

بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی تأثیر ترتیب قرارگیری لایه‌های خاک و ضخامت آن‌ها در انتقال محلول

فرشید تاران^{1*} و سعید نورآبادی²

تاریخ دریافت: 1394/9/25 تاریخ پذیرش: 1394/2/1

چکیده

درک انتقال محلول در خاک‌های ناهمگن و لایه‌ای جهت مدیریت بهتر و توصیف حرکت مواد شیمیایی در این گونه محیط‌ها حائز اهمیت است. در این مطالعه تأثیر ترتیب قرارگیری لایه‌های خاک با ضخامت‌های مختلف در حرکت محلول بررسی شد. بدین منظور از دو خاک با بافت‌های مختلف شن لومی و لوم رسی برای تهیه شش ستون دو لایه‌ای (دو ستون 10 سانتی‌متری، دو ستون 20 سانتی‌متری و دو ستون 30 سانتی‌متری) استفاده و انتقال محلول سدیم کلرید در این ستون‌ها آزمایش شد. با قرار گرفتن لایه شن لومی در زیر لایه لوم رسی (حالت اول)، در مقایسه با حالتی که ترتیب قرارگیری این دو لایه تغییر داده شد (حالت دوم)، رخنه محلول و مشاهده غلظت اوج در کف ستون سریع‌تر و دنباله منحنی رخنه کوتاه‌تر بود. با افزایش ضخامت لایه‌ها، این تفاوت‌ها بیش‌تر شد. به طوری که در لایه‌های 5 سانتی‌متری با تغییر محل دو لایه، اختلاف بین زمان رسیدن محلول رخنه شده به یک غلظت تقریباً ثابت، زمان مشاهده غلظت اوج و مدت زمان امتداد دنباله منحنی رخنه به ترتیب 100، 130 و 30 دقیقه بود. این زمان‌ها در لایه‌های 10 سانتی‌متری به ترتیب 150، 190 و 40 دقیقه و در لایه‌های 15 سانتی‌متری به ترتیب 210، 250 و 40 دقیقه بودند. ترتیب قرارگیری لایه‌ها بیش‌تر از طول ستون بر انتقال محلول تأثیر گذاشت. به طوری که غلظت اوج در حالت دوم ستون 10 سانتی‌متری 40 دقیقه دیرتر از حالت اول ستون 20 سانتی‌متری و در حالت دوم ستون 20 سانتی‌متری 100 دقیقه دیرتر از حالت اول ستون 30 سانتی‌متری رخ داد. انتقال محلول به روش اجزای محدود و با استفاده از مدل GeoStudio شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی با ضریب تبیین (R^2) بیش‌تر از 0/984 و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کم‌تر از 0/530 گرم بر لیتر رضایت بخش بود.

واژه‌های کلیدی: انتقال محلول، خاک لایه‌ای، ضخامت لایه‌ها، مدل GeoStudio

مقدمه

بینی کرده‌اند، اما عملکرد آن‌ها در مقیاس میدانی اغلب ضعیف بوده است. دلیل اصلی این اتفاق آن است که خصوصیات خاک در مقیاس میدانی از نقطه‌ای به نقطه دیگر و با عمق و هم‌چنین با زمان تغییر می‌کند (Leij and van Genuchten., 1995). آزمایش‌های انتقال محلول نیز غالباً در خاک‌های همگن انجام می‌گیرد، در حالی که در شرایط واقعی انتقال در خاک‌های ناهمگن اتفاق می‌افتد (Porro et al., 1993). به‌طور کلی خاک‌های همگن به‌ندرت در طبیعت یافت می‌شوند، در حالی که خاک‌های ناهمگن غالباً در همه جا وجود دارند. خاک‌های همگن برای مطالعات ایده‌آل هستند، اما نمی‌توان انتظار داشت که رفتار آن‌ها مشابه رفتار خاک‌های مزارع باشد. در مقابل، خاک‌های ناهمگن و لایه‌ای معمولاً در مزارع مشاهده می‌شوند. لذا به‌منظور ارائه مدل‌های کاربردی‌تر، مطالعات در مورد انتقال مواد در خاک‌های ناهمگن ضروری است. فرایندهای انتقال در خاک‌های ناهمگن متفاوت از خاک‌های همگن است. مطالعات نشان داده‌اند که مواد شیمیایی در خاک‌های ناهمگن نسبت به خاک‌های همگن

در سال‌های گذشته مشاهده شده که انواع آلاینده‌های کشاورزی و صنعتی و فاضلاب‌های شهری از سطح خاک نفوذ کرده و پروفیل خاک و آب‌های زیرزمینی را آلوده می‌کنند. انتقال مواد شیمیایی در خاک‌ها و نقش آن‌ها در آلودگی محیط زیست و تأثیر آن بر سلامت انسان، حیوان و گیاه مورد توجه مهندسين خاکشناسی و کشاورزی قرار گرفته است. برای جلوگیری از خطرات ناشی از این آلاینده‌ها، درک و بررسی فرایندهای انتقال آن‌ها در خاک و نحوه رسیدن آن‌ها به سطح آب زیرزمینی ضروری است (Charbeneau., 2000). تاکنون مطالعات زیادی برای توصیف حرکت مواد محلول در خاک انجام و مدل‌های زیادی برای آن ارائه شده است که این مدل‌ها به‌طور موفقیت آمیزی فرایندهای انتقال را در خاک‌های همگن پیش -

1- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه تبریز

2- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه تبریز

* - نویسنده مسئول: (Email: farshidtaran@gmail.com)

که صرف‌نظر از ویژگی‌های آب و ماده محلول، ترتیب قرارگیری لایه‌های یک خاک اشباع تأثیری در رخنه محلول از ستون‌ها ندارد (Sharma et al., 2014).

بنابراین هنوز تأثیر ترتیب قرارگیری لایه‌ها در انتقال محلول در خاک به‌طور واضح مشخص نشده است و با توجه به اهمیت نقش ناهمگنی و لایه‌بندی خاک، تحقیقات بیش‌تری باید در این زمینه انجام گیرد. علاوه بر این، اگرچه مطالعات زیادی در مورد تأثیر لایه‌بندی خاک و همچنین ترتیب لایه‌ها در انتقال محلول در خاک انجام گرفته، اما تاکنون تأثیر توأم ترتیب قرارگیری لایه‌ها و ضخامت آن‌ها در نظر گرفته نشده است. در این مطالعه تأثیر ترتیب قرار گرفتن لایه‌های خاک با ضخامت‌های مختلف در حرکت محلول در ستون‌های خاک لایه‌ای بررسی شده است. بدین منظور از دو خاک با بافت‌های مختلف شن لومی (درشت بافت) و لوم رسی (ریزبافت) برای تهیه شش ستون خاک دو لایه‌ای استفاده و محلول غیرواکنش دهنده سدیم کلرید از سطح این ستون‌ها تزریق شد. در نهایت غلظت محلول‌های خروجی از ستون‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. اخیراً مدل‌های کامپیوتری ترکیبی ارائه شده‌اند که قادرند پدیده‌های مختلفی را به‌طور همزمان بررسی کنند. یکی از این مدل‌ها GeoStudio است که دارای قسمت‌های مختلفی برای بررسی مکانیزم حرکت آب در خاک و انتقال مواد محلول است. در این مطالعه انتقال محلول در ستون‌های خاک به روش اجزای محدود با استفاده از برنامه‌های SEEP/W و CTRAN/W موجود در بسته نرم‌افزاری GeoStudio نسخه 2007 شبیه‌سازی و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. به‌طور کلی اهداف این مطالعه عبارتند از: 1) بررسی تأثیر توأم ترتیب لایه‌بندی نیم‌رخ خاک و ضخامت لایه‌های خاک در انتقال محلول (2) شبیه‌سازی انتقال محلول در خاک‌های لایه‌ای با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio برای بررسی دقیق‌تر تأثیر لایه‌بندی بر انتقال محلول (3) تأیید اعتبار نرم‌افزار GeoStudio در شبیه‌سازی انتقال محلول در خاک است.

مواد و روش‌ها

تهیه ستون‌های خاک لایه‌ای

برای آماده کردن ستون‌های خاک لایه‌ای، دو خاک با بافت‌های مختلف از دو عمق 0-50 و 50-100 سانتی‌متری از دو نقطه متفاوت ایستگاه تحقیقاتی کرکج دانشگاه تبریز واقع در جاده باسمنج با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب $46^{\circ} 43'$ و $38^{\circ} 02'$ و ارتفاع 1567 متر از سطح دریا تهیه شد. خاک‌ها به مدت 24 ساعت در دمای 105 درجه سانتی‌گراد آون خشک شدند. پس از کوبیدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. بافت آن‌ها با روش هیدرومتری و هدایت هیدرولیکی اشباع آن‌ها با روش بار ثابت به‌دست آمد. خصوصیات فیزیکی این دو

سریع‌تر و تا عمق بیش‌تری انتقال می‌یابند (Zhou., 2002). خاک-های لایه‌ای انواعی از خاک‌های ناهمگن هستند. خاک در اثر فعالیت‌های موجودات زنده و اعمال مدیریتی در مزارع به صورت لایه‌ای درمی‌آید. لذا لایه‌بندی خاک پدیده‌ای طبیعی است که در بسیاری از مناطق دیده می‌شود. همچنین موانع مصنوعی مانند نوارهای رسی غالباً جهت کاهش حرکت برخی مواد شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Leij et al., 1991)، یا گاهی اوقات سطح خاک سله می‌بندد (Leij and van Genuchten., 1995). پارامترهای هیدرولیکی هر لایه معمولاً متفاوت از لایه‌های دیگر بوده و لذا نفوذ در خاک‌های لایه‌ای پیچیده‌تر از خاک‌های همگن است (Mohammadzadeh-Habili and Heidarpour., 2015)، زیرا آب و مواد محلول برای رسیدن از سطح خاک تا آب زیرزمینی باید از لایه‌هایی با ویژگی‌های انتقال مختلف عبور کنند (Jury and Utermann., 1992).

چندین مطالعه در مورد لایه‌های با بافت‌ها و ترکیبات مختلف با فصل مشترک مشخص انجام شده‌اند که در آن‌ها هر لایه به‌طور همگن در نظر گرفته شده است. باترز و همکاران حرکت محلول در زیر سطح یک خاک شن لومی تحت آبیاری را بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که در 3 متری فوقانی نیم‌رخ خاک ضریب پخش به‌طور خطی افزایش می‌یابد، اما پس از عبور از یک لایه نازک ریزبافت در 3 متری، ضریب پخش حدود 30 درصد کاهش و بعد از آن دوباره به صورت تقریباً خطی افزایش یافت. آن‌ها این کاهش ضریب پخش را به تأثیر لایه ریزبافت نسبت دادند (Butters et al., 1989). لیچ و همکاران انتقال یک بعدی محلول را در خاک‌های لایه‌ای بررسی کردند. آن‌ها برای یک خاک دو لایه‌ای حل‌های تحلیلی ارائه دادند و تأثیر لایه‌بندی خاک را در انتقال محلول با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که لایه‌بندی خاک می‌تواند نقش زیادی در انتقال محلول داشته باشد. آن‌ها نتیجه گرفتند به‌دلیل تفاوت در مقدار رطوبت لایه‌ها، مقادیر فلاکس‌های توده‌ای و پخش در لایه با سرعت منفذی کم‌تر به ترتیب کوچک‌تر و بزرگ‌تر از لایه با سرعت منفذی بیش‌تر بود (Leij et al., 1991). پوررو و همکاران انتقال محلول در خاک‌های یکنواخت و لایه‌ای را با یکدیگر مقایسه نمودند. آن‌ها آب تریتیومی، برومید و کلرید را به صورت پالسی از سطح دو ستون خاک تزریق کردند. یک ستون به‌طور یکنواخت با خاک شن لومی و دیگری به‌طور متناوب با لایه‌هایی به ضخامت 20 سانتی‌متر از خاک‌های شن لومی و لوم رس سیلتی پر شد. تطابق بین منحنی‌های رخنه به‌دست آمده از معادله جریان توده‌ای-پخش و منحنی‌های رخنه مشاهداتی برای ستون خاک لایه‌ای بیش‌تر و قابل قبول‌تر از ستون خاک همگن بود (Porro et al., 1993). شارما و همکاران به بررسی انتقال آلاینده در خاک‌های چند لایه پرداختند. آن‌ها سدیم کلرید و سدیم فلورید را به‌صورت پالسی در ستون‌های خاک چند لایه اشباع تزریق کردند. نتایج آن‌ها نشان داد

خاک در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1- خصوصیات فیزیکی دو خاک مورد استفاده در آزمایش

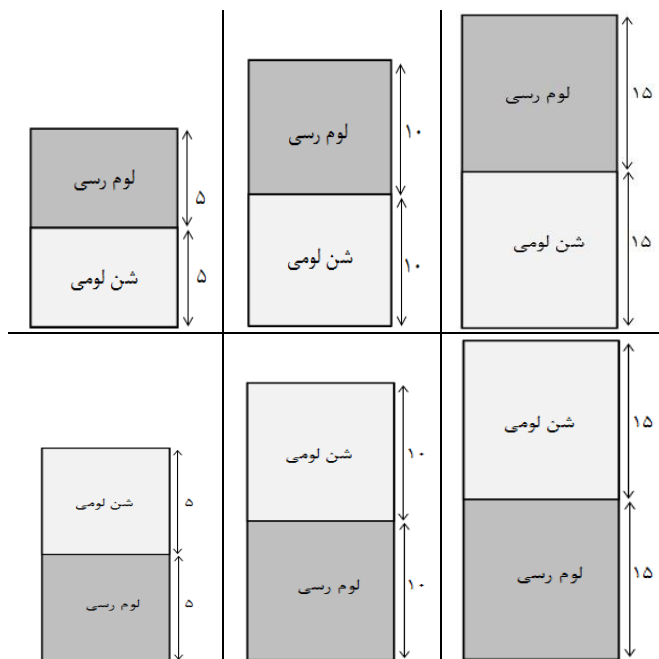
شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	چگالی ظاهری (gr/cm ³)	تخلخل (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/min)
85	11	4	1/61	0/34	0/15
39	31/5	29/5	1/11	0/54	0/05

ضربات آهسته دست به دیواره استوانه‌ها ایجاد گردید. ستون‌های آماده شده به آرامی به مدت 72 ساعت در ظرف‌های آب قرار داده شدند تا از کف و بدون محبوس شدن هوا اشباع شوند.

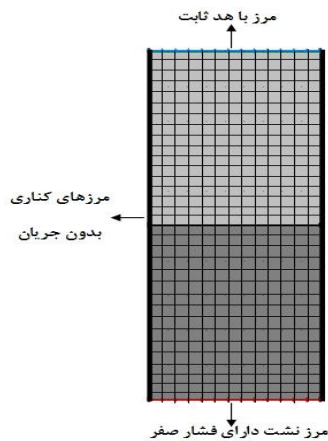
آزمایش تزریق محلول به ستون‌ها

محلول غیرواکنش دهنده سدیم کلرید با غلظت 3 گرم بر لیتر با استفاده از یک بار ثابت 5 سانتی‌متری به‌طور پیوسته از سطح ستون‌های خاک تزریق شد. در واقع جریان عمود بر فصل مشترک دو لایه بود. بلافاصله پس از شروع تزریق، نمونه‌برداری از محلول رخنه شده از کف ستون آغاز شد و تا زمانی که غلظت آن تقریباً به مقدار ثابت و برابر با غلظت محلول تزریق شده برسد، با فواصل 10 دقیقه‌ای ادامه یافت. محلول رخنه شده با استفاده از یک قیف به داخل ظرف نمونه‌گیری هدایت می‌شد. غلظت این نمونه‌ها با استفاده از یک دستگاه مولتی‌متر اندازه‌گیری شد که قادر است غلظت محلول (c) را بر حسب گرم بر لیتر نشان دهد. در شکل 2 نحوه انجام آزمایش مشاهده می‌گردد.

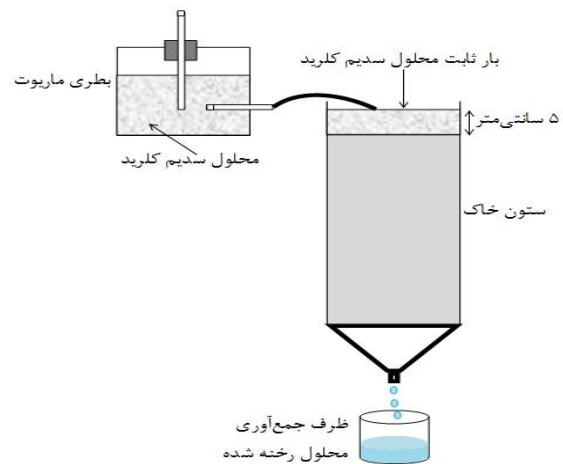
برای تهیه ستون‌های خاک دو لایه‌ای، از استوانه‌هایی به جنس پرپکس به قطر داخلی 9/3 استفاده شد. در سه استوانه ابتدا یک لایه از خاک شن لومی به ترتیب به ضخامت‌های 5، 10 و 15 سانتی‌متر ریخته شد و سپس بر روی آن‌ها لایه‌ای از خاک لوم رسی با ضخامتی برابر با ضخامت لایه شن لومی زیرین قرار گرفت. سه استوانه دیگر مشابه این استوانه‌ها آماده شد، با این تفاوت که جای لایه‌های شن لومی و لوم رسی با یکدیگر عوض شد. شکل 1 شش ستون خاک دو لایه‌ای تهیه شده را نشان می‌دهد. در این ستون‌ها هر لایه به‌صورت همگن و دارای ویژگی‌های خاص خود است و دو لایه با هم یک محیط ناهمگن را تشکیل داده‌اند. برای جلوگیری از حرکت محلول از جدار داخلی استوانه‌ها، دور جدار داخلی گریس مالیده شد. خاک درون استوانه‌ها با آب شهری چند بار آبشویی شد تا غلظت املاح آن حتی‌الامکان با غلظت آب شهری برابر شود. غلظت املاح آب شهری (0/225 گرم بر لیتر) بسیار کم‌تر از غلظت محلول مورد استفاده در آزمایش بود و در نتایج آزمایش‌ها تأثیر قابل توجهی نداشت، لذا در اندازه‌گیری‌ها نادیده گرفته شد. چند روز اجازه داده شد تا خاک داخل استوانه‌ها خشک شود. سپس تراکم لازم با وارد کردن



شکل 1- ترتیب قرارگیری لایه‌ها در ستون‌های خاک و ضخامت آن‌ها (برحسب سانتی‌متر)



شکل 3- هندسه، شبکه‌بندی و شرایط مرزی محدوده مورد نظر



شکل 2- آزمایش انتقال محلول سدیم کلرید در ستون خاک

شبیه‌سازی عددی

از برنامه‌های CTRAN/W و SEEP/W موجود در مجموعه نرم‌افزاری GeoStudio نسخه 2007 برای شبیه‌سازی حرکت آب و ماده محلول (با مکانیزم جریان توده‌ای-پخش¹) استفاده شد. این برنامه‌ها مبتنی بر روش اجزای محدود هستند. 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. شکل 3 هندسه و شبکه‌بندی ستون‌ها را به همراه شرایط مرزی نشان می‌دهد. در این مطالعه برای شبیه‌سازی از گام‌های مکانی (فاصله گره‌ها) 0/3 سانتی‌متری و گام‌های زمانی 1 دقیقه‌ای استفاده شد. شرایط اولیه اشباع برای جریان آب و غلظت پیش‌زمینه صفر برای انتقال محلول منظور گردید.

برای توصیف انتقال محلول نیاز به دو ضریب پخشیدگی طولی و عرضی است. ضریب پخشیدگی طولی² برای جهت جریان و ضریب پخشیدگی عرضی³ برای عمود بر جهت جریان. معمولاً ضریب پخشیدگی طولی برابر یک دهم طول محیط (مانند *Siyal et al., 2013; Hooshmandfar and Khodadadi., 2014*) و ضریب پخشیدگی عرضی برابر یک دهم ضریب پخشیدگی طولی (مانند *Hanson et al., 2006; Abbaspour et al., 2001*) در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه طول انتقال همان سطح تا کف ستون خاک است و به‌عنوان تخمین اولیه، ضریب پخشیدگی طولی برای ستون‌های 10، 20 و 30 سانتی‌متری به ترتیب برابر با 1، 2 و 3 سانتی‌متر و ضریب پخشیدگی عرضی به ترتیب برابر با 0/1، 0/2 و 0/3 سانتی‌متر در نظر گرفته شدند. اما برای بهبود عملکرد مدل، نسبت به این

ضرایب واسنجی صورت گرفت. واسنجی به این صورت بود که ابتدا غلظت‌های به دست آمده از نرم‌افزار GeoStudio در زمان‌های مختلف وارد برنامه رایانه‌ای 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. این مقادیر برآورد شده (ضریب پخشیدگی طولی) به همراه یک دهم آن‌ها (به عنوان ضریب پخشیدگی عرضی) بار دیگر وارد نرم‌افزار GeoStudio شدند. در حین این فرایند، برای برآورد مقادیر بهینه ضرایب پخشیدگی، از سعی و خطا نیز استفاده گردید. این فرایندها آن قدر تکرار شد تا غلظت‌های خروجی به دست آمده از نرم‌افزار GeoStudio نزدیک‌ترین نتایج را با غلظت‌های مشاهداتی داشته باشند. این اتفاق هنگامی رخ داد که مقادیر بهینه ضریب پخشیدگی طولی به ترتیب برابر با 0/95، 2/03 و 3/1 و مقادیر بهینه ضریب پخشیدگی عرضی به ترتیب برابر با 0/08 و 0/15 و 0/25 شدند.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

استفاده از معیارهای متکی بر همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، نظیر ضریب همبستگی، به تنهایی نمی‌تواند در تحلیل دقت مدل‌ها کارآمد باشد و از معیارهای دیگری نیز باید استفاده نمود (Legates and Mc Cabe., 1999). در این مطالعه علاوه بر ضریب تبیین (R^2)، از معیارهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تجمعی باقیمانده (CRM) جهت بررسی دقت مدل استفاده شد:

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

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

1- Advection-dispersion

2- Longitudinal dispersivity

3- Transverse dispersivity

حالت دوم طولانی‌تر از حالت اول است، زیرا این دنباله در حالت اول بین دقایق 80 تا 90 و در حالت دوم بین دقایق 180 تا 220 است. لذا 30 دقیقه بین دنباله‌های آن‌ها اختلاف وجود دارد. در یک خاک دو لایه، هنگامی که جریان به مرز بین لایه‌ها می‌رسد، متوقف می‌شود تا این که مکش در آن جا به اندازه‌ای کاهش یابد (یا فشار افزایش یابد) که آب بتواند وارد منافذ لایه پایینی شود. چنانچه در این نقطه، هدایت هیدرولیکی لایه پایینی بیش‌تر از هدایت هیدرولیکی لایه بالایی باشد، لایه پایینی آب دریافت شده را از منافذ بزرگ‌تر خود حرکت داده و موجب تسریع حرکت محلول می‌شود (Hillel., 2004). لایه‌های 10 سانتی‌متری:

1- لایه پایینی شن لومی و لایه بالایی لوم رسی: در این حالت 180 دقیقه پس از شروع تزریق، غلظت محلول خروجی برابر غلظت محلول ورودی می‌شود. مطابق شکل 3-ب افزایش غلظت و در نتیجه صعود منحنی رخنه از زمان صفر تا حدود دقیقه 160 ادامه دارد و پس از آن غلظت تقریباً به مقدار ثابتی رسیده و منحنی رخنه به شکل افقی درمی‌آید.

2- لایه پایینی لوم رسی و لایه بالایی شن لومی: در این حالت در دقیقه 370 غلظت محلول خروجی برابر با غلظت محلول تزریق شده می‌گردد. همان‌طور که در شکل 3-ب مشاهده می‌شود، حدود دقیقه 310 از شدت افزایش غلظت کاسته شده، غلظت به تدریج به مقدار ثابتی می‌رسد و از این زمان به بعد منحنی رخنه تقریباً موازی با محور افقی می‌شود.

در این جا نیز با وجود ثابت ماندن ضخامت لایه‌ها، تغییر در ترتیب قرارگیری لایه‌ها موجب تغییر در رفتار حرکتی محلول شده است. در حالت اول در مقایسه با حالت دوم، غلظت اوج 190 دقیقه زودتر رخ داده است. همچنین دنباله منحنی رخنه در حالت اول بین دقایق 160 تا 180 و در حالت دوم بین دقایق 310 و 370 است. بنابراین دنباله منحنی رخنه در حالت دوم امتداد بیش‌تری دارد. لایه‌های 15 سانتی‌متری:

1- لایه پایینی شن لومی و لایه بالایی لوم رسی: 270 دقیقه بعد از شروع تزریق، غلظت محلول خروجی برابر با غلظت محلول ورودی می‌شود. طبق شکل 3-ج افزایش غلظت تقریباً تا دقیقه 240 با شیب تند همراه است، اما بعد از آن کم کم به مقدار ثابتی می‌رسد و منحنی رخنه به شکل افقی درمی‌آید.

2- لایه پایینی لوم رسی و لایه بالایی شن لومی: 520 دقیقه بعد از شروع تزریق، مقدار غلظت محلول خروجی به مقدار غلظت محلول ورودی می‌رسد. مطابق شکل 3-ج غلظت تقریباً تا دقیقه 450 افزایش یافته و سپس از شدت افزایش غلظت کاسته می‌شود تا این که برابر با غلظت ورودی شود.

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (3)$$

که در آن‌ها، O_i و P_i مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و \bar{O} و \bar{P} به ترتیب مقدار متوسط آن‌ها هستند 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. هر چقدر RMSE نزدیک به صفر باشد، خطای متوسط مدل پایین است. مقدار مثبت و منفی CRM به ترتیب نشان دهنده تخمین بیش‌تر و کم‌تر مدل نسبت به مشاهدات است.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش

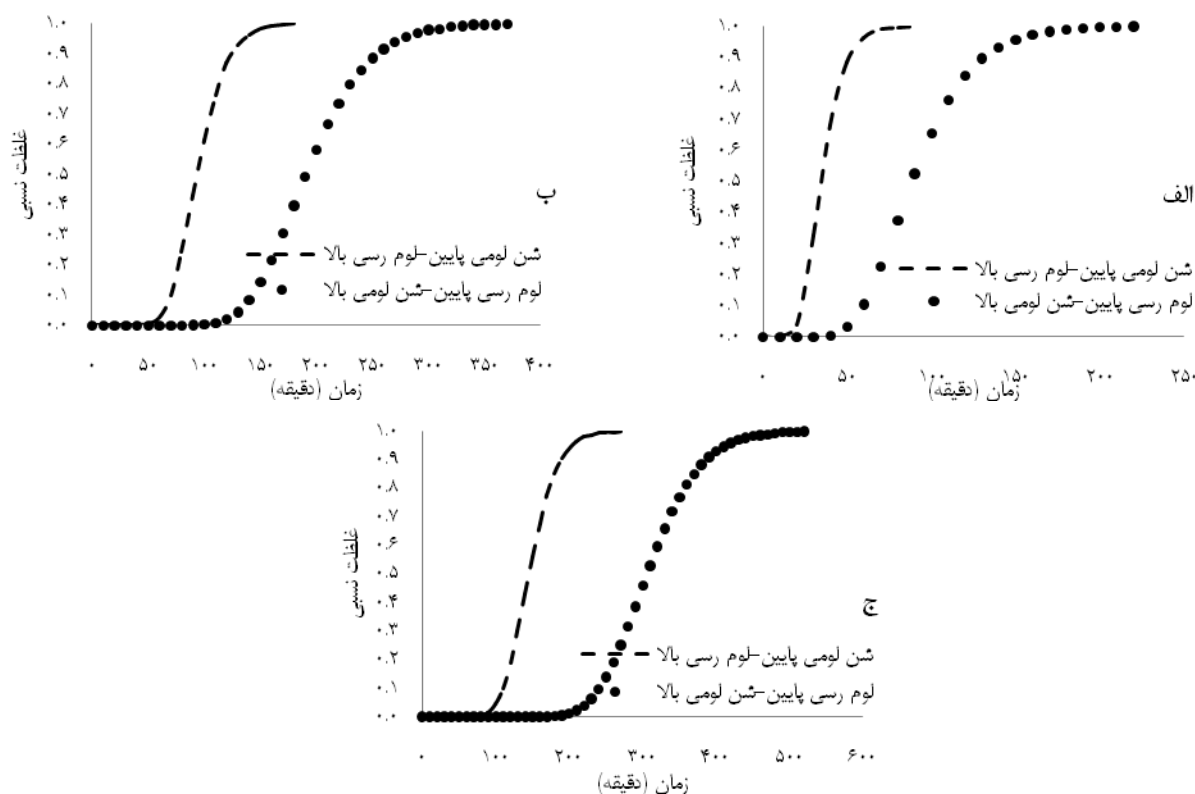
شکل 4 منحنی‌های رخنه محلول سدیم کلرید را برای ستون‌های خاک نشان می‌دهد. در این نمودارها محور افقی زمان سپری شده پس از شروع تزریق بوده و محور عمودی غلظت نسبی محلول خروجی از انتهای ستون (یعنی غلظت محلول خروجی تقسیم بر غلظت محلول تزریق شده) را نشان می‌دهد و لذا غلظت‌های ارائه شده کوچک‌تر یا مساوی یک هستند. محور افقی بر حسب دقیقه و محور عمودی بدون واحد است.

لایه‌های 5 سانتی‌متری:

1- لایه پایینی شن لومی و لایه بالایی لوم رسی: در این حالت 90 دقیقه پس از شروع تزریق، غلظت محلول خروجی از انتهای ستون برابر با غلظت محلول تزریق شده می‌گردد. همان‌طور که در شکل 3-الف مشاهده می‌شود، غلظت تقریباً تا دقیقه 80 به طور صعودی تغییر می‌کند، اما از این زمان تا دقیقه 90 کم کم به مقدار ثابتی رسیده و منحنی رخنه به صورت موازی با محور افقی امتداد می‌یابد.

2- لایه پایینی لوم رسی و لایه بالایی شن لومی: در این حالت در دقیقه 220 غلظت محلول خروجی برابر با غلظت محلول ورودی می‌شود. مطابق شکل 3-الف حدود 180 دقیقه غلظت با شیب تندی افزایش یافته و از این زمان تا دقیقه 220 به تدریج مقدار آن ثابت می‌شود تا این که برابر با غلظت محلول تزریق شده گردد.

ملاحظه می‌گردد علی‌رغم این که ضخامت لایه‌ها در دو ستون یکسان است، تغییر ترتیب قرارگیری آن‌ها در این ستون‌ها بر روی حرکت محلول تأثیر گذاشته است. در حالت اول که لایه درشت بافت (شن لومی) در زیر لایه ریزبافت (لوم رسی) قرار گرفته، منحنی رخنه حدود 130 دقیقه زودتر از حالت دوم (لایه ریزبافت پایین لایه درشت بافت) به نقطه اوج خود رسیده است. همچنین دنباله¹ منحنی رخنه در



شکل 4- منحنی‌های رخنه محلول سدیم کلرید در ستون‌های خاک دو لایه‌ای. الف) لایه‌های 5 سانتی‌متری، ب) لایه‌های 10 سانتی‌متری، و ج) لایه‌های 15 سانتی‌متری.

وارد لایه پایینی می‌شود. از آن به بعد، جریان به جای این که به طور یکنواخت از تمام لایه درشت بافت عبور کند، از طریق منافذ و مجاری درشت حرکت می‌کند. لذا سرعت آن افزایش می‌یابد (Hillel, 2004). لیج و ون گنوختن نیز در تحقیق خود به نتایج مشابهی دست یافتند. آن‌ها برای انتقال محلول در طی جریان ماندگار در یک خاک دو لایه‌ای که هر لایه به صورت همگن بوده و فصل مشترک آن‌ها عمود بر جهت جریان بود، حل تحلیلی ارائه دادند و نتیجه گرفتند که ترتیب لایه‌ها بر منحنی‌های رخنه مربوط به محلول خروجی از خاک تأثیر می‌گذارد. وقتی سرعت لایه اول کم‌تر و ضریب پخش آن بیش‌تر از لایه دوم بود، در مقایسه با حالتی که سرعت لایه اول بیش‌تر و ضریب پخش آن کم‌تر از لایه دوم بود، منحنی رخنه زودتر به نقطه اوج رسید و دنباله طولانی‌تری داشت (Leij and van Genuchten, 1995).

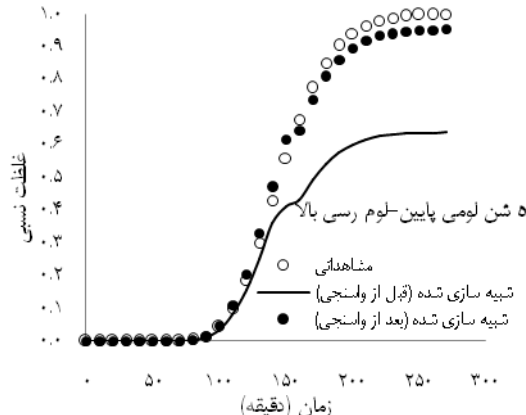
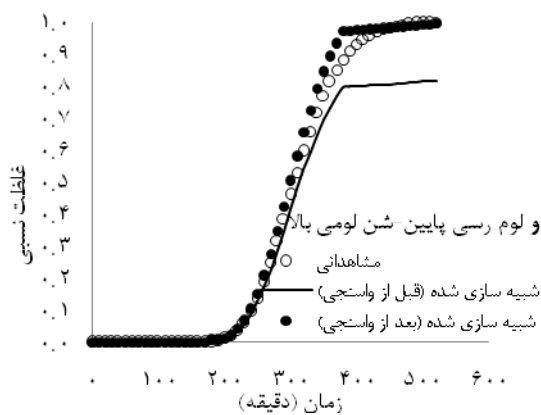
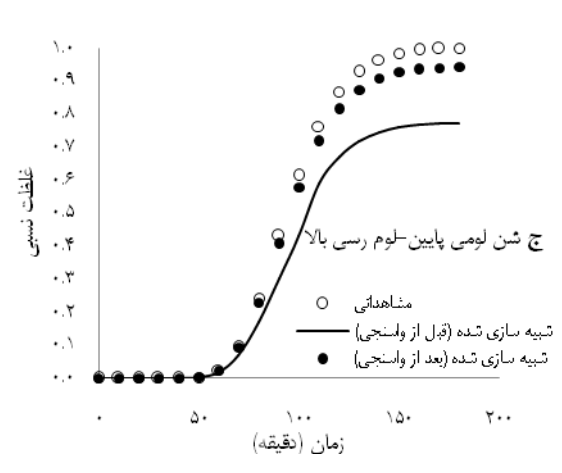
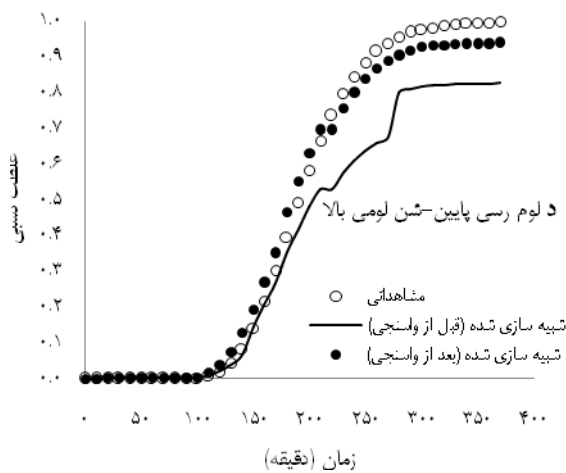
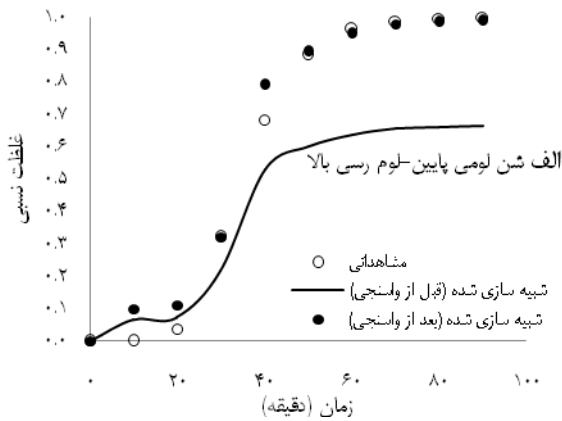
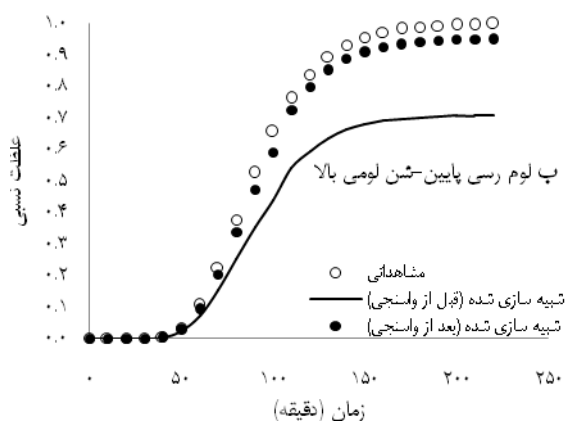
در این مطالعه غلظت اوج در حالت دوم ستون 10 سانتی‌متری دیرتر از حالت اول ستون 20 سانتی‌متری رخ داد (حدود 40 دقیقه). همچنین این اتفاق برای حالت دوم ستون 20 سانتی‌متری حدود 100 دقیقه دیرتر از حالت اول ستون 30 سانتی‌متری بود. بنابراین، ترتیب قرارگیری لایه‌ها حتی بیش‌تر از طول ستون بر انتقال محلول

باز هم با وجود عدم تغییر ضخامت لایه‌ها، انتقال محلول در خاک تحت تأثیر ترتیب قرارگیری لایه‌ها واقع شده است. غلظت اوج در حالت اول 250 دقیقه زودتر از حالت دوم اتفاق افتاده است و دنباله منحنی رخنه حالت دوم طولانی‌تر از حالت اول است. به طوری که این دنباله در حالت اول از دقیقه 240 تا 270 و در حالت دوم از دقیقه 450 تا 520 امتداد دارد. مقایسه میزان تأثیر تغییر در ترتیب قرارگیری لایه‌ها در ضخامت‌های مختلف:

در هر سه ضخامت 5، 10 و 15 سانتی‌متری لایه‌ها، تغییر ترتیب قرارگیری آن‌ها بر نحوه حرکت محلول در ستون خاک تأثیرگذار بود. وقتی لایه‌ای از خاک درشت بافت در زیر لایه‌ای از خاک ریزبافت قرار داشت (حالت اول)، رخنه محلول سریع‌تر از حالتی بود که ترتیب قرارگیری این دو لایه تغییر داده شد (حالت دوم). در حالت اول در مقایسه با حالت دوم، غلظت اوج زودتر مشاهده شد و همچنین دنباله منحنی رخنه امتداد کم‌تری داشت. دلیل این موضوع آن است که وقتی جریانی از یک لایه ریزبافت بالایی به یک لایه درشت بافت پایینی می‌رسد، به جای پیشروی با یک جبهه صاف و ملایم، در محل‌های مشخصی متمرکز شده و به صورت جریان چند شاخه‌ای

اوج و مدت زمان امتداد دنباله منحنی رخنه به ترتیب برابر با 100، 130 و 30 دقیقه بود. این زمان‌ها در مورد لایه‌های با ضخامت 10 سانتی‌متر به ترتیب برابر با 150، 190 و 40 دقیقه و در مورد لایه‌های با ضخامت 15 سانتی‌متر به ترتیب برابر با 210، 250 و 40 دقیقه بود. در شکل 4 نیز مشخص است که با افزایش ضخامت لایه‌ها، فاصله بین منحنی‌های رخنه مربوط به دو حالت قرارگیری لایه‌ها افزایش می‌یابد.

تأثیرگذار بود. با افزایش ضخامت لایه‌ها، میزان تأثیر تغییر در ترتیب قرارگیری لایه‌ها بیشتر شد. دلیل این موضوع آن است که پخشیدگی علاوه بر این که به میزان ناهمگنی خاک وابسته است (Huang et al., 1995)، تابعی از فاصله انتقال (ضخامت) نیز بوده و با آن تغییر می‌کند (Zhou., 2002). به طوری که در لایه‌های با ضخامت 5 سانتی‌متر با جابجایی محل دو لایه، اختلاف بین زمان رسیدن غلظت خروجی به یک مقدار تقریباً ثابت، زمان مشاهده غلظت



شکل 5- منحنی‌های رخنه. الف و ب: ستون‌های 10 سانتی‌متری، ج و د: ستون‌های 20 سانتی‌متری، ه و و: ستون‌های 30 سانتی‌متری

جدول 2- نتایج ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی انتقال سدیم کلرید در ستون‌های دو لایه‌ای

ستون 30 سانتی متری		ستون 20 سانتی متری		ستون 10 سانتی متری			
لوم رسی	شن لومی	لوم رسی	شن لومی	لوم رسی	شن لومی		
پایین	پایین	پایین	پایین	پایین	پایین		
شن لومی بالا	لوم رسی بالا	شن لومی بالا	لوم رسی بالا	شن لومی بالا	لوم رسی بالا		
0/879	0/880	0/881	0/877	0/878	0/888	R ²	قبل از
0/106	0/205	0/112	0/120	0/182	0/239	RMSE	واستنجی
-0/180	-0/322	-0/176	-0/193	-0/255	-0/330	CRM	
0/986	0/987	0/984	0/988	0/988	0/989	R ²	بعد از
0/033	0/032	0/041	0/036	0/038	0/053	RMSE	واستنجی
0/044	-0/028	-0/017	-0/056	-0/055	0/043	CRM	

بوده و ضریب تبیین (R^2) بیش‌تر از 0/984 و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) کم‌تر از 0/530 گرم بر لیتر حاکی از آن است که انتقال سدیم کلرید در ستون‌های خاک به طور قابل قبولی شبیه‌سازی شده است.

نتیجه‌گیری

به علت پتانسیل مواد شیمیایی کشاورزی و زائدات صنعتی به حرکت از سطح خاک به سمت آب زیرزمینی، توجه به انتقال مواد در خاک ضرورت دارد. این حرکت ممکن است تحت تأثیر لایه‌بندی خاک قرار گیرد. در این تحقیق تأثیر ترتیب قرارگیری لایه‌های خاک با ضخامت‌های مختلف در حرکت محلول سدیم کلرید بررسی شد. وقتی لایه درشت بافت شن لومی در زیر لایه ریزبافت لوم رسی قرار گرفت، رخنه محلول سریع‌تر از حالتی بود که ترتیب قرارگیری این دو لایه عوض شد. همچنین غلظت اوج در کف ستون سریع‌تر مشاهده شد و منحنی رخنه دنباله کوتاه‌تری داشت. با افزایش ضخامت لایه‌ها، تأثیر تغییر در ترتیب قرارگیری لایه‌ها بر انتقال محلول بیش‌تر شد. ترتیب قرارگیری لایه‌ها در مقایسه با طول ستون تأثیر بیش‌تری بر انتقال محلول داشت. مدل GeoStudio انتقال محلول سدیم کلرید را در تمام ستون‌های خاک به خوبی شبیه‌سازی کرد. نتایج این مطالعه می‌تواند در کشت محصولات کشاورزی در خاک‌های لایه‌ای و انتخاب بهترین مکان برای تغذیه مصنوعی و احیای زیستی آبخوان‌ها و طراحی لندفیل‌ها مفید باشد. استفاده از مدل‌های کامپیوتری کمک زیادی به درک انتقال محلول در خاک‌های لایه‌ای و نحوه تأثیر لایه‌بندی خاک می‌کند.

منابع

Abbaspour, K.C, Kohler, A., Simunek, J., Fritsch, M and Schulin, R. 2001. Application of a two-dimensional model to simulate flow and transport in a

با این وجود مدت زمان امتداد دنباله منحنی با افزایش ضخامت لایه‌ها تغییر قابل توجهی نکرده و ملاحظه می‌گردد که با افزایش ضخامت لایه‌ها از 5 سانتی متر به 10 سانتی متر تنها 10 دقیقه بر این مدت زمان افزوده شده و با افزایش ضخامت لایه‌ها از 10 سانتی متر به 15 سانتی متر نیز تغییری در این مدت زمان به وجود نیامده است.

نتایج شبیه‌سازی

شکل 5 منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio را در کنار منحنی‌های مشاهداتی متناظر نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که در تمام حالت‌ها نتایج شبیه‌سازی بعد از واستنجی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. هولابالی و همکاران نیز با استفاده از روش تفاضل محدود یک حل عددی برای انتقال آلاینده در محیط‌های متخلخل اشباع ارائه دادند و آن را با نتایج حاصل روش اجزای محدود برنامه CTRAN/W مقایسه کردند. آن‌ها تطابق بسیار خوبی بین نتایج این دو روش مشاهده نمودند (Hulagabali et al., 2014).

در جدول 2 معیارهای ارزیابی عملکرد مدل قبل و بعد از واستنجی ارائه شده است. در تمام حالت‌ها عملکرد مدل بعد از واستنجی بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته است. به طوری که قبل از واستنجی، با توجه به منفی بودن CRM، تخمین‌های مدل در تمام موارد به‌ویژه در زمان‌های انتهایی کم‌تر از مشاهدات است. دلیل این موضوع دقیق نبودن مقادیر ضریب پخشیدگی طولی و عرضی قبل از واستنجی (قبل از برآورد مقادیر بهینه آن‌ها) است. بنابراین و با توجه به این که پخشیدگی تابع زمان است (Zhou., 2002)، هر چه زمان بیش‌تری از تزریق محلول در نیمرخ خاک سپری سپری شده، اختلاف بین نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی بیش‌تر نمود پیدا کرده است. بعد از واستنجی، اگرچه در برخی حالت‌ها تخمین مدل اندکی کم‌تر (CRM منفی) و در برخی دیگر اندکی بیش‌تر (CRM مثبت) از مقادیر غلظت مشاهداتی است، اما این اختلافات در مقایسه با قبل از واستنجی ناچیز

- 35.1: 233-241.
- Leij,F.J and van Genuchten,M.Th. 1995. Approximate analytical solutions for solute transport in two-layer porous media. *Transport in Porous Media* 18.1: 65-85.
- Leij,F.J., Dane,J.H and van Genuchten,M.Th. 1991. Mathematical Analysis of One-Dimensional Solute Transport in a Layered Soil Profile. *Soil Science Society of America Journal* 55.4: 944-953.
- Mohammadzadeh-Habili,J and Heidarpour,M. 2015. Application of the Green-Ampt model for infiltration into layered soils. *Journal of Hydrology* 527: 824-832.
- Porro,I., Wierenga,P.J and Hills,R.G. 1993. Solute Transport Through Large Uniform and Layered Soil Columns. *Water Resources Research* 29.4: 1321-1330.
- Sharma,P.K., Sawant I,V.A., Shukla,S.K and Khan,Z. 2014. Experimental and numerical simulation of contaminant transport through layered soil. *International Journal of Geotechnical Engineering* 8.4: 345-351.
- 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.
- Zhou,L. 2002. Solute transport in layered and heterogeneous soils. Dissertation of Doctor of Philosophy, Department of Agronomy, Tsinghua University of Chinese.
- macroporous agricultural field with tile drains. *European Journal of Soil Science* 52.3: 433-447.
- Butters,G.L., Jury,W.A and Ernst,F.F. 1989. Field scale transport of bromide in an unsaturated soil: 1. Experimental methodology and results. *Water Resources Research* 25.7: 1575-1581.
- Charbeneau,R.J. 2000. Ground water hydraulics and pollutant transport, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall.
- Hanson,B.R., Simunek,J and Hopmans,J.W. 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management* 86.1-2: 102-113.
- Hillel,D. 2004. Introduction to Environmental Soil physics. Elsevier Academic press.
- Hooshmandfar,A and Khodadadi,A. 2014. Using GeoStudio model for assessment of leachate migration through soil in Hushangabad-Azizabad landfill of Tehran. *Journal of Middle East Applied Science and Technology* 3.8: 371-374.
- Huang,K., Toride,V and van Genuchten,M.Th. 1995. Experimental investigation of solute transport in large, homogeneous and heterogeneous, saturated soil columns. *Transport in Porous Media* 18.3: 283-302.
- Hulagabali,A.M., Solanki,C.H and Dodagoudar,G.R. 2014. Contaminant transport modeling through saturated porous media using finite difference and finite element methods. *Journal of Mechanical and Civil Engineering* 11.1: 29-33.
- Jury,W and Utermann,J. 1992. Solute transport through layered soil profiles: zero and perfect travel time correlation models. *Transport in Porous Media* 8.3: 277-297.
- Legates,D.R and Mc Cabe,G.J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic validation. *Water Resources Research*

Laboratory Investigation and Simulation of the Effect of Soil Layers Arrangement and their Thicknesses in Solute transport

F. Taran^{1*} and S. Noorabadi²

Recived: Des.16, 2015

Accepted: Apr.21, 2016

Abstract

In heterogeneous and layered soils, in order to a better management and description of chemicals movement on such media, perception of solute movement is very important. In this study, the effect of soil layers arrangement with different thicknesses on solute movement was investigated. For this purpose, two soils with different textures (i.e. loamy sand and clay loam) were used to prepare six two-layered columns (two 10cm-columns, two 20cm-columns and two 30cm-columns), and the movement of sodium chloride in these columns was tested. First arrangement, namely the loamy sand layer was beneath the clay loam layer, was compared to second arrangement (the layers were swapped), and it was observed that the solute breakthrough and the appearance of peak concentration in the bottom of column were faster and the tail of breakthrough curve was shorter. By increasing the thickness of layers, the differences also increased, so that by swapping the two layers in 5 cm-layers, the difference between the times that breakthrough solute reaches to an almost constant concentration, the time of maximum concentration appearance and the duration of breakthrough curve tail time were 210, 250 and 40 minutes, respectively. Layers arrangement more than column length effected the solute movement, so that the peak concentration in second arrangement of 10cm-column was 40 min later than the first arrangement of 20cm-column and, the concentration in second arrangement of 20cm-column was 100 min later than the first arrangement of 30cm-column. The solute movement was simulated by finite element method using the GeoStudio model. The simulation results have coefficient of determination (R²) more than 0.984 and root mean square error (RMSE) less than 0.530 g/L. This means that the simulation results were satisfactory.

Keywords: solute movement, layered soil, layers thickness, GeoStudio model

1- Ph.D Student of Water Engineering, University of Tabriz

2- Ph.D Student of Water Engineering, University of Tabriz

(*- Corresponding Author Email: farshidtaran@gmail.com)