

بررسی ضریب انتشارپذیری کلرید سدیم در ستون‌های آزمایشگاهی تحت تأثیر بافت و طول‌های مختلف

امید بهمنی^{۱*}، محمد قبایی‌سوق^۲، سید معین‌الدین رضوانی^۳، عاطفه مهدوی نجف‌آبادی^۴

۱. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران.

ghabaei.m63@gmail.com

۲. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران.

moin.rezvani@gmail.com

۳. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران.

a_mahdavi83@yahoo.com

۴. دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۳/۱۰/۸

تاریخ وصول مقاله: ۹۳/۳/۵

چکیده

در تحقیق حاضر تأثیر بافت خاک و مقیاس نمونه بر ضریب انتشارپذیری و مدل‌سازی حرکت املاح بررسی شد. تیمارهای آزمایشگاهی شامل چهار بافت مختلف خاک (۱۰۰ درصد ماسه بادی و ۸۰، ۹۰ و ۷۰ درصد ماسه بادی و مابقی ماسه شسته‌شده) با طول نمونه‌های ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی‌متری بود و از ردیاب کلرید سدیم استفاده شد. با برآزش منحنی‌تئوریک رخنه بر داده‌های آزمایشگاهی، با استفاده از برنامه CXTFIT به روش معکوس، ضریب انتشار برآورد شد و منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شدند. همچنین، با حل تحلیلی معادله انتقال - انتشار از روش بریگهام مقدار ضریب انتشارپذیری محاسبه و با نتایج روش معکوس مقایسه شد. نتایج نشان داد ضرایب انتشارپذیری به‌دست‌آمده از مدل بریگهام در همه تیمارها (به جز نمونه با طول ۱۱۰ سانتی‌متر و بافت ۱۰۰ درصد ماسه بادی) در دامنه کمتر از یک سانتی‌متر تغییر می‌کند. نتایج بیانگر دقت مناسب روش معکوس در برآورد پارامترهای معادله انتشار است به طوری که ضرایب انتشارپذیری در مقایسه با نتایج حل تحلیلی مدل بریگهام ضریب تبیین ۰/۷۹ دارند. همچنین، با افزایش درصد ماسه شسته‌شده در بافت خاک به ازای طول‌های یکسان ستون‌های آزمایشگاهی نسبت غلظت نسبی برابر با ۰/۵ در تعداد حجم آب تخلخل کمتری رخ می‌دهد.

کلیدواژه

آبشویی، برنامه CXTFIT، کلرید سدیم، منحنی رخنه، مدل بریگهام.

۱. سرآغاز

و جریان آب زیرزمینی، برای پیش‌بینی و مدل‌سازی جریان املاح در خاک ضروری است. تست‌های ردیاب می‌توانند تخمین مناسبی از این پارامترها را فراهم آورند (Tylor, et al., 1987).

انتشارپذیری خاصیت قابل اندازه‌گیری محیط متخلخل و یکی از پارامترهای مهم معادله جابه‌جایی انتشار است که در بررسی و حل مسائل مربوط به انتقال آلودگی و حفاظت از منابع آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود (فراستی و

آبشویی مواد شیمیایی از خاک و انتقال آن‌ها به آب‌های زیرزمینی سبب آلودگی منابع آبی می‌شود. برآورد کمی انتقال املاح در مزرعه به دلیل نیاز به اندازه‌گیری‌های زیاد غلظت در عمق‌ها و زمان‌های مختلف مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه است و استفاده از مدل‌های انتقال املاح می‌تواند کمک مهمی به این برآورد کند (شعبان‌پور، ۱۳۸۰). تعیین ویژگی‌های فرایندهای انتقال، جابه‌جایی و انتشار در خاک

را در برآورد حرکت برماید در ستون های یک خاک لوم شنی بررسی و بیان کردند. مدل MIM در خاک‌های ساختمان‌دار برآورد بهتری نسبت به مدل CDE دارد. شیرانی و همکاران (۱۳۹۰) در تحقیقی به شبیه‌سازی حرکت یون برومید پتاسیم در سطوح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک در ستون‌های دست‌خورده خاک با قطر ۱۰ و ارتفاع ۲۵ سانتی‌متر در دو بافت شن لومی و لوم شنی برای آزمایش آبشویی، از طریق مدل‌های Hydrus-1D و CDE NECDE^۳ پرداختند. اندازه‌گیری غلظت برومید در زهاب خروجی نشان داد که انتقال برومید در خاک لوم شنی آهسته‌تر از شن لومی بود. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد کمترین حساسیت مربوط به ضریب پخشیدگی و بیشترین آن مربوط به تغییرات رطوبت اشباع بود. در نهایت بیان کردند که مدل هایدروس پیش‌بینی بهتری از غلظت برومید در زهاب داشته است و NECDE بهتر از CDE عمل کرد.

آل‌طبا و همکاران (۲۰۰۰) در تحقیقی به بررسی حرکت انتقال ذرات در فواصل کوتاه در خاک‌های ماسه‌ای همگن با اندازه‌های ریز، متوسط و درشت در حالت اشباع، تحت شرایط جریان یک‌بعدی و آلاینده غیرجذب‌پذیر کلرید سدیم پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها مقدار ضریب انتشارپذیری برای ماسه درشت ۷/۶۴ سانتی‌متر، ماسه متوسط ۶/۳ سانتی‌متر و ماسه ریز ۴/۲۷ سانتی‌متر به دست آمد و متوسط سرعت حرکت آلاینده در فواصل انتقال کوتاه بیشتر از متوسط سرعت حرکت آب در داخل خلل و فرج است. معروف‌پور و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی وابستگی انتشارپذیری در خاک‌های ماسه‌ای همگن درشت و متوسط در شرایط اشباع پرداختند. آن‌ها با انتخاب ضخامت‌های ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر برای خاک‌های ماسه‌ای نشان دادند مقدار انتشارپذیری برای خاک‌های ماسه‌ای درشت و متوسط به ترتیب در بازه‌های ۰/۳۱ تا ۰/۶۴ و ۰/۱۳ تا ۰/۴۶ تغییر می‌کند که بیانگر عدم وابستگی انتشارپذیری به ضخامت خاک است و تغییرات را ناشی از خطای آزمایش دانستند.

سیدیان، (۱۳۹۲). مطالعه روی انتقال و حرکت املاح در محیط‌های متخلخل در مقیاس‌های کوچک (ستون‌های آزمایشگاهی) و بزرگ (مزرعه‌ای) از دهه‌های پیش آغاز شده است و در سالیان اخیر مطالعات مرتبط با عملکرد فیزیکی و شیمیایی محیط متخلخل بر پدیده‌هایی چون پخشیدگی، انتشار، دفع آبیونی، جذب یا فرایندهای تبادل افزایش چشمگیری یافته است.

محققان آزمایش‌هایی روی دو نوع ستون خاک با مقیاس‌های کوچک (طول ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۵/۱ سانتی‌متر) و بزرگ (طول ۶۰۰ سانتی‌متر و قطر ۹۵ سانتی‌متر) انجام دادند. آن‌ها هر یک از ستون‌ها را با خاک شن ریز لومی با اندازه ذرات حدود یک میلی‌متر طوری پر کردند که وزن مخصوص ظاهری خاک‌ها برابر ۱/۵۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب شد. بر اساس نتایج آن‌ها متوسط مقدار انتشارپذیری (α) برای ردیاب‌های تریتیوم و کلرید در ستون کوچک خاک به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۸۷ سانتی‌متر به دست آمد. این در شرایطی بود که در ستون‌های بزرگ متوسط انتشارپذیری برابر ۵ سانتی‌متر به دست آمد (Wierenga and Van Genuchten, 1989).

با استفاده از دو مدل تک‌تخلخلی و دو تخلخلی Macro، تأثیر رطوبت اولیه و نحوه کاربرد ردیاب‌های برماید و کلراید در سطح خاک بر حرکت املاح در دو ستون مرطوب و خشک بررسی شد و نتایج نشان داد که مدل دو ناحیه‌ای ساکن-روان (MIM) برآورد بهتری از حرکت ردیاب‌ها در ستون خاک خشک دارد (Katterer, et al., 2001). شعبان‌پور (۱۳۸۰) به مقایسه سه مدل انتقال املاح شامل CDE، TFM^۱ و RSM^۲ با استفاده از تست ردیاب برماید در مزرعه‌ای تحت کشت گندم، ذرت و یونجه پرداخت. نتایج آن‌ها بیان کرد که مدل‌های RSM، TFM و CDE به ترتیب بهترین برآورد را از حرکت تجمع برماید در خاک داشتند.

شیرانی و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از مدل هایدروس یک‌بعدی توانایی معادلات CDE و مدل MIM

ستون‌های حاوی خاک‌های دست‌خورده و دست‌نخورده لوم شنی و رسی نشان داد که روش حل تحلیل CXTFIT دارای دقت بیشتری است (Karimi, et al., 2013).

در پژوهشی به بررسی دامنه تغییرات مقادیر ضریب انتشارپذیری در سه خاک هموزن شنی با استفاده از دو مدل بریگهام و فرید-کانبرنس پرداختند. بر اساس نتایج آن‌ها نتایج مدل‌های بریگهام و فرید-کانبرنس برای ضریب انتشارپذیری دارای همبستگی بیش از ۹۸ درصد است و دامنه تغییرات این ضریب برای سه خاک شنی تحت بررسی بین ۰/۰۸ تا ۱/۴۶ سانتی‌متر گزارش شد (Ali Pour and Kamanbedast, 2011). فراستی و سیدیان (۱۳۹۲) در تحقیقی به بررسی اثر ضخامت‌های مختلف آبخوان (۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر) در انتشارپذیری محلول کلرید سدیم در خاک‌های ماسه‌ای پرداختند. آن‌ها برای تعیین ضریب انتشارپذیری از مدل بریگهام و برای شبیه‌سازی حرکت کلرید سدیم از مدل هایدروس دوبعدی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد انتشارپذیری مستقل از ضخامت خاک و مقدار آن در ضخامت‌های تحت بررسی تقریباً ثابت است و با افزایش متوسط فاصله انتقال مقدار انتشارپذیری خاک افزایش می‌یابد.

بررسی مقادیر ضریب انتشارپذیری در بافت و مقیاس‌های مختلف می‌تواند در برنامه‌ریزی برای حفظ منابع آب زیرزمینی از منابع آلاینده و کنترل آلودگی در سفره‌های زیرزمینی استفاده شود. از این رو هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر بافت خاک و مقیاس نمونه‌ها بر مقدار ضریب انتشارپذیری و میزان تطابق مدل برای پیش‌بینی انتقال املاح در تیمارهای مختلف ستون‌های آزمایشگاهی است. بدین منظور مقدار کلرید سدیم در زه‌آب خروجی در ۱۲ ستون آزمایشگاهی با چهار بافت مختلف خاک شنی و طول نمونه‌های ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی‌متری اندازه‌گیری و منحنی رخنه ترسیم شد. سپس، پارامترهای انتقال املاح و منحنی رخنه^۴ با استفاده از برنامه CXTFIT به روش معکوس و مدل تحلیلی بریگهام برآورد شدند.

Abbasi در سال ۲۰۰۸ حرکت یون‌های K^+ و Br^- را در دو محیط اشباع واکنش‌گر و غیرواکنش‌گر بررسی و پارامترهای انتقال املاح و منحنی رخنه را با استفاده از برنامه CXTFIT برآورد کرد. نتایج وی نشان داد که در محیط بدون واکنش منحنی‌های رخنه آنیون و کاتیون روی هم قرار گرفتند، مقادیر فاکتورهای تأخیر تقریباً برابر یک و مقادیر پخشیدگی‌ها برابر بودند. در محیط واکنش‌گر منحنی رخنه آنیون قبل از منحنی رخنه کاتیون ظاهر شد. فاکتور تأخیر آنیون کمتر از واحد و بزرگ‌تر از یک برای کاتیون به دست آمد و مقادیر پخشیدگی تحت تأثیر یون‌ها و محلول‌ها نبود.

Hussein در سال ۲۰۰۹ منحنی رخنه را با دو حل تحلیلی معادله CDE موجود در کد برنامه CfitM رسم و پارامترهای انتقال املاح را برای سه ستون مختلف رسوبات دست‌خورده تحت جریان اشباع ماندگار برآورد کرد. ستون اول شامل شن‌های روان بود که ضریب تأخیر واحد و پخشیدگی متوسط (۰/۴۹-۰/۶۹ سانتی‌متر) در آن مشاهده شد که نشان‌دهنده بازده آبشویی متوسط بود. ستون دوم شامل رسوبات ریزدانه که دارای ضریب تأخیر کمی کمتر از واحد و پخشیدگی کوچک (۰/۱۷-۰/۲۶ سانتی‌متر) و نشان از بازده آبشویی بالا بود. در ستون سوم خاک‌دانه‌های رسی مقدار ضریب تأخیر خیلی کوچک‌تر از واحد و پخشیدگی بسیار بالا (۰/۹-۳/۴ سانتی‌متر) داشتند که با افزایش اندازه دانه‌ها، افزایش می‌یافت و نشان از کارایی پایین آبشویی داشت.

با توجه به استفاده گسترده برنامه CXTFIT در مدل‌های انتقال آلودگی، در تحقیقی به منظور افزایش انعطاف‌پذیری در استفاده از این برنامه و افزودن آنالیزهای حساسیت و عدم قطعیت به منظور برآورد و تخمین بهتر پارامترهای مدل‌های انتقال، برنامه‌های آن را در محیط صفحه گسترده اکسل برنامه‌نویسی کردند (Tang, et al., 2010). بررسی روش‌های حل عددی (مدل هایدروس) و تحلیلی (CXTFIT) برای شبیه‌سازی انتقال برآورد در

۲. مواد و روش بررسی

۱.۲ مدل انتقال املاح جابه‌جایی انتشار (CDE)

مدل‌های انتقال املاح کاربردهای زیادی در بررسی چگونگی حرکت عناصر غذایی در خاک، انتقال آلاینده‌ها و آبسویی خاک‌های شور دارند. از جمله مدل‌های حاکم بر انتقال املاح در خاک مدل انتقال-انتشار (CDE) است که از آن برای یونها و املاح غیرواکنش‌گر استفاده می‌شود. در این مدل فرایند انتقال در اثر دو پدیده جریان روان (جریان توده‌ای) و انتشار در نظر گرفته می‌شود و دو عامل سرعت جریان در منافذ و ضریب انتشار^۵ بیانگر خصوصیات انتقال محیط است. برای جریان پایدار معادله یک‌بعدی آن را به شکل زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

که در آن C: غلظت نمک در فاز مایع (M/L^3)، x: طول مسیر در جهت جریان (L)، V: سرعت متوسط منفذی آب (M/L)، D: ضریب انتشار (L^2/T) است. ضریب انتشار هیدرودینامیکی از رابطه ۲ برآورد می‌شود:

$$D = \alpha V + D^* \quad (2)$$

که در آن α : ضریب انتشارپذیری محیط متخلخل (L) و D^* : ضریب پخشیدگی مولکولی محلول در محیط متخلخل (L^2) است. در سرعت‌های کم، پخشیدگی مولکولی فرایند غالب و بنابراین ضریب انتشار هیدرودینامیک مساوی ضریب پخشیدگی مولکولی است ($D=D^*$). برعکس، در سرعت‌های بالا، انتشار مکانیکی فرایند غالب پراکندگی است ($D=\alpha V$). از این رو، مقدار ضریب پخشیدگی مولکولی در سرعت‌های بزرگ‌تر از ۱۰ تا ۵ سانتی‌متر در ثانیه ناچیز است (معروف پور و همکاران، ۱۳۸۷).

به منظور حل معادله CDE روش‌های تحلیلی مختلفی ارائه شده که شامل حل معادلات دیفرانسیل جزئی بر اساس شرایط مرزی و مقادیر اولیه مختلف است. یکی از این حل‌های تحلیلی بر اساس شرایط مرزی نوع اول است.

این حالت برای ستونی از ماسه با آب اشباع و جریان آب از طریق یک پرمومتر به شکل ماندگار وارد ستون خاک می‌شود، سپس ردیاب با غلظت مشخص C_0 وارد ستون خاک و در فواصل زمانی t مقدار غلظت خروجی از ستون (C) اندازه‌گیری می‌شود (Ogata and Banks, 1961).

(۳)

$$C = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{L - V_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \exp \left(\frac{V_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{L + V_x t}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right]$$

در شرایطی که مقدار انتشارپذیری محیط متخلخل زیاد یا L و t بزرگ باشند، عبارت دوم طرف راست معادله ۳ ناچیز و رابطه ۳ به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{L - Vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (4)$$

در رابطه بالا، حجم منفذی مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$U = \frac{V_x n A t}{A L n} = \frac{V_x t}{L} = t_R \quad (5)$$

در این رابطه U: تعداد حجم منافذ مایع، A: سطح مقطع عرضی، L: طول ستون، n: تخلخل، Q: دبی تغذیه در مدت زمان مشخص، v_x : سرعت متوسط خطی در منافذ، T: فواصل زمانی و t_R : زمان ماندگاری بدون بعد است. با جای‌گذاری این معادله در معادله یک‌بعدی انتشار، معادله زیر به دست می‌آید:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{1 - U}{2(UD_L/V_x L)^{1/2}} \right) \right] \quad (6)$$

با اعمال ضریب تأخیر خواهیم داشت:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{R - U}{2(URD_L/V_x L)^{1/2}} \right) \right] \quad (7)$$

۲.۲ روش معکوس

روش بهینه‌سازی معکوس در مقایسه با سایر روش‌ها نظیر روش‌های مستقیم و توابع انتقالی، ارزان و سریع است و در آن پارامترهای مؤثر نیز برآورد می‌شود. این روش بر پایه بهینه‌سازی تابع هدف (رابطه ۸) استوار است.

می‌گیرند (Pickens and Grisak, 1981). در ادامه برای محاسبه انتشار در محیط، منطبق‌ترین خط بر داده‌ها رسم می‌شود و با استفاده از معادله زیر انتشار هیدرودینامیکی به دست می‌آید. این معادله بیانگر رابطه مستقیم شیب خط با ضریب انتشار است.

$$D = \left(\frac{V_x L}{8} \right) (J_{0.84} - J_{0.16})^2 \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{D - D^*}{V_x} \quad (10)$$

در رابطه ۹، $J_{0.84}$ برابر است با مقدار عبارت $(U - 1/U^{1/2})$ به ازای نسبت غلظت C/C_0 وقتی که برابر با ۰/۸۴ باشد و $J_{0.16}$ برابر است با مقدار عبارت $(U - 1/U^{1/2})$ به ازای نسبت غلظت C/C_0 وقتی که برابر با ۰/۱۶ باشد. در رابطه ۱۰، D^* ضریب پخشیدگی مولکولی است که برای خاک‌های ماسه‌ای برابر 1×10^{-5} سانتی‌متر مربع بر ثانیه است.

۲.۴. روش انجام آزمایش

این آزمایش در مجموع روی ۱۲ ستون آزمایشگاهی که شامل چهار بافت مختلف و سه نمونه با طول‌های متفاوت بود، انجام شد. بافت خاک (۱) شامل ۱۰۰ درصد ماسه بادی، بافت خاک (۲) شامل ۱۰ درصد ماسه شسته شده و ۹۰ درصد ماسه بادی، بافت خاک (۳) ۲۰ درصد ماسه شسته شده و ۸۰ درصد ماسه بادی و بافت خاک (۴) ۳۰ درصد ماسه شسته شده و ۷۰ درصد ماسه بادی بودند. همچنین، برای بررسی اثر مقیاس نمونه، نمونه‌ها دارای سه طول ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر بودند. در این تحقیق برای پرکردن ستون‌ها از ماسه شسته شده و ماسه بادی استفاده شد. از دلایل این انتخاب می‌توان به نبود واکنش‌های شیمیایی - زمین‌شناسی در این خاک‌ها اشاره کرد. علاوه بر این، مواد تشکیل‌دهنده آبخوان‌ها ماسه، شن یا سنگریزه‌هایی است که هنوز تحکیم نشده‌اند. همچنین، در این تحقیق کلرید سدیم به منزله آلاینده پایدار انتخاب شد. از دلایل انتخاب این ماده می‌توان به قابل دسترس بودن،

$$\varphi(q, b) = \sum_{i=1}^n w_i [q^*(z, t_i) - q(z, t_i, b)]^2 \quad (8)$$

در رابطه ۸، φ : تابع هدف، b : بردار مجهولات، w_i : فاکتور وزنی برای هر کدام از داده‌های اندازه‌گیری شده، $q(z, t_i, b)$: مقادیر شبیه‌سازی شده از طریق مدل در زمان t_i و عمق z : $q^*(z, t_i)$: مقادیر اندازه‌گیری شده در زمان t_i و عمق z است (عباسی، ۱۳۸۶).

در معادله ۷ مقدار C برای مقادیر مختلف U اندازه‌گیری و مقادیر اولیه برای پارامترهای V ، D و R در نظر گرفته و منحنی‌های رخنه‌تئوریک و اندازه‌گیری شده ترسیم و مقدار خطا بر اساس معیارهای آماری نظیر ریشه میانگین مربعات خطا محاسبه می‌شود. سپس، با استفاده از روش بهینه‌سازی معکوس بر اساس الگوریتم لونیبرگ - مارکواریت اختلاف بین مقادیر منحنی‌های رخنه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده کلرید سدیم با یافتن مقادیر بهینه پارامترهای V ، D و R کمینه به نظر می‌رسد. بدین منظور از برنامه CXTFIT در بسته نرم‌افزاری STANMOD که به طور تحلیلی معادله CDE را برای شرایط مرزی معین حل می‌کند استفاده می‌شود (Toride and van Genuchten, 1999).

۲.۳. مدل بریگهام

مدل بریگهام (۱۹۷۴) یکی از مدل‌های مهم انتقال آلاینده پایدار در محیط‌های متخلخل همگن در حالت اشباع تحت شرایط جریان دائمی است که برای محاسبه انتشارپذیری در فواصل انتقال کوتاه به کار می‌رود (معروف‌پور و همکاران، ۱۳۸۴). این مدل حل مستقیمی از معادله کلاسیک CDE است. در این پژوهش برای به دست آوردن ضریب انتشارپذیری α (برحسب سانتی‌متر) از مدل بریگهام استفاده شده است.

در این مدل مقدار C برای مقادیر مختلف U اندازه‌گیری و مقدار C/C_0 محاسبه و در مقابل $(U - 1)/U^{1/2}$ در کاغذ احتمالاتی خطی رسم می‌شود. این داده‌ها در کاغذ احتمالاتی نرمال، روی یک خط مستقیم قرار

درصد ماسه شسته شده منحنی‌های رخنه به دست آمده در طول‌های مختلف ستون خاک بر هم منطبق شده است و مقدار ضریب تأخیر به یک نزدیک می‌شود. تیمار با طول ۱۱۰ سانتی‌متر در بافت ۱۰۰ درصد ماسه بادی دارای ضریب تأخیر ۱/۸۰۵ و کمتر از تیمارهای طولی دیگر است، در حالی که در بافت خاک ۹۰ درصد ماسه بادی برای این طول مقدار ضریب تأخیر به حدود یک می‌رسد. در دیگر تیمارهای طولی تأخیر در انتقال املاح مشاهده می‌شود.

در شکل ۲ (شکل‌های الف تا ج) داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از آزمایش و منحنی برازش یافته بر طول‌های مختلف ستون خاک با بافت‌های مختلف رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالی که در نمونه با طول ۱۱۰ سانتی‌متری منحنی‌های رخنه تقریباً برهم منطبق‌اند (جز منحنی با بافت خاک ۱۰۰ درصد ماسه بادی) با کاهش طول ستون نمونه‌ها به تدریج منحنی‌های رخنه از یکدیگر فاصله می‌گیرند. به طوری که در تیمار با طول ۸۰ سانتی‌متری تقریباً به دو گروه یکی با مقدار ۱۰۰ و ۹۰ درصد ماسه بادی و دیگری با مقدار ۸۰ و ۷۰ درصد ماسه بادی در بافت خاک تقسیم می‌شوند. در تیمار ۵۰ سانتی‌متری منحنی‌های رخنه در بافت‌های مختلف از یکدیگر فاصله می‌گیرند. به طور کلی با کاهش درصد ماسه بادی ضریب تأخیر به سمت یک متمایل می‌شود. بررسی منحنی‌های رخنه به دست آمده برای طول‌های یکسان ستون آزمایشگاهی با بافت‌های مختلف در شکل ۲ نشان می‌دهد با افزایش درصد ماسه شسته شده در بافت خاک به ازای طول‌های یکسان نسبت غلظت نسبی ۰/۵ در تعداد حجم آب تخلخل کمتری رخ می‌دهد که این موضوع به شکل مشخص‌تری در شکل‌های ۲- الف و ۲- ب نشان داده شده است.

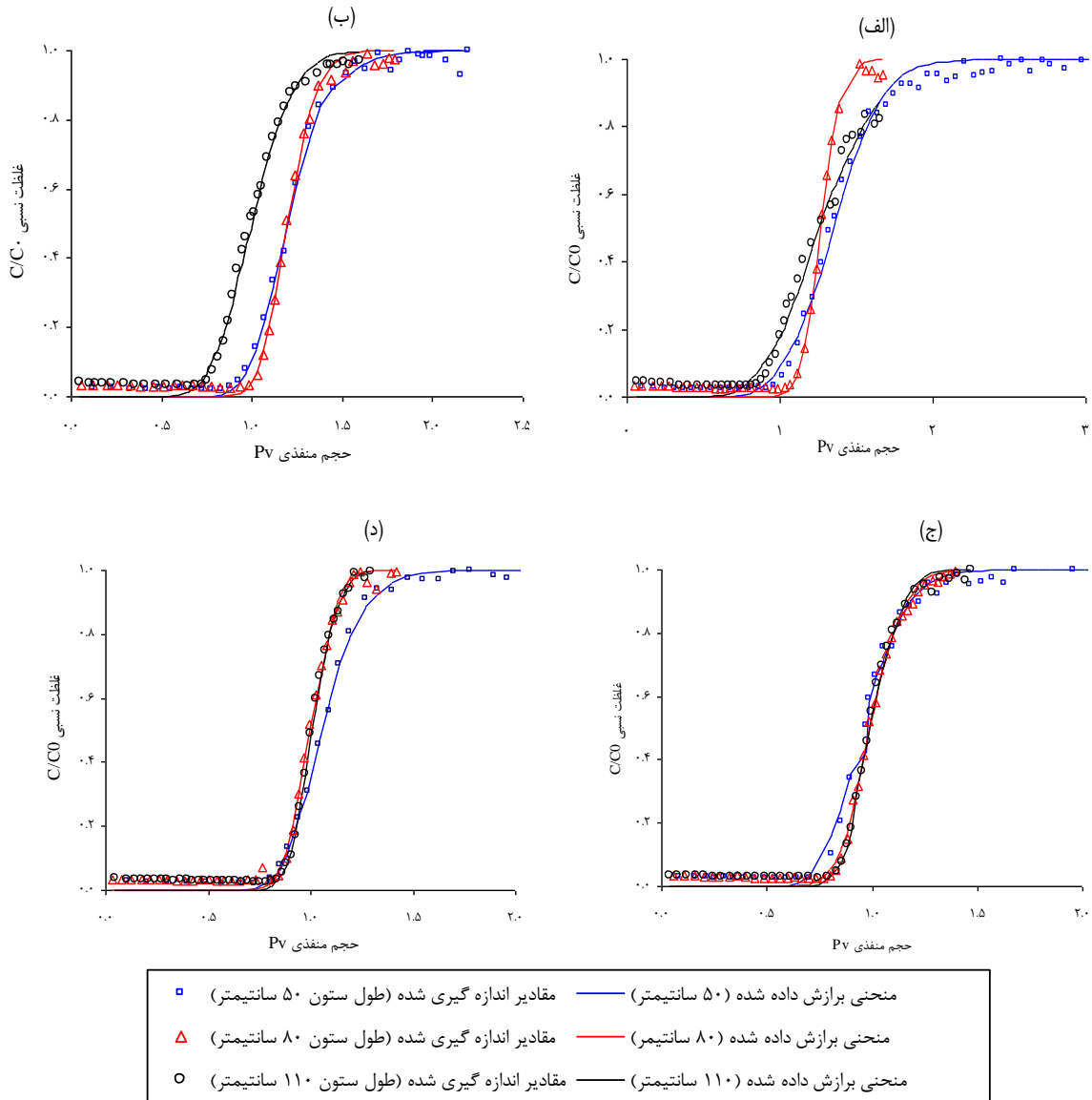
بی‌خطر بودن، سهولت و دقت اندازه‌گیری غلظت آن به کمک دستگاه هدایت‌سنج اشاره کرد. پس از آماده کردن ستون‌های خاک، ستون‌ها به صورت عمودی در آزمایشگاه آبیاری نصب شدند. پیش از انجام آزمایش، خاک نمونه‌ها با آب مقطر آبشویی شد، تا زمانی که مقدار هدایت الکتریکی آن‌ها به ۰/۲ دسی‌زیمنس بر متر رسید. محلول کلرید سدیم با هدایت الکتریکی ۵/۵ میلی‌موس بر سانتی‌متر تهیه و از آن در تمام آزمایش‌ها استفاده شد. پس از وارد کردن محلول حاوی کلرید سدیم به ستون‌های اشباع خاک، مقدار شوری در زه‌آب خروجی در فواصل زمانی مختلف اندازه‌گیری شد، این اندازه‌گیری تا زمانی ادامه داشت که مقدار شوری زه‌آب خروجی با شوری آب تزریق شده برابر می‌شد. در این آزمایش‌ها هدایت الکتریکی عصاره خروجی از ستون‌های خاک از طریق دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد.

۳. نتایج

۳.۱. نتایج روش حل معکوس

از روش حل معکوس برای تعیین متغیرهای ضریب انتشار، ضریب تأخیر و سرعت حرکت املاح با برازش منحنی تئوریک بر داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. برای برازش منحنی رخنه ابتدا نسبت C/C_0 اندازه‌گیری شده در مقابل تعداد حجم منفذی محاسبه شده رسم و از برنامه CXTFIT برای برازش منحنی رخنه تئوریک بر داده‌های حاصل از آزمایش استفاده شد.

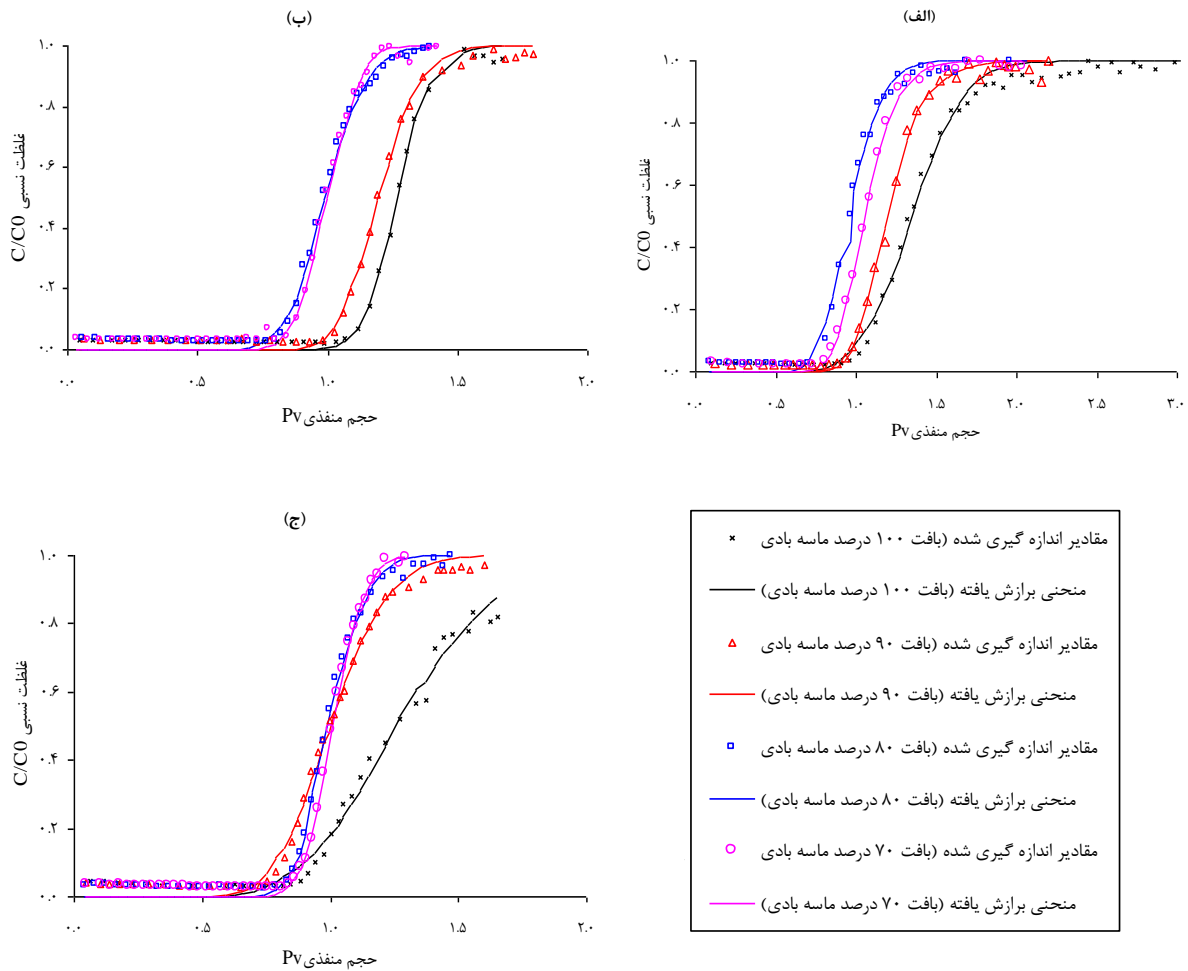
شکل‌های منحنی رخنه، غلظت نسبی (محور عمودی) را در مقابل تعداد حجم آب تخلخل به کاررفته در آزمایش‌ها با گذشت زمان (محور افقی) نشان می‌دهند. در شکل ۱ (شکل‌های الف تا د) داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل از آزمایش و منحنی تئوریک برازش یافته بر بافت‌های مورد آزمایش در طول‌های مختلف ستون خاک رسم شده است. بر پایه نتایج شکل‌های مذکور با افزایش



شکل ۱. منحنی‌های رخنه‌بازش یافته بر نمونه‌های با بافت ۱۰۰ درصد ماسه بادی (الف)، بافت ۹۰ درصد ماسه بادی و ۱۰ درصد ماسه شسته شده (ب)، بافت ۸۰ درصد ماسه بادی و ۲۰ درصد ماسه شسته شده (ج) و بافت ۷۰ درصد ماسه بادی و ۳۰ درصد ماسه شسته شده (د) در طول‌های ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر ستون‌های آزمایشگاهی

جدول مقادیر ضریب تبیین به دست آمده همگی مقداری بیش از ۰/۹۸ دارند و مقادیر RMSE نیز ۰/۰۱۹ تا ۰/۰۳۵ تغییر می‌کنند که همگی بیانگر دقت مناسب مدل CXTFIT در برآورد پارامترهای معادله انتقال-انتشار از روش معکوس‌اند.

همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است منحنی‌های رخنه‌سازی شده به خوبی بر مقادیر داده‌های آزمایشگاهی غلظت‌های نسبی مختلف در تیمارهای تحت بررسی برازش یافتند. در جدول ۱ مقادیر ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای منحنی‌های رخنه‌سازی شده از طریق برنامه CXTFIT به روش معکوس آورده شده است. بر اساس نتایج این



شکل ۲. منحنی‌های رخنه‌برازش یافته بر نمونه با طول ۵۰ سانتی‌متر (الف)، نمونه با طول ۸۰ سانتی‌متر (ب) و نمونه با طول ۱۱۰ سانتی‌متر (ج) در بافت‌های مختلف شامل: ۱۰۰، ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد ماسه بادی و مابقی ماسه شسته شده

جدول ۱. مقادیر ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده از روش معکوس

طول بافت ۱۰۰ درصد ماسه بادی		۹۰ درصد ماسه بادی و ۱۰ درصد ماسه شسته		۸۰ درصد ماسه بادی و ۲۰ درصد ماسه شسته		۷۰ درصد ماسه بادی و ۳۰ درصد ماسه شسته	
RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2
۰/۰۲۳	۰/۹۹۸	۰/۰۲۳	۰/۹۹۸	۰/۰۲۳	۰/۹۹۸	۰/۰۲۳	۰/۹۹۸
۰/۰۲۶	۰/۹۹۹	۰/۰۲۵	۰/۹۹۸	۰/۰۲۵	۰/۹۹۷	۰/۰۲۹	۰/۹۹۷
۰/۰۳۵	۰/۹۸۸	۰/۰۲۶	۰/۹۹۸	۰/۰۲۶	۰/۹۹۸	۰/۰۲۴	۰/۹۹۸

ضریب انتشار (سانتی متر مربع بر دقیقه)، ضریب تأخیر و سرعت حرکت املاح (سانتی متر بر دقیقه) در تیمارهای مختلف تحت آزمایش آورده شده است.

در برنامه CXTFIT از روش حل معکوس برای تعیین پارامترهای معادله انتقال املاح با برازش منحنی تئوریک بر داده‌های آزمایشگاهی استفاده شد. در جدول ۲ مقدار

۰/۱۷۶ تا ۰/۳۰۵ سانتی متر مربع بر دقیقه قرار دارد که هر دو تیمار در دامنه متوسط قرار می‌گیرند.

بررسی ضریب انتشار نشان می‌دهد مقدار ضریب انتشار با افزایش درصد ماسه شسته کاهش می‌یابد. با توجه به طول نمونه‌ها می‌توان گفت فقط در تیمار بافت خاک ۱۰۰ درصد ماسه بادی است که تغییرات زیادی با توجه به طول مشاهده می‌شود که در نمونه ۵۰ سانتی متری مقدار آن ۰/۶۵۵ سانتی متر مربع بر دقیقه است که با افزایش طول نمونه به ۸۰ سانتی متر مقدار آن به ۰/۲۷۷ سانتی متر مربع بر دقیقه کاهش و در طول ۱۱۰ سانتی متری مقدار آن به ۱/۱۰۶ سانتی متر مربع بر دقیقه دوباره افزایش می‌یابد. به طور متوسط مقدار ضریب انتشار در ستون‌های خاک با طول ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی متر به ترتیب برابر با ۰/۳۸۷، ۰/۲۷۶ و ۰/۴۹۶ سانتی متر مربع بر دقیقه است.

بررسی سرعت جریان املاح در تیمارهای آزمایشی نشان می‌دهد مقدار سرعت در تیمار بافت خاک ۱۰۰ درصد ماسه بادی نسبت به تیمارهای دیگر بیشتر است و هرچه مقدار درصد ماسه شسته در تیمارهای بافت خاک بیشتر شود تفاوت سرعت در طول‌های مورد آزمایش کمتر می‌شود. متوسط سرعت در بافت‌های مختلف در طول‌های ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی متر به ترتیب برابر با ۰/۴۰۲، ۰/۳۹۷ و ۰/۳۴۴ سانتی متر بر دقیقه است که تغییرات آن کم است.

بر اساس نتایج این جدول، در تیمارهای با بافت ۱۰۰ و ۹۰ درصد ماسه بادی ضریب تأخیر بزرگ‌تر از یک است و در تیمارهای با ۸۰ و ۷۰ درصد ماسه بادی و باقی ماسه شسته ضریب تأخیر برابر یا در حدود یک است. علاوه بر این، در تیمار بافت خاک ۱۰۰ درصد ماسه بادی مقدار ضریب تأخیر در طول‌های مختلف نمونه از دیگر تیمارها بالاتر است. پس از آن در تیمار ۹۰ درصد بافت خاک ماسه بادی و ۱۰ درصد ماسه شسته مقدار ضریب تأخیر از تیمارهای ۸۰ و ۷۰ درصد ماسه بادی و مابقی ماسه شسته‌شده بالاتر است. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش طول تیمار بافت خاک ۱۰۰ درصد ماسه بادی مقدار ضریب تأخیر کاهش می‌یابد. در تیمارهای دیگر بافت خاک این کاهش به صورت جزئی مشاهده می‌شود.

دامنه تغییرات ضریب انتشار در بافت خاک ۱۰۰ درصد ماسه بادی زیاد است به طوری که از ۰/۲۷۷ تا ۱/۱۰۶ سانتی متر مربع بر دقیقه تغییر می‌کند. در بافت خاک ۹۰ درصد ماسه بادی تغییرات آن تقریباً مقدار یکنواختی را نشان می‌دهد (۰/۳۹۰ تا ۰/۴۲۴) که در دامنه متوسط قرار می‌گیرد. در تیمارهای ۸۰ و ۷۰ درصد ماسه بادی و مابقی ماسه شسته مقدار ضریب انتشار کاهش می‌یابد به طوری که در تیمار بافت خاک ۸۰ درصد ماسه بادی مقدار آن بین ۰/۱۹۹ تا ۰/۳۶۲ سانتی متر مربع بر دقیقه و در تیمار بافت خاک ۷۰ درصد ماسه بادی مقدار آن در محدوده

جدول ۲. مقادیر ضریب انتشار، ضریب تأخیر و سرعت حرکت املاح برآوردشده در تیمارهای تحت بررسی از روش معکوس

طول بافت											
۱۰۰ درصد ماسه بادی			۹۰ درصد ماسه بادی و			۸۰ درصد ماسه بادی و			۷۰ درصد ماسه بادی و		
v	D	R	v	D	R	v	D	R	v	D	R
۲/۳۲۳	۰/۶۵۵	۰/۵۹۶	۱/۱۷۰	۰/۳۹۰	۰/۳۰۲	۱/۰۸۳	۰/۱۹۹	۰/۳۰۹	۱/۰۰۱	۰/۳۰۵	۰/۴۰۱
۲/۱۷۵	۰/۲۷۷	۰/۵۰۳	۱/۸۸۵	۰/۴۲۴	۰/۷۰۴	۱/۰۳۲	۰/۳۶۲	۰/۳۰۰	۱/۰۰۱	۰/۱۸۳	۰/۳۱۴
۱/۸۰۵	۱/۱۰۶	۰/۳۳۷	۱/۰۵	۰/۳۹۹	۰/۲۴۱	۱/۰۰۱	۰/۳۰۲	۰/۴۶۳	۱/۰۰۵	۰/۱۷۶	۰/۳۳۶

۲.۳. نتایج مدل تحلیلی بریگهام

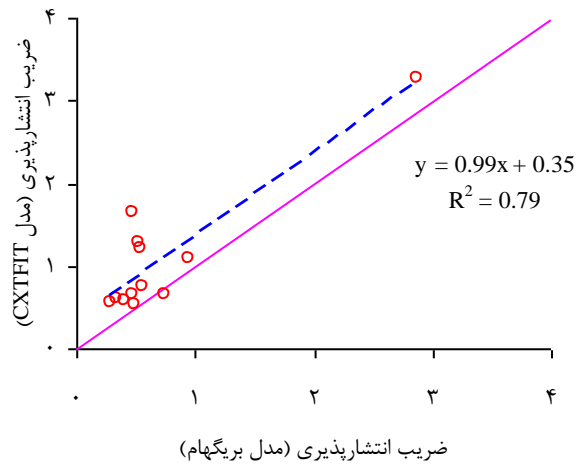
مقادیر ضریب انتشار (D) و انتشارپذیری (α) برای بافت‌های مختلف خاک شنی در طول‌های مختلف ستون‌های آزمایشگاهی شامل ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر با استفاده از مدل تحلیلی بریگهام به ترتیب از روابط ۹ و ۱۰ محاسبه شد که در جدول ۳ آورده شده‌اند. بر اساس نتایج این جدول مقدار ضریب انتشارپذیری برای طول ستون ۵۰ سانتی‌متر در بافت‌های مختلف از ۰/۴۷۳ تا ۰/۹۴۵ سانتی‌متر به ترتیب برای بافت‌های ۸۰ درصد ماسه بادی و مابقی ماسه شسته‌شده و ۱۰۰ درصد ماسه بادی تغییر می‌کند. برای ستون با طول ۸۰ سانتی‌متر در بافت‌های مختلف از ۰/۲۷۹ تا ۰/۵۴۸ به ترتیب برای بافت‌های ۱۰۰ درصد ماسه بادی و ۸۰ درصد ماسه بادی و مابقی ماسه شسته‌شده در نوسان است و در انتها برای ستون با طول ۱۱۰ سانتی‌متری در بافت‌های مختلف از ۰/۴۶۵ تا ۲/۸۶۸ به ترتیب برای بافت‌های ۹۰ درصد ماسه بادی و مابقی ماسه شسته و ۱۰۰ درصد ماسه بادی تغییر می‌کند. بررسی نتایج جدول نشان می‌دهد که مقادیر ضریب انتشارپذیری در بافت ۸۰ درصد ماسه بادی و بقیه ماسه شسته‌شده با افزایش طول مقیاس نمونه افزایش یافته است که نشان‌دهنده وابسته بودن ضریب انتشارپذیری به طول نمونه است، این روند برای بافت‌های ۱۰۰، ۹۰ و ۷۰ درصد ماسه بادی و بقیه ماسه شسته‌شده اگرچه برای طول‌های ۸۰ و ۱۱۰ درست است، مقدار ضریب انتشارپذیری نمونه با

طول ۵۰ سانتی‌متر نسبت به نمونه با طول‌های بزرگ‌تر تا اندازه ای بیشتر است. برای نمونه‌ها با طول یکسان و بافت‌های مختلف روند مشخصی در این تحقیق مشاهده نشد.

در ادامه با استفاده از معادله ۱۰ مقادیر ضریب انتشارپذیری برای مقادیر مختلف ضریب انتشار به‌دست آمده از مدل CXTIFT (جدول ۲) محاسبه شد تا بتوان با مقادیر به‌دست آمده از مدل بریگهام مقایسه کرد. نتایج نشان داد ضریب انتشارپذیری برآوردشده از روش CXTIFT بین ۰/۵۲۴ تا ۳/۲۸۲ سانتی‌متر به ازای تیمارهای تحت بررسی تغییر می‌کند که نسبت به مقادیر متناظر از روش بریگهام برآورد بیشتری از ضریب انتشارپذیری به دست می‌دهد. نتایج این مقایسه به صورت گرافیکی در شکل ۳ ترسیم و نشان داده شده است. بر اساس نتایج این شکل ضریب تبیین به‌دست آمده برای این ارتباط روی خط یک به یک برابر ۰/۷۹ به دست آمد که برای برخی از تیمارها مشاهده می‌شود که نتایج نسبت به خط یک به یک تطابق خوبی دارند هرچند این تطابق در خصوص برخی از تیمارها مانند بافت ۹۰ درصد ماسه بادی و مابقی ماسه شسته‌شده با طول‌های ۵۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر و بافت ۸۰ درصد ماسه بادی با طول نمونه ۸۰ سانتی‌متری انحراف بیشتری دارد.

جدول ۳. مقادیر ضریب انتشارپذیری، ضریب انتشار و سرعت حرکت املاح در تیمارهای تحت بررسی با استفاده از روش بریگهام

طول بافت	۱۰۰ درصد ماسه بادی			۹۰ درصد ماسه بادی و			۸۰ درصد ماسه بادی و			۷۰ درصد ماسه بادی و		
	α	D	v	α	D	v	α	D	v	α	D	v
۵۰ سانتی‌متر	۰/۹۴۵	۰/۲۹۲	۰/۳۰۹	۰/۵۱۹	۰/۱۲۸	۰/۲۴۷	۰/۴۷۳	۰/۱۳۰	۰/۲۷۶	۰/۵۵۱	۰/۲۱۵	۰/۳۹۰
۸۰ سانتی‌متر	۰/۲۷۹	۰/۰۷۵	۰/۲۶۸	۰/۳۳۸	۰/۱۳۹	۰/۴۰۹	۰/۵۴۸	۰/۱۴۰	۰/۲۵۴	۰/۴۰۰	۰/۱۱۳	۰/۲۸۳
۱۱۰ سانتی‌متر	۲/۸۶۸	۰/۶۶۹	۰/۲۳۳	۰/۴۶۵	۰/۱۹۲	۰/۳۹۲	۰/۷۴۰	۰/۳۳۹	۰/۴۵۹	۰/۴۹۶	۰/۱۶۵	۰/۳۳۲



شکل ۳. مقایسه نتایج ضریب انتشارپذیری به دست آمده از مدل CXTFIT و مدل بریگهام برای تیمارهای تحت بررسی

ردیاب‌های تریتیوم و کلرید برابر ۰/۸ و ۰/۸۷ سانتی متر و برای ستون‌های بزرگ (۶ متر و قطر ۹۵ سانتی متر) برابر ۵ سانتی متر به دست آمد (Wierenga and Van Genuchten, 1989). بنابراین، با توجه به طول نمونه‌ها بین ۵۰ تا ۱۱۰ سانتی متر، تغییرپذیری ضریب α بین ۰/۲۷۹ تا ۲/۸۷ در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

بررسی مقادیر ضریب انتشارپذیری بر اساس حل تحلیلی بریگهام نشان داد در بافت ۸۰ درصد ماسه بادی و بقیه ماسه شسته شده با افزایش طول مقیاس نمونه، مقدار ضریب α افزایش یافته است که می‌تواند بیانگر وابسته بودن ضریب انتشارپذیری به طول نمونه باشد. این روند برای بافت‌های ۱۰۰، ۹۰ و ۷۰ درصد ماسه بادی و بقیه ماسه شسته شده برای طول‌های ۸۰ و ۱۱۰ انطباق دارد، اما مقدار ضریب انتشارپذیری نمونه با طول ۵۰ سانتی متر نسبت به نمونه با طول‌های بیشتر به مقدار قابل توجهی بیشتر است. این در حالی است که برای نمونه‌ها با طول یکسان و بافت‌های مختلف روند مشخصی در این تحقیق مشاهده نشد.

نتایج جدول ۲ نشان داد با افزایش درصد ماسه در بافت خاک و طول نمونه‌ها ضریب تأخیر کاهش یافت. مقدار ضریب انتشارپذیری همان‌گونه نیز با افزایش درصد ماسه شسته، کاهش می‌یابد، اما متوسط مقدار ضریب

۴. بحث و نتیجه‌گیری

بررسی و پیش‌بینی انتقال املاح در محیط‌های متخلخل لازمه مدیریت بهینه خاک و منابع آب زیرسطحی، همچنین، آلودگی‌های شیمیایی این منابع است. در این پژوهش، اثر بافت‌های مختلف خاک شنی و طول نمونه ستون‌های آزمایشگاهی بر مقدار ضریب انتشارپذیری خاک در مقیاس آزمایشگاهی و بر اساس مدل CDE با استفاده از حل تحلیلی بریگهام و روش معکوس مطالعه شد.

مقایسه مقادیر به دست آمده برای ضریب α با نتایج سایر محققان نشان می‌دهد که دامنه نوسان مقادیر به جز برای نمونه با طول ۱۱۰ سانتی متر و بافت ۱۰۰ درصد ماسه بادی که مقدار آن برابر ۲/۸۶۸ سانتی متر به دست آمد برای بقیه تیمارها در دامنه کمتر از ۱ سانتی متر تغییر می‌کند (جدول ۳) که با نتایج گزارش شده مطابقت دارد: معروف پور و همکاران (۱۳۸۴) دامنه تغییرات مقدار ضریب انتشارپذیری را برای ستون‌های آزمایشگاهی از منابع مختلف بین صفر تا یک سانتی متر گزارش کردند. دامنه تغییرات مقادیر ضریب انتشارپذیری محاسبه شده از دو مدل بریگهام و فرید-کانبرنس برای خاک‌های شنی هموزن بین ۰/۰۸ تا ۱/۴۶ سانتی متر گزارش شده است (Ali Pour and Kamanbedast, 2011). در آزمایشی ضریب انتشارپذیری برای نمونه با طول ۳۰ و قطر ۵/۴ سانتی متر برای

یادداشت‌ها

1. Transport function Model
2. Regional Stochastic Model
3. Non-Equivalent CDE
4. Breakthrough (BTC)
5. Dispersion Coefficient
6. Pore Volume (Pv)

انتشارپذیری در ستون‌های خاک با طول‌های ۵۰، ۸۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر تغییرات زیادی ندارد. سرعت جریان املاح در تیمار بافت خاک ۱۰۰ درصد ماسه بادی نسبت به تیمارهای دیگر بیشتر بود و هرچه مقدار درصد ماسه شسته در تیمارهای بافت خاک بیشتر می‌شود تفاوت سرعت در طول‌های مورد آزمایش کمتر به دست آمد.

منابع

- شعبان‌پور شهرستانی، م. ۱۳۸۰. مقایسه سه مدل انتقال املاح با استفاده از ردیاب برماید، نشریه علوم خاک و آب: ۱۵ (۲): ۲۶۱-۲۷۲.
- شیرانی، ح.، صیاد، غ. و کرد، م. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی حرکت برومید در یک خاک لوم شنی با استفاده از مدل HYDRUS-1D، دومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- شیرانی، ح.، کرد، م.، صیاد، غ. و نقوی، ه. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی حرکت بروماید در ستون‌های دست‌خورده خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D، مجله پژوهش‌های آبخیزداری، ۹۲: ۲۱-۳۱.
- عباسی، ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته، انتشارات دانشگاه تهران، ۲۵۰ ص.
- فراسستی، م.، سیدیان، س. م. ۱۳۹۲. اثر فاصله انتقال بر انتشارپذیری کلرید سدیم با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۷ (۴): ۸۲۳-۸۳۱.
- معروف‌پور، ع.، کشکولی، ح.، معاضد، ه.، محمدولی سامانی، ح. ۱۳۸۴. بررسی وابستگی انتشارپذیری خاک به ضخامت آن در خاک‌های ماسه‌ای همگن اشباع، مجله علوم دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۴ (ب): ۱۶-۲۹.
- معروف‌پور، ع.، معاضد، ه.، کشکولی، ح.، محمدولی سامانی، ح. ۱۳۸۷. بررسی آزمایشگاهی اثر روش نمونه‌برداری در آزمایش‌های ردیابی بر ضریب انتشارپذیری آبخوان، مجله علوم و فنون کشاورزی، ۱۲ (۴۶): ۴۳۵-۴۴۶.
- Abbasi, F. 2008. Transport of K^+ , Br^- and KBr through saturated inter and reactive porous media, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(1), 1-6.
- Al Tabbaa, A. and Ayotamuno, J.M. 2000. One-dimensional solute transport in stratified sands at short travel distances. *Journal of Hazardous Materials*. 73: 1-15.
- Ali Pour, R. and Kamanbedast, A.A. 2011. Investigation of vertical transmission of pollution at laboratory model and it's vitalizing for determination of dispersion coefficient at homogenous sandy soil. *World Applied Science Journal*, 14(2): 351-355.
- Hussein, M.F. 2009. BTC solute-transport parameters for three sediments. *The Bulltine, Fautly of Agri, Cairo Univ.*, 4th Conference on Recent Technologies in Agriculture, 2009 01/2009; Special issue, conf, 2009:421-432.
- Karimi, S., Nazemi, A.H., Sdaraddini, A.A. and Delear Hasannia, R. 2013. Comparison of numerical and analytical solutions for breakthrough curve modeling. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 3 (2): 77-81.
- Katterer, T., Schmied, B., Abbaspour, K.C. and Schulin, R. 2001. Single- and dual-porosity modeling of multiple tracer transport through soil columns: effect of initial moisture and mode of application. *Europ. J. Soil Sci.* 52: 25-36.
- Ogata, A. and Banks, R. B. 1961. A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media, *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 411-A.
- Pickens, J. F. and Grisak, G. E. 1981. Scale-dependent dispersion in a stratified granular aquifer. *J. Water Resour. Res.* 17(4): 1191-1211.

Tang, G., Mayes, M.A., Parker, J C. and Jardine, Ph.M. 2010. CXTFIT/Excel–A modular adaptable code for parameter estimation, sensitivity analysis and uncertainty analysis for laboratory or field tracer experiments. *Computers & Geosciences*, 36 (9): 1200-1209

Toride, N., Leij, F. J. and van Genuchten, M.T. 1999. The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments Version 2.1. Research Report, vol. 137. U.S. Salinity Laboratory ,Riverside, CA.

Tylor, S.R., Molyaner, G.L., Howard, K.W.F. and Killey, R.W.D. 1987. A Comparison of Field and Laboratory Methods for Determining Contaminant Flow Parameters. *Groundwater Journal*, 25 (3): 321-330.

Wierenga, P.J. and Van Genuchten, M.Th. 1989. Solute transport through small and large pores on Saturated Soil Columns. *Groundwater*, 27:35-42.