

## آنالیز حساسیت پارامترهای هیدرولیکی محیط متخلخل در حل معکوس انتقال برومید

فریده انصاری<sup>۱</sup>، سیدحسین طباطبائی<sup>۱\*</sup>، فریبرز عباسی<sup>۲</sup> و ابراهیم علایی<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵)

### چکیده

شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در خاک، در مدیریت بهینه مصرف آب و کود در مزرعه بسیار مؤثر است. در این پژوهش از مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی انتقال آب و برومید در یک ستون آزمایشگاهی خاک با بافت لومرسی استفاده شد. پارامترهای هیدرولیکی خاک شامل (عکس نقطه ورود هوا)  $\alpha$ ، (هدایت هیدرولیکی اشباع)  $k_s$ ، (رطوبت باقی‌مانده)  $\theta_r$ ، (رطوبت اشباع)  $\theta_s$ ، (پارامتر پیوستگی خلل و فرج)  $I$  و (پارامتر شکل منحنی رطوبت)  $n$  از طریق اندازه‌گیری و با استفاده از نرم‌افزار Retc به دست آمدند. پارامترهای انتقال املاح شامل ضریب انتشار و سرعت واقعی با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی خاک و داده‌های غلظت برومید به روش مدل‌سازی معکوس برآورد شد، با توجه به ضرایب هدف، آنالیز حساسیت مدل فیزیکی انجام شد. نتایج حاصله نشان داد که ضریب همبستگی غلظت برومید مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در حالت بهینه برابر ۰/۸۴ درصد بود. بر این اساس مقدار ضریب انتشار برابر ۴/۰۹ سانتی‌متر برآورد شد. بر پایه نتایج آنالیز حساسیت، هدایت هیدرولیکی اشباع بیشترین تأثیر را در تغییرات این پارامتر داشت به طوری که مقدار ضریب حساسیت این پارامتر برابر با ۲/۶۴ بود. ضریب RMSE با مقدار ۰/۰۴ کمترین و ضریب ME با مقدار ۰/۰۰۱- بیشترین تغییرات پارامتر را داشتند.

واژه‌های کلیدی: پخشیدگی، شبیه‌سازی، بروماید، HYDRUS

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

۲. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

۳. گروه محیط زیست و بیوتکنولوژی، پژوهشگاه صنعت نفت

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Tabatabaei@agr.sku.ac.ir

## مقدمه

که در آن  $D$ : ضریب انتشار ( $M^2 L^{-1}$ )،  $C$ : غلظت نمک یا یون مورد نظر ( $ML^{-3}$ )،  $Z$ : فاصله ( $L$ )،  $V$ : سرعت متوسط حقیقی آب ( $LT^{-1}$ ) و  $t$ : زمان ( $T$ ) است.

استفاده از مدل‌ها در پیش‌بینی حرکت املاح و آلاینده‌ها در خاک، می‌تواند موجب صرفه‌جویی زیاد در وقت و هزینه‌ها شود. ولی این پیش‌بینی زمانی مفید و کاربردی خواهد بود که دقت و اعتبار مدل در این برآورد ابتدا بررسی شده باشد. بنابراین قبل از استفاده از این مدل‌ها باید کارایی آنها در شرایط کنترل شده ارزیابی شود. روش مدل‌سازی معکوس یکی از روش‌های غیرمستقیم برای تخمین ویژگی‌های خاک است که در کارهای مهندسی کاربرد بیشتری دارد. همچنین مدل‌سازی معکوس توانایی برآورد همزمان ویژگی‌های هیدرولیکی و انتقال املاح را دارد که در این صورت، با استفاده از روش معکوس اثرهای متقابل پارامترهای هیدرولیکی، انتقال و ویژگی‌هایی از خاک در نظر گرفته می‌شود (۱).

مدل HYDRUS یکی از مدل‌های پیشرفته با قابلیت شبیه‌سازی حرکت یک بعدی آب، املاح، حرارت و جذب آب توسط ریشه و همچنین رشد ریشه در شرایط اشباع و غیراشباع در خاک است. این مدل توسط سیمونیک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا بسط داده شده است (۲۴). مدل برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک از معادله جابه‌جایی-انتشار (CDE) استفاده می‌کند. در این مدل معادله ریچاردز اصلاح شده برای بررسی حرکت آب در خاک به صورت عددی حل می‌شود که به صورت معادله (۲) بیان می‌شود (۲۵).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \beta \right) \right] - s \quad (2)$$

در معادله ریچاردز برای توصیف مشخصات هیدرولیکی خاک نظیر منحنی رطوبتی و هدایت آبی معادلات متعددی تعریف شده است که معمول‌ترین آنها معادله ونگنوختن-معلم است (۲).

که در معادله مذکور،  $\theta_s$ : مقدار رطوبت اشباع،  $\theta_r$ : مقدار رطوبت باقی مانده،  $n$ : پارامتر شکل منحنی رطوبت است (۲۹).

منابع محدود آب در صورتی قابل استفاده خواهد بود که کیفیت مطلوب را بنابر مورد مصرف دارا باشد. امروزه به دلیل فعالیت‌های گسترده صنعتی و استفاده از کودها در کشاورزی آب به عنوان مهم‌ترین منبع حیات بشر در معرض مخاطره واقع شده است، به گفته پژوهشگران آلودگی آب‌های زیرزمینی اغلب به دلیل فاضلاب‌های سمی ناشی از صنایع و یا از منابع ذخیره فاضلاب اتفاق می‌افتد (۲۶). آلودگی آب‌های زیرزمینی از طریق حرکت آب و آلاینده از سطح خاک به طرف اعماق اتفاق می‌افتد. با توجه به موضوع تبدیل شدن آلودگی خاک به عنوان یک مشکل زیست‌محیطی، اهمیت پیش‌بینی جریان آب در منطقه اشباع و غیراشباع به طور روز افزون در حال گسترش است (۴). واضح است که باید نقش منطقه غیراشباع به صورت محل نابودی یا تولید، برای ارزیابی آلودگی آب‌های زیرزمینی و نیز انتخاب روش‌های اصلاحی به طور دقیق بررسی شود. املاح موجود در خاک یا آنهایی که به خاک اضافه می‌شوند درگیر واکنش‌هایی متفاوتی مانند رسوب، جذب سطحی، جذب به وسیله گیاهان و یا انتقال در خاک می‌شوند. آنیون‌های محلول در خاک از نظر شوری، حاصلخیزی و آلودگی آب‌های زیرزمینی دارای اهمیت هستند. غیر فعال بودن اکثر آنیون‌ها و عدم جذب آنها روی مکان‌های جذب در خاک بر اهمیت مطالعه آنها افزوده است. آنها به راحتی می‌توانند با کمی آبشویی از پروفیل خاک شسته شده و وارد آب‌های زیرزمینی شوند (۳). به طور کلی جابه‌جایی و انتشار نمک‌ها در خاک با سه مکانسیم انتقال توده‌ای (Mass flow)، پخشیدگی مولکولی (Diffusion) و انتشار آبی (Hydrodynamic dispersion) انجام می‌شود. با در نظر گرفتن تأثیر همزمان این سه فرایند بر حرکت یون‌ها و نمک‌ها در خاک، معادله جابه‌جایی-انتشار (CDE) برای محلول پایدار در محیط یک‌بعدی متخلخل همگن تحت شرایط جریان دائمی به صورت زیر است (۱۶).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial z} + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (1)$$

دارد. دامنه ضریب همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و آزمایشگاه بین ۰/۹۴ تا ۰/۹۷ محاسبه شد.

شیرانی و همکاران (۲۳) به شبیه‌سازی حرکت برومید در ستون‌های دست‌خورده خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D پرداختند. نتایج نشان داد که مدل بیشترین حساسیت را به تغییرات رطوبت اشباع دارد و این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی حرکت برومید با دقت بالا است. درخشان‌نژاد و همکاران (۱۰) به منظور بررسی حرکت نیترات در خاک تحت کشت نیشکر از مدل HYDRUS-1D استفاده کردند. نتایج نشان داد که گرچه این مدل توانست برآورد خوبی از روند حرکت نیترات در خاک انجام دهد، ولی مقادیر بهینه شده (برازش داده شده) توسط آن از میزان تعیین شده در آزمایش‌های صحرائی کمتر بود. چاوشی و همکاران (۹) به شبیه‌سازی حرکت فلوراید در خاک آهکی با استفاده از مدل HYDRUS-1D پرداخته و بیان کردند HYDRUS-1D به خوبی حرکت و تغییرات غلظت فلوراید در نیمرخ خاک را شبیه‌سازی کرده است و مدل بیشترین حساسیت را به رطوبت اشباع و هدایت هیدرولیکی اشباع برای شبیه‌سازی را دارد.

در این پژوهش با اندازه‌گیری غلظت برومید خروجی از زهاب و رسم منحنی‌های رخنه ((Breakthrough Curve (BTC) به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای مؤثر بر ضریب انتشار در خاک اشباع پرداخته شد.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش از یک ستون آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی بستر خاک و آب و یک ستون ماریوت برای برقراری جریان اشباع و یکنواخت استفاده شد. خاک مورد نیاز در طراحی بستر از مزرعه‌ای واقع در دانشگاه شهرکرد از عمق صفر تا ۴۵ سانتی‌متر تهیه شد. خاک‌های جمع‌آوری شده ابتدا به مدت دو روز هوا خشک و سپس از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری و جرم مخصوص به روش استوانه مشخص شدند. برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب استفاده شده در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

Ks هدایت هیدرولیکی اشباع ( $LT^{-1}$ ) و  $\alpha$ : عکس نقطه ورود هوا ( $L^{-1}$ ) است که وابستگی زیادی به بافت و ساختمان خاک دارد و در خاک‌های دارای خلل و فرج ریز از کمترین مقدار برخوردار است. Se اشباع نسبی یا درجه اشباع مؤثر، I: پارامتر پیوستگی خلل و فرج است که برای اکثر خاک‌ها ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (۱۸). از آنجایی که این پارامترها با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها تخمین زده می‌شوند، لذا باید با دقت بیشتری برآورد شوند.

### برومید و شبیه‌سازی آن

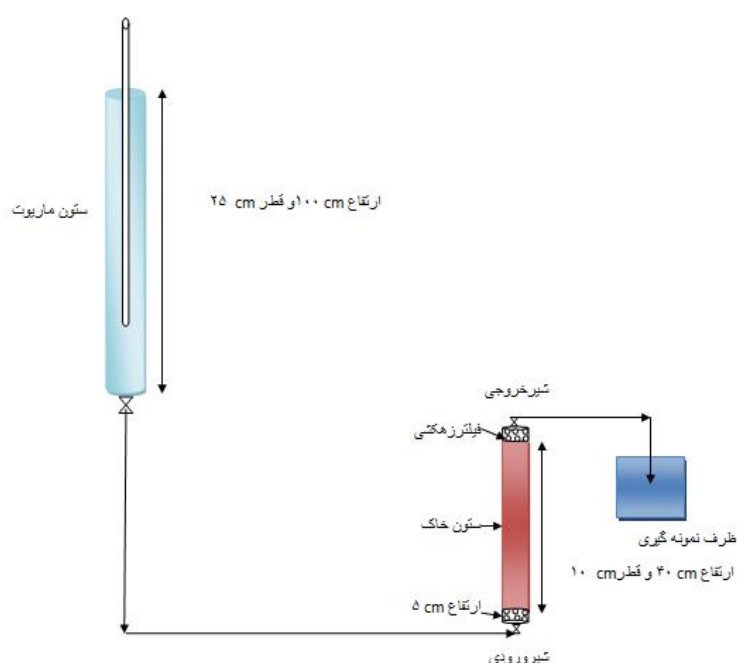
برومید از جمله آنیون‌هایی است که به راحتی آبشویی می‌شود و به دلیل این ویژگی، به عنوان ردیاب حرکت املاح در خاک مورد توجه قرار گرفته است. همین‌طور در این مطالعه استفاده از برومید به عنوان ردیاب به این دلیل ارجحیت دارد که غلظت اولیه خاک‌های ایران کم بوده و باعث آلودگی خاک نمی‌شود. همچنین در فرایندهای پیچیده شیمیایی و بیولوژیک نیترات شرکت نمی‌کند (۲۷). جاکلی و همکاران (۱۲) به بررسی میزان اثر میکروارگانسیم‌ها بر تصفیه آب دورنس تانک پرداختند. لایه‌های دورن تانک‌ها از خاکستر مواد ارگانیک، شن، خاکستر اوره و خاک طبیعی ساخته شد. نتایج حاصله با نرم‌افزار Hydrus-1D شبیه‌سازی شد و در نهایت حساسیت پارامترهای مدل آنالیز شد. زاکاری و همکاران (۳۱)، پژوهشی را با هدف تعیین پارامترهای انتقال آلاینده‌ها در آبخوان‌ها انجام دادند. برای این منظور انتقال بیسفنول در یک لایه آبدار شنی مورد مطالعه قرار گرفت. سپس مدل غیرتعدالی بر داده‌های منحنی رخنه برازش داده شد و پارامترهای آن از طریق حل معکوس با استفاده از مدل Hydrus-1D تعیین شد. ونژی و همکاران (۲۸) در پژوهش‌های خود نشان دادند که مدل Hydrus-1D می‌تواند با دقت به شبیه‌سازی آب و نمک در خاک بپردازد. اسدیانفلی (۷) برای بررسی انتقال نیترات در یک خاک لوم‌شنی تیمار شده با ژئولیت از نرم‌افزار Hydrus-1D استفاده کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این مدل برآورد خوبی از انتقال نیترات در خاک

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در ستون

کربن آلی (%)	Br	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/lit)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	EC (dS/m)	pH	P <sub>b</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	n	سیلت (%)	شن	رس	بافت خاک
۰/۲۸	۰/۰	۰/۰۵	۴/۰۴	۰/۳۳	۷/۳	۱/۳۸	۴۹	۴۸	۲۴	۲۸	لوم رسی

جدول ۲. مشخصات شیمیایی آب مورد استفاده

pH	EC (μmho/cm)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/lit)	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/lit)	تزیق شده Br (mg/lit)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/lit)	NH <sub>3</sub> (mg/lit)
۷/۶	۳۲۰	۲۴	۱۰/۷	۴۶	۰/۰۵	۰/۰۳



شکل ۱. تصویر شماتیک از مدل فیزیکی آماده شده برای مطالعه ستونی

استفاده شد. یک عدد شیر قطع و وصل روی خروجی و

ورودی ستون نصب شد. (شکل ۱)

برای پرکردن بستر، ابتدا یک سر ستون با در پوش از جنس پلگسی گلاس مسدود شد و یک سوراخ نیز برای نصب لوله مربوط به جریان ورودی روی آن ایجاد شد. کل ارتفاع ستون آزمایش توسط ترکیب خاک به صورت لایه لایه و به ضخامت پنج سانتی متر پر شد. پنج سانتی متر ابتدا و انتهای ستون با سنگریزه و شن ریز به منظور یکنواخت کردن ورود جریان و

تهیه ستون‌های آزمایشی و آماده‌سازی مدل فیزیکی

برای تهیه مدل فیزیکی ابتدا ستون‌های آزمایش طراحی شدند. ستون‌های آزمایش از جنس پلگسی گلاس به ضخامت دو میلی متر انتخاب شدند. ستون‌های پلگسی گلاس در دو طول ۱۰۰ و ۵۰ سانتی متر، به قطر ۲۵ و ۱۰ سانتی متر در کارگاه تحقیقاتی پژوهشگاه نفت تهران ساخته شدند به طوری که بستر به طول ۴۰ سانتی متر در این ستون شبیه‌سازی شد، از ستون دیگری به شکل ستون ماریوت برای تأمین و نگهداشت آب

جدول ۳. دامنه تغییرات ضریب حساسیت (۱۳)

$S_s > 1/5$	$0.3 < S_s < 1/5$	$0 < S_s < 0.3$	$S_s = 0$	دامنه تغییرات
حساسیت زیاد	حساسیت متوسط	حساسیت کم	بدون حساسیت	شدت حساسیت

بررسی میزان اثرگذاری تغییرات داده‌های ورودی بر خروجی به‌عنوان تحلیل حساسیت شناخته شده است. در تحلیل حساسیت مدل، ابتدا با استفاده از داده‌های ورودی، مدل اجرا شده و نتایج خروجی به‌عنوان داده‌های خروجی پایه در نظر گرفته شد، سپس در مراحل بعدی در هر بار اجرای مدل یکی از داده‌های ورودی مدل را تغییر داده و سایر داده‌ها ثابت نگه داشته شد و مدل اجرا شد. نتایج حاصل با نتایج پایه مقایسه و ضریب حساسیت محاسبه شد. بر این اساس ضریب حساسیت مدل مورد مطالعه، از روش ليو و همکاران (۱۴) استفاده شد.

$$S_S = - \frac{\frac{\Delta W}{W}}{\frac{\Delta P}{P}} \quad (3)$$

که در آن  $S_S$ : ضریب حساسیت،  $\Delta W$ : اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی،  $W$ : متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر داده ورودی،  $\Delta P$ : اختلاف مقدار ورودی یک پارامتر به مدل و  $P$ : متوسط مقدار ورودی یک پارامتر به مدل است. طبقه‌بندی ضریب حساسیت مطابق جدول ۳ است.

پارامترهای مدل از قبیل ویژگی‌های هیدرولیکی خاک شامل پارامترهای منحنی رطوبتی خاک و نیز پارامترهای هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_s$ ) رطوبت باقی‌مانده ( $\theta_r$ ) و باقی‌مانده رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) در مدل ونگنوختن - معلم با استفاده از اطلاعات تجزیه مکانیکی خاک (بافت خاک) و اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری به‌وسیله مدل RETC پیش‌بینی شدند.

در این پژوهش مقدار رطوبت حجمی و مقدار تخلخل اندازه‌گیری به‌عنوان داده‌های اولیه به مدل داده شدند، همزمان با اندازه‌گیری مقدار رطوبت، مقدار برومید موجود در خاک و آب زیززمینی که به‌عنوان منبع تأمین آب مورد استفاده واقع شد

جلوگیری از شستشوی محتویات داخل آن پر شد (۱۱). بعد از پرکردن تمامی ستون، انتهای آنها با در پوش پلگسی گلاس مسدود شد. یک سوراخ نیز برای نمونه‌گیری روی درپوش ایجاد شد. ستون‌های آماده شده روی چهارپایه‌های فلزی چیده شدند. انجام آزمایش مستلزم وقوع جریان اشباع است. به‌همین منظور برای اطمینان از پر بودن کلیه منافذ موجود در بستر و تخلیه کامل هوا از آنها، جریان ورودی به بستر رو به بالا در نظر گرفته شد (۱۱). شبیه‌سازی جریان ورودی به ستون بدین صورت انجام شد که ابتدا با استفاده از ستون ماریوت به حجم ۴۹ لیتر، انتقال جریان به کف ستون با تعبیه یک شیر روی محلول ورودی به ستون مهیا شد.

#### نمونه‌برداری از جریان پیوسته ورودی به بستر و خروجی از آنها

مقدار غلظت برومید طبق مطالعات قبلی برای تزریق در آب بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر بود (۱۴ و ۲۰) که در این پژوهش نیز ۴۶ میلی‌گرم بر لیتر در آب مقطر در نظر گرفته شد. نمونه‌برداری بر اساس حجم منفذی (Pore volume) (هر پوروالیوم برابر ۱۵۲۳ میلی‌لیتر است) و تقریباً روزانه انجام شد. نمونه‌برداری تا ۱۰ حجم منفذی ادامه داشت. نمونه‌ها در بطری‌های پلاستیکی شفاف جمع‌آوری شدند. نمونه‌های جمع‌آوری شده برای اندازه‌گیری pH (با دستگاه pH متر)، هدایت الکتریکی (دستگاه EC متر)، غلظت برومید (توسط دستگاه اسپکتوفتومتر) به آزمایشگاه کیفیت آب منتقل شدند. فاکتورهای شیمیایی ذکر شده در همان روز نمونه‌برداری اندازه‌گیری شدند، در غیر این صورت در یخچال در دمای کمتر از چهار درجه سانتی‌گراد به مدت یک روز نگهداری می‌شدند. شدت جریان حجمی خروجی از بسترها نیز با تعیین مدت زمان لازم برای جمع‌آوری حجم مشخصی از جریان خروجی اندازه‌گیری شد.

همان‌طور که از نتایج به‌دست آمده از تخمین پارامتر صورت گرفته است مقادیر تخمینی  $K_s$  و  $\theta_s$  بیشترین نزدیکی را به مقادیر اندازه‌گیری شده و به نوع واقعی خاک دارند، این نتیجه پیش از این نیز با توجه به آنالیز حساسیت پارامترها مشاهده شد، با توجه به بیشترین حساسیت این دو پارامتر بیشترین دقت را در تخمین این پارامترها مشاهده کرد.

با بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای معادله ونگنوختن بر ضریب انتشار دیده شد دو پارامتر مهم هدایت هیدرولیکی و رطوبت اشباع بسیار تأثیر گذارند. همان‌طور که در شکل (۲) دیده می‌شود این تغییرات در هدایت هیدرولیکی شدیدتر است.

منیشداوی و همکاران (۱۵) هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت اشباع و رطوبت باقی‌مانده، آزادی‌فر و همکاران (۸) هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت اشباع و شیرانی و همکاران (۲۳) ضریب پخشیدگی، هدایت هیدرولیکی اشباع، رطوبت اشباع را به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها بیان کردند. نخعی و همکاران (۱۹)، پارامتر شکل منحنی رطوبتی و عکس نقطه ورود هوا را حساس‌ترین پارامتر در پژوهش خود بیان کردند.

هم‌زمان با استفاده از شاخص ضریب تبیین از نمایه‌های (RMSE)، (SSQ) و (ME) که توسط مدل مقادیر به ثبت رسیده بود، از یک طرف برای مقایسه میزان خطای به‌وجود آمده بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده و از طرف دیگر برای شناخت توانایی شبیه‌سازی مدل مورد استفاده قرار گرفت، هر چه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشد، خطای مدل کمتر است.

با توجه به مقادیر  $R^2$  شکل (۳) و مقادیر خطای جدول (۶)، هر قدر مقادیر  $R^2$  بیشتر و در واقع بالاتر از ۶۰ درصد باشد و مقادیر خطا کمتر باشند مدل HYDRUS-1D توانسته است به‌خوبی غلظت برومید را شبیه‌سازی کند و همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود بیشترین مقدار  $R^2$  و کمترین خطا مربوط به هدایت هیدرولیکی در دامنه ۵۰ درصد کاهش است و این بیانگر این است که تغییرات در این پارامتر بیشترین تأثیر را دارد.

اندازه‌گیری و به مدل داده شد، با توجه به اینکه جریان آب به‌صورت اشباع و ماندگار اعمال شد فقط شرایط مرزی در ابتدا و انتها ستون خاک تعریف شد. در مرز بالایی (ورودی) ستون، جریان ثابت و برای مرز پایینی (خروجی) ستون، جریان ثابت با پتانسیل فشاری صفر در نظر گرفته شد.

### مقایسه آماری

برای ارزیابی کارایی واسنجی و اعتبارسنجی مدل از نمایه‌های آماری که توسط مدل HYDRUS-1D محاسبه می‌شود، استفاده شد، این نمایه‌های آماری شامل ضریب تبیین ( $R^2$ ) جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای حداکثر (ME) و مجموع مربعات خطا (SSQ) هستند که توسط مدل محاسبه می‌شوند.

### نتایج و بحث

با توجه به اینکه سرعت آب در جریان آب‌های زیرزمینی بین ۰/۱ تا ۰/۵ متر بر روز است (۶)، در این پژوهش نیز سعی بر این شد که برای ایجاد جریان یکنواخت در ستون، سرعت در حدود ۰/۳۴ متر بر روز باشد. بین این دو پارامتر  $p_v$  و  $t$  رابطه خطی به‌صورت برقرار بوده و تا مقدار  $PV=10$  آزمایش ادامه پیدا کرده است.

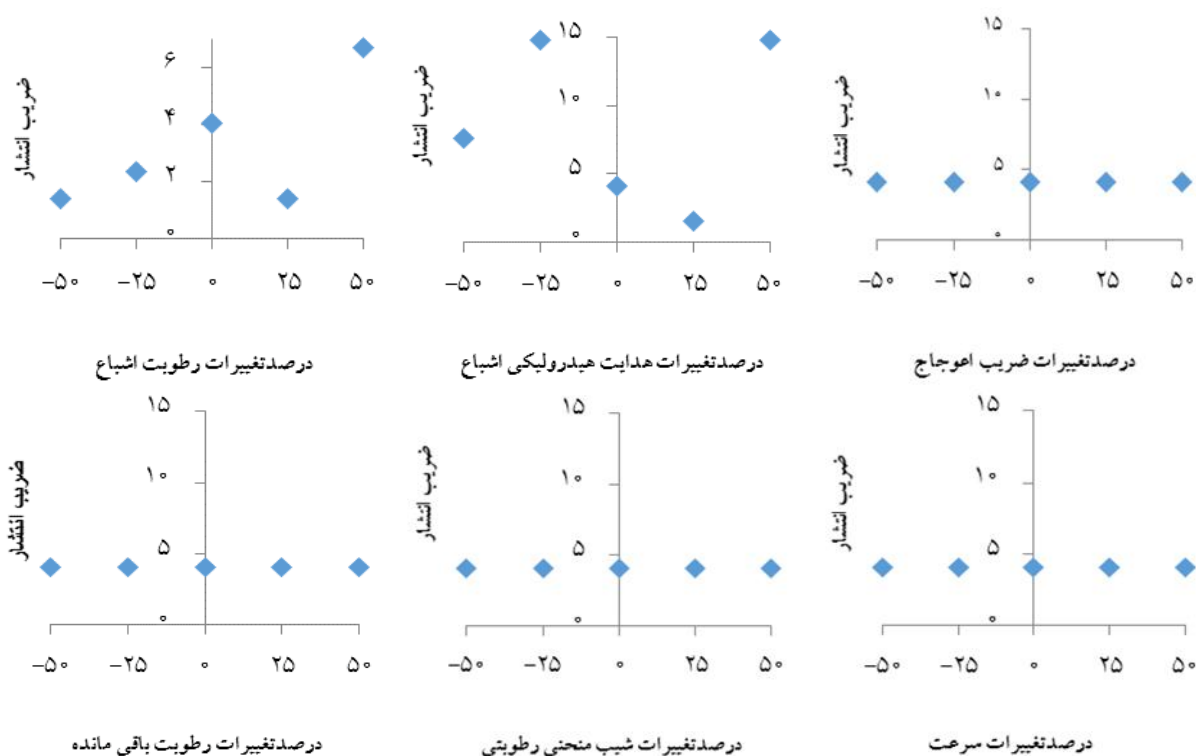
نتیجه آنالیز حساسیت نشان داد که حساس‌ترین پارامترهای هیدرولیکی  $\theta_s$  و  $k_s$  بودند به‌طوری که ضریب انتشار و منحنی رخنه به  $k_s$  حساس‌تر است. ضریب انتشار در بهترین حالت با نرم‌افزار Hydrus-1D برابر ۴/۰۹ سانتی‌متر تخمین زده شد. برای بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و رطوبتی بر این پارامتر مقادیر آنها ۰/۲۵ و ۰/۵۰ درصد افزایش و کاهش داده شدند. جدول ۴ مقادیر آماری و هیدرولیکی به‌دست آمده و جدول ۵ میزان حساسیت پارامترهای هیدرولیکی از شبیه‌سازی مدل را نشان می‌دهد. نخعی و همکاران (۱۹) به بررسی تخمین پارامترها و توابع هیدرولیکی خاک اشباع با مدل Hydrus-1D پرداختند و به این نتیجه رسیدند که  $\theta_r$  حداقل حساسیت را در بین پارامترها و  $n$  و  $\alpha$  بیشترین حساسیت را داشتند.

جدول ۴. نتیجه تخمین پارامترهای هیدرولیکی و پارامترهای بهینه در مدل و مقادیر آماری مربوط

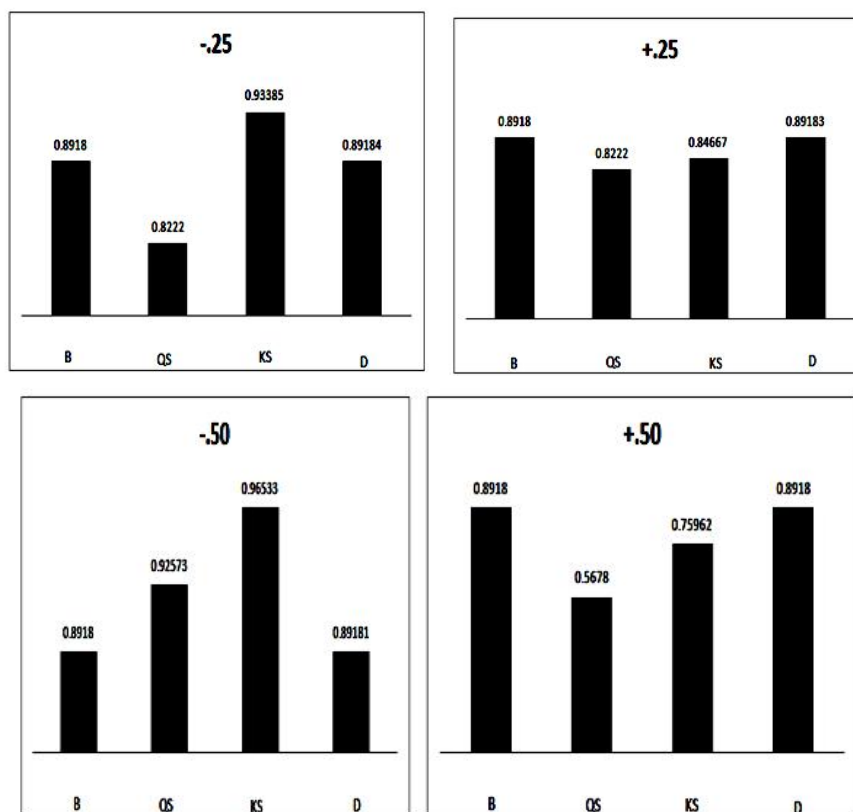
ME	RMSE	R <sup>2</sup>	$\Theta_s$	$\Theta_r$	$\square$ (1/cm)	n	I	Ks (cm/hr)	D (cm)	
			۰/۴۷	۰/۰۵	۰/۰۱	۱/۲۸	۰/۵	۱/۰۲	۵	مقادیر بهینه شده
-۰/۳۲	۰/۸۴	۰/۸۹	۰/۴۴	۰/۰۷۵	۰/۰۱۶	۱/۴۱	۰/۵	۱/۰۴	۴/۰۹	مقادیر اولیه

جدول ۵. میزان حساسیت پارامترهای ورودی

پارامترهای ورودی مدل	ضریب حساسیت (S <sub>s</sub> )	شدت حساسیت
$\theta_s$	۰/۶۵	متوسط
$\theta_r$	۰	بدون حساسیت
(cm/hr) k <sub>s</sub>	۲/۶۴	زیاد
$\alpha$	۰	بدون حساسیت
I	۰	بدون حساسیت
V(cm <sup>۳</sup> /hr)	۰	بدون حساسیت



شکل ۲. آنالیز حساسیت ضریب انتشار نسبت به تغییرات رطوبت اشباع، هدایت هیدرولیکی اشباع، ضریب اعوجاج، رطوبت باقی مانده، شیب منحنی رطوبتی و سرعت



شکل ۳. مقادیر  $R^2$  پارامترهای هیدرولیکی

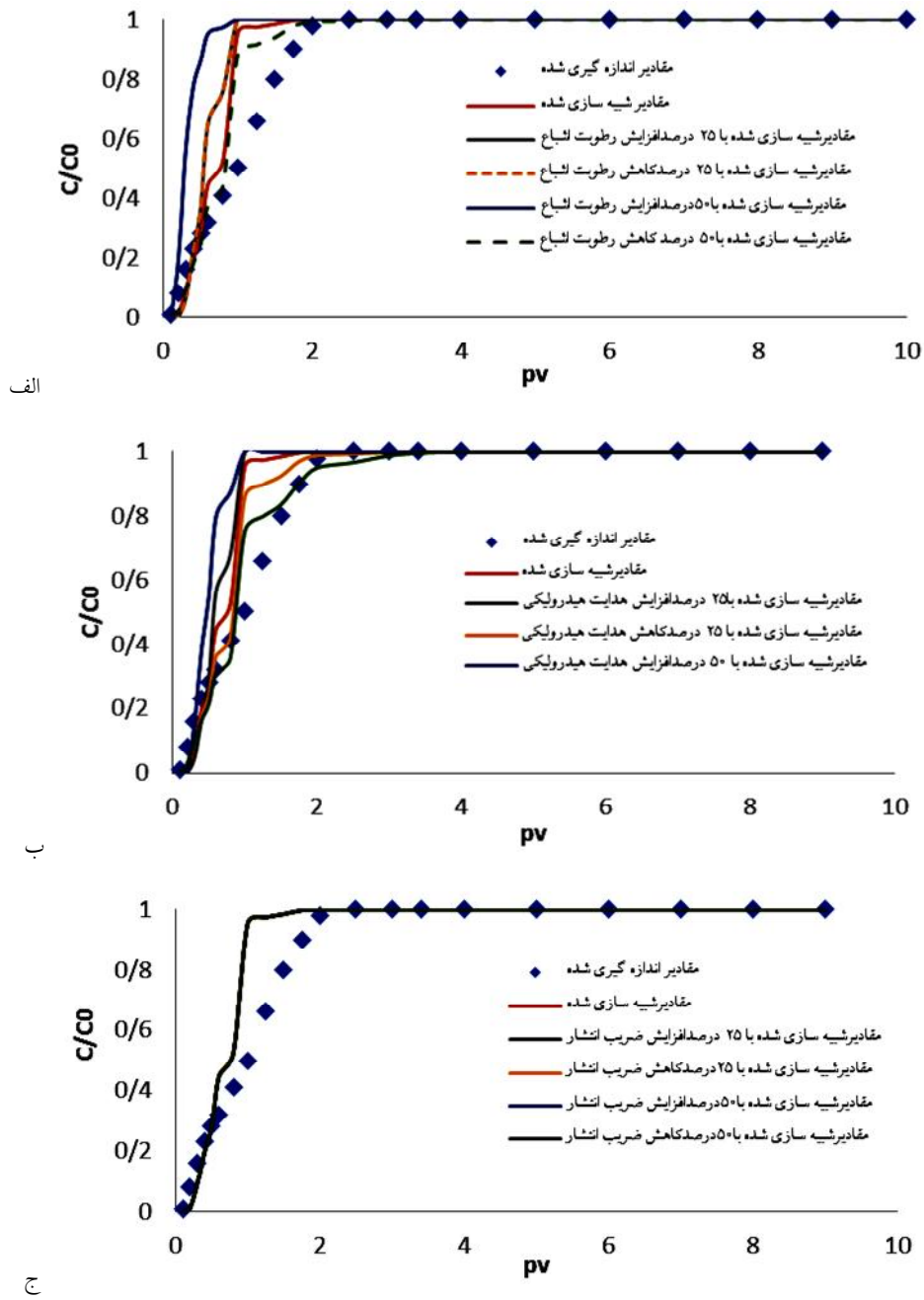
جدول ۶. آنالیز آماری و برآورد میزان خطا و درصد تغییرات

پارامترهای آماری	(مقدار بهینه)	(+۰/۲۵)	(-۰/۲۵)	(+۰/۵۰)	(-۰/۵۰)
$\theta_s$	ME	-۰/۰۳	-۰/۰۴	-۰/۰۱	-۰/۰۱
	SSQ	۰/۱۴	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۹۲
	RMSE	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۴
$K_s$	ME	-۰/۰۳	-۰/۰۴	۰/۱-۰	-۰/۰۱
	SSQ	۰/۱۴	۰/۲	۰/۸۰	۰/۳۹
	RMSE	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۰۶	۰/۰۴

HYDRUS-1D، مقدار ضریب همبستگی را ۰/۹۸ گزارش کردند که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. زمان وقوع نقطه رخنه و شکل منحنی رخنه مهم‌ترین مشخصات منحنی رخنه در تعیین عملکرد هستند (۱۵). نقطه رخنه زمانی فرا می‌رسد که غلظت یون در جریان خروجی به سه تا پنج درصد غلظت آن در جریان ورودی برسد. نقطه اشباع نیز زمانی فرا می‌رسد که غلظت یون در جریان خروجی به مقدار

به‌طور کلی مقایسه تمامی شاخص‌های آماری نشان داد که شبیه‌سازی حرکت یون برومید توسط مدل Hydrus-1D خوب انجام شده است. اسدیان فلی (۷)، مرادزاده و همکاران (۱۷) با شبیه‌سازی یون نیترات و یانگ و همکاران (۳۰) با شبیه‌سازی حرکت آب توسط مدل HYDRUS-1D مقدار ضریب همبستگی را ۰/۹۹ گزارش کردند. همچنین آزادی‌فر و همکاران (۸) به‌منظور بررسی انتشارپذیری یون نیترات توسط مدل





شکل ۴. آنالیز حساسیت برای پارامتر: الف) رطوبت اشباع، ب) هدایت هیدرولیکی اشباع و ج) ضریب انتشار

ستون جاذب است که در آن تغییرات غلظت جذب شده یون (غلظت یون در محلول ورودی به ستون، منهای غلظت یون در محلول خروجی از ستون  $(C-C_0)$ ) یا تغییرات غلظت خروجی نرمال شده  $(C/C_0)$ ، به صورت توابعی از زمان یا حجم جریان خروجی بیان می‌شوند (۵). همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده

ثابتی برسد، هر چند که بستر ستون به طور کامل اشباع نشده باشد، بنابراین نقطه اشباع در فرایند جذب یون از آب در ستون جاذب را می‌توان نقطه‌ای قلمداد کرد که در آن غلظت یون در خروجی با غلظت آن در ورودی برابر باشد (۲۱). یک منحنی رخنه نشان‌دهنده نحوه بارگذاری یون موجود در محلول روی بستر

به دست آوردند.

### نتیجه گیری

در این پژوهش به واسنجی و اعتبار سنجی مدل HYDRUS-1D با استفاده از داده‌های غلظت برداشت شده بررسی شد. با مدل‌سازی معکوس و با استفاده از پارمترهای هیدرولیکی خاک، پارمترهای انتقال املاح برآورد شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار ضریب تبیین بین مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-1D و مقادیر مشاهده شده بین ۵۷٪ تا ۹۶٪ درصد نوسان داشت که بیشترین مقدار از آن KS با ۵۰٪ درصد کاهش دامنه و کمترین مقدار مربوط به  $\theta_s$  با ۵۰٪ افزایش دامنه بود. کمترین مقدار ME مربوط به KS با مقدار ضریب تبیین ۹۶٪ درصد است که بیان‌کننده بیشترین تأثیر در مقدار ضریب انتشار است. مقدار ضریب حساسیت این پارمتر برابر با ۲/۶۴ است.

می‌شود منحنی‌های رخنه برآزش داده شده با مدل HYDRUD-1D تطابق بسیار بالایی با مقادیر مشاهده شده در آزمایشگاه از خود نشان دادند. درخشان‌نژاد (۱۰) و مرادزاده (۱۷) نیز در پژوهش‌های خود این مسئله را تأیید کرده‌اند. شکل ۴ نتایج تحلیل حساسیت مدل HYDRUD-1D را به ترتیب برای سه پارمتر هیدرولیکی مهم رطوبت اشباع، هدایت هیدرولیکی اشباع و ضریب انتشار نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است کمترین تأثیر مربوط به پارمتر ضریب پخشیدگی بر شکل منحنی رخنه و غلظت پیش‌بینی شده در زهاب خروجی است و بیشترین تأثیر مربوط به پارمتر هدایت هیدرولیکی اشباع است.

این نتایج با پژوهش سلامتی و همکاران (۲۲) قابل مقایسه است. پژوهشگران در پژوهش خود  $\theta_s$  (رطوبت اشباع)، ks (هدایت هیدرولیکی اشباع) را حساس‌ترین پارمتر به دست آوردند. شیرانی و همکاران (۲۳) ضریب پخشیدگی، رطوبت اشباع و رطوبت باقی‌مانده را به‌عنوان حساس‌ترین پارمتر

### منابع مورد استفاده

1. Abbasi, F. 2013. Advance soil physics. 2nd edition. Tehran University press. Tehran. Iran (In Farsi).
2. Abbasi, F., D. Jacques, J. Simunek, J. Feyen and M. Th. Genuchten. 2003. Inverse estimation of the soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: heterogeneous soil. *Transaction of the ASAE* 46 (4): 1097-1111.
3. Abbaspour, K. C. and R. Schulin. 1996. Two dimensional flow and transport in unsaturated soils. PP: 108-119. Federal Office of Environment, Forests and Landscape, Bern, Switzerland.
4. Afyuni, M., M. G. Wagger and R. B. Leidy. 1997. Runoff of two sulfonyl urea herbicides in relation to tillage system and rainfall intensity. *Journal of Environmental Quality* 26: 1318-1326.
5. Aksu, Z. and F. Gonen. 2004. Biosorption of phenol by immobilized activated sludge in a continuous packed bed: prediction of breakthrough curves. *Process Biochem Biochemistry Journal* 39: 599-613.
6. Al-Tabbaa, A., J. M. Ayotamuno and R. J. Martin. 2000. One-dimensional solute transport in stratified sands at short travel distances. *Journal of Hazardous Material* 73: 1-15.
7. Asadian Feli, Z. 2013. Effect of irrigation with municipal wastewater and potassium zeolite. *Journal of Hydrology* 42: 99-111.
8. Azadifar, A., A. Soltani mohammadi, H. Moazed and A. Farrokhian Firuz. 2017. The study of nitrate dispersivity in sandy soil using HYDRUS-1D model. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 47(4): 765-774. (In Farsi).
9. Chavoshi, E., M. Afyuni and M. A. Hajabbasi. 2015. Simulation of fluoride transport in a calcareous soil using HYDRUS-1D. *Journal of Water and Soil Science* 19(72): 205-215. (In Farsi).
10. Derakhshannejad, Z., GH. Sayyad and A. R. Jjafarnejadi. 2010. Simulation of nitrate transportation in a soils under sugarcane cultivation using HYDRUS-1D solute transport model. In: Proceeding of the First National Conference on Sustainable agriculture and healthy product production, Research Center for Agriculture and Natural Resources of Isfahan. (In Farsi).
11. Healy, M. G., T. G. Ibrahim, G. J. Lanigan, A. J. Serrenho and O. Fenton. 2012. Nitrate removal rate, efficiency and pollution swapping potential of different organic carbon media in laboratory denitrification bioreactors. *Ecological Engineering Journal* 40: 198-209.
12. JiakeLi, R., Y. Zhao and L. Chen. 2018. Modeling the effects of parameter optimization on three bio retention tanks using the HYDRUS-1D model. *Journal of Environmental Management* 217: 38-46.

13. Li, Z. M., E. O. Skogley and A. H. Ferguson. 1993. Resin adsorption for describing bromide transport in soil under continuous or intermittent unsaturated water flow. *Journal of Environmental Quality* 22: 715-722.
14. Liu, H. F., M. Genard, S. Guichard and N. Bertin. 2007. Model-assisted analysis of tomato fruit growth in relation to carbon and water fluxes. *Journal of Experimental Botany* 58(13): 3567-3580.
15. Maneshdavi, M., A. R. Jafarnejadi, G. A. Sayyad and H. Shirani. 2015. Inverse modeling of e.coli mobility through the soil by HYDRUS-1D code using equilibrium and non-equilibrium equations. 38(3):105-115.
16. Maroufpour, E., H. Kashcoli, H. Moazed and H. M. Vali Ssamani. 2008. Comparative study of mathematical models of Fried-Combernous Brigham to dispersion of conservative pollutants in the homogeneous sandy soil. *Journal of Agricultural Science* 30: 77-89. (In Farsi).
17. Moradzadeh, M., H. Moazed and GH. Sayyad. 2012. Simulation of Nitrate Ion Leaching in a Sandy Loam Soil Treated with Zeolite using Hydrus-1D Model. *Journal of Soil and Water* 23 (1):95-107. (In Farsi)
18. Mualem, Y. 1976. A new model for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resource Research Journal* 12(3): 513-522.
19. Nakhaei, M., V. Amiri and M. Vadiati. 2015. Inversely estimation of hydraulic parameters and functions of unsaturated soil using disk infiltrometer experiment data. *Journal of Soil and Water Conservation* 4(4): 40-48. (In Farsi).
20. Paramasivam, S., A. K. Alva, A. Fares and K. S. Sajwan. 2002. Fate of nitrate and bromide in an unsaturated zone of a sandy soil under citrus production. *Journal of Environmental Quality* 31: 671-681.
21. Paul Chen, J., J. T. Yoon and S. Yiacoumi. 2003. Effects of chemical and physical properties of influent on copper sorption onto activated carbon fixed-bed columns. *Carbon* 41: 1635-1644.
22. Salamati, N., M. Delbari, F. Abbasi and A. Sheini Dashtgol. 2016. Simulation of Water and Nitrate Transport in Soil Using HYDRUS-1D Model in Furrow Irrigation of Sugarcane. *Journal of Water and Soil Science* 19(74):179-192. (In Farsi).
23. Shirani, H., M. Kord, G. A. Sayyad and H. Naghavi. 2011. Simulating bromide transport in disturbed soil columns using HYDRUS-1D model. *Journal of Watershed Management Research* 92: 20-31. (In Farsi).
24. Simunek, J., M. Sejna and M. Th. Van Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solute in variably saturated media, Version 2.0, IGWMC-TPS-70, Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Co.
25. Simunek, J., M. Th. Van Genuchten and M. Sejna. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal* 7: 587-600.
26. Singh, R. M. and B. Datta. 2004. Groundwater pollution source identification and simultaneous parameter estimation using pattern matching by artificial neural network. *Environ Forensics* 5(3): 143-153.
27. Starr, J. L., J. Y. Parlange and C. R. Frink. 1986. Water and chloride movement through a layered field soil. *Soil Science Society of American Journal (SSSAJ)* 50: 1384-1390.
28. WenZhi, Z., Ch. XU, J. WU and J. Huang. 2014. Soil salt leaching under different irrigation regimes: HYDRUS-1D modelling and analysis. *Journal of Arid Land* 6(1): 44-58.
29. Xie, T., X. Liu and T. Sun. 2011. The effects of groundwater table and flood irrigation strategies on soil water and salt dynamics and reed water use in the yellow river delta, China. *Ecological Modelling Journal* 222: 241-252.
30. Yiang, M., F. Shaoyuan, S. Dongyuan, G. Guangyuo and H. Zailin. 2010. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D. *Computer and Electronic in Agriculture Journal* 71: 40-47.
31. Zakari, S., H. Liu, L. Tong, Y. Wang and J. Liu. 2016. Transport of bisphenol-A in sandy aquifer sediment: Column experiment. *Chemosphere* 144: 1807-1814 .

## Hydraulic Parameters Sensitivity Analysis of Porous Media at Inverse Solution of Bromide Transport

F. Ansari<sup>1</sup>, S. H. Tabatabaei<sup>1\*</sup>, F. Abbasi<sup>2</sup> and E. Alaei<sup>3</sup>

(Received: June 4-2018 ; Accepted: January 15-2019)

### Abstract

Simulation of water and salt transfer in soil is very effective in managing optimal water and fertilizer use in the field. In this study, the HYDRUS-1D model was used to simulate the transfer of water and bromide in a laboratory column of soil with clay loam texture. Soil hydraulic parameters (including air entry point)  $\alpha$ , (saturated hydraulic conductivity)  $k_s$ , (residual moisture content)  $\theta_r$  (saturation moisture content)  $\theta_s$ , (pore and particle joint parameter)  $l$  (parameter of moisture curve shape)  $n$  through measurement and using Retc software was obtained. Solubility transfer parameters including diffusion coefficient and actual velocity were estimated using soil hydraulic parameters and bromide concentration data by reverse modeling method. According to the target coefficients, the sensitivity analysis of the physical model was performed. The results showed that the correlation coefficient of observation and simulation bromide concentration in optimal mode was 0.84%. accordingly, the diffusion coefficient was estimated to be 4.9 cm. based on the results of the sensitivity analysis, the saturation hydraulic conductivity had the greatest effect on the variation of this parameter, so that the amount sensitivity coefficient of this parameter was 2.64. The RMSE coefficient with a value of 0.04 was the lowest and ME coefficient with the value of -0.0001 had the most parameter variations.

**Keywords:** Dispersion, Simulation, Bromide, HYDRUS

1- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2- Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.

3- Environmental and Biotechnology Department, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: faride.ansari@yahoo.com