

# اثر بافت خاک بر انتشارپذیری کلرید سدیم در خاک و شبیه‌سازی آن با استفاده از مدل دو بعدی Hydrus

معصومه فراستی

استادیار گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه. Farasati2760@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۹۳/۳/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۱۲

## چکیده

بررسی میزان انتشارپذیری در بافت‌های مختلف خاک می‌تواند در برنامه ریزی برای حفظ سفره‌های آب زیرزمینی از منابع آلاینده و کنترل آلودگی در منابع آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. مدل‌های عددی در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک کاربرد فراوان دارند. در این پژوهش به بررسی اثر بافت خاک بر انتشارپذیری نمک در خاک‌های ماسه‌ای پرداخته شده است. بدین منظور پنج بافت ماسه‌ای متفاوت (ماسه متوسط و اختلاط ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصدی ماسه درشت با ماسه متوسط و ماسه درشت) با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر تهیه و انتشارپذیری آنها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای انجام محاسبات مربوط به تعیین انتشارپذیری، از مدل بریگهام و برای شبیه‌سازی حرکت نمک در خاک از مدل دو بعدی هایدروس استفاده گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که انتشارپذیری نمک به اندازه ذرات و میزان اختلاط ماسه درشت با ماسه متوسط وابسته می‌باشد و با افزایش میزان اختلاط ماسه درشت با ماسه متوسط، مقدار انتشارپذیری افزایش یافته است.

کلید واژه‌ها: انتشارپذیری، بافت خاک، خاک ماسه‌ای، هایدروس، مدل بریگهام

## Effect of soil texture on NaCl dispersivity in soil and simulating by Hydrus 2D model

M. Farasati

Assistant Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

Received: 3 September 2013

Accepted: 8 June 2014

## Abstract

Evaluation of dispersivity in different soil textures can be used in solving problems related to pollutants migration of groundwater. Numerical models are frequently used for simulation of water movement in soils. In the present study, the dependence of dispersivity on the soil texture has been investigated. The textures of soils consisted of medium sand particles and medium sand particles with 25, 50 and 75 percent (by weight) of coarse sand and coarse designated by T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub> and T<sub>5</sub> with 40 cm height of soil column respectively. For calculation of dispersivity Brigham model and for simulation of salinity movement HYDRUS software used. Results of the study indicated that the dispersivity of sandy soil was dependent on the particle size and mixture of textures. And with increase of coarse soil, dispersivity increased.

**Keywords:** Dispersivity, Soil texture, Sandy soil, HYDRUS, Brigham model

## مقدمه

برای به‌دست آوردن پتانسیل آلوده شدن آبخوان‌ها ضروری بنظر می‌رسد (بشارت و همکاران، ۲۰۱۲). یکی از آسان‌ترین و کم هزینه‌ترین روش‌های تعیین ابعاد جبهه رطوبتی و الگوی توزیع رطوبت و شوری در خاک، استفاده از مدل‌های تحلیلی، تجربی و عددی شبیه‌ساز می‌باشد. مدل

روزانه مقادیر زیادی آلاینده، در نتیجه فعالیت‌های انسانی وارد محیط زیست می‌شوند و باعث تخریب آن می‌گردند. مهمترین تأثیر این آلاینده‌ها، نشت آن‌ها در آب‌های زیرزمینی است که در نتیجه آن، منابع آب در دسترس که خود دارای محدودیت می‌باشند دچار آلودگی می‌شوند، بنابراین یافتن معیاری برای مقایسه انتشارپذیری آلاینده‌ها و بررسی آن در انواع خاک‌ها

به هر حال، بررسی میزان انتشارپذیری در بافت‌های مختلف خاک می‌تواند در برنامه‌ریزی به منظور حفظ سفره‌های آب زیرزمینی از منابع آلاینده و کنترل آلودگی در منابع آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به مطالب ذکر شده هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر بافت خاک بر انتشارپذیری محلول نمک در خاک‌های ماسه‌ای می‌باشد و حرکت نمک در خاک با استفاده از نرم‌افزار هایدروس شبیه‌سازی و با نتایج به‌دست آمده از مدل بریگهام مقایسه گردید.

### مواد و روش‌ها

محل اجرای طرح آزمایشگاه کیفیت آب گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی بود. خاک ماسه‌ای متوسط و درشت برای پژوهش حاضر انتخاب گردید. از دلایل انتخاب خاک ماسه‌ای می‌توان به عدم وجود واکنش‌های شیمیایی - زمین‌شناسی در این خاک‌ها اشاره نمود. همچنین مواد تشکیل دهنده آبخوان‌ها ماسه، شن و یا سنگریزه‌هایی می‌باشد که هنوز تحکیم نشده هستند. ماسه‌ها پس از شسته شدن، به وسیله الک‌های استاندارد دانه‌بندی شده تا اندازه ذرات و منحنی دانه بندی آن‌ها به‌دست آید. سپس مقادیر  $D_{60}$ ،  $D_{10}$  و ضریب یکنواختی برای ماسه‌ها محاسبه شد. هدف از انتخاب اندازه‌های متفاوت برای ذرات ماسه در این پژوهش، ایجاد اختلاف‌های واضح در اندازه ذرات خاک‌ها و به تبع آن در میزان نفوذپذیری و سایر خصوصیات ژئوهیدرولوژی آن‌ها بود. پس از الک کردن خاک‌ها، پنج بافت ماسه متوسط ( $T_1$ )، ماسه متوسط و ۲۵ درصد ماسه درشت ( $T_2$ )، ماسه متوسط و ۵۰ درصد ماسه درشت ( $T_3$ )، ماسه متوسط و ۷۵ درصد ماسه درشت ( $T_4$ ) و ماسه درشت ( $T_5$ ) تهیه گردید. لازم به یادآوری است که طول ستون آزمایش ۴۰ سانتی‌متر و هر ستون خاک دارای ۳ تکرار آزمایش و ۱۰ سانتی‌متر فضای آزاد بود.

فرضیه آزمایش‌ها برای شبیه‌سازی انتقال املاح در مزرعه عبارت بودند از: تخلخل هر یک از خاک‌ها ثابت است و محیط متخلخل خاک‌ها همگن و کاملاً اشباع است. تنها پارامتر متغیر در مدت آزمایش‌ها، بافت خاک بود (آیوتومونو، ۱۹۹۸).

### انتخاب ماده آلاینده

در بیشتر مطالعات آزمایشگاهی انتقال آلاینده‌های پایدار از برومید، کلرید سدیم یا آب اکسیژنه به عنوان آلاینده خنثی یا غیر جذبی استفاده شده است. از میان این سه آلاینده مورد اشاره، کلرید سدیم به عنوان آلاینده پایدار برای پژوهش حاضر انتخاب شد. از دلایل انتخاب این ماده می‌توان قابل دسترس بودن، بی‌خطر بودن، سهولت و دقت اندازه‌گیری غلظت آن به کمک دستگاه هدایت سنج را نام برد. در این تحقیق محلول کلرید سدیم (نمک) با هدایت الکتریکی سه میلی موس بر سانتی‌متر تهیه گردید.

هایدروس دو بعدی<sup>۱</sup> یکی از مدل‌های توانمند در امر شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما می‌باشد که بر پایه حل عددی معادله ریچاردز عمل می‌کند. این مدل در سال ۱۹۹۸ توسط آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه گردید و تاکنون نسخه‌های اصلاحی آن در قالب مدل هایدروس یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی در اختیار محققین قرار گرفته است (ازدری، ۱۳۸۷).

نقوی و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی توانایی مدل هایدروس دوبعدی در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی پرداختند. نتایج نشان داد که مدل توانسته روند تغییرات را مشابه آنچه که در پروفیل خاک رخ داده است شبیه‌سازی کند.

فراستی و سیدیان (۱۳۹۲) به بررسی اثر فاصله انتقال بر انتشارپذیری کلرید سدیم با استفاده از نرم‌افزار هایدروس دوبعدی پرداختند. بدین منظور ضخامت‌های مختلف ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ سانتی‌متر تهیه و انتشارپذیری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از نرم‌افزار هایدروس نشان داد که با افزایش متوسط فاصله انتقال، مقدار انتشارپذیری خاک افزایش یافته به طوری که با نزدیک شدن غلظت نمونه‌ها به غلظت نهایی آلاینده مقدار آن ثابت شده است.

بشارت و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی با استفاده از نرم‌افزار هایدروس در شبیه‌سازی حرکت و جذب آب در خاک به ارائه نرم افزار SWMRUM پرداختند. نتایج شبیه‌سازی شده با داده‌های رطوبت خاک حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه و همبستگی قابل قبولی بین آنها مشاهده شد. نتایج نشان داد که میزان جذب حداکثر آب در حدود ۰/۰۴ مترمکعب بر مترمکعب بر روز در عمق ۳۰-۲۵ سانتی متری خاک و حداقل جذب در حدود ۰/۰۰۵ مترمکعب بر مترمکعب بر روز در عمق ۸۰ سانتی‌متر اتفاق می‌افتد.

هوانگ و همکاران (۲۰۰۶) بیان داشت که تغییرات انتشارپذیری در محیط‌های غیر همگن نسبت به محیط همگن از معنی‌داری بیشتری برخوردار است.

معاضد و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی اثر بافت و ضخامت خاک بر انتشارپذیری آلاینده‌ها پرداختند. در آزمایش‌های خود از بافت متوسط و اختلاط با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با ماسه درشت در ضخامت‌های مختلف از ۱۵ سانتی‌متر تا ۱۲۰ سانتی‌متر استفاده کردند. نتایج نشان داد که میزان انتشارپذیری برای بافت‌های متوسط و اختلاط با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد با ماسه درشت و ضخامت ۱۲۰-۱۵ سانتی‌متر به ترتیب ۰/۱۷ تا ۰/۴۵، ۰/۴۶ تا ۰/۰۵، ۰/۸۵ تا ۳ و ۱/۶ تا ۴/۶ به‌دست آمده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، انتشارپذیری آلاینده‌ها در خاک به بافت و ساختمان خاک وابسته است.

که در آن  $\theta$  درصد رطوبت حجمی ( $L^3L^{-3}$ )،  $h$  بار فشار آب در خاک ( $L$ )،  $t$  زمان ( $T$ )،  $K$  هدایت هیدرولیکی ( $LT^{-1}$ )،  $x$  جهت افقی و  $Z$  جهت عمودی را نشان می دهند. همچنین  $S$  نشان دهنده مقدار جذب آب توسط ریشه از خاک می باشد (لیترمکعب بر لیترمکعب بر زمان). مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از رابطه ون گنوختن- معلم بدست آمد (سیمونک و همکاران، ۲۰۰۶).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h > 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$K(h) = K_s Se L \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right) m \right]^2 \quad (6)$$

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (7)$$

که در آن:  $s$  درصد آب خاک اشباع،  $r$  درصد آب خاک باقیمانده،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع،  $\alpha$  معکوس مقدار ورود هوا در حالت اشباع و  $m$ ،  $n$  و  $L$  پارامترهای وابسته به خاک هستند که با استفاده از برازش بر معادله مورد نظر بدست می آیند. پارامترهای مدل از قبیل ویژگی های هیدرولیکی خاک شامل پارامترهای منحنی رطوبتی خاک و نیز پارامتر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ )، رطوبت باقی مانده ( $\theta_r$ ) و رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) در مدل ون گنوختن معلم، با استفاده از اطلاعات تجزیه مکانیکی خاک (بافت خاک) و اندازه گیری جرم مخصوص ظاهری به وسیله ی مدل رزتا<sup>۱</sup> پیش بینی گردیدند.

### شرایط مرزی

معادله انتقال املاح یک معادله مشتق جزئی غیر خطی است که دارای دو متغیر مستقل زمان ( $t$ ) و مکان ( $X$ ) و یک متغیر وابسته غلظت ( $C$ ) است. این نوع معادلات دارای جواب های زیادی هستند و برای این که جواب واحدی از آن ها به دست آید، باید شرایط اولیه و شرایط مرزی سیستم، تعریف شود (ون گنوختن، ۱۹۸۰). در این تحقیق، با توجه به این که جریان آب (آبشویی) به صورت اشباع ماندگار اعمال گردید، فقط شرایط مرزی در ابتدا و انتهای ستون خاک تعریف شد. در مرز بالایی

پس از آماده کردن ستون های خاک و نمک با غلظت سه میلی موس بر سانتی متر، ابتدا ستون های خاک با آب مقطر اشباع گردید. بدین منظور ستون ها به صورت عمودی در آزمایشگاه کیفیت آب دانشکده کشاورزی نصب شدند و سپس انتهای ستون های خاک درون لوله مسدود شده و آب به داخل آن تا ارتفاع کمی بالاتر از ارتفاع مورد نظر اضافه می شد. سپس هر یک از بافت های تهیه شده به تدریج از بالای ستون خاک اضافه می شد تا به ارتفاع مورد نظر برسد. بعد از ریختن یک حجم مشخص از هر بافت، به وسیله یک تخته چوبی ماسه ها به آرامی کوبیده شدند تا به حداکثر تراکم طبیعی برسند. بایستی قبل از شروع آزمایش از خارج شدن حباب های هوا مطمئن شد. برای این کار ضرباتی به بدنه ستون وارد شد. پس از آماده شدن ستون خاک، از بالای ستون خاک، محلول نمک تهیه شده به ارتفاع ۱۰ سانتی متر اضافه شد و تا پایان آزمایش این ارتفاع با اضافه کردن محلول، ثابت نگه داشته شد. همزمان با شروع آزمایش، نمونه برای اندازه گیری غلظت تهیه می شد. اولین قرائت در زمان  $t=0$  انجام شد. آزمایش ها تا رسیدن غلظت نمونه ها به غلظت نهایی ۳ میلی موس بر سانتی متر ادامه یافت. در این پژوهش جهت به دست آوردن ضریب انتشارپذیری از مدل بریگهام استفاده شده است.

$$D = (VL/8)(Y_{0.84} - Y_{0.16})^2 \quad (8)$$

$$\alpha = (D - D^*)/V \quad (9)$$

$$Y = \left[ \frac{(U-1)}{U^{1/2}} \right] \quad (10)$$

که در آن:  $Y_{0.84}$  و  $Y_{0.16}$  به ترتیب عبارتند از مقدار  $Y$  متناسب با غلظت نسبی برابر ۰/۱۶ و ۰/۸۴،  $U$  تعداد حجم آب تخلخل به کار رفته و  $V$  سرعت حقیقی ( $cm/s$ )،  $\alpha$  ضریب انتشارپذیری و  $D^*$  ضریب پخشیدگی مولکولی می باشد که برای خاکهای ماسه ای برابر  $10^{-10}$  سانتی متر مربع بر ثانیه می باشد.

### مدل هایدروس

حرکت آب در خاک بر اساس اطلاعات میدانی با استفاده از مدل هایدروس دوبعدی (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۶) شبیه سازی شد. معادله حاکم بر جریان آب در خاک معادله دو بعدی ریچاردز می باشد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S \quad (11)$$

فراستی: اثر بافت خاک بر انتشارپذیری کلرید سدیم در خاک و شبیه‌سازی ...

مدت آزمایش، ارتفاع آب روی ستون خاک ۱۰ سانتی متر ثابت نسبتاً محسوسی افزایش یافته و تفاوت آنها در محدوده گسترده است. این امر می‌تواند ناشی از تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی و سبک تر شدن بافت خاک باشد که تغییرات سرعت را در پی خواهد داشت. نتایج حاصله از این تحقیق با تحقیقات معاضد و همکاران (۲۰۱۲) همخوانی داشته است. در این تحقیق، قطر متوسط اندازه ذرات خاک ماسه‌ای درشت  $0.56 \times 10^{-3}$  میلی‌متر و خاک ماسه‌ای متوسط  $0.25$  میلی‌متر بوده است. هدایت هیدرولیکی خاک ماسه‌ای درشت در آزمایش  $4 \times 10^{-3}$  متر بر ثانیه و خاک ماسه‌ای متوسط  $2/3 \times 10^{-3}$  متر بر ثانیه می‌باشد. متوسط انتشارپذیری خاک ماسه‌ای درشت  $2/4$  سانتی‌متر و خاک ماسه‌ای متوسط  $0/2$  سانتی‌متر است. به عبارتی قطر متوسط ذرات خاک ماسه‌ای درشت در حدود  $2/2$  برابر خاک ماسه‌ای متوسط، هدایت هیدرولیکی خاک ماسه‌ای درشت در حدود  $1/7$  برابر خاک ماسه‌ای متوسط می‌باشد و ضریب انتشارپذیری آن  $12$  برابر خاک ماسه‌ای متوسط است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر انتشارپذیری خاک‌های ماسه‌ای در شرایط یکسان با افزایش هدایت هیدرولیکی و یا قطر ذرات افزایش یافته است.

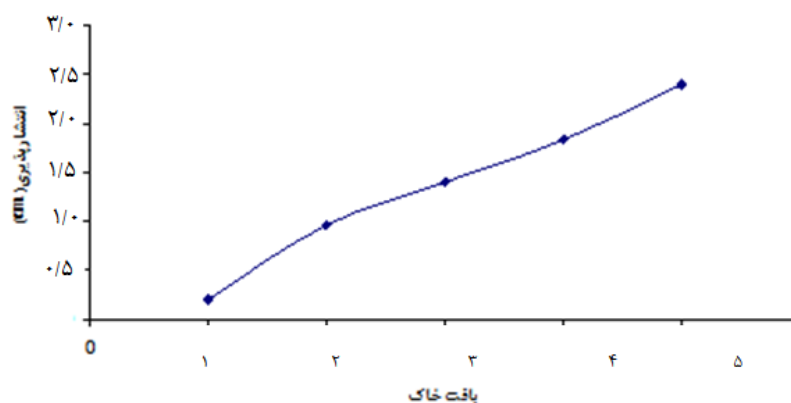
ستون، شرایط بار آبی ثابت در نظر گرفته شد و در تمام طول بود. برای مرز پایینی ستون خاک، جریان ثابت با پتانسیل فشاری صفر در نظر گرفته شد.

### نتایج و بحث

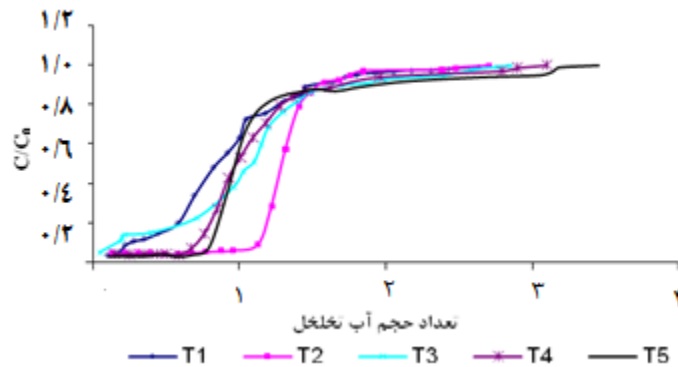
همان گونه که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد لازم بود تا خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه به منظور اجرای مدل هایدروس دو بعدی اندازه‌گیری شود. مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی بافت‌های خاک تهیه شده در جدول (۱) نشان داده شده است. با توجه به داده‌های جدول (۱)، قطر دانه‌های خاک در بازه کوچکی انتخاب شده تا ضریب یکنواختی (CU) خاک از ۴ کمتر باشد و محیط متخلخل همگنی ایجاد گردد. مقادیر انتشارپذیری بافت‌های مختلف با استفاده از مدل تحلیلی بریگهام محاسبه گردید که در شکل (۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱)، حداقل مقدار انتشارپذیری  $0/2$  مربوط به بافت متوسط و حداکثر مقدار انتشارپذیری  $2/4$  مربوط به بافت درشت و انحراف معیار  $0/83$  می‌باشد. با افزایش درصد اختلاط ماسه درشت و در حقیقت سبک تر شدن بافت خاک، مقادیر انتشارپذیری به نحو

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی بافت‌های خاک مورد مطالعه

n	CU	D <sub>60</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	نوع خاک
۰/۴۴	۲/۲۳	۰/۲۹	۰/۱۳	T <sub>1</sub>
۰/۳۷	۲/۳۸	۰/۳۸	۰/۱۶	T <sub>2</sub>
۰/۳۶	۲/۴۴	۰/۴۴	۰/۱۸	T <sub>3</sub>
۰/۳۳	۲/۵	۰/۵۰	۰/۲۰	T <sub>4</sub>
۰/۳۱	۲/۷۶	۰/۵۸	۰/۲۱	T <sub>5</sub>



شکل ۱- مقادیر انتشارپذیری برای خاک ماسه‌ای در بافت‌های مختلف



شکل ۲ - منحنی رخنه مربوط به بافت های T<sub>1</sub>، T<sub>2</sub>، T<sub>3</sub> و T<sub>4</sub>

به عبارتی سرعت داری در تمامی نقاط داخل محیط متخلخل و در هر نقطه در تمامی جهات با هم برابر باشد، لازمه چنین موضوعی، همگن بودن و همگون بودن خاک است. ایجاد چنین محیط متخلخلی کاری مشکل و حتی غیر ممکن می‌باشد. در این پژوهش همان گونه که قبلاً بیان شد نهایت تلاش برای محیط متخلخل همگنی به عمل آمد به طوری که قطر دانه‌های خاک در بازه کوچکی انتخاب شد تا ضریب یکنواختی (CU) خاک از ۴ کمتر باشد. اما ایجاد یک محیط هم تراکم، کاری مشکل و دشوار می‌باشد.

نتایج به دست آمده از هایدروس شبیه سازی حرکت نمک در خاک مورد مطالعه در چهار مرحله برای هر یک از بافت‌های مورد مطالعه در شکل‌های (۳) تا (۶) نشان داده شده است. مدت زمان آزمایش برای هر یک از بافت‌ها به چهار مرحله تقسیم گردیده است. شکل ۳ نتایج شبیه سازی را در مرحله اول زمان اجرای مدل پس از مدت زمان ۴۲، ۴۰، ۳۳ و ۲۸ دقیقه به ترتیب برای بافت‌های T<sub>1</sub> تا T<sub>5</sub> نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌گردد با افزایش درصد خاک درشت دانه میزان انتشارپذیری بیشتر شده است و نمک در تمام ستون خاک به سرعت پخش گردیده است، اما هنوز در هیچ یک از بافت‌ها نمک به انتهای ستون نرسیده بنابراین غلظت خروجی صفر می‌باشد.

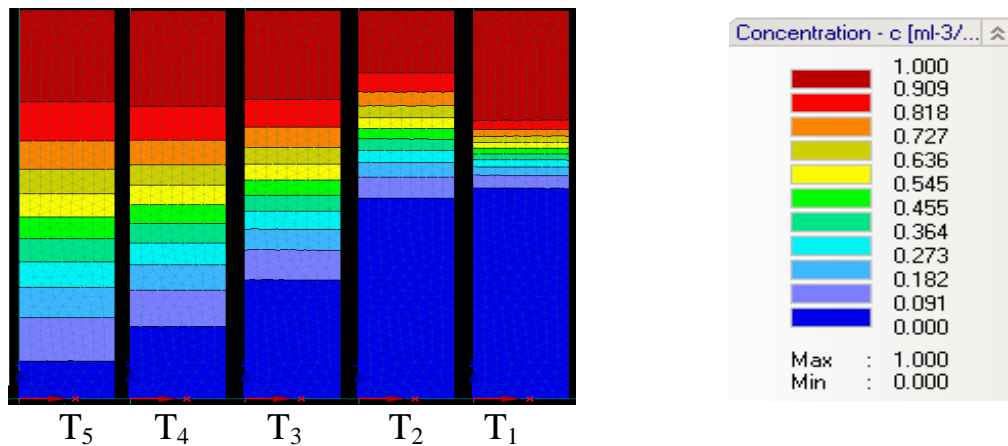
در شکل (۴)، نتایج شبیه سازی مرحله دوم را در بافت‌های T<sub>1</sub>، T<sub>2</sub>، T<sub>3</sub>، T<sub>4</sub> و T<sub>5</sub> به ترتیب پس از گذشت مدت زمان ۱۱۰، ۷۰، ۶۷، ۵۵ و ۴۸ دقیقه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴، در بافت‌های T<sub>3</sub>، T<sub>4</sub> و T<sub>5</sub> نمک به انتهای ستون خاک رسیده است اما در بافت‌های T<sub>1</sub> و T<sub>2</sub> هنوز غلظت خروجی صفر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان سبک تر بودن بافت‌های T<sub>3</sub>، T<sub>4</sub> و T<sub>5</sub> نسبت به T<sub>1</sub> و T<sub>2</sub> دانست.

در شکل (۲) منحنی‌های رخنه بافت‌های مورد مطالعه نشان داده

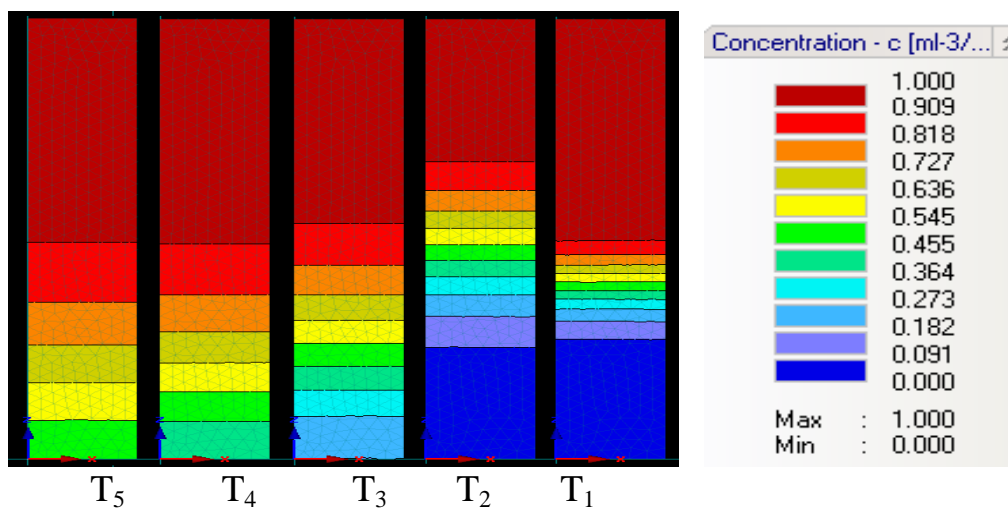
شده است. در محور عمودی غلظت نسبی  $(\frac{C}{C_0})$  و در محور

افقی تعداد حجم آب تخلخل قرار دارد. با مقایسه منحنی‌های رخنه آزمایش مذکور ملاحظه گردید که در همه بافت‌ها، منحنی‌های رخنه رسم شده از حالت متقارن خارج شده است. همچنین مشاهده گردید که منحنی‌های رخنه نمونه‌های T<sub>4</sub> و T<sub>5</sub> تقریباً تا رسیدن به غلظت نهایی به موازات هم می‌باشد، همچنین منحنی‌های رخنه نمونه‌های T<sub>1</sub> و T<sub>2</sub> تقریباً تا رسیدن به غلظت نهایی به موازات هم می‌باشد در حالی که این موضوع در منحنی‌های رخنه سایر بافت‌ها صدق نمی‌کند. مقادیر انتشارپذیری به دست آمده برای نمونه‌های T<sub>4</sub> و T<sub>5</sub> و انتشارپذیری T<sub>1</sub> و T<sub>2</sub> کمترین اختلاف را دارند. با توجه به شکل (۲) در همه بافت‌ها قبل از غلظت نسبی ۰/۵، حجم آب تخلخل برابر یک گردیده است. با مقایسه زمان‌های رسیدن به غلظت‌های نسبی ۰/۱۶ و ۰/۸۴ در تمامی آزمایش‌ها ملاحظه شد که بافت ماسه درشت (T<sub>5</sub>) از مدت زمان بیشتری برای رسیدن به غلظت نسبی ۰/۱۶ و ۰/۸۴ برخوردار می‌باشد. همچنین سرعت انتقال آلاینده در نمونه T<sub>5</sub> کمتر از سایر بافت‌ها بوده است. به طوری که برای رسیدن به غلظت نسبی ۰/۵، نمونه‌های T<sub>5</sub> بیشترین حجم آب تخلخل به کار رفته را به خود اختصاص داده است. منحنی‌های رخنه مربوط به این آزمایش‌ها، بیشترین چولگی را به سمت راست دارند. مطالعات تجربی متعدد (بشارت و همکاران، ۲۰۱۲) نشان داده است که وقتی شدت جریان آب در محیط متخلخل کم باشد پدیده عقب افتادگی از شدت بیشتری برخوردار بوده و منحنی رخنه متناسب با آن، چولگی به راست پیدا می‌کند. برای این که آلاینده در داخل خاک به صورت پیستونی حرکت نماید بایستی شدت جریان انتقال و یا

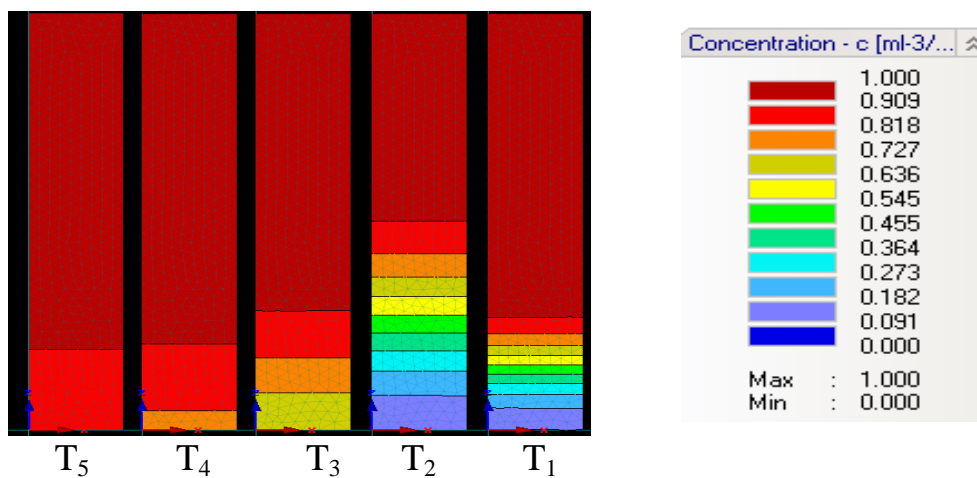
فراستی: اثر بافت خاک بر انتشارپذیری کلرید سدیم در خاک و شبیه‌سازی ...



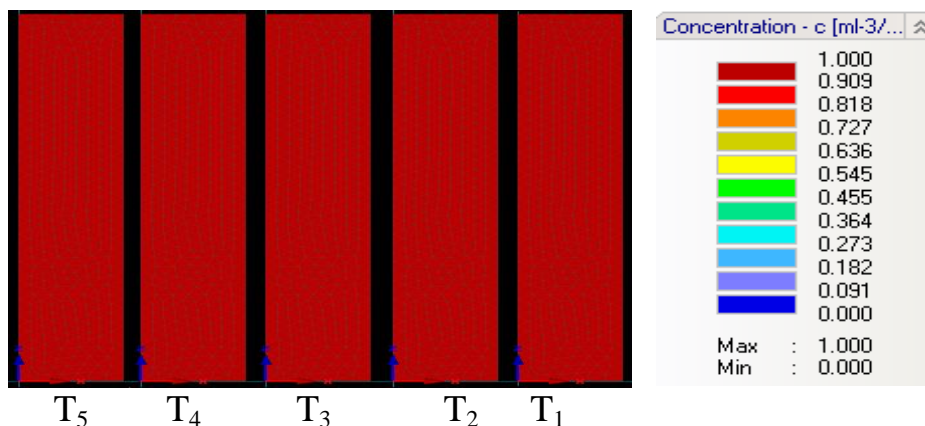
شکل ۳- مقایسه نتایج شبیه سازی نمک با استفاده از نرم افزار هایدروس در بافت های مختلف با ضخامت ۴۰ سانتی متر در مرحله اول زمانی



شکل ۴- مقایسه نتایج شبیه سازی نمک با استفاده از نرم افزار هایدروس در بافت های مختلف با ضخامت ۴۰ سانتی متر در مرحله دوم زمانی



شکل ۵- مقایسه نتایج شبیه سازی نمک با استفاده از نرم افزار هایدروس در بافت های مختلف با ضخامت ۴۰ سانتی متر در مرحله سوم زمانی



شکل ۶- مقایسه نتایج شبیه سازی نمک با استفاده از نرم افزار هایدروس در بافت های مختلف با ضخامت ۴۰ سانتی متر در مرحله چهارم زمانی

مختلف و در جهات مختلف می باشد می توان این موضوع را یکی از دلایل اختلافات بین انتشارپذیری محاسبه شده برای بافت های مختلف بیان نمود.

### نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده، تغییرات وسیع هدایت هیدرولیکی و قطر ذرات خاک در طول مسیر انتقال آلاینده اثر مستقیمی بر مقدار انتشارپذیری خاک داشته، به طوریکه متناسب با میزان تغییرات نفوذپذیری خاک ها، مقدار انتشارپذیری خاک نیز افزایش یافته است. در مطالعات انتقال آلاینده که معمولاً از مدل جابجایی-انتشار (مدل بریگهام) استفاده می شود از اختلاف چگالی بین آلاینده و سیال داخل محیط متخلخل صرف نظر می شود. بنابراین با فرض یکسان بودن سرعت انتقال در تمامی جهات در داخل محیط خاک، پیش بینی می شد که آلاینده به صورت کاملاً یکنواخت در داخل خاک حرکت کند اما نتایج مدل فیزیکی نشان داد که الگوی حرکت آلاینده یکنواخت نبوده و کاملاً غیریکنواخت انتقال یافته است. بنابراین نتیجه گرفته می شود که محیط متخلخل ایجاد شده غیرهمگن و غیرهمگون بوده به طوری که در لایه های متفاوت خاک، محیط یکسانی به وجود نیامده است. نتایج به دست آمده از نرم افزار هایدروس و مدل بریگهام نشان داد که میزان انتشار پذیری در خاک ماسه ای متوسط نسبت به سایر بافت ها کمتر بوده و با افزایش میزان اختلاط، انتشار پذیری به طور محسوسی افزایش یافته است. مقادیر بالای انتشارپذیری به دست آمده در بافت های مرکب می تواند به علت عدم تجانس محیط و وابستگی خاص لایه ها به هندسه آنها باشد. عدم تجانس می تواند باعث پیچیدگی توزیع سرعت شود که نتیجه آن انتشار و گستردگی آلودگی در مقایسه با یک محیط همگن و دانه دانه ای است و تحقیقات معاضد و همکاران (۲۰۱۲) و هوانگ و همکاران (۲۰۰۶) نیز گویای این مطلب می باشد. با توجه به نحوه حرکت آلاینده در داخل محیط متخلخل که بیانگر عدم یکسان بودن هدایت هیدرولیکی خاک در نقاط

در شکل (۵)، نتایج شبیه سازی مرحله سوم را در بافت های  $T_1, T_2, T_3, T_4$  و  $T_5$  به ترتیب پس از گذشت مدت زمان ۱۵۴، ۹۸، ۹۴، ۷۷ و ۶۷ دقیقه نشان می دهد. با توجه به شکل (۵)، در همه بافت ها غلظت خروجی غیر صفر بوده و کلرید سدیم در ستون خاک انتشار یافته است. در بافت  $T_4$  و  $T_5$  تقریباً غلظت خروجی نزدیک به غلظت نهایی سه میلی موس بر سانتی متر بوده اما در بافت های دیگر مدت زمان بیشتری برای رسیدن به این وضعیت لازم است.

در شکل (۶)، نتایج شبیه سازی را در بافت های  $T_1, T_2, T_3, T_4$  و  $T_5$  به ترتیب پس از گذشت مدت زمان ۲۲۰، ۲۰۱، ۱۲۲، ۱۰۱ و ۹۰ دقیقه نشان می دهد. با توجه به شکل (۶)، در همه بافت ها غلظت خروجی برابر با غلظت ورودی (سه میلی موس بر سانتی متر) گردیده است. همان طور که داده ها نشان می دهد در بافت  $T_1$  دیرتر از همه و بافت  $T_5$  سریعتر از سایر بافت ها غلظت خروجی برابر غلظت ورودی شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، مقادیر اندازه گیری شده از مدل بریگهام و شبیه سازی توسط نرم افزار هایدروس نشان دهنده افزایش میزان انتشارپذیری نمک در خاک با درصد اختلاط بالای درشت دانه می باشد. بافت خاک بر انتشارپذیری نمک تأثیر داشته است به این ترتیب که با افزایش میزان اختلاط درشت دانه با خاک ماسه ای میزان انتشارپذیری کلرید سدیم افزایش یافته است. با سبک تر شدن خاک میزان انتشار از خلل و فرج خاک افزایش یافته است. مقادیر بالای انتشار پذیری به دست آمده در بافت های با درصد اختلاط بالا، می تواند به علت عدم تجانس محیط باشد. عدم تجانس می تواند باعث پیچیدگی توزیع سرعت شود که نتیجه آن انتشار و گستردگی آلودگی در مقایسه با یک محیط همگن و دانه دانه ای است و تحقیقات معاضد و همکاران (۲۰۱۲) و هوانگ و همکاران (۲۰۰۶) نیز گویای این مطلب می باشد. با توجه به نحوه حرکت آلاینده در داخل محیط متخلخل که بیانگر عدم یکسان بودن هدایت هیدرولیکی خاک در نقاط

فراستی: اثر بافت خاک بر انتشارپذیری کلرید سدیم در خاک و شبیه‌سازی ...

رسیدن به غلظت نسبی ۰/۵ در تعداد حجم آب تخلخل کمتری از واحد روی می‌دهد که نتایج پژوهش حاضر نیز با آن مطابقت داشته است.

**تشکر و قدردانی**

این تحقیق بخشی از طرح دانشگاه رازی کرمانشاه بوده، بدین وسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه رازی تقدیر و تشکر می‌گردد.

### منابع

- ۱- اژدری، خ. ۱۳۸۷. شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک در سیستم آبیاری قطره‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-2D. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۴۲(۴): ۵۰-۱۱.
- ۲- فراستی، م. و م. سیدیان. ۱۳۹۲. اثر فاصله انتقال بر انتشارپذیری کلرید سدیم با استفاده از نرم افزار HYDRUS-2D. نشریه آب و خاک مشهد، ۷(۴): ۸۳۱-۸۳۳.
- ۳- نقوی، ه. حسینی‌نیا، م. کریمی‌گوهری، ش. و م. ایران‌دوست. ۱۳۹۰. توانایی مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی علوم آب و خاک، ۱۶(۶۱): ۶۹-۵۹.
- 4- Ayotamuno, J.M. 1998. Cotaminant transport and immobilization in stratified sands. Ph.D thesis, University of Birmingham, Uk.
- 5- Besharat, S. Nazemi, A.H. Sadroldini, A.A. and S. Shahmorad. 2012. Applications of hydrus and the proposed swmrum software in simulating water flow with root water uptake through soils. Water and Science Journal. 21(4):121-137.
- 6- Huang, G. Huang, Q. and Z. Hongbin. 2006. Evidence of one-dimensional scale-dependent fractional advection–dispersion, Journal of Contaminant Hydrology.85 (1-2):53-71.
- 7- Moazed, H. Farasati, M. and H. Ghamarneia. 2012. Dispersivity of chlorine through medium and coarse grained soil materials. Reserch on Crops, 13 (1): 327-333.
- 8- Simunek, J. Sejna, M. and M.Th. Van Genuchten. 2006. The hydrus software package for simulating the two and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, User Manual Version 1.0, PC-progress, Prague, Czech Republic.
- 9- Van Genuchten, M.Th. 1980. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of American Journal, 44: 892–898.