نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال ششم، شماره سوم، بهار ۱۳۹۶

ISSN 2251-7480

بررسی آزمایشگاهی تأثیر لایه‌های درشت منفذ پیوسته و ناپیوسته در انتقال محلول در خاک

فرشید تاران[۱*]، علی اشرف صدرالدینی[۲]، امیرحسین ناظمی[۳]

۱) دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: farshidtaran@gmail.com

۲) استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳) استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰٤/۰۲

چکیده

یکی از مکانیزم‌های انتقال مواد محلول در خاک، جریان ترجیحی یا جریان از مسیرهای درشت منفذ است. در این تحقیق، برای بررسی تأثیر مسیرهای درشت منفذ در انتقال محلول، از سه توده خاک حاوی ۳ درصد رس، ۴/۲ درصد سیلت و ۹۲/۸ درصد شن در مخزنی به طول ۲۰۰، عرض ۱۰۰ و ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر استفاده شد. توده خاک اول به صورت همگن (بدون مسیر درشت منفذ)، توده خاک دوم حاوی خاک و لایه‌هایی به ضخامت ۵ سانتی‌متر از سنگریزه‌هایی به قطر ۲ تا ۴ میلی‌متر از سطح تا کف (دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته) و توده خاک سوم حاوی خاک و لایه‌هایی به ضخامت ۵ سانتی‌متر از سنگریزه‌هایی به قطر ۲ تا ۴ میلی‌متر از سطح تا عمق ۳۵ سانتی‌متری (دارای لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته) تهیه شد. انتقال محلول سدیم کلرید در این سه توده خاک آزمایش و با نرم‌افزار GeoStudio شبیه‌سازی شد. محلول انتخابی در توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته در مقایسه با توده خاک بدون لایه درشت منفذ، ۲۷ درصد سریع‌تر انتقال یافت و غلظت‌های اوج محلول رخنه شده نیز زودتر مشاهده شد. تأثیر قابل توجهی در سرعت انتقال محلول در لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته مشاهده نشد. نرم‌افزار GeoStudio با ضریب تعیین بیش از ۰/۸۹ و مقادیر جذر میانگین مربعات خطای کم‌تر از ۰/۲۵ انتقال محلول سدیم کلرید را به طور رضایت‌بخشی شبیه‌سازی کرد.

کلید واژه‌ها: توده خاک؛ جریان ترجیحی؛ مسیر درشت منفذ؛ CTRAN/W؛ SEEP/W

مقدمه

خاک دریافت کننده بسیاری از آلاینده‌ها مانند زائدات صنعتی، مواد شیمیایی کشاورزی، زباله‌های خانگی و فاضلاب‌ها است. این مواد همواره به خاک اضافه شده، توسط بارندگی یا آبیاری در نیمرخ خاک حرکت کرده و وارد آب‌های زیرزمینی می‌شوند. آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی توسط این مواد خطرات جدی را متوجه محیط زیست می‌کند و به‌همین دلیل به‌ویژه در سال‌های اخیر توجه زیادی به مسئله انتقال مواد محلول در خاک شده است. اما به‌علت ناهمگنی طبیعی ساختمان خاک توصیف انتقال محلول در آن دشوار است. این دشواری در خاک‌های دارای مسیرهای جریان ترجیحی[۱] بیش‌تر است. جریان ترجیحی یا جریان خارج از توده غالب خاک یکی از مکانیزم‌های انتقال در خاک است که در آن، محلول از مسیرهای سهل‌الوصول حرکت می‌کند (امیری میجان و همکاران، ۱۳۸۷). این مسیرها شامل مجاری ایجاد شده توسط کرم‌های خاکی و ریشه‌های گیاهان و یا ترک‌های ایجاد شده در اثر فرایندهای خشک شدن و مرطوب شدن، یخ زدن و ذوب شدن، انبساط و انقباض و فرسایش هستند و منافذ درشت (ماکروپور)[۲] نامیده می‌شوند (Beven and

[1]- Preferential Flow Paths

[2]- Macropores

(White, 1985 ؛Germann, 1982).

به‌طور کلی، انتقال محلول در خاک علاوه بر سه طریق جریان تودهای[1]، پخش[2] و انتشار[3] توسط جریان ترجیحی نیز می‌تواند انجام گیرد. محلول از طریق حرکت در مسیرهای جریان ترجیحی، بخش اعظم توده خاک را میان‌بر می‌زند و سرعت حرکت آن تا حد زیادی افزایش می‌یابد (پناهپور و همکاران، ۱۳۸۷). خاک به‌عنوان یک محیط متخلخل ناهمگن شامل انواع زیادی از منافذ درشت است. به‌دلیل نقش مهم منافذ درشت در حرکت ترجیحی محلول در خاک و ورود آن به آب‌های زیرزمینی، تحقیقات زیادی در مورد آن انجام شده است. با این وجود، ماهیت این نوع جریان هنوز به‌خوبی مشخص نشده و سوال‌های زیادی در مورد نقش نسبی دو بخش درشت منفذ و ماتریکس خاک[4] (توده غالب خاک) در انتقال محلول باقی مانده است. بر این اساس لازم است نقش منافذ درشت بیش‌تر مورد بررسی قرار گیرد. این بررسی‌ها به چهار صورت هستند (Buttle and Leigh, 1997): ۱- مطالعات میدانی که با مشکلاتی مانند تغییرات آب و هوا و پیچیدگی‌های مربوط به ارزیابی خصوصیات هیدرولیکی خاک همراه است (مانند Jardine *et al.*, 1989 و Gardenas *et al.*, 2006)، ۲- مطالعات آزمایشگاهی با خاک‌های دست‌نخورده تحت شرایط کنترل شده که در آن‌ها مانند شرایط میدانی، معمولاً اطلاعاتی در مورد ترکیبات داخلی خاک‌ها وجود ندارد (مانند Edwards *et al.*, 1993 و زند سلیمی و همکاران، ۱۳۸۵)، ۳- مدل‌سازی که بررسی تأثیرات آب و هوا و ماهیت خاک را بر جریان درشت منفذی آسان می‌کند (مانند Jarvis *et al.*, 1991 و Booltink, 1994). محدویت اصلی مدل‌سازی تعیین دقیق پارامترهایی مانند پیوستگی منافذ و شدت ورود آب به منافذ درشت است که جریان میان‌بر را کنترل می‌کنند، و ٤- مطالعات آزمایشگاهی شامل منافذ درشت مصنوعی با ابعاد معلوم که در آن‌ها تأثیر تغییرات بافتی و ساختمانی خاک بر رفتار فیزیکی خاک حذف می‌شود و تأثیر ویژگی‌های یک مسیر درشت منفذ در رفتار فیزیکوشیمیایی خاک قابل بررسی است. استفاده از مسیرهای درشت منفذ مصنوعی بهترین روش جهت اجتناب از پیچیدگی توصیف تأثیر خصوصیات منافذ درشت بر جریان ترجیحی بوده است (Lamy *et al.*, 2009). بر این اساس و بسته به اهداف تحقیق، نوع خاک و ابعاد ستون خاک روش‌های مختلفی برای ایجاد مسیرهای درشت منفذ مصنوعی ارائه شده‌اند. Castiglione و همکاران (۲۰۰۳) برای آزمایش نفوذ آب در یک ستون خاک با قرار دادن یک لوله استیلی میان‌تهی به قطر یک میلی‌متر از سطح خاک تا کف آن، یک مسیر درشت منفذ مصنوعی در مرکز ستون ایجاد کردند. شناخت کافی از هندسه این مسیر درشت منفذ و شرایط تحت کنترل آزمایش به آن‌ها کمک کرد تا بین جریان از بخش‌های ماتریکس و درشت منفذ خاک تمایز قائل شوند. Lamy و همکاران (۲۰۰۹) به مطالعه آزمایشگاهی افزایش سرعت انتقال یک محلول غیرواکنش دهنده (NaCl) از طریق یک مسیر درشت منفذ استوانه‌ای شکل به قطر ۵ میلی‌متر و طول ۲۷ سانتی‌متر در مرکز یک ستون خاک شنی به قطر ۱۰ و طول ۲۷ سانتی‌متر پرداختند. Mori و همکاران (۲۰۱٤) به‌منظور افزایش نفوذپذیری خاک از مسیرهای درشت منفذ مصنوعی استفاده نمودند. آن‌ها برای این کار شکاف‌هایی استوانه‌ای به قطر ۱ میلی‌متر و طول ۵۰ سانتی‌متر در خاک ایجاد کرده و برای استحکام این شکاف‌ها الیاف‌های شیشه‌ای داخل آن‌ها قرار دادند.

در بیش‌تر این مطالعات فرض شده که مسیرهای درشت منفذ در تمام پروفیل خاک به‌صورت پیوسته از سطح خاک آغاز شده و به‌صورت موازی با جهت جریان امتداد یافته‌اند. در حالی که واقعیت چنین نیست و حتی مسیرهای درشت منفذ مصنوعی با وجود مؤثر بودن،

[1]- Advection
[2]- Dispersion
[3]- Diffusion
[4]- Soil Matrix

شکننده هستند و نمی‌توانند همواره پایدار باقی بمانند (Castiglione *et al.*, 2003). Munyankusi و همکاران (۱۹۹٤) بیان نمودند که تعداد مسیرهای درشت منفذی که یک سوی آن‌ها در سطح زمین قابل مشاهده است، برای مدل‌سازی انتقال محلول در خاک کافی نبوده و باید از طول و پیوستگی این مسیرها نیز آگاهی داشت. Li و Ghodrati (۱۹۹۷) در آزمایش خود دریافتند که ۱/۵ سانتی‌متر از بخش پایینی برخی مسیرهای درشت منفذ مصنوعی ایجاد شده در اثر جریان محلول تخریب شده‌اند و پیوستگی آن‌ها به هم خورده است. به‌همین دلیل جریان ترجیحی قابل توجهی رخ نداد. بسته به پیوستگی یا ناپیوستگی از سطح تا کف ستون خاک، مسیرهای درشت منفذ همواره نمی‌توانند به حرکت محلول در خاک کمک کنند. پیوستگی مسیرهای درشت منفذ فاکتور مهمی است که در مدل‌سازی انتقال محلول باید مد نظر قرار گیرد (Leung *et al.*, 2000).

Mori و Hirai (۲۰۱٤) اظهار داشتند که ساختمان مسیرهای درشت منفذ مصنوعی معمولاً در بلندمدت تخریب و مسدود می‌شود و احتمال دوام آن‌ها اندک است. این اتفاق مانع نفوذ پیوسته آب در خاک در زمان‌های طولانی می‌شود. بنابراین تأثیر پیوستگی مسیرهای درشت منفذ در ایجاد جریان ترجیحی نیاز به مطالعات بیش‌تری دارد.

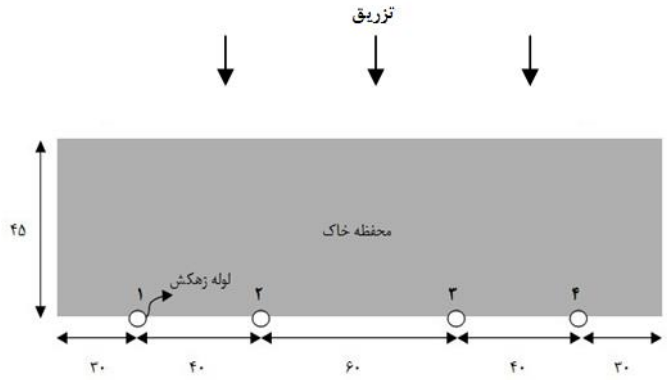
در این تحقیق، به‌جای استفاده از میله‌ها و استوانه‌های میان‌تهی، برای ایجاد مسیرهای ترجیحی در داخل توده خاک، لایه‌هایی از خاک با منافذ درشت‌تر (ماکروپور) قرار داده شد و تأثیر مسیرهای درشت منفذ و همچنین پیوستگی آن‌ها از سطح تا کف توده خاک در انتقال محلول بررسی گردید. بدین‌منظور، سه توده خاک به این ترتیب تهیه شدند: ۱- توده خاک همگن و بدون لایه‌های درشت منفذ، ۲- توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ از سطح تا کف خاک، و ۳- توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ از سطح خاک تا یک عمق معین بالاتر از کف آن. انتقال محلول غیرواکنش‌گر سدیم کلرید در این محیط‌های متخلخل با توجه به منحنی‌های رخنه آن بررسی شد و از آنجا که مدل‌سازی در کنار مطالعات آزمایشگاهی می‌تواند به بررسی جریان ترجیحی و وابستگی آن به خصوصیات مسیرهای درشت منفذ (مانند پیوستگی و خصوصیات هیدرولیکی آن) کمک کند، آزمایش‌های انتقال با استفاده از برنامه‌های SEEP/W و CTRAN/W موجود در مجموعه نرم‌افزاری GeoStudio نسخه ۲۰۰۷ شبیه‌سازی شدند.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های انتقال محلول

آزمایش‌های انتقال محلول در مدل فیزیکی موجود در آزمایشگاه منابع آب دانشگاه تبریز در دی‌ماه ۱۳۹٤ انجام گرفتند. مدل فیزیکی مذکور شامل یک مخزن مستطیلی به ابعاد ۲۰۰، ۱۰۰ و ٤۵ سانتی‌متر (به‌ترتیب طول، عرض و ارتفاع) بود. در کف این مخزن و در راستای عرض آن، چهار لوله زهکش قرار داشت. در بالای آن و در ارتفاع ٦۰ سانتی‌متری نیز ۸ آبپاش برای تزریق پیوسته و یکنواخت آب و محلول قرار داشتند. از دو مخزن و دو پمپ برای تأمین و تزریق آب خالص و محلول استفاده شد. شکل ۱ شماتیکی از مخزن خاک را نشان می‌دهد.

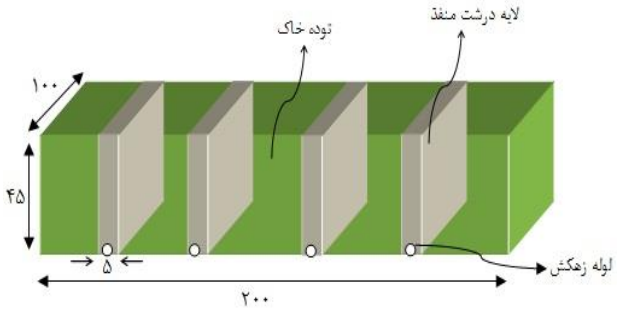
برای بررسی تأثیر مسیرهای درشت منفذ و همچنین پیوستگی آن‌ها از سطح تا کف توده خاک، سه آزمایش انجام گرفت. در آزمایش اول، مخزن خاک با استفاده از خاکی حاوی ۳ درصد رس، ٤/۲ درصد سیلت و ۹۲/۸ درصد شن و هدایت هیدرولیکی اشباع ۰/٦۸ سانتی‌متر بر دقیقه پر شد. برای انجام آزمایش‌های دوم و سوم، ابتدا با استفاده از ورقه‌های پلاستیکی نازک (طلق) با ابعاد ۱۰۰×٤۵ سانتی‌متر مربع (هم‌عرض و هم‌ارتفاع با مخزن خاک)، محفظه‌هایی با ضخامت ۵ سانتی‌متر و هم‌ارتفاع با توده خاک در کنار تمام زهکش‌ها ایجاد شد.



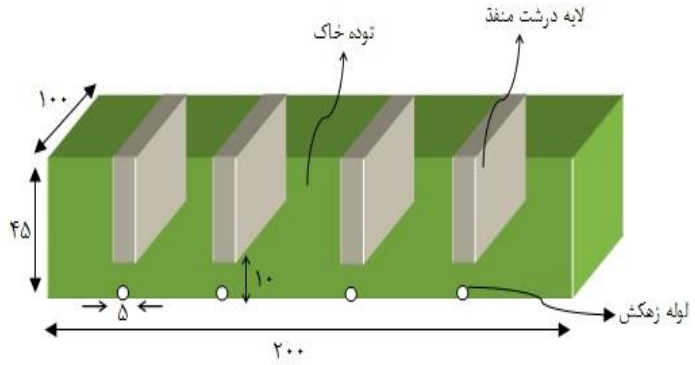
شکل ۱. مخزن خاک (اندازه‌ها برحسب سانتی‌متر هستند).

برای انجام این کار، در طرفین هریک از زهکش‌ها دو ورقه به شکل ایستاده (ارتفاع ٤٥ سانتی‌متر) با فاصله ٥ سانتی‌متر از یکدیگر قرار داده شد تا فضای بین این دو ورقه از فضای اطراف آن در داخل مخزن جدا شود. به این ترتیب ٤ محفظه به ارتفاع ٤٥ سانتی‌متر و ضخامت ٥ سانتی‌متر (در جهت طول مخزن) در اطراف ٤ زهکش ایجاد گردید. در آزمایش دوم، داخل این محفظه‌ها از کف تا ارتفاع هم‌سطح با توده خاک به‌طور کامل با استفاده از سنگریزه‌هایی به قطر ۲ تا ٤ میلی‌متر (به عنوان لایه درشت منفذ) و با هدایت هیدرولیکی اشباع ۱/۹ سانتی‌متر بر دقیقه پر شد. در آزمایش سوم، داخل محفظه‌ها تا ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری از کف، خاک ریخته شد و از ارتفاع ۱۰ سانتی‌متری تا ارتفاع هم‌سطح با توده خاک، با سنگریزه پر شد. سپس ورقه‌های پلاستیکی به‌آرامی بیرون کشیده شدند. از آنجایی که خاک مرطوب و دارای چسبندگی بود، هنگام بیرون کشیدن ورقه‌ها ترکیب ایجاد شده دچار به هم ریختگی نشد. به این ترتیب آزمایش‌های دوم و سوم به‌ترتیب نشانگر توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته از سطح تا کف و توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته بودند. شکل ۲ نحوه آرایش لایه‌های درشت منفذ را در توده‌های خاک مربوط به آزمایش‌های دوم و سوم نشان می‌دهد.

توده‌های خاک با استفاده از آب شهری چندین‌بار آبشویی شدند و اندازه‌گیری‌ها نشان داد که غلظت خروجی آبشویی برابر با غلظت آب شهری گردید. غلظت املاح آب شهری (۰/۲۲۵ گرم بر لیتر) بسیار کم‌تر از غلظت محلول مورد استفاده در آزمایش بود و در اندازه‌گیری‌ها نادیده گرفته شد. قبل از شروع هر آزمایش و سه روز بعد از آبشویی و زهکشی توده خاک، نمونه‌های از آن برداشته شد و برای تعیین رطوبت حجمی، چگالی ظاهری و تخلخل خاک مورد استفاده قرار گرفت که مقادیر آن‌ها در آزمایش‌ها به‌طور متوسط به‌ترتیب برابر با ١٦/٩٤ درصد، ١/٣٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ٤٧/٨٦ درصد به‌دست آمد.



(الف)



(ب)

شکل ۲. توده‌های خاک و لایه‌های درشت منفذ داخل آن‌ها. الف) لایه‌های درشت منفذ پیوسته و ب) لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته.

هدایت هیدرولیکی اشباع خاک به روش بار ثابت و بافت آن به روش هیدرومتری تعیین شدند. برای انجام آزمایش‌های انتقال، ۲۰۰ لیتر محلول سدیم کلرید (NaCl) با غلظت ۵ گرم بر لیتر با دبی ٤۰۰ لیتر بر ساعت (که با توجه به مساحت ۲ متر مربعی سطح توده‌های خاک، این شدت معادل ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه است) در سطح توده‌های خاک تزریق شد. در آزمایش مربوط به توده خاک بدون لایه‌های درشت منفذ و همچنین توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته، حدود ۱۵ و در آزمایش مربوط به توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته، حدود ۱۰ دقیقه بعد از شروع تزریق، خروج محلول از هر چهار زهکش مشاهده شد. از این لحظه نمونه‌برداری از زهکش‌ها آغاز شد و تا پایان آزمایش با فواصل زمانی ۵ دقیقه ادامه یافت. پس از ۳۰ دقیقه (یعنی درست پس از اتمام ۲۰۰ لیتر محلول با شدت تزریق ٤۰۰ لیتر بر ساعت)، عمل تزریق محلول متوقف شد و آب شیر با همان دبی تزریق گردید و در توده‌های خاک بدون لایه‌های درشت منفذ و دارای لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته تا دقیقه ۱۸۰ و در توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته تا دقیقه ۱۳۰ ادامه یافت؛ یعنی زمانی که غلظت محلول‌های خروجی از زهکش‌ها کم‌کم برابر با غلظت آب شهری شدند. غلظت نمونه‌های گرفته شده از زهکش‌ها با EC متر اندازه‌گیری شد.

شبیه‌سازی عددی

از مجموعه نرم‌افزاری GeoStudio نسخه ۲۰۰۷ برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها استفاده شد. در این مجموعه نرم‌افزاری، برنامه SEEP/W برای تعریف محیط مورد نظر و بر اساس رابطه ریچاردز برای شبیه‌سازی جریان آب به‌کار می‌رود و برنامه CTRAN/W بر اساس جریان تودهای پخش[1] انتقال ماده محلول را در محیط مذکور شبیه‌سازی می‌کند. در واقع، GeoStudio یک مدل کامپیوتری ترکیبی مبتنی بر روش اجزای محدود بوده و قادر است پدیده‌های مختلف را به‌طور همزمان بررسی کند. ایجاد هندسه جریان، تخصیص بافت‌های مختلف به قسمت‌های مختلف محدوده مورد مطالعه، شبکه‌بندی، اعمال شرایط اولیه و مرزی و حل شبکه مراحل اصلی کار با این نرم‌افزار است.

در این تحقیق، رطوبت حجمی ١٦/٩٤ درصد و غلظت ۰/۲۲۵ گرم بر لیتر به عنوان شرایط اولیه محدوده مورد نظر اعمال شدند. در مورد جریان آب، محل تزریق (بارش) مرز با جریان متغیر و محل خروج محلول (زهکش‌ها) مرز نشت دارای فشار صفر در نظر گرفته شد. در مورد انتقال محلول، شرط مرزی نوع سوم (نوع جریان) در هر دو محل (تزریق محلول و خروجی زهکش‌ها) اعمال گردید. علاوه بر قسمت‌های بین زهکش‌ها در کف مخزن خاک، در دو

[1]- advection-dispersion

مرز عمودی نیز شرط مرزی بدون جریان منظور گردید.

برای شبیه‌سازی انتقال محلول با مکانیزم جریان تودهای پخش نیاز به معرفی ضرایب پخشیدگی طولی (جهت جریان) و عرضی (عمود بر جهت جریان) به CTRAN/W است. در مطالعاتی که امکان اندازه‌گیری ضریب پخشیدگی نیست، معمولاً ضریب پخشیدگی طولی برابر یک‌دهم طول محیط و ضریب پخشیدگی عرضی برابر یک‌دهم ضریب پخشیدگی طولی توصیه شده است (Siyal *et al.*, 2013 و Amin *et al.*, 2014).

در این تحقیق، طول انتقال همان سطح تا کف توده خاک است که پس از چند بار آبشویی، در اثر تراکم خاک تقریباً به ٤٠ سانتی‌متر رسید. لذا در تخمین اولیه، ضریب پخشیدگی طولی برابر با ٤ و ضریب پخشیدگی عرضی برابر با ۰/٤ سانتی‌متر در نظر گرفته شدند. اما برای بهبود عملکرد مدل، نسبت به این ضرایب واسنجی صورت گرفت. به این صورت که ابتدا غلظت‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار GeoStudio در زمان‌های مختلف برای یکی از زهکش‌ها (زهکش ۱)، وارد برنامه کامپیوتری CXTFIT2.1 (Toride *et al.*, 1999) شد. برنامه CXTFIT2.1 قادر است با اخذ داده‌های غلظت در زمان‌های مختلف، به روش حل معکوس مقادیر ضریب پخشیدگی طولی متناظر را برآورد کند. میانگین این مقادیر برآورد شده (ضریب پخشیدگی طولی) به همراه یک‌دهم آن (به عنوان ضریب پخشیدگی عرضی) بار دیگر وارد نرم‌افزار GeoStudio شدند. در حین این فرایند، برای برآورد مقدار بهینه ضریب پخشیدگی، از سعی و خطا استفاده گردید. این فرایندها آن قدر تکرار شد تا غلظت‌های خروجی به‌دست آمده از نرم‌افزار GeoStudio نزدیک‌ترین نتایج را با غلظت‌های مشاهداتی داشته باشند. این اتفاق هنگامی رخ داد که مقادیر بهینه ضریب پخشیدگی طولی و عرضی به‌ترتیب برابر با ٤/۳ و ۰/۹ شدند.

ارزیابی مدل

عملکرد مدل GeoStudio با استفاده از چهار معیار آماری ضریب تبیین (رابطه ۱)، جذر میانگین مربعات خطا (رابطه ۲)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (رابطه ۳) و ضریب تجمعی باقیمانده (رابطه ٤) بررسی شد:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})(P_i - \overline{P})]^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2 \sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{P})^2} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(O_i - P_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۳)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i - \sum_{i=1}^{n} O_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (٤)$$

در روابط فوق، O_i و P_i به‌ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده، $\overline{O}$ و $\overline{P}$ به‌ترتیب مقدار متوسط آن‌ها و n تعداد مشاهدات است. R^2 نزدیک به یک، نشان دهنده دقت بالای مدل و همبستگی قوی بین داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده است. RMSE هم‌واحد با داده‌های مورد بررسی است و هر چقدر نزدیک به صفر باشد، بیانگر خطای متوسط مدل پایین است. EF می‌تواند بین $-\infty$ و یک قرار بگیرد. EF نزدیک به یک، بیانگر دقت بالای مدل و تطابق زیاد بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده است. EF مساوی صفر نشان می‌دهد که مدل دقتی برابر با دقت مقدار متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده دارد و EF منفی (بین $-\infty$ و صفر) موقعی اتفاق می‌افتد که دقت مقدار متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده بیش‌تر از دقت مدل باشد. مقدار مناسب برای CRM صفر است. مقدار مثبت و منفی CRM به‌ترتیب نشان دهنده تخمین بیش‌تر و کم‌تر مدل نسبت به داده‌های مشاهداتی است.

نتایج و بحث

در شکل ۳ منحنی‌های رخنه محلول سدیم کلرید از زهکش‌ها برای توده‌های خاک بدون لایه‌های درشت منفذ، دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته و دارای لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته مشاهده می‌گردد. محورهای عمودی

غلظت نسبی (غلظت خروجی تقسیم بر غلظت ورودی) را نشان می‌دهند. در توده خاک بدون لایه‌های درشت منفذ، غلظت اوج محلول رخنه شده از هر چهار زهکش در زمان ۹۰ دقیقه پس از شروع تزریق و مقدار نسبی (بی‌بعد) آن برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ٤ تقریباً مساوی و به‌ترتیب ۰/۷۹۹، ۰/۷۸٦، ۰/۷۷۹ و ۰/۷۸۲ است. زمان به حداقل رسیدن غلظت خروجی از چهار زهکش نیز تقریباً یکسان و در دقیقه ۲٤۰ بوده است.

برای توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته، غلظت اوج در زهکش‌ها بین دقایق ۷۰ تا ۸۰ پس از شروع تزریق و مقدار نسبی (بی‌بعد) آن برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ٤ به‌ترتیب برابر با ۰/۹۱۵، ۰/۹۱۳، ۰/۹۲۱ و ۰/۹۲۳ است. غلظت خروجی از چهار زهکش در زمان ۱۷۵ دقیقه به مقدار حداقل رسیده است.

برای توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته، غلظت اوج بین زمان‌های ۸۰ تا ۸۵ دقیقه پس از شروع تزریق رخ داده و مقدار نسبی (بی‌بعد) آن برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ٤ به‌ترتیب برابر با ۰/۸۵٦، ۰/۸٤۷، ۰/۸٦٤ و ۰/۸٤۳ است. غلظت‌های خروجی در زمان ۲٤۰ دقیقه به مقدار حداقل رسیده است.

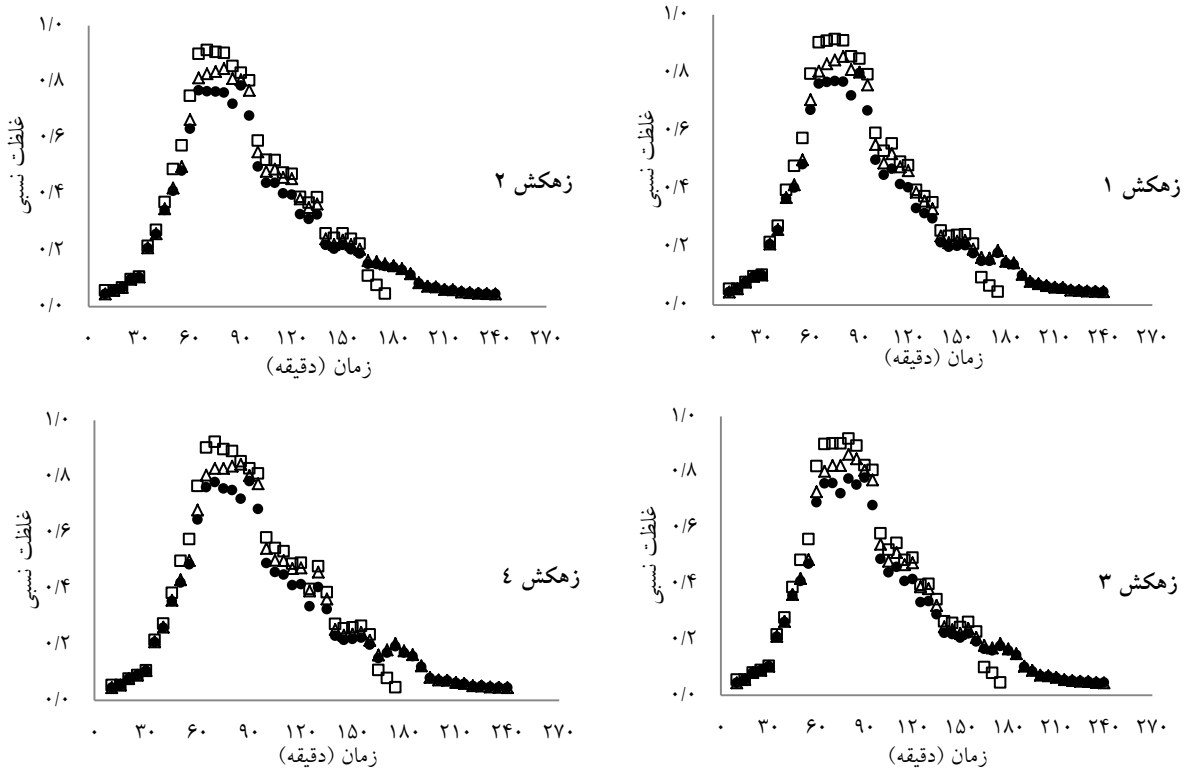
با توجه به این ارقام و شکل ۳، مقادیر نسبی غلظت اوج در اثر ایجاد لایه‌های درشت منفذ پیوسته نسبت به توده خاک بدون لایه درشت منفذ بین ۰/۱۱٦ تا ۰/۱٤۱ (بین ۱٤/۵۲ تا ۱۸/۰۳ درصد) افزایش و زمان وقوع این غلظت‌ها حدود ۱۰ تا ۲۰ دقیقه (۱۱ تا ۲۲ درصد) کاهش یافته است. کاهش زمان به حداقل رسیدن غلظت‌های خروجی نیز ٦۵ دقیقه (۲۷ درصد) بوده است. این در حالی است که این تغییرات در میزان نسبی غلظت‌های اوج و زمان‌های مذکور در مورد لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته کم‌تر بوده است. به‌طوری که مقادیر نسبی غلظت اوج نسبت به توده خاک بدون لایه درشت منفذ بین ۰/۰۵۷ تا ۰/۰۸۵ (بین ۷/۱۳ تا ۱۰/۹۱ درصد) افزایش و زمان مشاهده غلظت‌های اوج نیز حدود ۵ تا ۱۰ دقیقه (۵ تا ۱۱ درصد) کاهش یافته است.

در توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته، محلول بیش‌تر وارد مسیرهای درشت منفذ شده و در زمان کوتاه‌تری انتقال یافته است. بقیه محلول به بخش ماتریکس انتشار یافته و آرام‌تر حرکت کرده است. در این توده خاک، انتقال محلول در مقایسه با دو توده خاک دیگر سریع‌تر اتفاق افتاده، غلظت اوج زودتر مشاهده شده و منحنی آن به سمت چپ تمایل پیدا کرده است اما بین انتقال محلول در دو توده خاک دیگر تفاوت قابل توجهی وجود ندارد. محققان زیادی نشان داده‌اند که وجود بخش درشت منفذ در محدوده توده غالب خاک می‌تواند با ایجاد جریان ترجیحی موجب افزایش سرعت انتقال محلول در خاک شود. Castiglione و همکاران (۲۰۰۳) در آزمایش نفوذ آب در ستون‌های خاک حاوی مسیر درشت منفذ مصنوعی و بدون مسیر درشت منفذ مشاهده نمودند که شدت نفوذ در حالت وجود مسیر درشت منفذ به‌طور قابل توجهی بیش‌تر از حالت بدون مسیر درشت منفذ بود. رئیسی‌زاده و همکاران (۱۳۸۹) نشان دادند که منافذ درشت حتی اگر درصد کوچکی از تخلخل خاک را تشکیل دهند، بیش‌ترین درصد جریان در خاک را عبور می‌دهند. Mori و همکاران (۲۰۱٤) نشان دادند که مسیرهای درشت منفذ مصنوعی با بهبود نفوذپذیری خاک و وارد کردن آب به پروفیل خاک، رواناب سطحی را کاهش می‌دهند.

در این تحقیق، با توجه به این که غلظت اوج در توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته زودتر از دو توده خاک دیگر مشاهده شد و منحنی رخنه آن به سمت چپ تمایل پیدا کرد، لذا اگر زمان نمونه‌برداری از آن ادامه می‌یافت دنباله منحنی امتداد بیش‌تری پیدا می‌کرد. Hu و Brusseau (۱۹۹۵)، Li و Ghodrati (۱۹۹۷) و Lamy و همکاران (۲۰۰۹) در آزمایش‌های خود به نتایج مشابهی دست یافتند.

لایه‌های درشت منفذی که از سطح خاک تن‌ها تا عمق ۳۵ سانتی‌متری ادامه داشتند (ناپیوسته) تأثیر قابل توجهی در انتقال محلول نداشتند و به‌عنوان مسیرهای ترجیحی عمل نکردند. در نتیجه انتقال محلول در توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته تقریباً مانند توده خاک بدون لایه درشت منفذ بود که خاک همگنی داشت. در مطالعات زیادی (مانند Leung *et al.*, 2000 و زند سلیمی و همکاران، ۱۳۸۵) به اهمیت توزیع و پیوستگی منافذ درشت در تمام طول ستون خاک در ایجاد جریان ترجیحی و انتقال سریع محلول تأکید شده است.

در توده خاک همگن و بدون لایه‌های درشت منفذ (که در واقع مسیر ترجیحی ندارد)، محلول از سطح خاک وارد شده و به‌طور یکنواخت به سمت عمق خاک حرکت می‌کند. در توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته، محلول بلافاصله پس از ورود به پروفیل خاک به سمت لایه‌های درشت منفذ متمایل می‌شود و درصد بیش‌تر آن از همین لایه‌ها به سمت عمق خاک و زهکش‌ها هدایت می‌گردد و بخش توده غالب خاک را میان‌بر می‌رند. انتقال سریع محلول به طرف کف خاک به‌دلیل همین لایه‌های درشت منفذ است. در توده خاک دارای لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته، محلول ابتدا وارد لایه‌های درشت منفذ شده است، اما پس از عمق ۳۵ سانتی‌متری به‌دلیل قطع این لایه‌ها، محلول به بخش توده غالب خاک انتشار یافته است. اگرچه در این حالت لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته سرعت انتقال محلول را تا عمق مزبور افزایش داده‌اند، اما سرعت انتقال محلول تا کف خاک تفاوت قابل توجهی با توده خاک بدون لایه‌های درشت منفذ ندارد. این موضوع بیانگر این است که تأثیر مسیرهای درشت منفذ ناپیوسته در انتقال املاح بسیار کم‌تر از مسیرهای درشت منفذ پیوسته است.

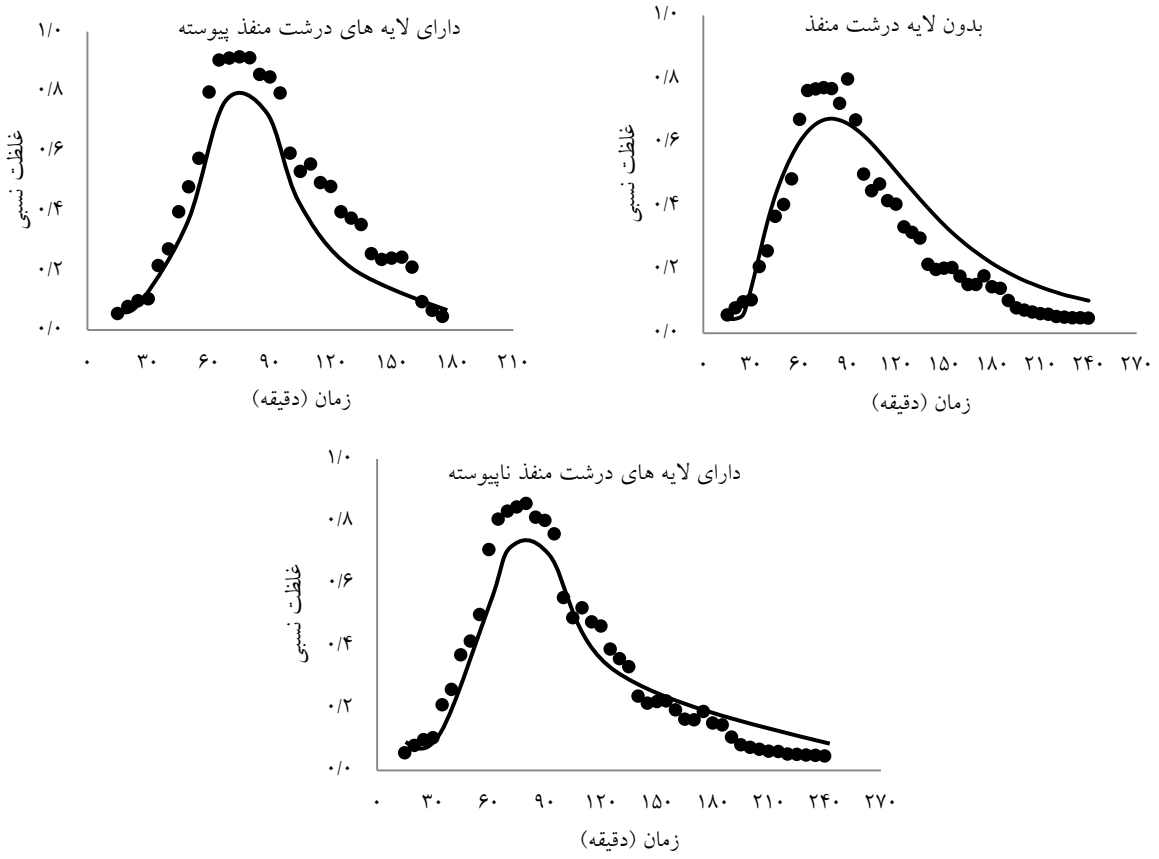


شکل ۳. منحنی‌های رخنه محلول سدیم کلرید از زهکش‌ها. بدون لایه درشت منفذ (●)، دارای لایه درشت منفذ پیوسته (□) و دارای لایه درشت منفذ ناپیوسته (Δ).

جدول ۱. معیارهای عملکرد مدل GeoStudio در توده‌های خاک بدون مسیر درشت منفذ و دارای مسیرهای درشت منفذ پیوسته و ناپیوسته

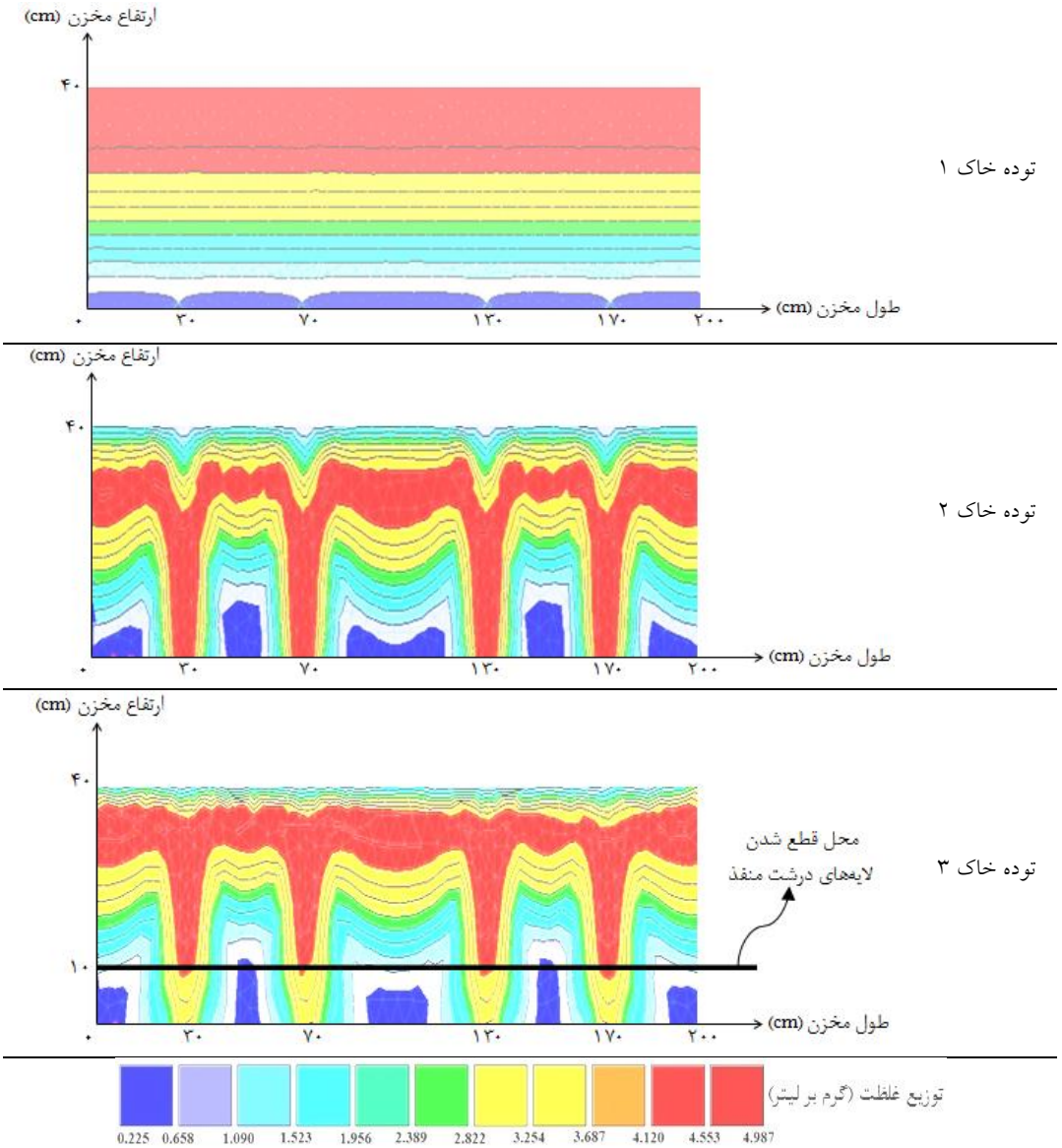
	R^2	RMSE	EF	CRM
توده خاک بدون مسیر درشت منفذ	۰/۹۰۸	۰/۲۳۲	۰/۸۹۹	۰/۱۲۱
توده خاک دارای مسیرهای درشت منفذ پیوسته	۰/۸۹۷	۰/۲۲۱	۰/۸۸۵	−۰/۱۶۶
توده خاک دارای مسیرهای درشت منفذ ناپیوسته	۰/۹۰۱	۰/۲۴۱	۰/۸۹۵	−۰/۱۷۱

در شکل ٤ منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به تعداد زیاد نمودارها و روند مشابه آن‌ها برای هر چهار زهکش، تنها نمودارهای مربوط به زهکش ۱ آورده شده است. با توجه به این شکل و جدول ۱ ملاحظه می‌گردد که مدل GeoStudio با ضریب تعیین بالا (۰/۹۰۸–۰/۸۹۷)، ضریب کارایی بالا (۰/۸۹۹–۰/۸۸۵) و جذر میانگین مربعات خطای پایین (۰/۲٤۱–۰/۲۲۱ گرم بر لیتر) دقت بسیار خوبی در شبیه‌سازی انتقال محلول در هر سه توده خاک داشته است. با این وجود، همان‌طور که از این منحنی‌ها مشخص است، مدل غلظت‌ها را در برخی زمان‌ها بیش‌تر (CRM مثبت) و در برخی دیگر کم‌تر (CRM منفی) تخمین زده است. یک دلیل این اختلاف‌ها می‌تواند ناشی از آن باشد که مدل شبیه‌سازی جریان را فقط در گره‌های موجود در شبکه‌بندی اجزای محدود انجام می‌دهد و محدوده‌های بین گره‌ها را در نظر نمی‌گیرد (Pang *et al.*, 2000).



شکل ٤. منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده و مشاهداتی. مشاهداتی (●)، شبیه‌سازی شده (ـــــ).

لذا حتی در صورت کوچک بودن فاصله گره‌ها این اختلاف‌ها تا حدی وجود خواهند داشت. به‌ویژه در توده‌های خاک دارای لایه‌های درشت منفذ (پیوسته و ناپیوسته) که حاوی دو محیط با بافت‌های مختلف بوده و در شبیه‌سازی عددی، شبکه‌بندی دقیق در مرز بین این دو خاک اهمیت زیادی دارد. در واقع جریانی با دو سرعت در این توده‌های خاک حاکم است: با سرعت بیش‌تر در لایه‌های درشت منفذ و بخشی از نواحی مجاور آن و با سرعت کم‌تر در سایر نواحی ماتریکس توده خاک. Lamy و همکاران (۲۰۰۹) اظهار داشتند که مسیر جریان ترجیحی به نواحی مجاور آن نیز بسط می‌یابد و در مدل‌سازی باید این موضوع را در نظر گرفت. دلیل دیگر اختلاف بین نتایج مدل و مشاهدات احتمالاً آن است که دقت دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری غلظت در حد یک‌هزارم گرم بر لیتر و دقت مدل عددی بیش‌تر از آن بود.



شکل ۵. پروفیل‌های دوبعدی غلظت در توده خاک‌های ۱ (بدون لایه درشت منفذ)، ۲ (دارای لایه‌های درشت منفذ پیوسته) و ۳ (دارای لایه‌های درشت منفذ ناپیوسته) در زمان ۷۵ دقیقه.

شکل ۵ پروفیل‌های دوبعدی غلظت را در توده‌های خاک در زمان ۷۵ دقیقه نشان می‌دهد. تقریباً در این زمان، غلظت‌های اوج در محلول رخنه شده از زهکش‌های توده خاک شماره ۲ (دارای لایه های درشت منفذ پیوسته) رخ داده است. در این توده خاک، محلول بلافاصله پس از ورود به پروفیل خاک به سمت لایه‌های درشت منفذ متمایل شده و درصد بیش‌تر آن از همین لایه‌ها به سمت عمق خاک هدایت شده است و در واقع، بخش ماتریکس را میان‌بر زده است. در چنین شرایطی محلول در یک زمان کوتاه از سطح خاک به طرف قسمت انتهایی لایه درشت منفذ حرکت می‌کند. از آن جا که لایه‌های درشت منفذ به‌صورت عمودی قرار گرفته بودند، یک گرادیان غلظت در جهت افقی ایجاد گردیده و موجب شده است که محلول علاوه بر نفوذ بیش‌تر در اعماق خاک، به‌صورت جانبی از لایه‌های درشت منفذ به سمت بخش ماتریکس نیز حرکت کند (Leung *et al.*, 2000).

در تمام زمان‌ها محلول در توده خاک ۲ زودتر از توده خاک ۱ به طرف کف خاک انتقال یافته است و دلیل آن نیز همین لایه‌های درشت منفذ است. در توده خاک شماره ۱ که محیط همگن بوده و در آن مسیر ترجیحی ساخته نشد، محلول از سطح خاک وارد شده و به‌طور یکنواخت به سمت عمق خاک حرکت کرده است. در توده خاک شماره ۳ نیز محلول ابتدا وارد لایه‌های درشت منفذ شده است، اما پس از عمق ۳۵ سانتی‌متری به دلیل قطع این لایه‌ها، سرعت انتقال آن کاهش پیدا کرده است.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر مسیرهای درشت منفذ در انتقال محلول در خاک بررسی شد. نتایج نشان داد که مقدار زیادی از محلول وارد بخش‌های درشت منفذ می‌شود. مسیرهای درشت منفذ که از سطح تا کف توده خاک امتداد داشتند موجب شدند مقدار زیادی از محلول بخش ماتریکس را میان‌بر زده و در مقایسه با توده خاک بدون مسیر درشت منفذ در زمان کوتاه‌تری در خاک انتقال یابد.

مسیرهای درشت منفذی که از سطح خاک تا عمقی بالاتر از کف توده خاک امتداد داشتند، تأثیر قابل توجهی در سرعت انتقال محلول نداشتند.

انتقال محلول سدیم کلرید در توده‌های خاک بدون مسیرهای درشت منفذ و حاوی مسیرهای درشت منفذ پیوسته و ناپیوسته با استفاده از مدل GeoStudio به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی شد. نتایج این مطالعه می‌تواند در کارهای مختلفی مانند زیست‌پالایی خاک‌های آلوده، آبشویی خاک‌های شور، کاربرد مؤثر کودها در کشاورزی و نفوذ آب بدون ایجاد ماندابی در سطح زمین مد نظر قرار گیرد. همچنین حفظ ساختمان مسیرهای درشت منفذ برای مدتی طولانی می‌تواند راندمان این کارها را افزایش می‌دهد.

فهرست منابع

پناهپور، ا.، افیونی، م.، همایی، م. و هودجی، م. ۱۳۸۷. حرکت کادمیم، کروم و کبالت در خاک تیمار شده با لجن فاضلاب و نمک این فلزات و جذب آن توسط سبزیجات در منطقه شرق اصفهان. مجله آب و فاضلاب، ۱۹ (۳): ۹-۱۷.

رئیسی‌زاده، آ.، صیاد، غ.، خرمیان، م.، خادم‌الرسول، ع. و رمضانی، ن. ۱۳۸۹. توزیع اندازه منافذ خاک و درصد جریان ترجیحی تحت تأثیر بی‌خاکورزی و خاکورزی مرسوم در خاک با بافت سیلتی کلی لوم. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. ۱۰ تا ۱۲ اسفند، دانشگاه شهید چمران اهواز.

زند سلیمی، س.، محبوبی، ع.ا.، مصدقی. م.ر.، رشیدیان، م. و فیروزمنش، م. ۱۳۸۵. بررسی اثر تیمارهای خاک بر منحنی رخنه باکتری اشریشیاکلی آزاد شده از کودهای آلی مختلف. مجله آب و فاضلاب، ۱۷ (۳): ۶۳-۷۴.

امیری میجان، ف.ا.، شرفا، م.، لیاقت، ع. و محمدی، م.ح. ۱۳۸۷. بررسی ساز و کار جریان ترجیحی املاح در حضور و عدم

حضور ماکروپورها در دو شدت جریان مختلف. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۲ (۲): ۷۳-۸۰.

Amin, M.G.M., Simunek, J. and Lagdsmand, M. 2014. Simulation of the redistribution and fate of contaminants from soil-injected animal slurry. Agricultural Water Management, 131 (3): 17– 29.

Beven, K. and Germann, P. 1982. Macropores and water flow in soils. Water Resources Research, 18 (5): 1311-1325.

Booltink. H.W.G. 1994. Field-scale distributed modelling of bypass flow in a heavily textured clay soil. Journal of Hydrology, 163 (1-2): 65-84.

Buttle, J.M. and Leigh, D.G. 1997. The influence of artificial macropores on water and solute transport in laboratory soil columns. Journal of Hydrology, 191 (1-4): 290-313.

Castiglione, P., Mohanty, B.P., Shouse, P.J., Simunek, J., van Genuchten, M.Th. and Santini, A. 2003. Lateral Water Diffusion in an Artificial Macroporous System: Modeling and Experimental Evidence. Vadose Zone Journal, 2 (2): 212–221.

Edwards, W.M., Shipitalo, M.J., Owens, L.B. and Dick, W.A. 1993. Factors affecting preferential flow of water and atraxine through earthworm burrows under continuous no-till corn. Journal of Environmental Quality, 22 (3): 453-457.

Gardenas, A.I., Simunek, J., Jarvis, N. and van Genuchten, M.Th. 2006. Two-dimensional modelling of preferential water flow and pesticide transport from a tile-drained field. Journal of Hydrology, 329 (3-4): 647–660.

Hu, Q. and Brusseau, M.L. 1995. Effect of solute size on transport in structured porous media. Water Resources Research, 31 (7): 1637-1646.

Jardine, P.M., Wilson, G.V., Luxmoore, R.J. and Mc Carthy, J.F. 1989. Transport of inorganic and natural organic tracers through an isolated pedon in a forest watershed. Soil Science Society of America Journal, 53 (2): 317-323.

Jarvis, N.J., Bergstrom, L. and Dik, P.E. 1991. Modelling water and solute transport in macroporous soil. II. Chloride breakthrough under non-steady flow. Journal of Soil Science, 42 (1): 7l-81.

Lamy, E., Lassabatere, L., Bechet, B. and Andrieu, H. 2009. Modeling the influence of an artificial macropore in sandy columns on flow and solute transfer. Journal of Hydrology, 376 (3-4): 392–402.

Leung, A.S.E., Gupta, S.C. and Moncrief, J.F. 2000. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. Macropore continuity. Journal of Contaminant Hydrology, 41 (3–4): 283–301.

Li, Y. and Ghodrati, M. 1997. Preferential Transport of solute through soil columns containing constructed macropores. Soil Science Society of America Journal, 61 (5): 1308-1317.

Mori, Y., Fujihara, A. and Yamagishi, K. 2014. Installing artificial macropores in degraded soils to enhance vertical infiltration and increase soil carbon content. Progress in Earth and Planetary Science, 1: 1-30.

Mori, Y. and Hirai, Y. 2014. Effective Vertical Solute Transport in Soils by Artificial Macropore System. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 18 (2): 1-7.

Munyankusi, E., Gupta, S.C., Moncrief, J.F. and Berry, E.C. 1994. Earthworm macropores and preferential transport in a long-term manure applied typic Hapludalf. Journal of Environmental Quality, 23 (4): 773–784.

Pang L., Close, M.E., Watt, J.P.C. and Vincen, K.W. 2000. Simulation of picloram, atrazine, and simazine l-eaching through two New Zealand soils and into groundwater using HYDRUS-2D. Journal of Contaminant Hydrology, 44 (1): 19–46.

Siyal, A.A., van Genuchten, M.Th. and Skaggs, T.H. 2013. Solute transport in a loamy soil under subsurface porous clay pipe irrigation. Agricultural Water Management, 121: 73–80.

Toride, N., Leij, F.j. and van Genuchten, M.Th. 1999. The CXTFIT code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments. Version 2.1, Research Rep. 137. U.S. Salinity Lab, Riverside, CA, USA, 119 pp.

White, R.E. 1985. The influence of macropores on the transport of dissolved and suspended matter through soil. Advances in Soil Science, 3: 95-120.

ISSN 2251-7480

Laboratory study of the influence of continuous and non-continuous macropore layers on solute transport in soil

Farshid Taran[1*], Ali Ashraf Sadraddini[2] and Amir Hossein Nazemi[3]

1[*]) PhD Student, Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
[*] Corresponding author email: farshidtaran@gmail.com
2) Professor, Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3) Professor, Water Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 17-04-2016 Accepted: 22-06-2016

Abstract
One of the mechanisms of solute transport in soil is preferential flow or flow in macropores. In this study, to investigate the influence of macropore paths on solute transport, three soil bulks composed of 3% clay, 4.2% silt and 92.8% sand in a box with 200 cm length, 100 cm width and 45 cm height were used. The first soil bulk was homogeneous (without macrpore path), the second one contained soil and layers of 5 cm thickness, composed of gravels with 2-4 mm diameter, from surface to bottom of the box (with continuous macropore layers), and the third one contained also contained soil and layers of same thickness and material, but the layers extended only to a depth of 35 cm (with non-continuous macropore layers). The transport of NaCl solution in these three soil bulks were experimented and then simulated using GeoStudio. In the soil bulk having continuous macropore layers, in comparison with the one with no macropore layer, the solute traveled the distance between the surface and the bottom in a shorter time (about 27%) and the peak concentrations were sooner observed (10-20 min). However, the non-continuous layers had no significant impact on the speed of solute transport. The GeoStudio software satisfactorily simulated the solute transport with the coefficient of determination more than 0.970 and the values of the root mean square error less than 0.25.

Keywords: CTRAN/W; macropore path; preferential flow; SEEP/W; soil matrix