظر است، لذا منحنی مذکور یک منحنی نرمال محسوب می‌شود و می‌توان از معادله‌ی ۳ برای به دست آوردن D_L استفاده کرد. تابع خطا $erfx$ و متمم تابع خطا^{۱۲} که به اختصار $erfc$ نامیده می‌شود، یک تابع ریاضی است که با توزیع نرمال ارتباط دارد. به عبارت دیگر، پاسخ‌ها یا حل‌هایی از معادلات و توابع ریاضی که به $erfc$ می‌انجامد، مثلاً همانند خود فرایند پخشیدگی، توزیع نرمال دارد.

در روابط مذکور C غلظت متوسط گیری شده در مقطع عرضی، u سرعت طولی میانگین، t زمان، x مختصات طولی در راستای جهت جریان است. با داشتن شرایط مرزی و اولیه (قانون فیک):^[۲۳]

$$\begin{aligned} C(x, 0) &= 0 & x \geq 0 \\ C(0, t) &= C_0 & t \geq 0 \\ C(\infty, t) &= 0 & t \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

حل تقریبی معادله‌ی مذکور بر حسب تابع خطای متمم به صورت رابطه‌ی ۴ می‌آید:^[۲۴]

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - ut}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad (4)$$

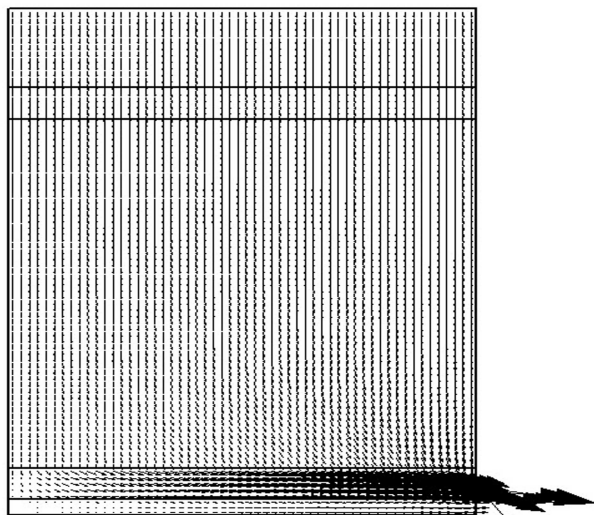
که در آن، D_L طی این مراحل به دست آمده است:

۱. شرایط مرزی و اولیه (برقرار بودن قانون فیک) عیناً مشابه شرایط معادله‌ی ۴ است.

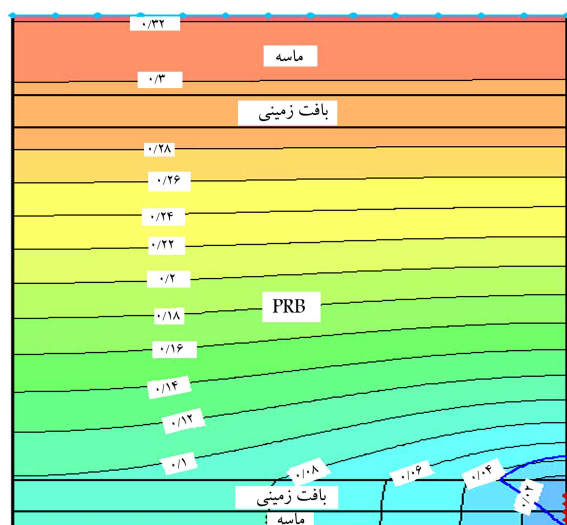
۲. با جای گذاری t (زمان متناظر با C/C_0)، x (طول ستون خاک)، u (سرعت متوسط عبور جریان) که برابر است با دبی عبوری از ستون خاک تقسیم بر سطح مقطع عبور جریان و C/C_0 غلظت نسبی در معادله‌ی ۴ و سپس از طریق سعی و خطا ضریب انتشار طولی محاسبه شده است. محاسبات در محیط صفحه گسترده‌ی اکسل انجام و تابع متمم خطا ($erfc$) به سهولت محاسبه شده است. در پژوهش حاضر، مقادیر پارامترها به صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$\begin{aligned} X &= 0.22 \text{ m} \\ u &= \frac{Q}{A} = 7.17 \times 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (5)$$

مقدار $D_L = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ برای PRB حاصل شده است که مقدار منطقی و قابل قبولی است. در پژوهش حاضر با توجه به مطالعات پیشین، از ضریب پخش



شکل ۸. بردارهای سرعت درون فیلتر حاصل از مدل عددی.



شکل ۹. خطوط کانطور هد کلی پس از اجرای مدل عددی.

۲.۳.۵. جبهه‌ی ردیابی

برای تبیین بهتر رفتار املاح یا ردیاب درون محیط متخلخل مورد بررسی لازم است چگونگی حرکت املاح در زمان‌های مختلف بررسی شود تا بتوان توصیف درستی از رفتار جریان و املاح ارائه کرد. [۲۶] در این مدل، فیلتر به صورت اشباع و با بار آلاینده‌ی ثابت به صورت یکنواخت از شروع تا زمان کامل شدن منحنی رخنه‌ی نیتراست. شکل‌های ۱۰ الی ۱۵، حرکت جبهه‌ی ردیاب به سمت شیر خروجی فیلتر در زمان‌های مختلف را نشان می‌دهد. غلظت آلاینده در ستون خاک و در شروع آزمایش، صفر است. شکل‌های مذکور، جبهه‌ی ردیاب را در محیط PRB نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به علت پایین بودن سرعت جریان، جبهه‌ی ردیاب با سرعت کمتری در حال گذر از محیط است. بنابراین سرعت جریان اثر معنی‌داری در حرکت جبهه‌ی ردیاب دارد. در مکانیسم پخشیدگی در نرم‌افزار، املاح از محلی که غلظت بیشتری دارد به محلی که غلظت کمتری دارد، انتقال می‌یابند. در مکانیسم انتشار، اختلاف سرعت مکانی املاح در فیلتر سبب پراکنش می‌شود. بنابراین پراکنش وقتی مؤثر است که آلاینده در فیلتر در حال حرکت باشد.

مولکولی نیتراست (D_m) در مقایسه با عبارت انتشار مکانیکی (عبارت حاوی سرعت جریان) صرف نظر شده است. [۲۴] با استفاده از رابطه‌ی ۶ و با جای‌گذاری مقدار D_L در معادله مقدار $\alpha_L = 0.097 m$ و $\alpha_T = 0.097 m$ برای لایه‌های نفوذپذیر فعال به دست آمده است: [۲۳]

$$D_L = \alpha_L u + D_m \quad (6)$$

۲.۵. عدد پکلت ۱۳

نسبت انتقال توده‌یی به انتشار به وسیله‌ی عدد بی بعد پکلت سنجیده می‌شود. این عدد به صورت رابطه‌ی ۷ تعریف می‌شود: [۲۳]

$$P_e = \frac{\langle u \rangle L}{D_L} \quad (7)$$

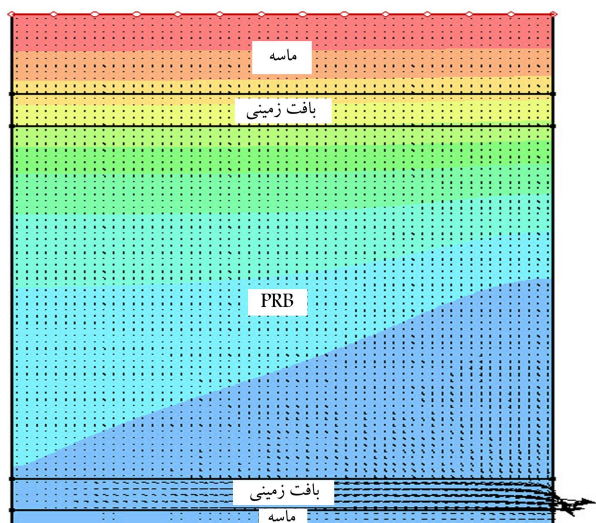
که در آن، $\langle u \rangle$ سرعت متوسط جریان، L مشخصه‌ی طولی و D_L ضریب انتشار هیدرودینامیکی طولی است. در مقیاس منفذی D_L همان ضریب پخش مولکولی (D_m) است. با استفاده از داده‌های موجود و به کار بردن معادله‌ی ۷، عدد پکلت برای PRB برابر ۱۵/۷۷۴ به دست آمده است. با توجه به عدد پکلت به دست آمده، تأثیر پخشیدگی و انتشار در جابه‌جایی مواد یکسان نیست. در سرعت‌های کم، پخشیدگی نسبت به انتشار آبی نقش بیشتری در جابه‌جایی مواد دارد، زیرا ارقام بزرگ پکلت مدلول سرعت‌سازو یا مسیر طولانی‌تر است و در چنین شرایطی آنچه موجد اختلاط مواد و انتشار آن می‌شود، تغییرات و نوسانات طولی و عرضی بردار سرعت است. [۲۵] نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که نقش انتقال توده‌یی در انتقال نیتراست به مراتب بیشتر از نقش پدیده‌ی انتشار است.

۳.۵. نتایج مدل‌سازی عددی

پس از به‌کارگیری نتایج آزمایشگاهی به عنوان اطلاعات پایه در مدل ستون در نرم‌افزارهای SEEP/W و CTRAN/W، نتایج این بخش به صورت زیر جمع‌بندی شده است:

۱.۳.۵. نتایج مربوط به جریان

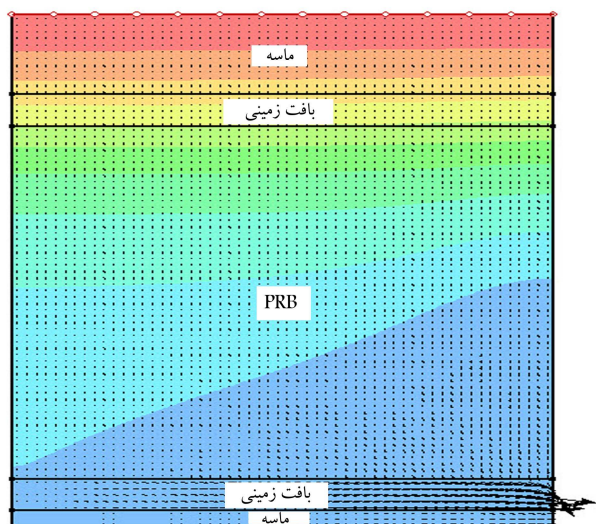
شکل ۸، بردارهای سرعت درون فیلتر را نشان می‌دهد که جهت بردار به سمت خروجی فیلتر است. در شکل ۹ مقادیر خطوط کانطور هد نشان داده شده است. تغییرات هد نسبت به زمان با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی به نرم‌افزار ارائه شده و مقدار دبی در هر مقطع عرضی ثابت و مقدار آن $10^{-5} m^3/s \times 0.27 \times 9/0$ به دست آمده است که مقداری منطقی و قابل قبول برای فیلتر مورد نظر است. برای بررسی منطقی بودن حرکت املاح درون فیلتر لازم است رفتار عبارت‌هایی از جمله: جبهه‌ی ردیابی، منحنی رخنه و غلظت متوسط‌گیری شده در PRB بررسی شود تا از نظر فیزیکی و ریاضی سازگاری داشته باشند. در پژوهش حاضر، مدل‌های نرم‌افزاری SEEP/W و CTRAN/W به منظور شبیه‌سازی یک بعدی حرکت آلاینده (نیتراست محلول) در محیط متخلخل فیلتر استفاده شده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، حرکت نیتراست در فیلتر، مدل‌سازی و بررسی شده است که در آن ستون خاک به صورت اشباع و با بار آلاینده‌ی ثابت به صورت یکنواخت از شروع تا زمان کامل شدن منحنی رخنه‌ی نیتراست است. فرایند جذب نیز در مدل پژوهش حاضر در نظر گرفته شده است.



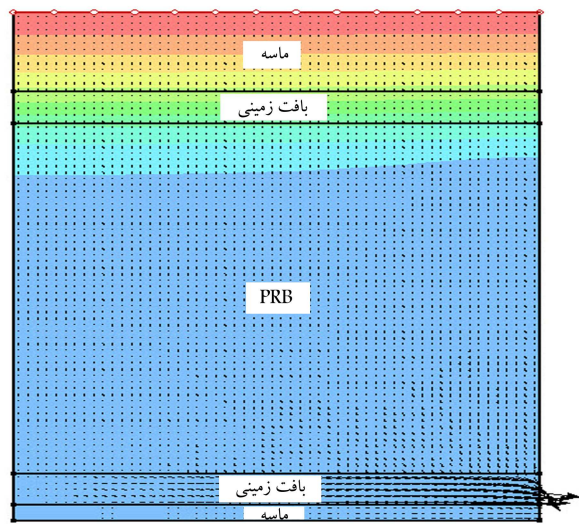
شکل ۱۳. جبهه‌ی ردیابی به‌دست آمده از مدل عددی در زمان ۱۹۸۱۵۳ ثانیه.



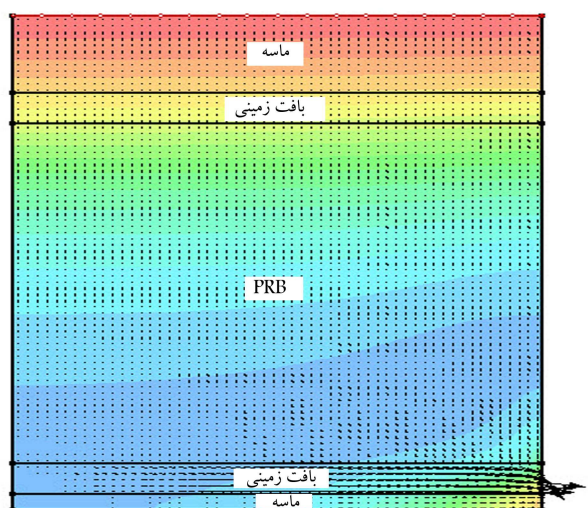
شکل ۱۰. جبهه‌ی ردیابی شبیه‌سازی شده به‌وسیله‌ی مدل عددی در شرایط اولیه.



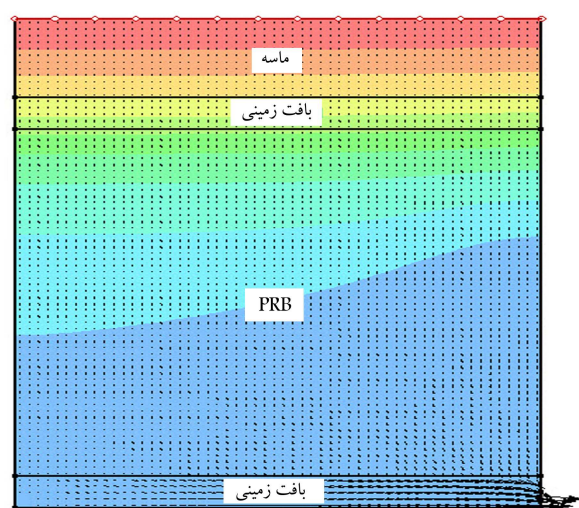
شکل ۱۴. جبهه‌ی ردیابی به‌دست آمده از مدل عددی در زمان ۳۷۶۲۲۷ ثانیه.



شکل ۱۱. جبهه‌ی ردیابی به‌دست آمده از مدل عددی در زمان ۲۲۰۵۲ ثانیه.



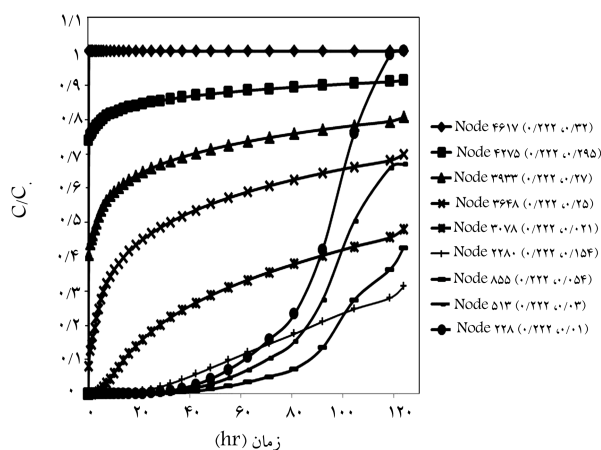
شکل ۱۵. جبهه‌ی ردیابی در زمان کامل شدن منحنی رخنه.



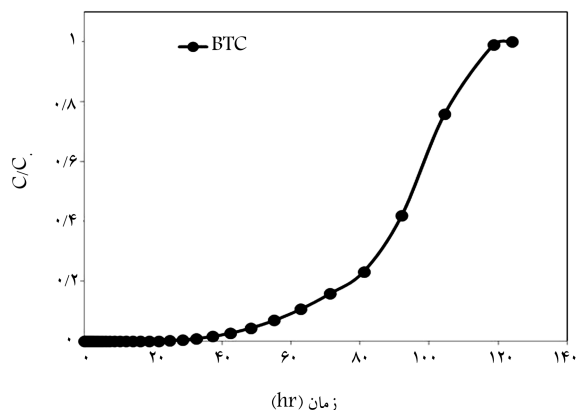
شکل ۱۲. جبهه‌ی ردیابی به‌دست آمده از مدل عددی در زمان ۱۱۶۰۸۵ ثانیه.

۳.۳.۵. منحنی‌های رخنه‌ی به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی

هنگامی‌که محلول نیترات با غلظت 10° میلی‌گرم بر لیتر، در ستون (فیلتر موردنظر) تزریق می‌شود، با توجه به جبهه‌ی ردیابی در زمان‌های مختلف مشاهده می‌شود که این ترکیب با زمان تغییر یافته و در نهایت، محلول نیترات با غلظت 10° میلی‌گرم بر لیتر بعد از گذشت زمان مشخصی در خروجی فیلتر آشکار می‌شود. شکل ۱۶، منحنی رخنه برای نقاطی از مدل که بر روی یک خط در طول فیلتر قرار دارند (نقاط با فاصله‌های متفاوت از کف ستون و در فاصله‌ی مساوی از بدنه‌ی فیلتر ($x = 0/222 m$)) را نشان می‌دهد؛ که مطابق آن، بین منحنی‌های نمونه‌های نقطه‌یی در مدل فیلتر اختلاف‌های واضحی مشاهده می‌شود. چون مجرای خروجی در گوشه‌ی پایینی فیلتر است، به علت پخشیدگی و انتشار املاح، با گذشت زمان منحنی رخنه به کامل شدن نزدیک‌تر می‌شود؛ به طوری که منحنی رخنه در مجرای خروجی فیلتر مطابق شکل ۱۷ است. در ورودی فیلتر، چون غلظت محلول نیترات در تمامی زمان‌ها ثابت است، مقدار C/C_0 در تمامی زمان‌ها برابر ۱ است. با گذشت زمان و با عبور ابر آلودگی از فیلتر، منحنی رخنه به صورت کامل تشکیل می‌شود. از نظر اصولی و آرمانی، منحنی BTC باید پس از خروج یک حجم مایع معادل تخلخل کل خاک، شکل قریه‌یی داشته باشد. در شکل ۱۷، که نمودار C/C_0 بر حسب زمان است، از لحاظ فیزیکی رفتار درست و منطقی دارد. شکل



شکل ۱۶. منحنی رخنه برای نقاطی از فیلتر با فاصله‌های متفاوت از کف ستون و در فاصله‌ی مساوی از بدنه‌ی فیلتر ($x = 0/222 m$).



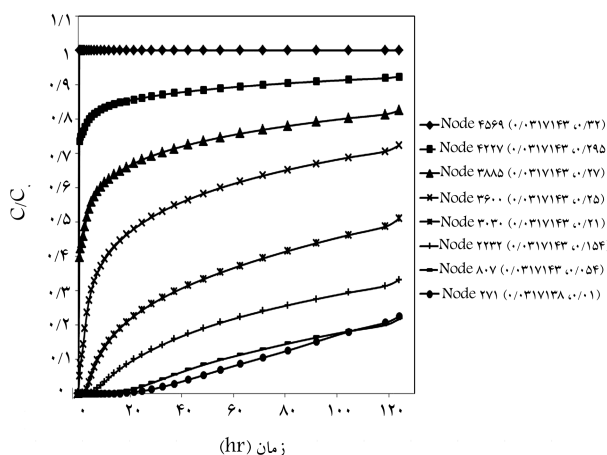
شکل ۱۷. منحنی رخنه‌ی نیترات مدل فیلتر در نرم‌افزار CTRAN/W.

منحنی رخنه از حالت تقارن یا گوسی انحراف کمی دارد. آشکارسازی و رخنه‌ی نیترات در زمان حدود ۲۴ دقیقه اتفاق می‌افتد، که با زمان شکست نیترات در مدل آزمایشگاهی (۲۵ دقیقه) تقریباً برابری می‌کند. منحنی رخنه‌ی نیترات در مدل عددی فیلتر (شکل ۱۷) نسبت به مدل آزمایشگاهی آن (شکل ۷)، چولگی بیشتری به سمت راست دارد؛ ولی شکل هر دو منحنی از لحاظ آماری و فیزیکی، منطقی و قابل قبول است و اختلاف مربوط به دلیل تفاوت شرایط محیطی فیلتر در مدل آزمایشگاهی و عددی است.

همچنین منحنی رخنه برای نقاطی از مدل که بر روی یک خط در طول فیلتر قرار دارند (نقاط با فاصله‌های متفاوت از کف ستون و در فاصله‌ی مساوی از بدنه‌ی فیلتر ($x = 0/32 m$)) به‌دست آمده است (شکل ۱۸). با مقایسه‌ی نقاط با مختصات ($0/01$ و $0/222$) و ($0/01$ و $0/32$) در بازه‌ی زمانی یکسان که به ترتیب نقطه‌یی در وسط مجرای خروجی (شکل ۱۶) و نقطه‌یی دور از مجرای خروجی (شکل ۱۸) در مدل هستند و هر دو نقطه در یک راستا (در فاصله‌ی یکسان از کف ستون) قرار دارند، مشاهده می‌شود که در نقطه‌ی قرار گرفته در وسط مجرای خروجی، منحنی رخنه تا کامل شدن پیشرفته است؛ ولی در نقطه‌ی دیگر، منحنی رخنه به علت جبهه‌ی حرکت املاح درون ستون، پخشیدگی و عدم انتقال کامل جرم آلاینده به این نواحی کامل نشده است.

۴.۳.۵. رابطه‌ی گرادیان غلظت با زمان برای PRB

در بررسی رفتار جبهه‌ی ردیاب، گرادیان غلظت در طول محیط فیلتر می‌تواند راهنمای خوبی برای تفسیر پدیده‌ی آن باشد، به همین دلیل مطابق شکل ۱۹، تعدادی نقطه در محیط PRB (سه نقطه در راستای هم در طول PRB و سه نقطه در راستای هم در قطر PRB) انتخاب شده است. سپس گرادیان غلظت برای اختلاف‌های 5 cm و 10 cm محاسبه شده است. C_i ، C_{i+1} و C_{i+2} غلظت‌های متوسط‌گیری شده در هر راستا از قطر PRB است که فاصله‌ی هر راستا تا راستای دیگر $0/5\text{ m}$ است. شکل ۲۰، میزان غلظت متوسط‌گیری شده در PRB برای دو حالت اختلاف 5 cm و 10 cm با زمان را نشان می‌دهد که مطابق آن با کاهش اختلاف هد، جبهه‌ی املاح با سرعت کمتری از محیط عبور کرده و بنابراین زمان بیشتری نیاز است تا جبهه‌ی املاح با اختلاف هد کمتر محیط را طی کند، به طوری که برای اختلاف هد بالاتر، زمان پیمایش جبهه‌ی املاح کمتر بوده است. مطابق شکل مذکور، گرادیان



شکل ۱۸. منحنی رخنه برای نقاطی از مدل فیلتر با فاصله‌های متفاوت از کف ستون و در فاصله‌ی مساوی از بدنه‌ی فیلتر ($x = 0/32 m$).

۶. بحث و نتیجه گیری

۱. پس از انجام آزمایش های نفوذپذیری و بررسی نتایج آن و همچنین با توجه به میزان دردسترس بودن مواد انتخابی در عمل، نسبت اختلاط وزنی مواد به صورت ۲۵٪ ماسه، ۲۵٪ آنتراسیت، ۲۰٪ ژئولیت، ۲۰٪ براده ی آهن و ۱۰٪ خاک اره ی چوب سپیدار در نظر گرفته شده است.

۲. با توجه به شست و شوی مواد سازنده ی فیلتر می توان انتظار داشت که فیلتر مورد نظر در درازمدت آلودگی بسیار کمی از خود آزاد کند.

۳. جهت تعیین منحنی شکست برای فیلتر با تزریق پساب مصنوعی با غلظت اولیه ی ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نیترات، آشکارسازی و رخنه ی نیترات در زمان ۲۵ دقیقه از شروع آزمایش اتفاق افتاده است. منحنی رخنه ی PRB را می توان با تقریب مهندسی شبه گوسی طبقه بندی کرد. منحنی رخنه یک منحنی نرمال محسوب شده و مقدار یگانه مجهول مسئله یعنی ضریب انتشار طولی $1 \times 10^{-7} m^2/s$ به دست آمده است.

۴. عدد پکلت برای PRB مورد نظر برابر ۱۵/۷۷۴ به دست آمده است که حاکی از تأثیر غالب فرایند انتقال توده یی در انتقال نیترات است.

۵. در آزمایش انجام شده جهت حذف آلودگی، فیلتر قادر است تا پس از رشد توده ی بیولوژیک در محیط خود، نیترات را به میزان ۹۹٪ بعد از ۹ روز کاهش و میزان نهایی آن را از ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر به ۱ میلی گرم بر لیتر کاهش دهد.

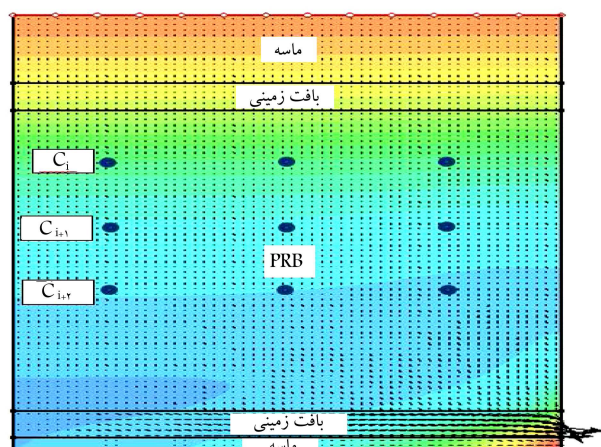
۶. مسدود شدن منافذ فیلتر در اثر رشد توده ی بیولوژیک با گذشت زمان زیادی از کارکرد فیلتر (بیش از ۱ ماه)، پس از گذشت یک دوره ی خشک برطرف شده و نفوذپذیری آن به شرایط اولیه ی خود برگشته است.

۷. به دلیل حفظ رطوبت توسط لایه ی PRB (به دلیل وجود خاک اره و اندازه ی کوچک منافذ لایه ی PRB)، توده های بیولوژیک تشکیل شده در ژئونکستایل در دوره های خشک به مدت طولانی قادر به حیات خود هستند. این امر علاوه بر تسریع رشد بیولوژیکی در هنگام عبور رواناب در دوره ی بعدی بارندگی، سبب باز شدن منافذ مسدود شده ی فیلتر نیز می شود.

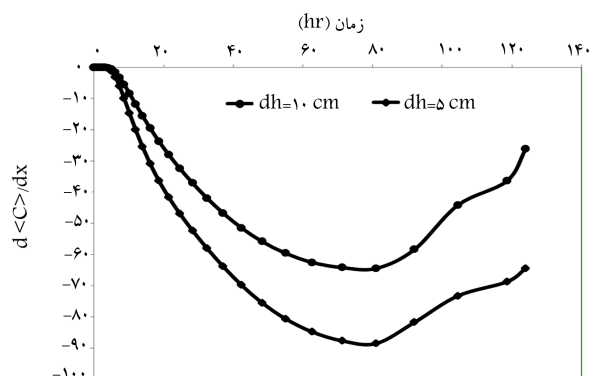
۸. مدل CTRAN/W برآورد منطقی و دقیقی را از روند حرکت آلاینده در فیلتر انجام می دهد.

۹. منحنی رخنه ی به دست آمده از مدل CTRAN/W، نمی تواند برآورد خوبی از زمان کل تشکیل منحنی رخنه در شرایط آزمایشگاهی بدهد؛ ولی مدل عددی شکست نیترات را با تقریب بسیار خوب و نزدیک به مدل آزمایشگاهی محاسبه می کند. شکل منحنی رخنه ی به دست آمده از هر دو مدل عددی و آزمایشگاهی از لحاظ آماری و فیزیکی، منطقی و قابل قبول است که با نتایج برخی پژوهش ها، [۱۶، ۲۶] هم خوانی دارد.

۱۰. با توجه به نتایج مدل عددی فیلتر طراحی شده، اهمیت بررسی انتقال آلاینده در فیلتر و نقش مهم مدل در مطالعه ی حاضر مشخص می شود. در واقع برای بررسی عملی حرکت عناصر، نیاز به آزمایش های بیشتر به صورت مداوم است که مشکل، وقت گیر و پرهزینه است. بنابراین بسیار مطلوب است که بتوان با مدل هایی حرکت املاح را برآورد کرد. با داشتن مدل مذکور، می توان سرنوشت عناصر را در فیلتر در شرایط مختلف مدیریتی تعیین کرد که هم از نظر زمان و هم از نظر هزینه، صرفه جویی خواهد شد.



شکل ۱۹. نقاط منتخب از محیط فیلتر جهت رسم نمودار گرادیان غلظت با زمان.



شکل ۲۰. رابطه ی بین گرادیان غلظت دو اختلاف هد با زمان در فیلتر.

غلظت دو اختلاف هد با زمان، رفتاری منسجم و منطقی دارند. بدین صورت که با کاهش اختلاف هد، زمان گذر جبهه ی ردیابی طولانی شده است، بنابراین نمودار گرادیان غلظت با زمان پهن تر شده است. نکته ی مهم دیگر، شکل منحنی هاست که شکلی نسبتاً نرمال است و پیک دو منحنی در یک سطح قرار دارند.

۴.۵. بررسی عملکرد فیلتر در جذب نیترات

نحوه ی طراحی این سیستم به گونه یی بوده است که نمونه ی پساب مصنوعی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر نیترات به صورت پیوسته و با شدت جریان ثابت (۱/۰/۰۰ مترمکعب بر ثانیه) در فیلتر جریان داشته باشد. گردش پساب مصنوعی نیترات در سیستم مورد نظر حدود ۱ ماه بررسی و مشخص شده است که به دلیل رشد بیولوژیکی، دبی جریان خروجی از هر دو ستون کاهش یافته است، ولی فیلتر در مدت آزمایش مسدود نشده است که دلیل آن می تواند دانه بندی یکنواخت آنتراسیت باشد، که ۲۵٪ وزنی PRB را شامل می شود. راندمان حذف نیترات توسط ستون اول (که شامل PRB) است برای ۴، ۶ و ۹ روز به ترتیب ۹۳/۰۲، ۹۶/۵۱ و ۹۸/۸۳ درصد بوده است که بیانگر توانایی بالای سیستم طراحی شده برای حذف کل نیترات محلول در مدت ۹ روز از پساب مصنوعی است. با توجه به اینکه ستون دوم، فیلتر ماسه یی است و بعد از ستون اول قرار دارد، نیترات نمونه ی خروجی از آن نسبت به نیترات ورودی به آن از ستون اول، در تمامی آزمایش ها تقریباً ثابت مانده و تغییری پیدا نکرده است. این روند به دلیل عدم جذب نیترات توسط ماسه و آنتراسیت است.

1. Methemoglobinemia
2. permeable reactive barriers
3. Gifu
4. Anthracite
5. woven geotextiles
6. nonwoven geotextiles
7. naue
8. break through
9. asymptotic
10. non-fickian
11. anomalous transport
12. error function compliment
13. Peclet

منابع (References)

1. Rosta, M.J. "Complications due to high nitrate in human water and food", *Second Conference Specialty of Biology Environmental Engineering* (2008).
2. Cho, D.W., Chon, C.M., Jeon, B.H., Kim, Y., Khan, M.A. and Song, H. "The role of clay minerals in the reduction of nitrate in groundwater by zero-valent iron", *Chemosphere*, **81**(5), pp. 611-616 (2010).
3. Mishra, P. and Patel, R. "Use of agricultural waste for the removal of nitrate-nitrogen from aqueous medium", *Journal of Environmental Management*, **90**(1), pp. 519-522 (2009).
4. Rodriguez-Maroto, J., Garcia-Herruzo, F., Gaecia-Rubio, A., Gomez-Lahoz, C. and Vereda-Alonso, C. "Kinetics of the chemical reduction of nitrate by zero-valent iron", *Chemosphere*, **74**(6), pp. 804-809 (2009).
5. Chabani, M., Amrane, A. and Bensmaili, A. "Equilibrium sorption isotherms for nitrate on resin Amberlite IRA 400", *Journal of Hazardous Materials*, **165**(1-3), pp. 27-33 (2009).
6. *EPA National Primary Drinking Water Standards*, EPA 8, EPA 816-F-09-0004 (2009).
7. *Industrial Standard and Research Institution*, The 5th Edn. (1997).
8. Soejima, T. "In situ remediation of nitrate-contaminated groundwater using a permeable reactive barrier", *Environmental Geotechnics (4th ICEG)*, de Mello and Almeida., **2**, pp. 811-816 (2002).
9. Parvinnia, M. "Filterability and recovery of civic floods using active penetrable layers", PhD Thesis, University of Shiraz, Department of Civil and Road Engineering (2007).
10. Yaman, C. "Geotextiles as biofilm filters in wastewater treatment", PhD Thesis, Department of Environmental Engineering, Drexel University, Philadelphia (2003).
11. Mohammed, T., Vigneswaran, S. and Kandasamy, J. "Biofiltration as pre treatment to water harvesting and recycling", *Water Sci. Technol*, **63**(10), pp. 2097-2105 (2010).
12. Ghasemian, M.K. "Modeling of biologic soil filters at pilot scale for removal of organic materials solved in civil floods", M.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, Yasouj University (2010).
13. Amini, S. "Filtration of color sewage in sewing factories using surface adsorbents with the aim of recovery", *The 4th International Conference of Civil Engineering* (1997).
14. Harris, B., *PRB's and Their Role in the Sustainable Remediation of Groundwater*, Belfast Northern Irland, UK (2004).
15. Patil, S.B. and Chore, H.S. "Experimental and Numerical Modeling of Solute Transport Through Porous Media", *International Journal of Engineering Research*, **22**(3), pp. 244-249 (2015).
16. Swami Deepak, Sharma, P.K. and Ojha, C.S.P. "Experimental investigation of solute transport in stratified porous media", *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, **19**(3), pp. 145-153 (2013).
17. Kamali, M. and Haji, S. "Application of zeolite in water and wastewater treatment", *First Conference on Biology Environmental Refining Technologies* (2011).
18. Delbazi, N., Ahmadi Moghadam, M., Takdastan, A. and Jafar Zade Haghighi Fard, N. "A comparison of filter performance layer of sand-floor and bilayer filter with Lika and anthracite floors in the removal of organic matter and turbidity", *Journal of Health and Environment, Journal Scientific Research*, **3**, pp. 301-312 (2011).
19. Samadi, M.T., Salimi, M. and Saghi, M.H. "Comparison of mercury removal from drinking water by activated carbon columns packed with natural zeolite Clinoptilolite and anthracite", *Journal of Water and Wastewater*, **4**, pp. 54-59 (2009).
20. Afandi Zade, SH. "Geotextiles (Textiles species)", *Journal of Road*, **17**, pp. 13-21 (1988).
21. Anwar, S., Cortis, A. and Sukop, M.C. "Lattice boltzmann simulation of solute transport in heterogeneous porous media with conduits to estimate macroscopic continuous time random walk model parameters", *Progress in Computational Fluid Dynamics*, **8**, pp. 213-221 (2008).
22. Sedghi-Asl, M. "Investigation of the limits of the dupuit analogue for steady gradually varied flow through coarse porous media", PhD Thesis, Faculty of Agricultural Engineering and Technology (2010).
23. Bear, J., *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Elsevier Science, New York (1972).
24. Ehtashami, M. and Sharifi, A. "Qualitative model aquifer Rey", *Journal of Environmental Science and Technology*, **4**, pp. 1-9 (2006).
25. Baiboudi, M., *Soil Phsics*, Tehran University Press, 8th Edn (2005).
26. Heydarpoor, M. and Oliaei, M. "Petroleum pollutants dispersion in soil affected by different conditions of soil and contaminants", *Journal of Omran Modares*, **13**(2), pp.39-51 (2013).