آنالیز حساسیت پارامترهای تأثیرگذار در طراحی دیواره‌های تراوای واکنش‌زا (PRBs) برای تصفیه آب زیرزمینی آلوده به ترکیبات نفتی محلول

مهران ناصری راد[1*]، محمدرضا صبور[2]، مجید احتشامی[3]

[1]کارشناس ارشد عمران- محیط زیست، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[2]دانشیار گروه محیط‌زیست دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[3]استادیار گروه محیط‌زیست دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

دریافت: 94/9/23 پذیرش: 95/7/7

چکیده

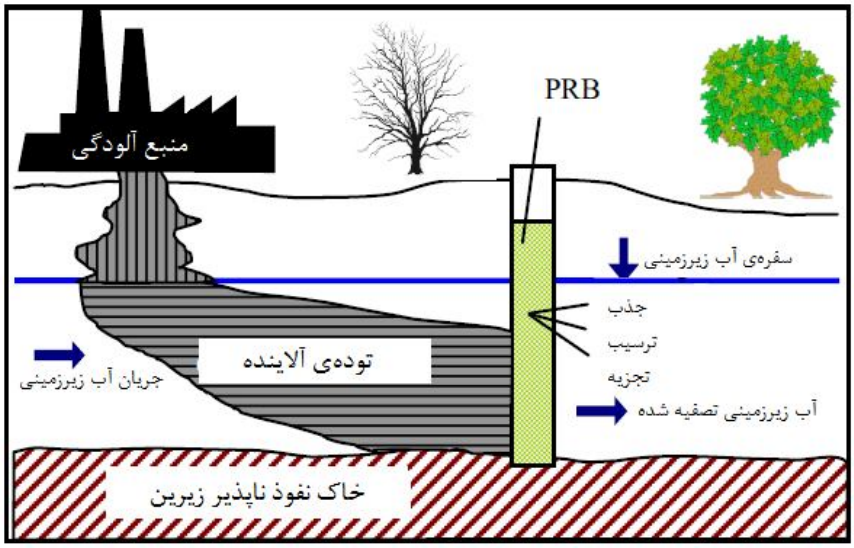
فناوری دیواره‌های تراوای واکنش‌زا (PRBs) یک فناوری خلاقانه برای پاک‌سازی درجای آب زیرزمینی آلوده می‌باشد. مفهوم PRB، شامل قرار دادن یک محیط واکنش‌زای عمود بر مسیر بالقوه‌ی جریان آب زیرزمینی است. هنگامی که توده‌ی آلودگی، تحت تأثیر گرادیان هیدرولیکی طبیعی خود از میان این محیط می‌گذرد، آلاینده‌های موجود در آن با محیط واکنش می‌دهند و این منجر به تغییر و تبدیل آن‌ها به ترکیباتی کم-خطرتر و یا تثبیت آن‌ها می‌گردد. با توجه به جوان بودن این فناوری در دنیا و عدم ورود آن به کشورمان، در این مطالعه سعی شد تا در مورد چگونگی تصفیه آلودگی‌های نفتی محلول و نحوه طراحی این دیواره‌ها برای این منظور تحقیق شود. تمرکز این مطالعه بر تحلیل و مدل‌سازی لازم برای طراحی دیواره‌های تراوای واکنش‌زا معطوف است و برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی عبوری از دیواره، از کد نرم‌افزاری Visual Modflow استفاده شد. سپس از شبیه‌سازی‌ها برای مطالعه‌ی حساسیت پارامترهای مختلف و شناسایی بحرانی‌ترین آن‌ها در طراحی سیستم استفاده گردید. با علم به این پارامترهای بحرانی و تحلیل آن‌ها در منحنی‌های طراحی مربوطه می‌توان در هر نقطه از کشور به حالت بهینه طراحی این دیواره‌ها دست یافت.

کلمات کلیدی: آلودگی آب زیرزمینی، تصفیه درجا، مدل‌سازی با Visual Modflow، دیواره‌های تراوای واکنش زا، آنالیز حساسیت.

* mnaserirad@mail.kntu.ac.ir

مقدمه

در آغاز دهه‌ی 90 میلادی روش دیواره‌های تراوای واکنش‌زا[1] معرفی و بسط داده شد. این روش به گروه روش‌های انفعالی پاک‌سازی درجا تعلق دارد و به نظر می‌رسد جاگزین مناسبی برای روش پمپاژ و تصفیه باشد، چرا که روش پمپاژ و تصفیه اغلب می‌تواند نسبتاً پرهزینه، بسیار زمان‌بر یا ناکارآمد باشد[1 و2]. قاعده‌ی کلی این روش در شکل 1 نمایش داده شده است.



شکل1. قاعده‌ی کلی پاک‌سازی آب زیرزمینی به وسیله‌ی دیواره‌های تراوای واکنش‌زا

روش دیواره‌های تراوای واکنش‌زا بر اساس ساخت یک دیوار تراوا استوار است، که از مواد واکنش‌زای مناسب تشکیل می‌شود. آب زیرزمینی آلوده از میان محیط واکنش‌زا، که فرآیند تصفیه در آن رخ می‌دهد، جریان می‌یابد. مواد واکنش‌زا، آلاینده‌ها را یا بی‌حرکت یا دچار تغییر و تبدیل (بیولوژیکی یا غیر زیستی) می‌کنند، به نحوی که آب زیرزمینی تصفیه شده در پایین دست دیواره‌ی تراوای واکنش‌زا، خطری برای منابع آب یا دیگر پذیرندگان آن نداشته باشد[3 و 4].

از هنگام ابداع فناوری پرمزایای PRB در اوایل دهه 1990، توانایی آن در حذف آلاینده‌های آب زیرزمینی به شکل گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بعضی از این بررسی‌ها فوق العاده است، و به موجب همین نتایج، فناوری PRB به عنوان یک جایگزین قابل اعتماد برای روش مرسوم پمپاژ و تصفیه شناخته شده است [9، 10، 11، 12، 13، 14]. با وجود این، هنوز کمبودی قابل توجه در مستنداتِ راجع به عملکرد طولانی مدت PRBها وجود دارد، چرا که بیشتر بررسی‌ها اساس آزمایشگاهی دارند [15]. همچنین گزارشاتی مبنی بر جانشینی آلودگی در بعضی از انواع PRBها منتشر شده است [17]، که این امر، بهبود آن‌ها را تا حدی که موجب تصفیه‌ی طیف وسیعی از آلاینده‌ها شود، و در نتیجهٔ آن موجب گسترش

[1] Permeable Reactive Barriers (PRBs)

تخصیص بودجه برای آن‌ها گردد، ایجاب نموده است. با این وجود، تا به امروز PRBها، با ثبت رکورد 200 مورد نصب میدانی از زمان آغازشان، یک فناوری امیدبخش در زمینه‌ی پاک‌سازی‌آلاینده‌ها محسوب می‌شوند[16].

گام‌های اولیه‌ی این فناوری اغلب شاهد کاربردهای PRB با استفاده از یک دیواره‌ی تنها متمرکز بود (که معمولاً با یک ماده‌ی واکنش‌زای تنها پر می‌شود)[16]. این دیواره‌ها عمدتاً برای توده‌های آلودگی دارای یک آلاینده یا آلاینده‌هایی با ماهیت مشابه (به عنوان مثال فلزات سنگین) به کار می‌رفتند. با این وجود، برای اکثر مکان‌هایی که توده‌ی آلودگی، مخلوطی از آلاینده‌هایی با خواص گوناگون فیزیکی، شیمیایی و ترمودینامیکی است (مثل: فلزات سنگین، BTEX و TCE) اثبات شد که چنین دیواره‌هایی ناکارآمد هستند[18]. جدای از عدم توانایی چنین دیواره‌هایی در کاهش دادن توده‌های دارای چند نوع آلاینده، اغلب محققین می‌بایست با پدیده‌ی جانشینی آلودگی هم دست و پنجه نرم می‌کردند، که به این صورت تعریف می‌شود: تولید یا آزاد شدنِ ناخواسته‌ی آلاینده‌های جدیدی در حین حذف آلاینده‌های دیگر که پتانسیل خطرناک بودن را دارا می‌باشند[20 و 21]. Lai و همکاران (2006) تولید ۱،۲ــ دی کلرو اتیلن و دی کلرومتان در حین کلرزدایی از هیدروکربن‌های آلیفاتیک کلرینه (CAHها) توسط ZVI را گزارش نمودند. Borden (2008) نیز تجمع cis-DCE و وینیل کلراید (VC) در حین حذف TCE و PCE را بیان نمود. تعدادی از مطالعات هم پدیده‌ی جانشینی آلودگی در حین استفاده از رآکتورهای زیستی نیترات زدا را برای حذف نیترات ناشی از سیستم‌های کشاورزی گزارش نمودند. نیترات معمولاً جانشین آلاینده‌هایی از قبیل آمونیوم یا گازهای گلخانه‌ای مانند اکسید نیتروس (N_2O)، CO_2 و CH_4 می‌شود.

ابتدا، پیامد جانشینی آلودگی در طراحی PRBها لحاظ نمی‌شد. با این وجود، به دنبال افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی جهانی و تمایل به کاربرد روش قابل اطمینانی در پاک‌سازی، جانشینی آلودگی به یک موضوع قابل بحث و با اهمیت مبدل شده است.

نتیجتاً، مفهوم چند دیواره‌ای معرفی شد تا PRBها را به یک فناوری قابل اطمینان تر تبدیل کند و حوزه‌ی کاربرد آن‌ها را بسط و توسعه دهد. یک سیستم چند دیواره‌ای به شکل کلی به صورت PRBهایی تعریف می‌شود که از دو یا چند دیواره تشکیل شده اند که با مواد واکنش‌زای مشابه یا مختلفی پر شده اند (چند دیواره‌ای متوالی). اگرچه مفهوم چند دیواره‌ای نسبتاً جدید است، توجهات زیادی را به خود معطوف نموده است[18 و 22].

بعضی چنددیواره‌ای‌ها اصولاً برای حذف آلاینده‌های آلی طراحی شده اند. به عنوان نمونه‌ای پربازده و خلاقانه از کاربرد چند دیواره‌ای‌ها، Morkin و همکاران (2000) از دو دیواره برای تصفیه‌ی یک توده‌ی مخلوط آلی از اتان‌های کلرینه (DCE و VC) و BTEX در داخل یک سیستم قیف و دروازه استفاده کردند. دیواره‌ی اول، به منظور کلرزدایی کاهشی از آهن گرانوله (دانه‌ای) تشکیل شده بود، در حالی که دومی محیطی بود که گل زیستی بر آن پاشیده شده بود تا در تجزیه‌ی بیولوژیکی آلاینده‌ها، عمدتاً BTEX و محصولات جانبی اتان‌های کلرینه، تسهیل نماید. نتایج، عملکرد خوب دیواره‌ها در کاهش آلاینده‌ها را نشان داد. نشان داده شد که BTEX به وسیله‌ی آهن دانه‌ای به شدت تأخیر پیدا کرد، با این وجود مشاهده شد

که DCE و VC در هر دو نوع دیواره حذف شدند. یک حذف جرم تقریباً 99% برای هردو آلاینـده‌ی DCE و VC که برایشان به ترتیب تجزیه‌ی بیولوژیکی 65% و 30% تخمین زده شده بود، مشاهده شد.

جدای از هزینه‌ها، پیچیدگی‌ها در طراحی چنین سیستم‌های چند تصفیه‌ای و دشواری‌ها در نظارت بر آن‌ها، به هر حال، تصدیق شده است. مشکلاتی از قبیل اثرات مخالفِ تحمیل شده به وسیله‌ی یک آلاینده (یا یـک دیواره‌ی تصفیه کننده) بر آلاینده‌ی دیگر در حین پاک‌سازی توده‌های چند آلاینده‌ای گزارش شده‌اند [13 و 23]. تعدادی از رویکردها، با این وجود، برای تعیین چنین مواردی در سـاخت PRBهـا بـا فنـاوری‌ای قابـل اعتمادتر استفاده شده و می‌شـوند. مطالعـات آزمایشـگاهی دسـته‌ای و سـتونی بـه منظـور بـه دسـت آوردن اطلاعاتی در مورد پدیده‌های گوناگون ژئوشیمیایی و میکروبیولوژیکی در چنـین سیسـتم‌هـای تصـفیه‌ای بـه کرات انجام شده اند. آزمون‌های دسته‌ای به سرعت انجام می‌شوند؛ به هـر حـال آزمایشـات سـتونی شـرایط جریان دینامیکی را ایجاد می‌کنند که با دقـت قابـل قبـولی مقـادیر مـورد انتظـار در یـک سیسـتم PRB در آرایشات میدانی را تخمین می‌زنند. با این وجود، هر دوی آن‌ها اطلاعات ارزشمندی به دسـت مـی‌دهـد کـه می‌تواند برای دفع یا کم کردنِ برای مثال اثرات مخالف در سیستم‌های چنددیواره‌ای به کار رود [19].

از ابزارهای مدل‌سـازی ژئوشـیمیایی ماننـد MINTEQA2 [23] و PHREEQC [24] هـم بـرای مطالعـه و پیش‌بینی فازهای معدنی‌ای که ممکن است شکل بگیرند و تغییرات پارامترهای ژئوشـیمیایی از قبیـل PH و Eh از واکنش‌های بین مواد واکنش‌زا، آلاینده‌ها و اجزاء آب زیرزمینی، استفاده می‌شـود تـا در مـورد انتخـاب مواد واکنش‌زا و توالی دیواره‌ها اطلاعاتی به دست دهد تا مانع از اثرات مخالف یا ممانعت کننـده‌ی مشـاهده شده در چنددیواره‌ای‌ها شود.

در این مطالعه، به جانشینی آلودگی توجه زیادی معطوف نشده است؛ با این وجـود، در اینجـا بـه ایـن نکتـه اشاره می‌کنیم که سخن گفتن در مورد آن به ارزیابی ظرفیت کل جانشینی آلـودگی نیـاز دارد، کـه بـه نـوع آلاینده‌های موجود وابسته است. علاوه بـر ایـن، بـه دانـش و اطلاعـات پیرامـون مکـانیزم‌هـا و همـین طـور فاکتورها/پارامترهای کنترل کننده‌ی کاهش آلاینده‌ها نیازمند است. همچنـین Fenton و همکـاران (2014) بیان کردند که طراحی یک سیستم PRBقابل اعتماد به عنوان یک معیار اندازه گیری برای توزیـع جانشـینی آلودگی به قوانین ملی بستگی خواهد داشـت چـرا کـه تأکیـدات گونـاگونی بـر تلفـات محلـول یـا گـازی در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف وجود دارد.

به طور کلی، بعضی مطالعات هم به خرابی ناشی از به دام انداختن آلاینده‌ها یا کاهش کارایی PRBها با گذر زمان و به دلیل بعضی فرآیندهای بیوژئوشیمیایی ناشی از اندرکنش‌های محیط واکنش‌زا – آلاینده – آبخوان در داخل یا بالادست دیواره‌ها اشاره کرده‌اند. بسته شـدن حفـرات دیـواره در اثـر تجمـع رسـوبات کربناتـه و سولفاته، و در نتیجه‌ی آن، فقدان واکنش‌زایی و کاهش در زمان ماند هیدرولیکی، تولید گاز و کاهش تراوایـی (نفوذپذیری)، و رقابت برای واکنش‌دهی بین آلاینده‌ها و مواد دیگر یا تلفـات مکـان‌هـای واکـنش‌زا ناشـی از خوردگی، شکست یا ترسیب، در میان موارد ثبت شده‌ی خرابی PRBها هستند [12 و 14 و 25 و 26 و 27 و 28 و 29 و 30 و 31 و 32]. Henderson و Demond (2007) با استفاده از روش‌های گرافیکی و آماری، مروری انتقادی بر عملکرد طولانی مدت PRBهای حاوی آهن صفرظرفیتی (ZVI) منتشر کردند تا مهم‌ترین

فاکتورهای مؤثر بر دوام دیواره‌ها را شناسایی کنند. مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که خصوصیات هیدرولیکی نامناسب فاکتوری اساسی است که منجر به بیشتر نقص‌ها و خرابی‌های PRBها است.

به منظور تضمین این مطلب که آلاینده‌های هدف به دام انداخته می‌شوند و احتمال نقص و خرابی به حداقل می‌رسد، ارزیابی مکان اولیه و تعیین خصوصیات جزئی مکان لازم است. این ارزیابی‌ها در شناسایی محدودیت‌های احتمالی که ممکن است بر نصب دیواره یا عملکرد آن پس از نصب تأثیرگذار باشد، کمک شایانی می‌کنند و بنابراین نشان می‌دهد که آیا PRB برای مکانی خاص مناسب خواهد بود یا خیر. اغلب، این ارزیابی شامل تعیین خصوصیات هیدروژئولوژی مکان، آلاینده‌ها و ژئوشیمی آب زیرزمینی می‌شود[19]. ارزیابی ژئوتکنیکی هم مهم است چرا که در مواردی از این دست کمک شایانی می‌نماید:

1) نشان دادن این که آیا سازه‌ای که ممکن باشد در استفاده از تجهیزات سنگین روی زمین در حین نصب دیواره ممنوعیت ایجاد کند وجود دارد یا خیر.

2) نشان دادن این که آیا ترکیبات زمین شناسی پیچیده‌ای در زیر سطح زمین وجود دارد که ممکن باشد دشواری‌هایی را در ساختمان و/یا استفاده‌ی متعاقب از دیواره‌ها ایجاد کند یا خیر.

تعیین خصوصیات آلاینده و خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی هر دو برای انتخاب محیط مناسب و طراحی PRB لازم‌اند. این موارد همچنین برای ارزیابی یا پیش بینی تغییرات بیوژئوشیمیایی که ممکن است بر دوام دیواره تأثیرگذار باشد، لازم است [19 و 33].

بنا بر موارد فوق، مزایا و محدودیت‌های فناوری PRB در جدول 1 خلاصه شده است [9 و 12و 15 و 34 و 35 و 36].

از طرفی با قطعیت می‌توان گفت که یکی از مهمترین صنایع ایران و یکی از ذخایر عظیم تأمین سرمایه و اعتبار کشور -که با استفاده‌ی بهینه می‌تواند به گسترش صنایع زیرمجموعه، کمکی شایان کند- منابع نفت، گاز و پتروشیمی می‌باشد. کاهش اثرات نامطلوب بر محیط زیست و نیز بهبود وضعیّت زیست‌بوم‌های مناطق درگیر با این صنایع می‌تواند باعث بهره‌وری هرچه بیشتر از آن‌ها و استفاده‌ی مطلوب از منابع موجود گردد. برای مثال پالایشگاه تهران (شهر ری) و جایگاه‌ها و انباره‌های اطراف آن و نیز شرکت‌هایی چون شرکت لوله‌های نفت، شرکت نفت بهران، کارخانه‌ی سولفور سدیم و سایر صنایع وابسته، از قدیمی‌ترین و معروف‌ترین مناطق صنعت نفت به شمار می‌رود که به خاطر مرکزیّت، نزدیکی به پایتخت و فاصله‌ی کم با زمین‌های مسکونی و کشاورزی (باقرشهر و اسماعیل‌آباد) و معضلات زیست‌محیطی متعدّد ناشی از آن، همواره مورد توجّه بوده است؛ تا آن جا که طیّ مطالعاتی که در سال 1383 توسّط شرکت ژاپنی «ایده میتسو» انجام گرفت، از نفوذ یک میلیون و 440 هزار متر مکعب موادّ نفتی به عمق متوسّط 1/5 تا 7 متر بر روی سفره‌ی آب‌های زیرزمینی تنها در محوّطه‌ی پالایشگاه تهران طی سالهای گذشته پرده برداشته شد.

لذا در این مطالعه سعی بر این خواهد بود تا بتوان علاوه بر پیشنهاد راه حلی تازه برای حل مشکلات ناشی از مواد نفتی محلول، در مورد شیوه بهینه طراحی و استفاده از این نوع فناوری تحقیق شود.

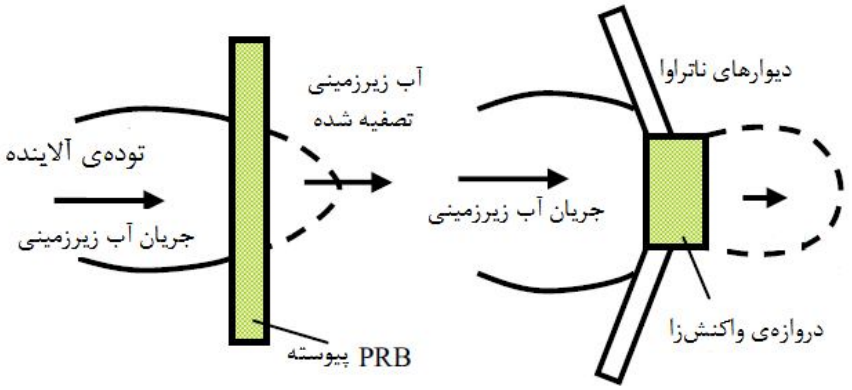
جدول 1. مزایا و محدودیت‌های فناوری PRB

مزایا	محدودیت‌ها
الف) نسبتاً ارزان بودن و انفعالی بودن فناوری؛ یعنی: مواد واکنش‌زای ارزان ولی مؤثر می‌تواند به کار رود؛ هزینه‌ی انرژی پایین است؛ هزینه‌های دفع صفر و یا بسیار کم برای پسمانده‌های تصفیه شده و هزینه‌های نسبتاً پایین نگه‌داری و نظارت به استثنای هزینه‌ی نصب اولیه	الف) تنها آلاینده‌هایی می‌توانند تصفیه شوند که در جهت دیواره در جریان باشند.
ب) امکان تصفیه‌ی توده‌های چند آلاینده‌ای با استفاده از کاربرد بیش از یک دیواره	ب) نیازمندی به تعیین خصوصیات مناسب و دقیق محل، آبخوان، شرایط هیدروژئولوژیکی و تعیین دقیق توده‌ی آلاینده پیش از نصب دیواره
ج) قابلیت تصفیه‌ی طیف وسیعی از آلاینده‌ها	ج) محدود به توده‌هایی که عمیق‌تر از 20 متری سطح زمین نباشند.
د) هنگامی که تصفیه در حال انجام است، زمین سطحی محل آلوده می‌تواند مورد استفاده‌ی مقتضی قرار بگیرد.	د) اطلاعات محدودی درمورد دوام دیواره‌ها در دسترس است.
ه) پخش آلودگی در محیط وجود ندارد چرا که آلاینده‌ها به سطح آورده نمی‌شوند.	ه) سازه‌های زیر زمین (مانند سازه‌های خدماتی و فونداسیون‌ها) ممکن است مشکلاتی در ساخت و کارایی ایجاد کنند.
و) به ندرت نیازمند بازرسی است تا تضمین حاصل شود که به شکل مناسب کار می‌کند یا خیر.	و) محیط واکنش‌زا ممکن است نیازمند برداشته و جایگزین شدن (تعویض) در حین عملکرد باشد.
ز) مرتفع کردن نیاز به مدیریت احجام بزرگ آب زیرزمینی و یا فقدان آن	ز) ممکن است نیازمند نظارت طولانی مدت باشد، به خصوص در حالت وجود آلاینده‌های پایدار یا جریان بسیار آهسته‌ی آب زیرزمینی

از هنگام آغاز این فناوری، دو نوع پیکربندی اصلی دیواره‌های تراوای واکنش‌زا برای کاربردهای میدانی به کار رفته است؛ که عبارت اند از طراحی‌های: قیف و دروازه و دروازه‌ی پیوسته (شکل 2 را مشاهده نمایید).

مورد اول از دو سازه تشکیل می‌شود: قیف، که تشکیل شده است از دیوارهای جدا کننده‌ی نفوذناپذیری که توده‌ی آلودگی را به ناحیه‌ی تصفیه هدایت می‌کنند، و دروازه‌ی واکنش‌زا که در آن فرآیند تصفیه به وقوع می‌پیوندد. اگرچه این نوع پیکربندی در مقایسه با نوع دوم هزینه‌ی ساخت بیشتری دارد، امکان عملکرد مطلوب این روش را در مواجهه با انواع مختلف توده‌های آلودگی که به شکل گسترده‌ای پخش شده اند، و به دام انداختن آن‌ها، افزایش می‌دهد[5].

از طرف دیگر، پیکربندی دروازه‌ی پیوسته، قراردادن دیواره‌ی تصفیه کننده در سرتاسر مسیر توده‌ی آلاینده را در بر می‌گیرد. از جمله قابلیت‌های این نوع پیکربندی این است که ساخت آن آسان می‌باشد، کم‌هزینه‌تر است و تأثیر بسیار کمی بر جریان آب زیرزمینی دارد. با این حال، این طراحی تنها برای توده‌هایی با عرض-های کم مناسب است[6].



شکل 2. دو پیکربندی اساسی دیوارهای تراوای واکنش‌زا: شکل سمت چپ: دیوار پیوسته، شکل سمت راست: سیستم قیف و دروازه

در این مقاله برآنیم تا نوع دیواره پیوسته را مورد بررسی قرار دهیم. برای این کار ابتدا باید معیار مدل شبیه‌سازی را تعیین نماییم.

طراحی PRB

در حالت کلی، طراحی یک PRB گام‌های متوالی ذیل را در بر می‌گیرد: ارزیابی فنی و اقتصادی اولیه، بررسی و تعیین خصوصیات دقیق محلی که دیواره قرار است در آن ساخته شود، انتخاب محیط واکنش‌زا، مطالعات امکان تصفیه پذیری (آزمایشات دسته‌ای و ستونی)، طراحی مهندسی، انتخاب روش ساخت، قاعده مند سازی برنامه ی نظارت، و تحلیل اقتصادی[19]

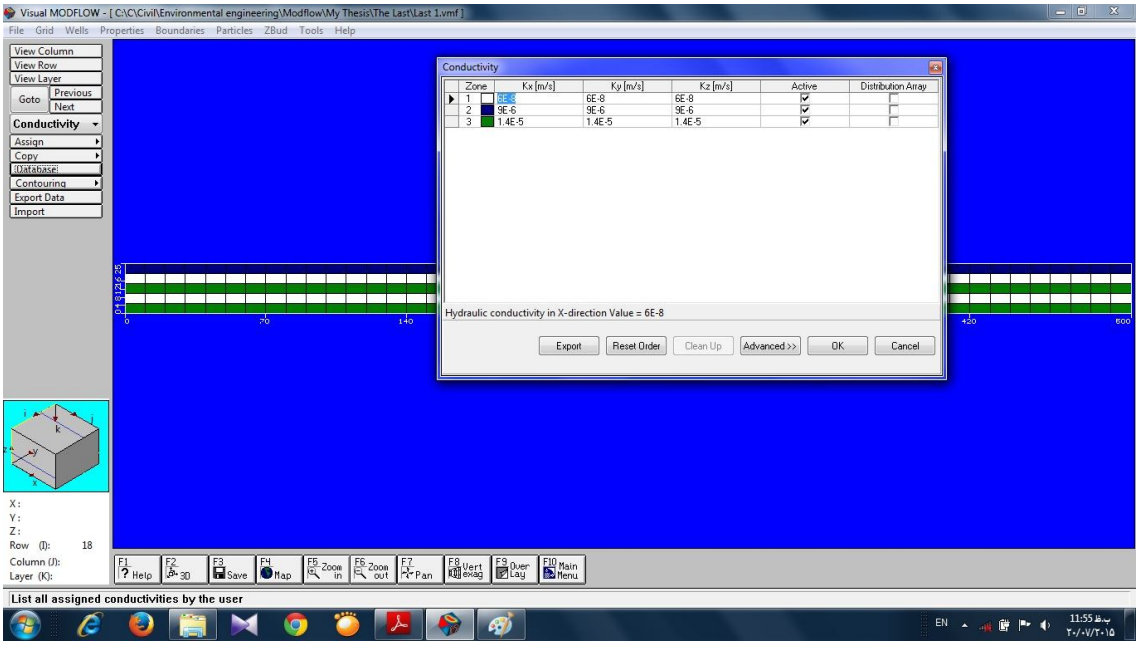
ساخت مدل و کالیبره نمودن آن

همانند هر شبیه‌سازی دیگری، گام اولیه تشکیل، کالیبره نمودن و بسط مدل مفهومی است. پس از بررسی کدهای موجود در بازار Modflow به عنوان کد شبیه‌سازی مناسب انتخاب شد و ساخت و کالیبره نمودن مدل آغاز گردید. Modflow قوی‌ترین نرم افزار موجود برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی می‌باشد و امکان مدل‌سازی یک، دو و سه بعدی جریان آب زیرزمینی را ایجاد کرده و با کاربرد آسان می‌تواند حالت‌های مختلف آبخوان‌های محبوس، غیرمحبوس و شبه‌محبوس و نیز چاهک، چشمه، رودخانه و مکانیزم‌های مختلف انتقال و انتشار را شبیه‌سازی نماید. در ادامه به روال و فرضیات مطرح در ساخت و کالیبراسیون مدل می‌پردازیم:

ساخت شبکه مدل

با توجه به حالت‌های کلی در نظر گرفته شده، محیط مورد مطالعه را به یک مربع 500×500 متر تبدیل می‌کنیم و بنابراین فاصله بین خطوط به میزان 10 متر مناسب به نظر رسید.
معمولاً توصیه می‌شود که شبکه طوری طراحی شود که عدد پکلت[1] کوچکتر از 4 گردد. عدد پکلت به صورت زیر تعریف می‌گردد[7]:

که در آن Δl فاصله‌ی بین گره‌ها[2] و α ضریب انتشار[3] می‌باشد. عدد پکلت برای شبکه‌ی طراحی شده در این مطالعه از 1 متر تا 10 متر متغیر است (Δl از 80 متر تا 800 متر تغییر کرده است و α نیز 80 متر در نظر گرفته شده است).
عمود بر سطح زمین نیز، مدل ما به 5 لایه تقسیم می‌شود و گرادیان هیدرولیکی بین 0.04 تا 0.10 را برای مدل در نظر می‌گیریم. واضح است که در هنگام وقوع گرادیان هیدرولیکی 0.04، اختلاف هد هیدرولیکی 20 متری بین دو انتهای مکان مورد مطالعه به وجود خواهد آمد. بنابراین برای در نظر گرفتن حالت ایده‌آل‌تری برای مدل، عمق هر لایه را 5 متر در نظر می‌گیریم (شکل 3).



شکل 3. ساخت شبکه و سپس پنج لایه برای مدل

[1] Peclet number
[2] Nodal Spacing
[3] Dispersivity

ویژگی‌های مدل

به همه‌ی سلول‌های موجود در مدل مقادیر هدایت هیدرولیکی[1]، ضریب ذخیره[2]، ضریب تسلیم ویژه[3] و نیز تخلخل[4] اختصاص داده می‌شود. در مدل مفهومی جهت تسهیل در طراحی دیواره، همسانی سه بعدی[5] برای کل سلول‌های مدل فرض شده است. علاوه بر این دوره زمانی[6] بیست ساله (7300 روزه) که به گام‌های زمانی[7] یک ساله تقسیم شده، برای حصول نتایج لازم کافی در نظر گرفته شد.

تخلخل موثر (n)، به عنوان یک فرض منطقی، 0.3 در نظر گرفته شده است. گرادیان هیدرولیکی در محل‌های متعدد نصب دیواره‌های تراوای واکنش‌زا ، بین 0.04 تا 0.1 متغیر است.

مراجع متعددی هم ضریب ذخیره (S) را به شکل زیر تعریف کرده اند[7]:

1. آبخوان آزاد: $S \sim 0.20$
2. آبخوان محبوس: $S \sim 0.001$

برای یک آبخوان آزاد، ترم ذخیره که به نام ضریب تحویل ویژه (S_y) شناخته می‌شود، برابر ضریب ذخیره می‌باشد. در این مدل، ضریب ذخیره‌ی ویژه و ضریب تحویل ویژه به ترتیب 0.0004 و 0.2 در نظر گرفته می‌شوند.

شرایط مرزی مدل

از میان سه نوع شرایط مرزی دریکله، نیومن و کوشی، شرط مرزی دریکله (هد ثابت) برای مدل فرض شد. علاوه بر آن تخلیه‌ای به میزان 100 mm/yr را برای دوره‌ی زمانی 7300 روز فرض می‌کنیم و در هنگام تخصیص مشخصات مدل این میزان را به همه‌ی سلول‌ها اختصاص می‌دهیم.

ذرات آلاینده

جهت مطالعه و بررسی پارامترهای حساس مانند نسبت‌های هدایت هیدرولیکی، گرادیان هیدرولیکی، طول دیواره، ضخامت دیواره و ... خطوط مسیر آلاینده‌ها در ارزیابی لازم و ضروری می‌نمود. برجسته کردن و بررسی دقیق تعداد نسبتاً زیادی (50 ذره) حساسیت مدل به تغییرات اندک در خطوط مسیر آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد[8].

[1] Hydraulic conductivity
[2] Storage
[3] Specific yield
[4] Porosity
[5] Three-dimensional isotropy
[6] Time Period
[7] Time Steps

اجرای مدل

پس از آن که مدل کالیبره شد می‌تواند برای شبیه‌سازی‌های تفسیری و پیش بینی کننده مورد استفاده قرار گیرد. تعداد زیادی از مقالات پژوهشی در مورد این شبیه‌سازی‌های تفسیری بحث و بررسی کرده‌اند. اما در این مطالعه تمرکز بر رفتن به سوی منحنی‌های طراحی است که می‌تواند برای طراحی چنین دیواره‌هایی در شرایط گوناگون آبخوان به سهولت به کار رود.

خروجی‌های مدل و هدهای هیدرولیکی از طریق استفاده از بسته‌ی منحنی ساز Visual Modflow تفسیر شدند و برای شبیه‌سازی‌های ردیابی ذرات و در جهت محاسبه و نمایش مسیرهای جریان آب زیرزمینی، مسیرهای جریان آلاینده و شارهای عبوری از سلول‌های مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

پس از این که مدل جریان کالیبره شد، مدل اجرا و سپس آنالیز حساسیت مرتبط با آن انجام گشت. در حین آنالیز حساسیت، اثر پارامترهای گوناگون بر افت[1] یک دیواره‌ی تک‌ترانشه‌ای با نفوذ کامل مورد مطالعه قرار گرفت. افت ذرات آلاینده از مسیرهای عبور آلاینده محاسبه شد. درصد افت از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

که در آن:

N_{influx} = تعداد مسیرهای عبوری آلاینده که از بین ابتدا و انتهای دیواره نشأت می‌گیرند.

N_{thru} = تعداد مسیرهای عبوری آلاینده که از میان دیواره عبور می‌کنند.

N_{loss} = تعداد مسیرهای عبوری آلاینده که از بین ابتدا و انتهای دیواره نشأت می‌گیرند ولی از میان آن عبور نمی‌کنند.

شکل 4 نمونه‌ای واضح از نمایش اجرای مدل برای مراحلی است که محاسبه درصد افت آن‌ها باید انجام می‌گرفت.

آنالیز حساسیت

کالیبراسیون مدل با بررسی حساسیت پارامترهای زیر پی گرفته شد:

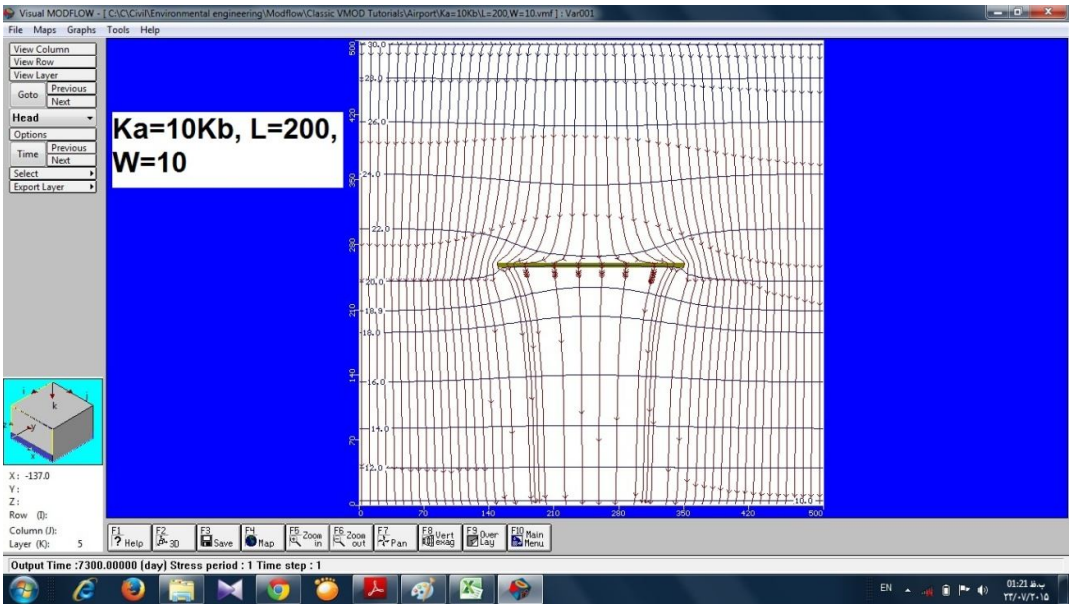
طول دیواره در ابعاد 20، 40، 60، 80، 100، 200، 300 و 400 متری تغییر داده شد و برای هر طول، متناسب با نسبت‌های مختلف هدایت هیدرولیکی آبخوان به دیواره، مدل اجرا شد. درصد افت در هر نوبت محاسبه گردید. پس از این، اثر طول دیواره و نسبت هدایت هیدرولیکی دیواره به آبخوان (حساسیت) بر خطوط مسیر آلاینده‌های ورودی مورد ارزیابی قرار گرفت.

تغییرات خطوط مسیر خروجی‌های شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شد تا مشخص شود که این تغییرات تا چه حد بر پارامترهای طول دیواره و نسبت هدایت هیدرولیکی دیواره به آبخوان (Ka/Kb) اثرگذار بوده اند.

[1] Loss

این فرآیند برای پارامترهای ذیل و در مقادیر ذیل انجام شد و نتایج بـه صـورت نمودارهـایی در آمـد کـه در ادامه آورده شده‌اند (اشکال 5 تا 9):

- عرض دیواره: 1، 2، 3، 5 و 10 متر.
- گرادیان هیدرولیکی: 0.01، 0.02، 0.03، 0.04، 0.05 و 0.1.
- افت در برابر فاصله بین ترانشه‌ها (در PRBهای دوگانه).



شکل 4. مثالی از نتایج مدل‌سازی برای یک دیواره به طول 200 متر، عرض 10 متر و نسبت هدایت هیدرولیکی آبخوان به دیواره برابر با 10.

محاسبه حساسیت یک پارامتر

آنالیز حساسیت برای تعیین این که کدام پارامترها بر طراحی یک دیواره موثر هستند انجـام شـد. عـلاوه بـر این، حساسیت یک پارامتر می‌تواند به شکل بزرگی تغییرات در خطوط مسـیر آلاینـده (کـه در ایـن مطالعـه توسط افت اندازه گیری شده است) تعریف شود. بنابراین این مقیاس در این مطالعه با رابطه‌ی زیـر محاسـبه می‌شود:

حساسیت = اختلاف بین درصد افت در دو مقدار از یک پارامتر ÷ اختلاف دو مقدار پارامتر[7]

محدوده‌ی مقادیر حساسیت برگرفته از محاسبات متعدد درصد افت برای یـک پـارامتر در جـدول 1 گـزارش شده است.

همچنین حساسیت یک پارامتر می‌تواند به وسیله‌ی محاسبه شیب میانگین منحنی طراحـی (یعنـی نمـودار درصد افت در برابر یک پارامتر) هم تعیین شود.

جدول1. نتایج آنالیز حساسیت

مشخصه	حالت کلی	مربوط به آبخوان یا دیواره؟	حساسیت
طول دیواره	حالت 1	دیواره	با افزایش این طول، افت کاهش می‌یابد. حساسیت = 0.1 تا 1
نسبت هدایت هیدرولیکی آبخوان به دیواره (Ka/Kb)	حالت 1	هردو	با افزایش این نسبت، افت افزایش می‌یابد. حساسیت = 0.1 تا 0.4
ضخامت دیواره	حالت 1	دیواره	با افزایش این ضخامت، افت افزایش می‌یابد. حساسیت = 3 تا 8
گرادیان هیدرولیکی	همه‌ی حالات	آبخوان	حساسیت = 0
عمق دیواره	حالت 2	دیواره	حساسیت = 0
فاصله بین ترانشه‌های دیواره (در دیواره‌های دوترانشه‌ای)	حالت 4	دیواره	در فاصله‌های بیش از 50 متر، افت به یک مقدار ثابت متقارب می‌شود. حساسیت = 0

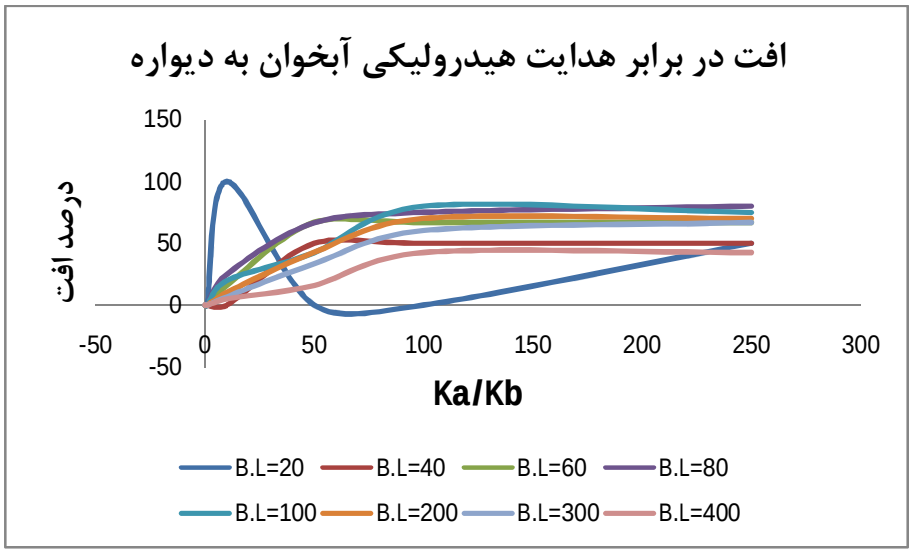
منحنی‌های طراحی

منحنی طراحی می‌تواند به شکل یک ترسیم گرافیکی از پارامترهای بحرانی و غیربحرانی در برابر یک فاکتور (درصد افت) که تعیین کننده‌ی کارایی نهاد طراحی است و اساس طراحی دیواره را تشکیل می‌دهد، تعریف شود.

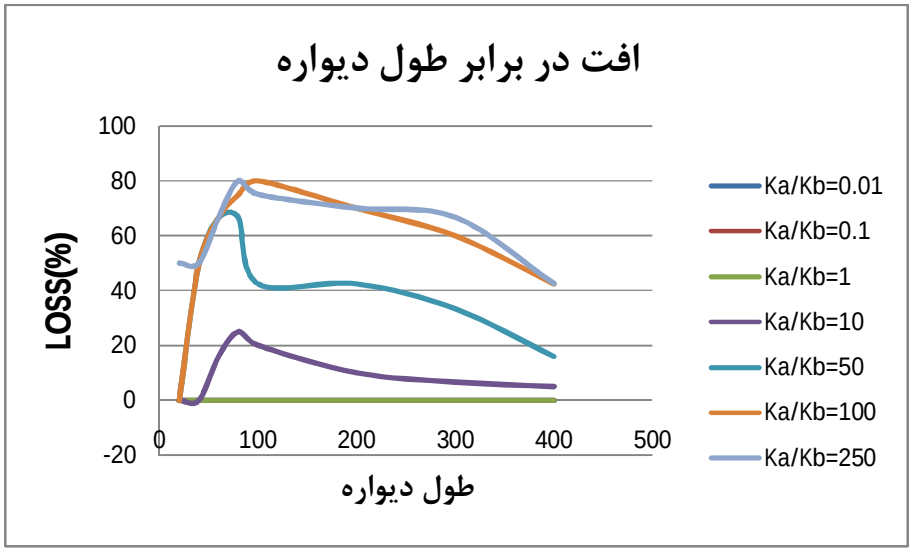
ساخت منحنی‌های طراحی

مدل‌ها برای حالات مفهومی گوناگون به وسیله‌ی تغییر پارامترهای مختلفی که به عنوان پارامتر بحرانی شناخته می‌شوند اجرا شدند. آنالیز حساسیت به وسیله محاسبه افت خطوط مسیر آلاینده از خروجی مدل انجام گردید.

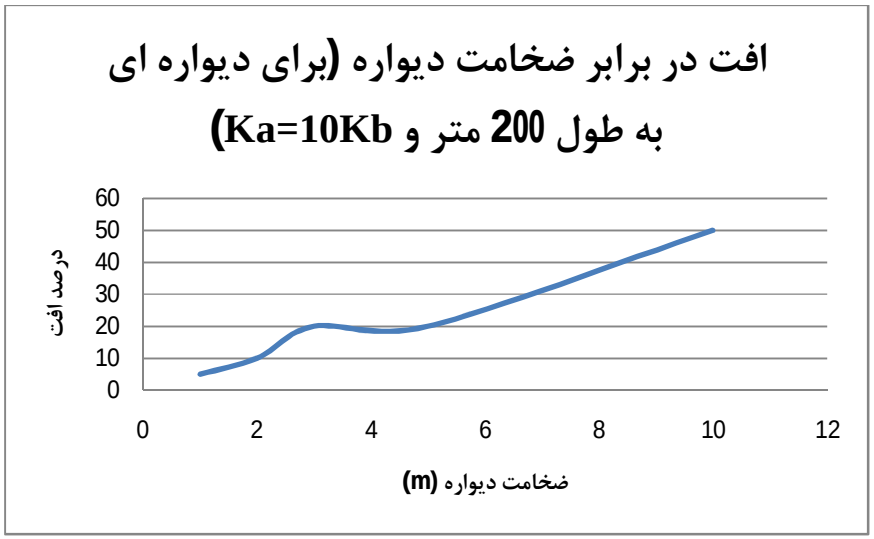
نمودار درصد افت در برابر یک پارامتر ترسیم شد. این نمودارها منحنی‌های طراحی را نشان می‌دهند. شیب منحنی طراحی متناظر نیز حساسیت یک پارامتر را نشان می‌دهد.



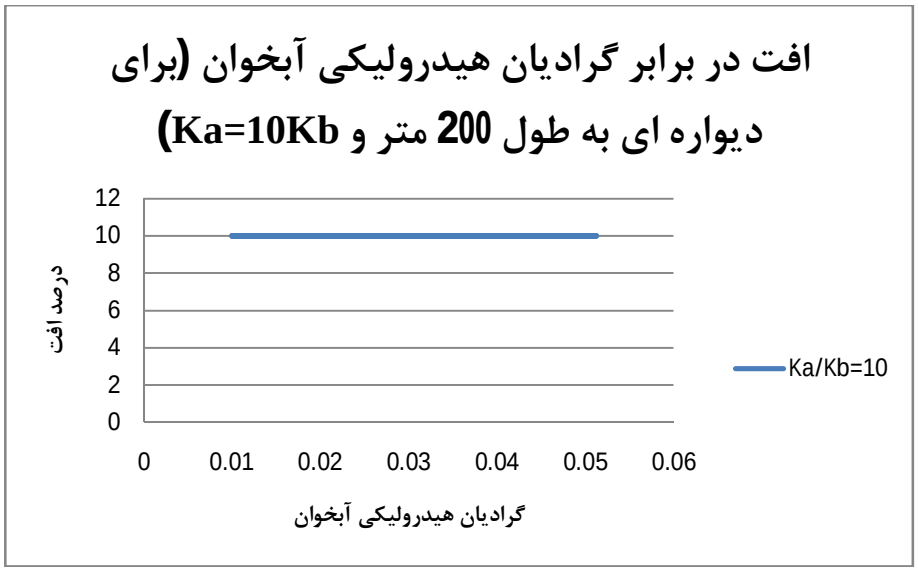
شکل 5. نمودار نشان دهنده افت در برابر هدایت هیدرولیکی آبخوان به دیواره



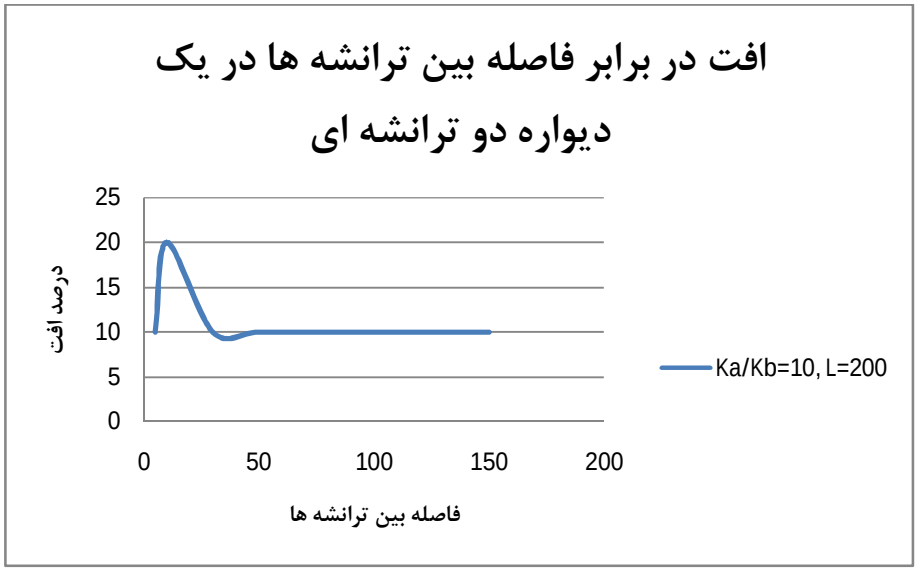
شکل 6. نمودار نشان دهنده افت در برابر طول دیواره



شکل 7. نمودار نشان دهنده درصد افت در برابر ضخامت دیواره



شکل 8. نمودار نشان دهنده درصد افت در برابر گرادیان هیدرولیکی آبخوان



شکل 9. نمودار نشان دهنده درصد افت در برابر فاصله بین ترانشه‌ها در یک دیواره‌ی دو ترانشه‌ای

بحث و نتیجه گیری

سیستم دیواره‌های تراوای واکنش‌زا یک فناوری درجا برای تصفیه‌ی آب زیرزمینی آلوده با استفاده از قراردادن مواد واکنش‌زا در مسیر آب زیرزمینی است. مواد واکنش‌زا تا حدی مانع عبور آب زیرزمینی می‌شوند و به واسطه‌ی کاهش غلظت آلاینده‌ها به زیر حد مجاز، آن‌ها را به موادی کم خطرتر برای محیط زیست تبدیل می‌کنند.

جهت‌گیری این مطالعه بر تحلیل و مدل‌سازی در جهت کمک به طراحی دیواره‌های تراوای واکنش‌زا متمرکز بود. پیش بینی هندسی و ارزیابی پیکربندی‌های گوناگون در طراحی یک دیواره‌ی تراوای واکنش‌زا حائز اهمیت می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت این پژوهش به نتایج زیر نایل گشت:

1. آنالیز حساسیت نشان داد که بحرانی‌ترین و مهم‌ترین پارامترها، ضخامت دیواره و پس از آن طول دیواره‌های تراوا بود. یک نتیجه‌ی مهم حاصل از آنالیز حساسیت هم این بود است که افت به نسبت Ka/Kb حساس نیست یا حساس بسیار کمی دارد.
2. مهم‌ترین نتیجه‌ی این مطالعه این است که منحنی‌های طراحی برای کمک به درک یک روال برای طراحی دیواره‌های پیوسته مورد استفاده قرار گرفت. روال طراحی مورد اعتبارسنجی قرار گرفت تا هم مشخصات و خصوصیات دیواره و هم آبخوان را در بر بگیرد.
3. هنگامی که نیاز است آب زیرزمینی مورد پیش تصفیه قرار گیرد، نصب یک دیواره‌ی دوترانشه‌ای ضروری می‌نماید. در این شرایط این دیواره‌ها می‌توانند مانند دیواره‌های تک‌ترانشه‌ای طراحی شوند و افت آلاینده نیز به فاصله‌ی بین ترانشه‌ها حساس است.

تشکر و قدردانی

این مقاله برگرفته از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مؤلف می‌باشد و تحت حمایت شرکت ملّی پالایش و پخش فرآورده‌های نفتی ایران صورت گرفته است.

منابع

[1] Tase, N., 1992. Groundwater contamination in Japan. Environ. Geol. Water Sci. 20 (1), 15–20.
[2] Schipper, L.A., Robertson, W.D., Gold, A.J., Jaynes, D.B., Cameron, S.C., 2010. Denitrifying bioreactors – an approach for reducing nitrate loads to receiving waters. Ecol. Eng. 36 (11), 1532–1543.
[3] Wiafe, S., Ofosu, S.A., Ahima, J., 2013. The quality of groundwater resources around auto-mechanic workshop enclaves in Ghana. Eng. Sci. Technol. 1 (1), 38–49.
[4] Rodak, C., Silliman, S.E., Bolster, D., 2014. Time-dependent health risk from contaminated groundwater including use of reliability, resilience, and vulnerability as measures. JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc. 50 (1), 14–28.
[5] Starr, R.C., Cherry, J.A., 1994. In situ remediation of contaminated ground water: the funnel-and-gate system. Ground Water 32 (3), 465–476.
[6] Gavaskar, A., Gupta, N., Sass, B., Janosy, R., Hicks, J., 2000. Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation. Columbus, OH, 157pp.
[7] Gautam C Ijoor, 1999. MODELING OF A PERMEABLE REACTIVE BARRIER. A Thesis Submitted to the Faculty of New Jersey Institute of Technology. In Partial Fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science in Environmental Engineering Department of Civil and Environmental Engineering.
[8] مهران ناصری راد، 1394 (2015 میلادی). مدل‌سازی عملکرد دیواره‌های تراوای واکنش‌زا در تصفیه آب زیرزمینی آلوده، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.
[9] Carey, M.A., Fretwell, B.A., Mosley, N.G., Smith, J.W.N., 2002. Guidance on the Use of Permeable Reactive Barriers for Remediating Contaminated Groundwater. National Groundwater and Contaminated Land Centre Report NC/01/51, UK Environment Agency, Bristol. 140pp.
[10] Skinner, S.J., Schutte, C.F., 2006. The feasibility of a permeable reactive barrier to treat acidic sulphate- and nitrate-contaminated groundwater. Water SA 32 (2), 129–136.
[11] Wilkin, R.T., Puls, R.W., 2003. Capstone Report on the Application, Monitoring, and Performance of Permeable Reactive Barriers for Ground-Water Remediation: Volume 1 Performance Evaluations at Two Sites. Report EPA/600/R-03/045a, U.S. Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH, 135pp.
[12] Puls, R.W., 2006. Long-term performance of permeable reactive barriers: lessons learned on design, contaminant treatment, longevity, performance monitoring and cost – an overview. In: Twardowska, I. et al. (Eds.), Soil and Water Pollution Monitoring. Protection and Remediation, Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 221–229.
[13] Chen, Y., Li, J., Lei, C., Shim, H., 2011a. Interactions between BTEX, TPH, and TCE during their bio-removal from the artificially contaminated water. In: Bionature 2011: The

Second International Conference on Bioenvironment, Biodiversity and Renewable Energies, Venice, Italy, pp. 33–37.
[14] Korte, N.E., 2001. Zero-Valent Iron Permeable Reactive Barriers: A Review of Performance. Environmental Sciences Division Publication No. 5056, U.S. Department of Energy, Washington DC.
[15] Warner, S.D., Sorel, D., 2002. Chlorinated solvent and DNAPL remediation. In: Henry, S.M., Warner, S.D. (Eds.), American Chemical Society, Washington, DC.
[16] ITRC, Interstate Technology & Regulatory Council, 2011. Permeable Reactive Barrier: Technology Update. PRB: Technology Update Team, Washington, D.C., 156 pp.
[17] Schipper, L.A., Robertson, W.D., Gold, A.J., Jaynes, D.B., Cameron, S.C., 2010. Denitrifying bioreactors – an approach for reducing nitrate loads to receiving waters. Ecol. Eng. 36 (11), 1532–1543.
[18] Köber, R., Schäfer, D., Ebert, M., Dahmke, A., 2002. Coupled in situ reactors using Fe0 and activated carbon for the remediation of complex contaminant mixtures in groundwater. In: Thornton, S.F., Oswald, S.E. (Eds.), Proceedings of the Groundwater Quality 2001 Conference. IAHS, Sheffield, UK, pp. 18–21.
[19] Gavaskar, A., Gupta, N., Sass, B., Janosy, R., Hicks, J., 2000. Design Guidance for Application of Permeable Reactive Barriers for Groundwater Remediation. Columbus, OH, 157pp.
[20] Stevens, C.J., Quinton, J.N., 2009. Diffuse pollution swapping in arable agricultural systems. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 39 (6), 478–520.
[21] Healy, M.G., Ibrahim, T.G., Lanigan, G.J., Serrenho, A.J., Fenton, O., 2012. Nitrate removal rate, efficiency and pollution swapping potential of different organic carbon media in laboratory denitrification bioreactors. Ecol. Eng. 40, 198–209.
[22] Birke, V., Burmeier, H., Jefferis, S., Gaboriau, H., Touze, S., Romain, C., 2007. Permeable reactive barriers (PRBs) in Europe: potentials and expectations. Ital. J. Eng. Geol. Environ. 1, 1–8.
[23]Allison, J.D., Brown, D.S., Novo-Gradac, K.J., 1991. MINTEQA2/PRODEFA2, A geochemical Assessment Model for Environmental Systems. Report EPA/600/ 3-91/021, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia. 107pp.
[24] Parkhurst, D.L., Appelo, C.A.J., 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2): a computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey, Denver, CO. 309pp.
[25] Mackenzie, P.D., Horney, D.P., Sivavec, T.M., 1999. Mineral precipitation and porosity losses in granular iron columns. J. Hazard. Mater. 68 (1–2), 1–17.
[26] Phillips, D.H., Gu, B., Watson, D.B., Roh, Y., Liang, L., Lee, S.Y., 2000. Performance evaluation of a zerovalent iron reactive barrier: mineralogical characteristics. Environ. Sci. Technol. 34 (19), 4169–4176.
[27] Gu, B., Watson, D.B., Wu, L., Phillips, D.H., White, D.C., Zhou, J., 2002. Microbiological characteristics in a zero-valent iron reactive barrier. Environ. Monit. Assess. 77 (3), 293–309.
[28] Roberts, L.A., Ball, W.P., Searson, P., Fairbrother, H., Vikesland, P.J., Klausen, J., Kohn, T., Kamath, R., Zimmermann, H.J., 2002. Influence of Groundwater Constituents on Longevity of Iron-Based Permeable Barriers. Final Report for the SERDP Project CU-1125, Air Force Research Laboratory, Tyndall AFB, FL.
[29] Kamolpornwijit, W., Liang, L., West, O.R., Moline, G.R., Sullivan, A.B., 2003. Preferential flow path development and its influence on long-term PRB performance: column study. J. Contam. Hydrol. 66 (3–4), 161–178.

[30] Liang, L., Sullivan, A.B., West, O.R., Moline, G.R., Kamolpornwijit, W., 2003. Predicting the precipitation of mineral phases in permeable reactive barriers. Environ. Eng. Sci. 20 (6), 635–653.
[31] Borden, R.C., 2007. Concurrent bioremediation of perchlorate and 1,1,1- trichloroethane in an emulsified oil barrier. J. Contam. Hydrol. 94 (1–2), 13–33.
[32] Zolla, V., Freyria, F.S., Sethi, R., Di Molfetta, A., 2009. Hydrogeochemical and biological processes affecting the long-term performance of an iron-based permeable reactive barrier. J. Environ. Qual. 38 (3), 897–908.
[33] Morrison, S.J., Spangler, R.R., 1992. Extraction of uranium and molybdenum from aqueous solutions: a survey of industrial materials for use in chemical barriers for uranium mill tailings remediation. Environ. Sci. Technol. 26 (10), 1922–1931.
[34] U.S. EPA, 1997. Permeable Reactive Subsurface Barriers for the Interception and Remediation of Chlorinated Hydrocarbon and Chromium (VI) Plumes in Ground Water. EPA/6ok00/F-97/008, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC, 4pp.
[35] NTUA, National Technical University of Athens, 2000. Literature Review: Reactive Materials and Attenuation Processes for Permeable Reactive Barriers. Long-term Performance of Permeable Reactive Barriers used for the Remediation of Contaminated Groundwater. 5th Framework Programme Research and Technological Development Project, Athens, Greece.
[36] Jirasko, D., 2012. Problems connected with use of permeable Reactive Barriers for groundwater treatment. Construction on brownfields. Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic. pp. 145–154.