

بررسی تأثیر شیب خاک و شدت بارندگی بر انتقال محلول با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی و مدل HYDRUS-2D

فرشید تاران^۱، امیرحسین ناظمی^۲، سید علی اشرف صدرالدینی^۳، یعقوب دین پژوه^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۱۶

چکیده

خاک نه تنها محیطی برای رشد گیاه، بلکه انتقال دهنده بسیاری از آلاینده‌ها به اتمسفر و آب‌های سطحی و زیرزمینی است و لذا مطالعه حرکت مواد در خاک اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه تأثیر شیب خاک و شدت بارندگی بر انتقال محلول در خاک در شرایط آزمایشگاهی بررسی شد. آزمایش‌ها در دو توده خاک شیب‌دار و بدون شیب انجام گرفت و شامل تزریق یک محلول غیرواکنش دهنده (سدیم کلرید) با دو شدت مختلف بود. نتایج نشان دادند که شیب خاک موجب افزایش انتقال محلول در جهت عرضی می‌شود. همچنین افزایش شدت تزریق باعث تسریع حرکت محلول به سمت عمق خاک شده و با افزایش مقدار محلول در اعماق خاک موجب افزایش غلظت بیشینه در آن‌جا می‌گردد. در ادامه از مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی انتقال محلول استفاده شد. عملکرد مدل بعد از بهینه‌سازی پارامترهای ورودی بهبود یافت و مقادیر غلظت محلول با ضریب تبیین (R^2) بین ۰/۸۴۸-۰/۹۰۷ و ضریب بازدهی نش-ساتکلیف (EF) بین ۰/۸۰۵-۰/۹۰۷ و همچنین مقادیر پایین جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به خوبی شبیه‌سازی شدند.

واژه های کلیدی: انتقال محلول، شدت بارندگی، شیب خاک، HYDRUS-2D.

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی آب دانشگاه تبریز. ۰۹۳۵۵۵۴۱۸۱۷. farshidtaran@yahoo.com (مسئول مکاتبه)

^۲ استاد گروه مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز. ۰۹۱۴۳۱۳۵۲۸۱. ahnazemi@yahoo.com

^۳ استاد گروه مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز. ۰۹۱۴۳۱۳۵۷۹۷. alisadraddini@yahoo.com

^۴ دانشیار گروه مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز. ۰۹۱۴۴۰۳۶۱۷۶. dinpashoh@yahoo.com

مقدمه

اگرچه اخیراً آگاهی عمومی در مورد مسائل زیست‌محیطی افزایش یافته است، اما هنوز در موقعیت‌ها و فعالیت‌های زیادی مانند مخازن فاضلاب، محل‌های دفن زباله، عملیات کشاورزی و دفع مواد زائد، آلوده شدن منابع آب و خاک ادامه دارد (Kohler et al., 2001). این شرایط محصول جانبی تلاش برای پیشرفت بوده و قابل حذف نیستند (Adamu and Nganje, 2010) و نیاز به مدیریت و ارزیابی دارند. این بررسی‌ها دو دسته‌اند: (۱) تکنولوژی‌های صحرائی که مخصوص یک مکان خاص هستند و (۲) مطالعات آزمایشگاهی که اطلاعاتی را برای شبیه‌سازی ریاضی و عددی فراهم می‌کنند و ابزار مهمی برای پیش‌بینی حرکت و سرانجام مایعات غیرآبی هستند (Jia et al., 1999). استفاده از روش اول به‌علت محدودیت‌های زمانی و مکانی، اطلاعات بسیار کم در مورد حرکت مواد در خاک و گران و زمان‌بر بودن، متداول نبوده و معمولاً روش دوم، یعنی مدل‌سازی انجام می‌گیرد (Pang et al., 2000; McGrath et al., 2010; Rudra et al., 2005). مدل‌های تحلیلی و عددی زیادی برای جریان آب و انتقال محلول توسعه یافته است که بیشتر آنها بر اساس حل عددی معادله ریچاردز برای توصیف جریان آب و حل تحلیلی یا عددی معادله فیکی توده‌ای-پخش برای توصیف انتقال محلول در سیستم اشباع-غیراشباع هستند (Zhu et al., 2009; Simunek et al., 2009; Pang et al., 2013). در بسیاری از مسائل، وقتی جریان آب غیرماندگار و خصوصیات خاک و شرایط اولیه غیریکنواخت باشد، راه‌حل‌های تحلیلی قابل استفاده نبوده و مدل‌های عددی به‌علت انعطاف‌پذیری نسبت به شرایط اولیه و مرزی، بیشتر به‌کار می‌روند (Zhu et al., 2013; Vanderborght, 2005).

در اکثر مطالعات، جریان در ناحیه غیراشباع خاک، عمودی و در ناحیه اشباع، افقی منظور می‌شود و معادلات یک‌بعدی برای توصیف شرایط جریان و

انتقال محلول در ناحیه غیراشباع مناسب هستند. آزمایش‌های صحرائی نیز درستی این فرض را تأیید می‌کنند (Sherlock et al., 1998; Romano et al., 1998). به‌طور کلی، فلاکس^۱ تغذیه در اعماق نزدیک سطح زمین تقریباً عمودی است و با نزدیک شدن به سطح آب زیرزمینی، یک تغییر در جهت جریان از عمودی به افقی به‌وجود می‌آید، اما این تغییر به‌طور ناگهانی در سطح آب زیرزمینی رخ نمی‌دهد (Connell, 2007). در ناحیه غیراشباع، سرعت جریان در جهت عمودی بسیار بزرگ‌تر از مقدار آن در جهت جانبی است و فلاکس توده‌ای عمودی غالب است. لذا نادیده گرفتن فلاکس توده‌ای جانبی می‌تواند معقول باشد. اما اگر اثر پخش قابل ملاحظه باشد، نادیده گرفتن پخش جانبی در ناحیه غیراشباع می‌تواند موجب کاهش دقت مدل‌سازی و بروز خطا گردد (Zhu et al., 2012). حتی در صورتی که پخش و جریان توده‌ای عرضی کوچک باشند، بازهم می‌توانند موجب انتقال جانبی شوند. به‌ویژه اگر شیب ناحیه غیراشباع قابل توجه باشد، جریان توده‌ای جانبی نقش برابر یا حتی بیشتری نسبت به جریان توده‌ای عمودی دارد (Zhu et al., 2013).

در مطالعات متعددی تأثیر شدت بارندگی یا آبیاری بر آبشویی مواد از ناحیه غیراشباع به ناحیه اشباع بررسی و نشان داده شده که بارندگی‌ها یا آبیاری‌های شدید موجب حرکت بیشتر و سریع‌تر مواد محلول از لایه‌های خاک و افزایش آنها در آب زیرزمینی می‌شوند (Pang et al., 1992; Edwards et al., 2000). زمان و مقدار بارندگی با ایجاد جریان‌های سریع از عوامل مهم در کنترل حرکت مواد به سمت آب‌های زیرزمینی هستند (Flury, 1996; Kladvik et al., 2001). مطالعات بسیاری نشان می‌دهند که مبدأ شکل‌گیری انتقال سریع آفت‌کش‌ها، نزدیک سطح خاک است (Leung et al., 2000). لذا بارندگی که به‌طور مستقیم بر لایه سطحی خاک اثر می‌گذارد، نقش مهمی در این باره دارد (McGrath et al., 2013).

¹ flux

قابل تنظیم بود. در قسمت بالای محفظه خاک و در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متری آن، یک سیستم شبیه‌ساز بارش شامل چهار لترال هر کدام دارای دو آبپاش (مدل ProMax QPHA-35، ساخت Systems Co. فشار کارکرد ۰/۰۲ L/s، شدت جریان ۱۰ psi) برای ایجاد بارش یکنواخت قرار داشتند. در پایین محفظه، دو مخزن برای تأمین آب و محلول با پمپ و دبی‌سنج مخصوص به خود وجود داشتند. شکل ۱ شماتیکی از محفظه خاک در حالت بدون شیب، محل قرارگیری زهکش‌ها و شماره آنها و نحوه تغذیه با استفاده از شبیه‌ساز بارش را نشان می‌دهد.

از محلول سدیم کلرید (NaCl) به‌عنوان یک ماده غیرواکنش دهنده در آزمایش‌ها استفاده شد. در هر آزمایش ۱۰۰۰ گرم NaCl در ۲۰۰ لیتر آب شهری به‌طور کامل حل شد. بنابراین غلظت محلول‌ها ۵ گرم بر لیتر بود. غلظت املاح آب شهری (۰/۲۲۵ گرم بر لیتر) بسیار کمتر از غلظت محلول‌ها بود و در نتایج آزمایش‌ها تأثیر قابل توجهی نداشت. لذا در اندازه‌گیری‌ها نادیده گرفته شد.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک را نشان می‌دهد. قبل از شروع هر آزمایش و سه روز بعد از آبرشویی و زهکشی مربوط به آزمایش قبلی، نمونه‌ای از خاک برداشته و از آن برای تعیین رطوبت حجمی، چگالی ظاهری و تخلخل خاک استفاده شد. رطوبت اندازه‌گیری شده قبل از تمام آزمایش‌ها تقریباً برابر با یکدیگر بود و در تمام شبیه‌سازی‌ها یک مقدار واحد برای آن وارد مدل شد. هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز به روش بار ثابت به‌دست آمد.

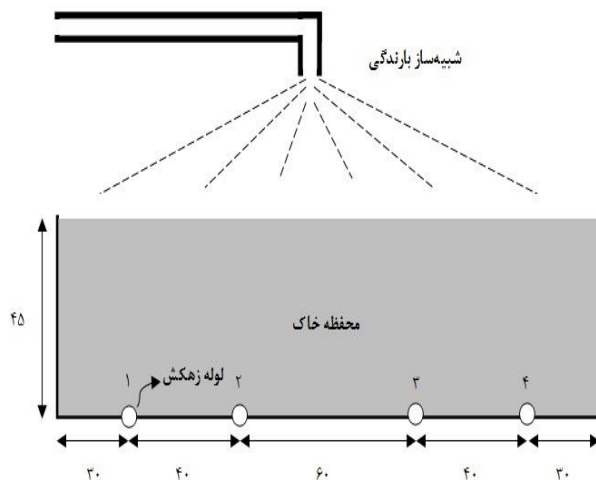
(al., 2010). با این وجود، نیاز به مطالعات بیشتری در این مورد است. برای مثال Dyson and White (1989) در مطالعه خود در یک خاک رسی با منافذ درشت نتیجه گرفتند که انتقال محلول در این خاک، مستقل از شدت آبیاری است. در حالی که معمولاً انتقال محلول در چنین خاکی وابسته به شدت پخش آب آبیاری در نظر گرفته می‌شود. لذا آنها اظهار داشتند که نیاز به مطالعات بیشتر و بررسی خاک‌های دیگر است.

هدف این مطالعه شبیه‌سازی و تحلیل انتقال محلول در حالت دوبعدی در خاک غیراشباع در شرایط آزمایشگاهی است. در مطالعات قبلی، آزمایش‌ها در تانک‌ها یا ستون‌های کوچک افقی یا قائم حاوی خاک انجام گرفته‌اند که در آنها محلول به‌صورت نقطه‌ای و در محل محدود و مشخصی از سطح خاک تزریق شده است. همچنین نمونه‌برداری از محلول تنها از یک نقطه خروجی انجام گرفته است. به‌منظور بررسی پدیده انتقال محلول در شرایطی نزدیک به وضعیت میدانی، محلول مورد نظر با استفاده از یک شبیه‌ساز بارش در تمام سطح خاک تزریق شد و نمونه‌برداری نیز از طریق چند زهکش زیرسطحی انجام گرفت. تأثیر شیب خاک و شدت تزریق در حرکت محلول در خاک بررسی و همچنین با استفاده از مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد.

مواد و روش‌ها

مدل آزمایشگاهی، محلول و خاک

آزمایش‌ها در یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه منابع آب دانشگاه تبریز انجام گرفت. این مدل، دستگاهی بود با یک محفظه فلزی مکعب مستطیلی به ابعاد ۲۰۰، ۱۰۰ و ۴۵ سانتی‌متر (به ترتیب طول، عرض و ارتفاع) که خاک در آن ریخته شد. در کف این محفظه و در راستای عرض آن، چهار لوله مشبک استیل به قطر ۲ و طول ۸۰ سانتی‌متر به‌عنوان زهکش قرار داشتند. شیب محفظه خاک با استفاده از دو اهرم



شکل (۱): شماتیکی از مدل فیزیکی در حالت بدون شیب. اندازه‌ها بر حسب سانتی‌متر هستند.

جدول (۱): مشخصات فیزیکی خاک

توزیع اندازه ذرات			هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/min)	تخلخل (%)	چگالی ظاهری (gr/cm ³)	رطوبت جمعی (%)
شن	سیلت (%)	رس				
۹۲/۸	۴/۲	۳	۰/۶۸	۴۷/۸۶	۱/۳۴	۱۶/۹۴

آزمایش‌ها در سه سناریو انجام گرفتند. سناریوی اول به‌عنوان سناریوی مبنا در نظر گرفته شد و هدف از انجام سایر سناریوها مقایسه با آن بود. به‌طوری که سناریوهای دوم و سوم به‌ترتیب به‌منظور بررسی تأثیر شیب و شدت تزریق بر حرکت محلول انجام شدند. در سناریوی اول، پس از دادن شیب ۲/۵ درصد به محفظه خاک، ۲۰۰ لیتر محلول در مخزن مربوط ریخته شد و پمپ آن در لحظه صفر با دبی ۴۰۰ لیتر بر ساعت (با توجه این که سطح خاک ۲ متر مربع بود، این دبی معادل شدت پخش ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه بود) شروع به‌کار کرد. شدت‌های تزریق طوری انتخاب شدند که کمتر از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک باشند و تا حد امکان از رواناب جلوگیری گردد. حدود ۱۵ دقیقه بعد از شروع تزریق، خروج محلول از هر چهار زهکش مشاهده شد. از این لحظه نمونه‌برداری از زهکش‌ها آغاز شد و تا پایان آزمایش با فواصل زمانی ۵ دقیقه ادامه یافت. پس از ۳۰ دقیقه تزریق، محلول

آزمایش‌های انتقال

ابتدا خاک، درون محفظه فلزی ریخته و با استفاده از آب شهری چندین بار آبشویی شد تا غلظت املاح داخل آن حتی‌الامکان برابر با غلظت آب شهری گردد. غلظت نمونه‌های گرفته شده از زهکش‌ها در طول آزمایش با استفاده از EC متر (مدل AZ-86501، ساخت تایوان) اندازه‌گیری شد. این دستگاه، هدایت الکتریکی (EC) را برحسب میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر و غلظت محلول (c) را بر حسب گرم بر لیتر با رابطه $c = 0.5EC$ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نشان می‌داد.

پس از اتمام عمل آبشویی، به‌مدت سه روز اجازه داده شد تا خاک زهکشی شود. این عمل موجب فشردگی خاک می‌شود (Huang et al., 1995). به‌طوری که ارتفاع توده خاک تقریباً به ۴۰ سانتی‌متر رسید. در شبیه‌سازی‌ها نیز این مقدار به‌عنوان ارتفاع به مدل معرفی شد.

K_{ij}^A ، (T) ، زمان t ، مختصات مکانی (L) ، $(j = 1, 2)$ مؤلفه‌های تانسور ناهمروندی بی‌بعد K و K^A تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع (LT^{-1}) است. در این مطالعه از مدل ون گنوختن-معلم (van Genuchten, 1980) برای توصیف خصوصیات هیدرولیکی خاک استفاده شد:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha|h]^m} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^{0.5} (1 - (1 - S_e^{1/m})^m)^2 \quad (3)$$

که در آنها، α و n پارامترهای شکل، $S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ اشباع مؤثر، $m = 1 - 1/n$ ، θ_r و θ_s به ترتیب مقادیر آب باقیمانده و اشباع و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع است. با وارد کردن درصدهای شن، سیلت و رس و چگالی ظاهری در مدل ROSETTA (Schaap et al., 2001) که در HYDRUS-2D تعبیه شده است، پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم پیش‌بینی شد. اما مقدار تخلخل اندازه‌گیری شده و مقدار K_s آزمایش بار ثابت به ترتیب جایگزین مقادیر پیش‌بینی شده θ_s و K_s شدند.

انتقال محلول

انتقال محلول توسط ADE بیان می‌شود (Bear, 1972):

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_i c}{\partial x_i} \quad (4)$$

که در آن، c غلظت محلول (ML^{-3}) ، q_i لامین مؤلفه فلاکس حجمی (LT^{-1}) و D_{ij} تانسور ضریب پخش (L^2T^{-1}) بوده و به این صورت تعریف می‌شود:

$$\theta D_{ij} = a_T |q| \delta_{ij} + (a_L - a_T) \frac{q_i q_j}{|q|} + \theta D_w \tau_w \delta_{ij} \quad (5)$$

که در آن، D_w ضریب انتشار مولکولی در آب آزاد (L^2T^{-1}) ، τ_w عامل انحنا در خاک (بی‌بعد)، $|q|$ قدر

در مخزن به اتمام رسید و بلافاصله پمپ مخزن حاوی آب شهری با همان شدت شروع به کار کرد و تا دقیقه ۱۸۰ ادامه یافت. یعنی تا زمانی که غلظت محلول‌های خروجی از زهکش‌ها کم‌کم نزدیک به غلظت آب شهری شدند. در سناریوی دوم، مقدار محلول و شدت تزریق همانند سناریوی اول بود، اما محفظه خاک به صورت بدون شیب قرار گرفت. زمان شروع رخنه و پایان آزمایش همانند سناریوی اول بود و نمونه‌برداری‌ها بین دقایق ۱۵ و ۲۴۰ انجام گرفتند. در سناریوی سوم، مقدار محلول همانند دو سناریوی قبل بود. محفظه خاک به صورت شیب‌دار اما دبی تزریق ۶۰۰ لیتر بر ساعت (۰/۵ سانتی‌متر بر دقیقه) بود. خروج محلول از زهکش‌ها ۱۰ دقیقه بعد از شروع تزریق اتفاق افتاد و غلظت آنها تقریباً در دقیقه ۱۶۰ با غلظت آب شهری برابر شد. لذا نمونه‌برداری‌ها بین این دو زمان با فواصل زمانی ۵ دقیقه انجام شد. در این سناریو بعد از ۲۰ دقیقه تزریق محلول، پمپ آن خاموش و پمپ آب شهری با همان دبی روشن شد و تا دقیقه ۱۲۰ کار کرد.

شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی آزمایش‌ها از مدل HYDRUS-2D استفاده شد. این مدل، معادله ریچاردز را برای جریان آب و معادله جریان توده‌ای-پخش^۱ (ADE) را برای انتقال محلول به روش المان محدود حل می‌کند.

جریان آب

جریان آب در یک محیط متخلخل دوبعدی، همدم و صلب با درجه اشباع متغیر با معادله ریچاردز بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{ij}^A \right) \right] - S \quad (1)$$

که در آن، θ مقدار حجمی آب (L^3L^{-3}) ، h فشاری (L) ، S یک مؤلفه تخلیه (T^{-1}) ،

¹ advection-dispersion equation

گرم بر لیتر به عنوان شرایط اولیه محدودده مورد نظر به ترتیب برای جریان آب و انتقال محلول در نظر گرفته شدند.

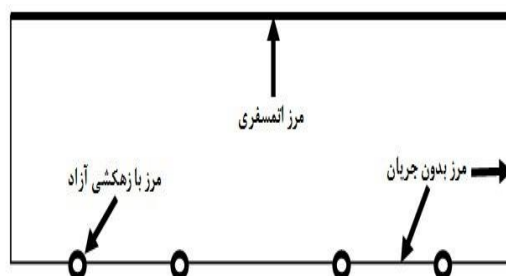
در مورد جریان آب، محل ورود جریان (بارش) مرز اتمسفری و محل خروج آن (زهکشها) به دلیل عدم وجود مکش، مرز با زهکشی آزاد یا گرادیان بار فشاری صفر منظور شد. در مورد انتقال محلول، شرط مرزی نوع سوم (نوع جریان) در هر دو محل اعمال گردید. اعمال شرط مرزی نوع اول (نوع غلظت) در مرز ورودی منجر به ایجاد خطای قابل توجهی در توازن جرم می شود و در این مرز باید از شرط مرزی نوع جریان استفاده شود (van Genuchten and Parker, 1984; Toride et al., 1995). علاوه بر قسمت های بین زهکشها در کف محفظه خاک که هیچ جریانی در آنها وجود نداشت، در دو مرز عمودی نیز به علت محدودیت در اندازه مدل آزمایشگاهی و با فرض وجود جریان متقارن و عدم وجود گرادیان در این مرزها شرط مرزی بدون جریان منظور شد (شکل ۲).

مطلق فلاکس حجمی آب ($L T^{-1}$)، δ_{ij} دلتای کرونگر (برابر یک برای $i = j$ و برابر صفر برای $i \neq j$) و a_L و a_T به ترتیب پخشیدگی طولی و عرضی (L) هستند. پخشیدگی، ثابت مربوط به محیط بوده و مستقل از شدت جریان است (Jacques et al., 2002).

در بسیاری از مطالعات، پخشیدگی طولی برابر با یکدهم طول انتقال (Siyal, Phogat et al., 2011)؛ $a_T = 0.1$ (et al., 2013) و پخشیدگی عرضی برابر با یکدهم پخشیدگی طولی (Amin et al., Hanson et al., 2006)؛ $a_L = 0.1$ (al., 2014) در نظر گرفته شده است. در این مطالعه طول انتقال همان سطح تا کف توده خاک است و لذا پخشیدگی طولی برابر با ۴ سانتی متر (یعنی یکدهم ارتفاع توده خاک) و پخشیدگی عرضی برابر با ۰/۴ سانتی متر منظور شد و از روش های کرنک-نیکلسون و المان های محدود گالرکین برای حل معادله ۴ استفاده گردید.

شرایط اولیه و مرزی

رطوبت حجمی ۱۶/۹۴ درصد و غلظت ۰/۲۲۵



شکل (۲): شرایط مرزی محدودده مورد نظر

خروجی مشاهداتی، از روش حل معکوس علاوه بر پارامترهای هیدرولیکی خاک، برای تخمین ضرایب پخشیدگی طولی (a_L) و عرضی (a_T) در حالت های شیب دار و بدون شیب استفاده شد. مقادیر این دو ضریب بعد از بهینه سازی در جدول ۲ آورده شده است.

بهینه سازی معکوس

مدل HYDRUS-2D قادر است به روش حل معکوس، پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال محلول را با استفاده از الگوریتم مارکوارت-لونبرگ و با اخذ داده های مشاهداتی بهینه سازی کند. در این مطالعه بعد از اجرای اول مدل، برای بالا بردن دقت نتایج شبیه سازی، با در دست داشتن غلظت جریان های

جدول (۲): مقادیر بهینه ضرایب پخشیدگی طولی و

عرضی

حالت	حالت	
شیب‌دار	حالت بدون شیب	
۴/۱۱۴	۳/۰۰۲	a_L
۱/۰۶۴	۰/۲	a_T

دقت مقدار متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده است. EF منفی (بین $-\infty$ و صفر) موقعی اتفاق می‌افتد که دقت مقدار متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده بیشتر از دقت مدل باشد. مقدار مناسب برای CRM صفر است. مقدار مثبت و منفی CRM به ترتیب نشان دهنده تخمین بیشتر و کمتر مدل نسبت به مشاهدات است.

نتایج و بحث

نتایج آزمایش

خاک شیب‌دار - شدت تزریق ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه

غلظت بیشینه مشاهده شده در زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب در زمان‌های ۹۵، ۹۰، ۹۰ و ۸۰ دقیقه پس از شروع تزریق و برابر ۳/۷۴۷، ۳/۸۲۳، ۳/۸۸۲ و ۳/۹۰۰ گرم بر لیتر بود. از ابتدا تا انتهای شیب (از زهکش ۱ تا زهکش ۴) مقدار غلظت بیشینه افزایش و زمان رسیدن به آن کاهش یافت. در آزمایش Yu et al (2011) بیشترین غلظت ماده، مربوط به زهکش ابتدای شیب بود، زیرا تزریق به صورت نقطه‌ای و در ابتدای شیب انجام گرفت و لذا غلظت محلول در ابتدای شیب بیشتر بود (منبع تزریق در ابتدا بود). از طرفی بارش آب خالص به‌طور همزمان با تزریق محلول موجب رقیق شدن محلول تا رسیدن آن به بخش‌های دیگر شد. در حالی که در این مطالعه تزریق محلول به صورت غیرنقطه‌ای و از روی تمام سطح خاک به‌طور مساوی انجام گرفت. بارش آب خالص نیز به‌طور همزمان با آن نبود و قبل از رقیق شدن محلول مقداری از آن از زهکش‌ها خارج شد.

معیارهای عملکرد مدل

جهت بررسی عملکرد مدل از چند معیار آماری متداول زیر استفاده شد:
ضریب تبیین:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (6)$$

جذر میانگین مربعات خطا:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - P_i)^2}{n}} \quad (7)$$

ضریب کارایی نش-ساتکلیف:

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

ضریب تجمعی باقیمانده:

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (9)$$

که در آنها، P_i و O_i مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده و \bar{P} و \bar{O} 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. EF می‌تواند بین $-\infty$ و یک قرار بگیرد. EF نزدیک به یک بیانگر دقت بالای مدل و تطابق زیاد بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده و EF مساوی صفر نشانگر برابر بودن دقت مدل با

قطرات باران (به‌ویژه در قسمت‌های نزدیک لبه‌های محفظه خاک) در آزمایش (Yu et al (2011) می‌تواند دلیل دیگری برای این تفاوت باشد. زیرا در این مطالعه، در اطراف محفظه خاک دیواره‌هایی برای جلوگیری از پاشش ذرات محلول به بیرون وجود داشت.

خاک بدون شیب - شدت تزریق ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه

غلظت بیشینه در هر چهار زهکش ۹۰ دقیقه پس از شروع تزریق و مقدار آن برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ تقریباً مساوی و به ترتیب ۳/۹۹۸، ۳/۹۳۱، ۳/۸۹۹ و ۳/۹۱۳ گرم بر لیتر بود. با وجود شیب صفر و شدت تزریق یکسان در تمام سطح خاک، مقادیر غلظت بیشینه زهکش‌ها حدود چندصدم با یکدیگر اختلاف داشتند که این اختلاف می‌تواند به سه دلیل باشد: (۱) خطا در اندازه‌گیری، (۲) گرفتگی بعضی از آبپاش‌ها در حین آزمایش توسط NaCl و در نتیجه کاهش یکنواختی بارش و (۳) وجود ناهمگنی در داخل خاک که موجب شد زمان و مسیر حرکت محلول برای رسیدن از سطح خاک تا تمام زهکش‌ها مشابه هم‌دیگر نباشد. زمان به حداقل رسیدن غلظت خروجی از چهار زهکش نیز تقریباً یکسان بود و در انتهای آزمایش، غلظت محلول خروجی از زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۰/۲۳۰، ۰/۲۲۶، ۰/۲۲۶ و ۰/۲۲۷ گرم بر لیتر بود. لذا با ادامه زمان نمونه‌برداری، دنباله منحنی‌های رخنه چهار زهکش تقریباً یکسان می‌شد. حجم کل آب خروجی از زهکش‌ها حدود ۱۰۵۹ لیتر بود که ۲۶۴ لیتر آن (۲۴/۹۳ درصد) از زهکش ۱، ۲۶۵/۵ لیتر (۲۵/۰۷ درصد) از زهکش ۲، ۲۶۵/۵ لیتر (۲۵/۰۷ درصد) از زهکش ۳ و ۲۶۴ لیتر (۲۴/۹۳ درصد) از زهکش ۴ خارج شد و غلظت آنها به ترتیب برابر با ۰/۹۱۷، ۰/۹۱۹، ۰/۹۱۶ و ۰/۹۲۲ گرم بر لیتر بود. حجم کل جریان خروجی و غلظت آن از ابتدا تا انتهای شیب تقریباً یکسان بود. کل NaCl خارج شده از زهکش‌ها حدود ۹۷۲/۶۹ گرم (معادل

زمان رسیدن غلظت خروجی به مقدار حداقل (یعنی غلظت آب شهری) نیز از ابتدا تا انتهای شیب کاهش یافت. در آخرین زمان نمونه‌برداری (زمانی که غلظت محلول‌های رخنه شده تقریباً برابر با غلظت آب شهری شد)، غلظت جریان خروجی از زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۰/۲۹۱، ۰/۲۵۳، ۰/۲۳۲ و ۰/۲۲۸ گرم بر لیتر بود. از ابتدا تا انتهای آزمایش (از دقیقه صفر تا دقیقه ۲۴۰) در مجموع حدود ۱۰۶۹ لیتر آب از زهکش‌ها خارج شد که سهم زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب حدود ۲۴۲، ۲۶۳/۵، ۲۷۰ و ۲۹۳/۵ لیتر معادل ۲۲/۶۴، ۲۴/۶۵، ۲۵/۲۶ و ۲۷/۴۶ درصد بود. غلظت کل جریان خروجی از این زهکش‌ها به ترتیب برابر با ۰/۸۶۲، ۰/۸۶۸، ۰/۸۷۴ و ۰/۹۰۲ گرم بر لیتر بود. حجم جریان خروجی و همچنین غلظت آن از ابتدا تا انتهای شیب افزایش یافت. با استفاده از حجم جریان و غلظت آن، مقدار کل NaCl بر حسب گرم به دست آمد. در مجموع حدود ۹۳۸/۱۷ گرم NaCl (معادل ۹۳/۸۲ درصد کل NaCl تزریق شده) از زهکش‌ها خارج شد که این مقدار به علت پایان زمان آزمایش قبل از خروج کل NaCl از زهکش‌ها و احتمالاً به دلیل وجود خطا در اندازه‌گیری، کمتر از ۱۰۰ درصد بود. از این میزان حدود ۲۰۸/۵۹ گرم (۲۲/۲۳ درصد) از زهکش ۱، ۲۲۸/۷۹ گرم (۲۴/۳۹ درصد) از زهکش ۲، ۲۳۶/۰۱ گرم (۲۵/۱۶ درصد) از زهکش ۳ و ۲۶۴/۷۸ گرم (۲۸/۲۲ درصد) از زهکش ۴ خارج شد. لذا مقدار NaCl خروجی از زهکش‌ها از ابتدا تا انتهای شیب افزایش یافت. به‌هرحال مقدار آن در مقایسه با مقدار بروماید خروجی از زهکش‌ها در آزمایش (Yu et al (2011) که تنها حدود ۲۹ درصد کل بروماید بود، بسیار بیشتر است. شاید یک دلیل این تفاوت آن باشد که در آزمایش آنها رواناب سطحی فرایند غالب در انتقال محلول بود و مقدار زیادی از بروماید توسط رواناب حمل می‌شد، اما در این مطالعه شدت بارش طوری تنظیم شد که تا حد امکان از ایجاد رواناب جلوگیری گردد. همچنین پاشش مقداری از بروماید به خارج از محفظه خاک در اثر برخورد

تأثیر شیب

در حالت شیب‌دار برخلاف حالت بدون شیب، غلظت بیشینه و غلظت حداقل برای تمام زهکش‌ها در یک زمان یکسان به‌دست نیامد و از ابتدا تا انتهای شیب زمان رسیدن به آن کاهش یافت. زیرا در خاک شیب‌دار، محلول علاوه بر حرکت عمودی دارای حرکت افقی در جهت شیب نیز بوده و شیب توده خاک موجب شده که هرچه از ابتدا (زهکش ۱) به سمت انتهای شیب (زهکش ۴) حرکت می‌کنیم خروج جریان زودتر اتفاق بیفتد. لذا در ابتدای آزمایش که تنها تزریق محلول انجام گرفت، محلول بیشتر به سمت زهکش ۴، سپس ۳ و به‌همین ترتیب به سمت زهکش‌های ۲ و ۱ حرکت کرد و در نتیجه، غلظت بیشینه نیز ابتدا در زهکش ۴ و سپس در زهکش‌های ۳، ۲ و ۱ مشاهده شد. همین روند با قطع تزریق محلول و شروع تزریق آب شهری نیز طی شد. به‌عبارتی حرکت افقی آب در جهت شیب ابتدا باعث رقیق‌تر شدن جریان خروجی از زهکش ۴ و سپس زهکش‌های ۳، ۲ و ۱ شد. بنابراین، غلظت حداقل نیز در زهکش ۴ زودتر و در زهکش ۱ دیرتر از زهکش‌های دیگر مشاهده شد. در توده خاک بدون شیب، جریان بیشتر در جهت عمودی بود و به‌علت عدم وجود حرکت افقی قابل ملاحظه، تفاوتی در زمان وقوع این غلظت‌ها مشاهده نشد.

مقدار غلظت بیشینه در حالت شیب‌دار از ابتدای شیب تا انتهای آن افزایش یافت، اما در حالت بدون شیب برای تمام زهکش‌ها تقریباً یکسان بود. در حالت شیب‌دار برخلاف حالت بدون شیب، دنباله هر چهار منحنی رخنه یکسان نبود. حجم جریان و مقدار NaCl خروجی در حالت شیب‌دار از ابتدا تا انتهای شیب افزایش یافت، اما در حالت بدون شیب برای تمام زهکش‌ها تقریباً برابر بود. لذا در حالت شیب‌دار در مقایسه با حالت بدون شیب، انتقال محلول در جهت جانبی قابل ملاحظه بوده و موجب تفاوت توزیع غلظت در بخش‌های مختلف شیب خاک شده است.

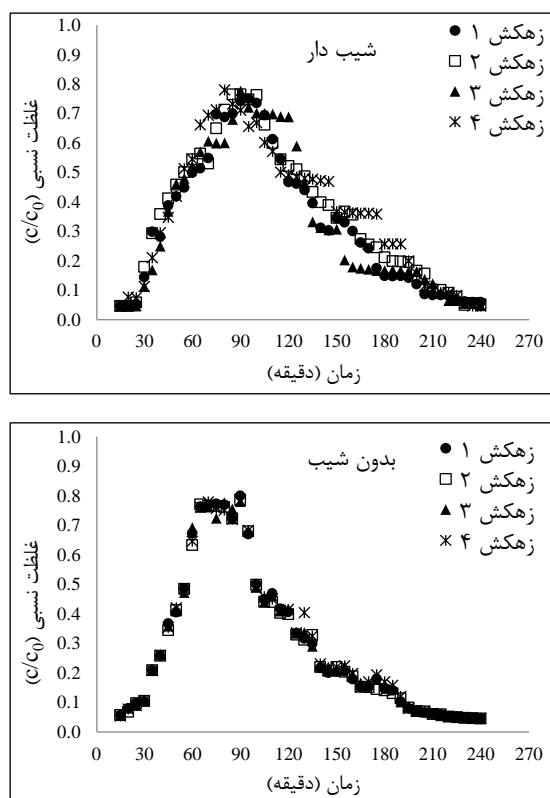
۹۷/۲۷ درصد NaCl تزریق شده) بود. از این میزان سهم زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب حدود ۲۴۲/۱۸ گرم (۲۴/۹۰ درصد)، ۲۴۳/۸۷ گرم (۲۵/۰۷ درصد)، ۲۴۳/۱۷ گرم (۲۵/۰۰ درصد) و ۲۴۳/۴۷ گرم (۲۵/۰۳ درصد) بود. لذا مقدار NaCl خروجی از تمام زهکش‌ها تقریباً یکسان بود.

خاک شیب‌دار - شدت تزریق ۰/۵ سانتی‌متر بر دقیقه

غلظت بیشینه در زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب مربوط به زمان‌های ۵۰، ۴۵، ۴۰ و ۴۰ دقیقه پس از شروع تزریق و برابر با ۳/۷۶۵، ۳/۸۵۵، ۳/۹۰۰ و ۳/۹۰۵ گرم بر لیتر بود. از ابتدا تا انتهای شیب، مقدار این غلظت افزایش و زمان رسیدن به آن کاهش یافت. زمان به حداقل رسیدن غلظت نیز از ابتدا تا انتهای شیب کاهش یافت و مقدار غلظت در آخرین زمان نمونه‌برداری برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب برابر با ۰/۲۳۹، ۰/۲۳۳، ۰/۲۲۷ و ۰/۲۲۲ گرم بر لیتر بود. زمان آزمایش ۱۶۰ دقیقه بود که در این مدت، کل آب خروجی حدود ۱۱۲۳/۵ لیتر بود. از زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به‌ترتیب ۲۶۸/۵، ۲۷۵، ۲۸۴/۵ و ۲۹۵/۵ لیتر آب خارج شد. درصد متناظر این حجم‌های خروجی به‌ترتیب ۲۳/۹۰، ۲۴/۴۸، ۲۵/۳۲ و ۲۶/۳۰ و غلظت آنها به‌ترتیب برابر با ۰/۸۵۳، ۰/۸۶۹، ۰/۸۷۲ و ۰/۸۷۴ گرم بر لیتر بود. لذا حجم آب خروجی و غلظت آن از ابتدا تا انتهای شیب افزایش یافت. در مجموع ۹۷۴/۳۶ گرم NaCl معادل ۹۷/۴۴ درصد NaCl تزریق شده، خارج شد که ۲۲۹/۱ گرم (۲۳/۵۱ درصد) آن از زهکش ۱، ۲۳۸/۹۸ گرم (۲۴/۵۳ درصد) آن از زهکش ۲، ۲۴۸/۰۹ گرم (۲۵/۴۶ درصد) آن از زهکش ۳ و ۲۵۸/۱۹ گرم (۲۶/۵۰ درصد) آن از زهکش ۴ بود. بنابراین مقدار NaCl خروجی نیز از ابتدا تا انتهای شیب افزایش یافت.

عمودی، غلظت نسبی را نشان می‌دهد که در آن، غلظت محلول خروجی در هر زمان (C) بر غلظت اولیه محلول ورودی (C_0) تقسیم شده است.

این در تطابق با نظریه (Zhu et al. (2013) است که در محیط‌های شیب‌دار، جریان توده‌ای جانبی نقشی برابر و یا حتی مهم‌تر از جریان توده‌ای عمودی دارد. منحنی‌های رخنه در شکل ۳ تفاوت بین دو حالت شیب‌دار و بدون شیب را بهتر نشان می‌دهند. محور



شکل (۳): مقایسه منحنی‌های رخنه در حالت‌های شیب‌دار و بدون شیب

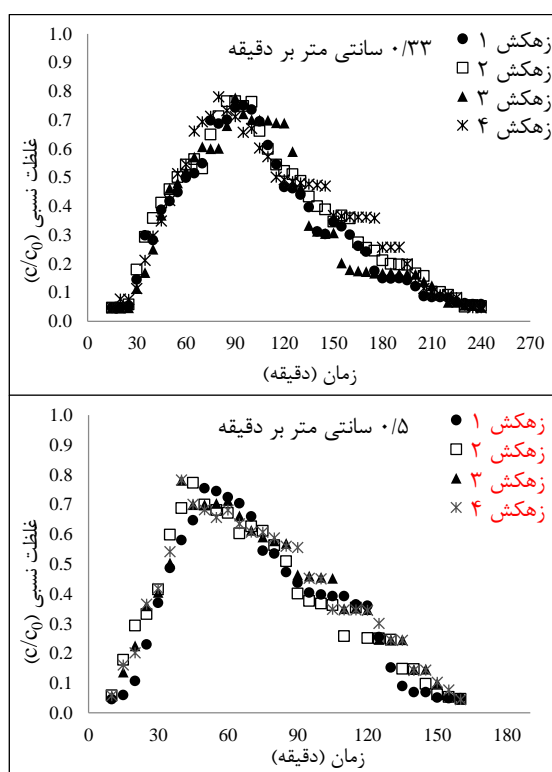
زهکش‌ها با افزایش شدت تزریق، غلظت بیشینه افزایش یافت. زمان مشاهده غلظت حداقل نیز تحت هر دو شدت تزریق از ابتدا تا انتهای شیب، روند مشابه نزولی داشت، اما این زمان برای شدت $0/5$ سانتی‌متر بر دقیقه حدود ۸۰ دقیقه زودتر فرا رسید. Pot et al. (2005) متوجه وقوع زودهنگام غلظت بیشینه علف‌کش‌ها با افزایش شدت بارندگی شدند و دلیل آن را میان‌بر زدن بخش زیادی از منافذ ریز خاک توسط علف‌کش‌ها و انتقال سریع آنها از منافذ درشت تحت بارندگی شدیدتر بیان نمودند. در مطالعه Wang et al. (2010) نیز با افزایش شدت پخش آب آبیاری،

تأثیر شدت تزریق

شدت تزریق $0/5$ سانتی‌متر بر دقیقه در مقایسه با $0/33$ سانتی‌متر بر دقیقه موجب خروج سریع‌تر محلول از زهکش‌ها شد. به طوری که زمان شروع رخنه از زهکش‌ها حدود ۵ دقیقه کاهش یافت. همچنین غلظت بیشینه تحت شدت $0/5$ سانتی‌متر بر دقیقه در تمام زهکش‌ها نسبت به $0/33$ سانتی‌متر بر دقیقه حدود ۴۰ تا ۵۰ دقیقه زودتر مشاهده شد. زمان رسیدن به غلظت بیشینه از ابتدا تا انتهای شیب تحت هر دو شدت تزریق، روند نزولی و مقدار این غلظت، روند صعودی داشت، با این تفاوت که در تمام

آزمایش تحت شدت $0/5$ سانتی‌متر بر دقیقه زودتر مشاهده شد و لذا نمونه‌برداری ادامه نیافت. برای مقایسه بهتر رفتار رخنه تحت دو شدت تزریق، شکل ۴ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش شدت تزریق، منحنی‌ها به سمت چپ تمایل پیدا کرده‌اند. به‌طور کلی تفاوت‌ها را می‌توان به تسریع انتقال محلول در اثر افزایش شدت تزریق نسبت داد.

مقدار آبشویی نیترات و زهکشی به‌طور قابل توجهی افزایش و زمان رخنه به اعماق پایین‌تر خاک کاهش یافت. آنها همچنین دریافتند که آبشویی نیترات در سال‌های با بارندگی‌های شدید، بیشتر است. حجم جریان و مقدار NaCl خروجی تحت هر دو شدت تزریق از ابتدا تا انتهای شیب افزایش یافت، با این تفاوت که تحت شدت $0/33$ سانتی‌متر بر دقیقه تا زمان قطع نمونه‌برداری، حجم بیشتری آب خارج شد. دلیل این اتفاق آن است که غلظت حداقل در



شکل (۴): مقایسه منحنی‌های رخنه در شدت‌های تزریق $0/33$ و $0/5$ سانتی‌متر بر دقیقه

نتایج شبیه‌سازی

قبل از بهینه‌سازی معکوس

خاک شیب‌دار - شدت تزریق ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه

مدل، اولین رخنه را ۵ دقیقه دیرتر (دقیقه ۲۰) تخمین زد. غلظت بیشینه در تمام زهکش‌ها ۷۵ دقیقه پس از شروع تزریق برآورد شد که زودتر از زمان مشاهده‌ای بود. مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت بیشینه در تمام زهکش‌ها نسبت به مقادیر مشاهده‌ای کمتر و برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۳/۲۷۵، ۳/۳۵۰، ۳/۳۲۰ و ۳/۳۸۵ گرم بر لیتر بود. با وجود این که دو زهکش میانی با افزایش شیب روند صعودی نشان ندادند، ابتدا و انتهای شیب دارای کمترین و بیشترین غلظت بیشینه بودند و این در تطابق با مشاهدات است. همچنین غلظت شبیه‌سازی شده برای محلول خروجی از هر چهار زهکش در انتهای آزمایش تا رسیدن به مقدار حداقل تا حدودی فاصله داشت. بدین معنی که در شبیه‌سازی هنوز مقداری از NaCl در زمان انتهایی آزمایش در خاک باقی مانده بود. در حالی که در نمونه‌برداری‌های انتهای آزمایش، غلظت‌ها تقریباً برابر با آب شهری بودند و محلولی در خاک باقی نمانده بود. دلیل این تفاوت احتمالاً آن است که دقت EC متر مورد استفاده در حد یک‌هزارم گرم بر لیتر و دقت مدل بیشتر از آن بود.

خاک بدون شیب - شدت تزریق ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه

اولین رخنه توسط مدل ۵ دقیقه دیرتر از زمان مشاهده‌ای (دقیقه ۲۰) تخمین زده شد. غلظت بیشینه در هر چهار زهکش زودتر از آن چه مشاهدات نشان دادند، شبیه‌سازی شد. این غلظت برای چهار زهکش در شبیه‌سازی در زمان‌های ۷۰ تا ۷۵ دقیقه بوده و در مدل نیز همانند آزمایش، زمان رسیدن به غلظت بیشینه در تمام زهکش‌ها تقریباً یکسان بود. مدل مقادیر این غلظت را کمتر از مقادیر مشاهداتی و

برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۳/۲۶۰، ۳/۳۹۰، ۳/۳۸۵ و ۳/۳۷۵ گرم بر لیتر تخمین زد. بنابراین برای تمام زهکش‌ها غلظت بیشینه شبیه‌سازی شده مانند مقادیر مشاهده شده تقریباً یکسان بود و از این نظر نتایج مدل و آزمایش با یکدیگر مطابقت دارند. در حالت بدون شیب نیز مشابه حالت شیب‌دار، غلظت‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل در زمان انتهایی هنوز به مقدار حداقل نرسیده و اندکی با مشاهدات اختلاف داشتند.

خاک شیب‌دار - شدت تزریق ۰/۵ سانتی‌متر بر دقیقه

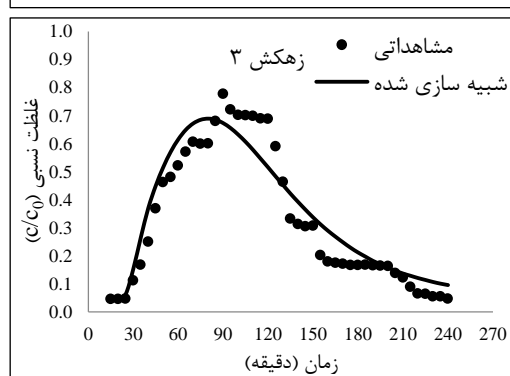
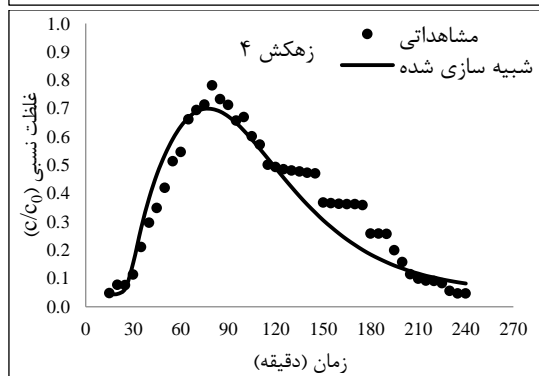
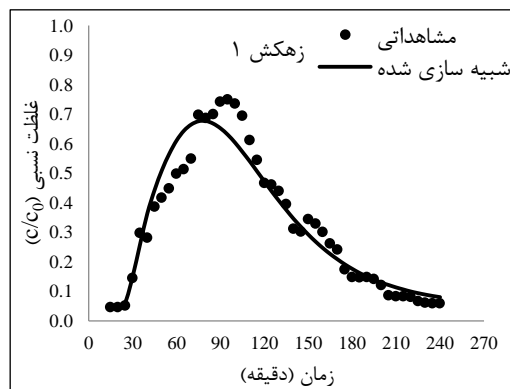
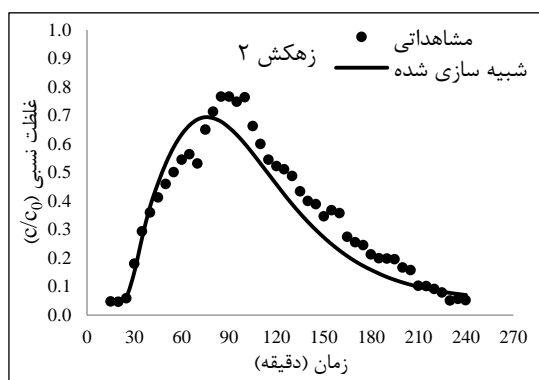
اولین رخنه ۱۰ دقیقه دیرتر (دقیقه ۲۰) برآورد شد. مدل، زمان رسیدن به غلظت بیشینه را در تمام زهکش‌ها دیرتر از زمان مشاهداتی و بین دقایق ۶۵ تا ۷۰ تخمین زد، اما همچون آزمایش این زمان را برای شدت تزریق ۰/۵ سانتی‌متر بر دقیقه زودتر از ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه نشان داد. مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت بیشینه کمتر از مقادیر مشاهداتی و برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۳/۳۷۰، ۳/۴۳۵، ۳/۴۰۵ و ۳/۴۷۰ گرم بر لیتر بود. بنابراین در شبیه‌سازی نیز مانند مشاهدات روند صعودی مقدار غلظت بیشینه از ابتدا تا انتهای شیب تقریباً رعایت شد. مدل در این حالت نیز مشابه دو حالت قبل در تخمین غلظت‌های حداقل ناموفق بود. نتایج شبیه‌سازی نسبت به دو حالت قبل تطابق کمتری با نتایج آزمایشگاهی داشت. این موضوع بیشتر به دلیل عدم موفقیت مدل در تخمین غلظت‌های حداقل در انتهای زمان آزمایش است، زیرا در این حالت اختلاف نتایج مدل با مشاهدات در مورد غلظت‌های حداقل نسبت به دو حالت قبلی اندکی بیشتر بود.

بهینه‌سازی معکوس

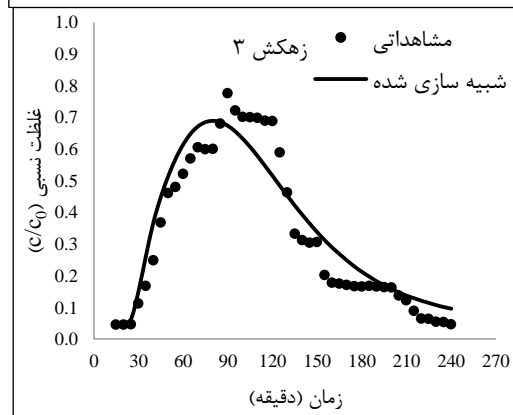
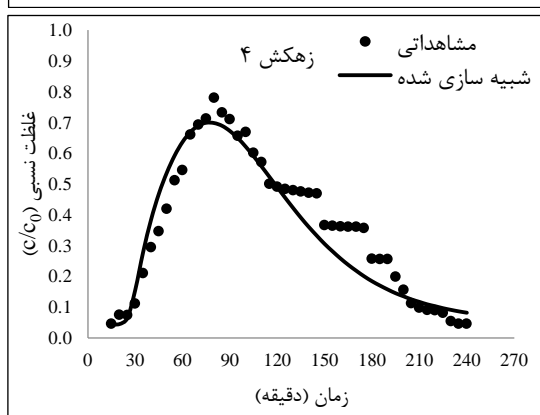
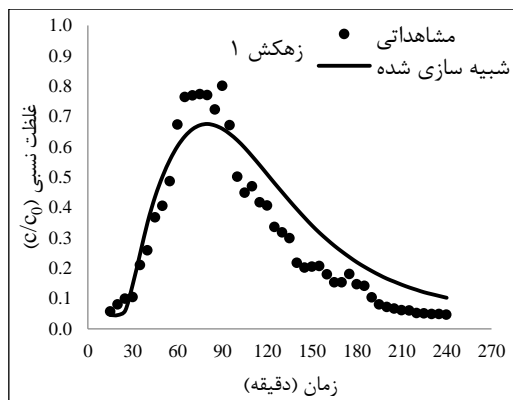
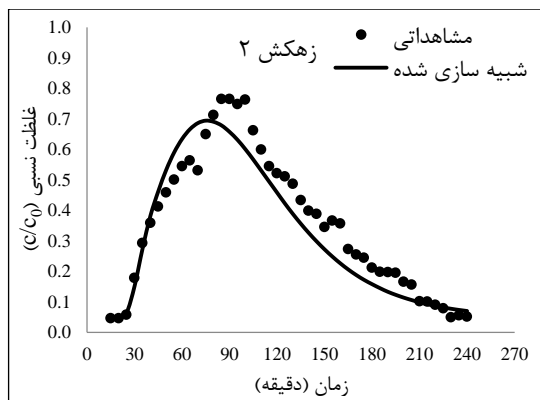
شکل ۵ منحنی‌های رخنه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بعد از بهینه‌سازی معکوس را نشان

تا ۸۰ تمایل داد و به زمان مشاهده‌ای نزدیک‌تر کرد. مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت بیشینه بعد از بهینه‌سازی در مقایسه با قبل افزایش یافت و به مقادیر مشاهداتی نزدیک‌تر شد. این غلظت برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۳/۳۷۵، ۳/۵۰۰، ۳/۵۰۰ و ۳/۵۰۰ گرم بر لیتر شبیه‌سازی شد که از نظر برابری این چهار مقدار نیز عملکرد مدل بهبود یافت. برای حالت شیب‌دار تحت شدت تزریق ۰/۵ سانتی‌متر بر دقیقه، مدل هم زمان و هم مقادیر غلظت اولین رخنه را بهتر از قبل شبیه‌سازی کرد. بهینه‌سازی، این زمان را به دقایق ۶۰ تا ۶۵ تمایل داد و به زمان مشاهده‌ای نزدیک‌تر کرد. مقدار غلظت بیشینه در زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۳/۲۱۵، ۳/۳۰۰، ۳/۲۵۵ و ۳/۳۲۵ گرم بر لیتر تخمین زده شد. در هر سه حالت، بهینه‌سازی موجب تطابق بیشتر دنباله منحنی‌های رخنه شبیه‌سازی شده با مشاهداتی شد.

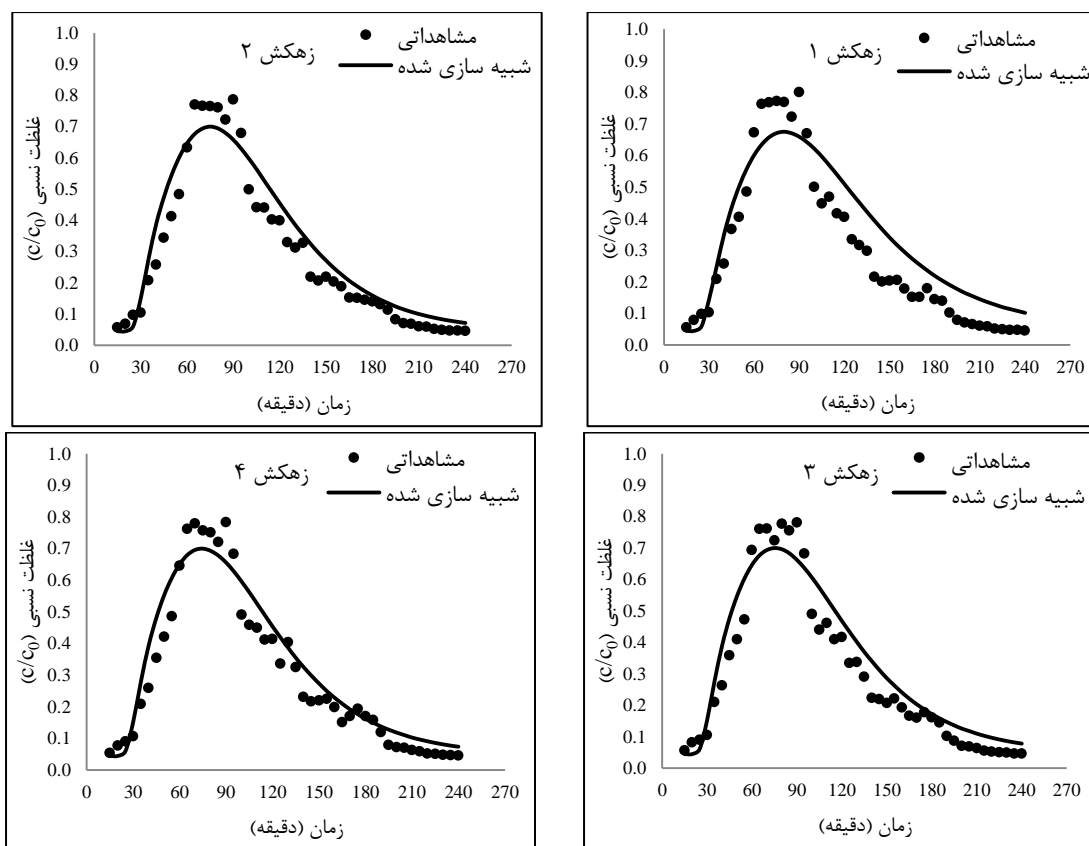
می‌دهد. در حالت شیب‌دار با شدت تزریق ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه مطابقت مقادیر شبیه‌سازی شده غلظت رخنه اول با مقادیر مشاهداتی بسیار بیشتر شد. زمان رسیدن به غلظت بیشینه پس از بهینه‌سازی تا دقیقه ۸۰ تمایل پیدا کرد و نسبت به قبل از بهینه‌سازی به مشاهدات نزدیک‌تر شد. این زمان برخلاف نتایج قبل از بهینه‌سازی که ثابت بود، از ابتدا تا انتهای شیب کاهش یافت که این در تطابق با مشاهدات است. مقادیر این غلظت نیز نسبت به قبل از بهینه‌سازی افزایش و اختلاف آنها در تمام زهکش‌ها با مقادیر آزمایشگاهی کاهش یافت. مقدار غلظت بیشینه برای زهکش‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۳/۳۸۵، ۳/۴۷۰، ۳/۴۴۵ و ۳/۴۹۵ گرم بر لیتر تخمین زده شد. از نظر افزایش مقدار غلظت بیشینه از ابتدا تا انتهای شیب، نتایج مدل با نتایج آزمایش مطابقت داشت. برای حالت بدون شیب، مدل پس از بهینه‌سازی، در تخمین زمان رسیدن به غلظت بیشینه اندکی بهتر از قبل عمل کرد. بهینه‌سازی، این زمان را به دقایق ۷۵



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵): منحنی‌های رخنه‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بعد از بهینه‌سازی معکوس، (الف) حالت شیب‌دار و شدت تزریق ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه، (ب) حالت بدون شیب و شدت تزریق ۰/۳۳ سانتی‌متر بر دقیقه و (ج) حالت شیب‌دار و شدت تزریق ۰/۵ سانتی‌متر بر دقیقه

با توجه به مقادیر CRM، تخمین‌های مدل قبل و بعد از بهینه‌سازی اندکی بیشتر از مشاهدات بوده‌اند (به جز حالت شیب‌دار تحت شدت تزریق ۰/۳۳ سانتی-متر بر دقیقه که تخمین مدل بعد از بهینه‌سازی کمتر از مشاهدات بود). با وجود این اختلاف‌های ناچیز، شکل کلی منحنی‌های رخنه و روند حرکتی محلول به‌خوبی شبیه‌سازی شده است.

تحلیل آماری

معیارهای عملکرد مدل شبیه‌سازی در جدول ۳ آورده شده‌اند. در تمام حالت‌ها بعد از بهینه‌سازی دقت مدل افزایش یافت. به‌طور کلی بعد از بهینه‌سازی، R^2 و EF نزدیک به یک (به ترتیب در محدوده ۰/۹۰۷-۰/۸۴۸ و ۰/۸۰۵-۰/۹۰۷) و RMSE پایین (در محدوده ۰/۳۵۱-۰/۴۵۹ گرم بر لیتر) نشان می‌دهد که مدل دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی داشته است. چنانچه در بررسی‌های نموداری اشاره شد، دقت شبیه‌سازی در خاک شیب‌دار و شدت تزریق ۰/۵ سانتی‌متر بر دقیقه اندکی کمتر از دو حالت دیگر بود (با RMSE بالاتر و R^2 و EF پایین‌تر).

جدول (۳): معیارهای عملکرد مدل در حالت‌های شیب‌دار و بدون شیب و شدت‌های تغذیه ۴۰۰ و ۶۰۰ لیتر بر ساعت

CRM	EF		RMSE*		R ²		قبل بهینه‌سازی	
	قبل بهینه‌سازی	بعد بهینه‌سازی	قبل بهینه‌سازی	بعد بهینه‌سازی	قبل بهینه‌سازی	بعد بهینه‌سازی		
بعد بهینه‌سازی	۰/۰۱۷	۰/۰۱۵	۰/۸۵۳	۰/۳۵۱	۰/۴۴۱	۰/۹۰۷	۰/۸۵۷	شیب‌دار- ۰/۳۳ cm/min
۰/۱۳۲	۰/۱۵۹	۰/۸۹۶	۰/۸۵۷	۰/۳۹۰	۰/۴۵۷	۰/۹۲۴	۰/۹۰۶	بدون شیب- ۰/۳۳ cm/min
۰/۰۹۷	۰/۱۵۵	۰/۸۰۵	۰/۶۸۳	۰/۴۹۵	۰/۶۳۱	۰/۸۴۸	۰/۷۵۴	شیب‌دار- ۰/۵ cm/min

* واحد RMSE همان واحد غلظت در آزمایش و شبیه‌سازی (گرم بر لیتر) است.

نتیجه‌گیری

رسد، بلکه به زهکش‌های انتهایی شیب زودتر از زهکش‌های ابتدای شیب رسیده و از آنها خارج می‌شود. (۲) شدت تزریق محلول بر سرعت حرکت آن در خاک و زمان رسیدن آن به زهکش‌ها تأثیرگذار است. افزایش شدت تزریق، حرکت محلول به سمت اعماق خاک را تسریع می‌بخشد و با افزایش مقدار محلول در اعماق، غلظت بیشینه را در آنجا افزایش می‌دهد. (۳) مدل قبل از بهینه‌سازی معکوس، انتقال محلول سدیم کلرید و شکل کلی منحنی‌های رخنه را به‌طور قابل قبولی شبیه‌سازی کرد، اما مطابقت نتایج شبیه‌سازی شده با مشاهدات بعد از بهینه‌سازی پارامترهای ورودی مدل افزایش یافت. برخی اختلاف‌های موجود بین منحنی‌های رخنه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به‌ویژه در دنباله انتهایی احتمالاً به دلیل نادیده گرفتن ناهمگنی مکانی در مدل است.

در این مطالعه، نحوه حرکت محلول در خاک‌های شیب‌دار و بدون شیب و تحت دو شدت تزریق مختلف در شرایط آزمایشگاهی بررسی و با استفاده از مدل HYDRUS-2D شبیه‌سازی شد. به‌طور کلی نتایج نشان دادند که:

(۱) شیب خاک موجب افزایش انتقال محلول در جهت جانبی می‌شود و حرکت محلول علاوه بر حرکت عمودی دارای حرکت افقی نیز است. در نتیجه در یک توده خاک شیب‌دار، در مقایسه با یک توده خاک بدون شیب که در آن، حرکت محلول عمدتاً به‌صورت عمودی است، توزیع غلظت در بخش‌های مختلف طول شیب متفاوت است. علاوه بر این، در توده خاک شیب‌دار به‌علت وجود حرکت در جهت افقی، محلول به‌طور هم‌زمان به تمام زهکش‌های زیرسطحی نمی‌

منابع:

Adamu, Ch. I., Th. N. Nganje. 2010. Heavy metal contamination of surface soil in relationship to land use patterns: a case study of Benue state, Nigeria. *Materials Sciences and Applications* 1 (3): 127-134.

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

Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluid in Porous Media*. Elsevier publishing.

- Connell, L. D. 2007. Simple models for subsurface solute transport that combine unsaturated and saturated zone pathways. *Journal of Hydrology* 332 (3-4): 361-373.
- Dyson, J. S., R. E. White, 1989. The effect of irrigation rate on solute transport in soil during steady water flow. *Journal of Hydrology* 127 (1-4): 19-29.
- Edwards, W. M., M. J., Shipitalo, W. A., Dick, L. B. Owens, 1992. Rainfall intensity affects transport of water and chemicals through macropores in no-till soil. *Soil Science Society of America Journal* 56 (1): 52-58.
- Flury, M. 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils-a review. *Journal of Environmental Quality* 25 (1), 25-45.
- Hanson, B. R., J., Simunek, J. W. Hopmans, 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management* 86 (1-2): 102-113.
- Huang, K., V., Toride, M. Th. van Genuchten, 1995. Experimental investigation of solute transport in large, homogeneous and heterogeneous, saturated soil columns. *Transport in Porous Media* 18 (3): 283-302.
- Jacques, D., J., Simunek, A., Timmerman, J. Feyen, 2002. Calibration of Richards' and convection-dispersion equations to field scale water flow and solute transport under rainfall conditions. *Journal of Hydrology* 259 (1-4): 15-31.
- Jia, C., Shing, K., Y. C. Yortsos, 1999. Visualization and simulation of non-aqueous phase liquids solubilization in pore networks. *Journal of Contaminant Hydrology* 35 (4): 363-387.
- Kladivko, E. J., L. C, Brown, J. L. Baker, 2001. Pesticide transport to subsurface tile drains in humid regions of north America. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 31 (1), 1-62.
- Kohler, A., Abbaspour, K. C., Fritsch, M., van Genuchten, M. Th, Schulin, R. 2001. Simulating unsaturated flow and transport in a macroporous soil to tile drains subject to an entrance head: model development and preliminary evaluation. *Journal of Hydrology* 254 (1-4): 67-81.
- Leung, A. S. E., S. C., Gupta, J. F. Moncrief, 2000. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics: 1. Macropore continuity. *Journal of Contaminant Hydrology* 41 (3-4): 283-301.
- McGrath, G., Ch., Hinz, M. Sivapalan, 2010. Assessing the impact of regional rainfall variability on rapid pesticide leaching potential. *Journal of Contaminant Hydrology* 113 (1-4): 56-65.
- Pang, L., M. E., Close, J. P. C., Watt, K. W. Vincen, 2000. Simulation of picloram, atrazine, and simazine leaching through two New Zealand soils and into groundwater using HYDRUS-2D. *Journal of Contaminant Hydrology* 44 (1): 19-46.
- Phogat, V., M., Mahadevan, M., Skewes, J. W. Cox, 2011. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design. *Irrigation Science* 30 (4), 315-333.
- Pot, V., J., Simunek, P., Benoit, Y., Coquet, A., Yra, M. J. M. Cordon, 2005. Impact of rainfall intensity on the transport of two herbicides in undisturbed grassed filter strip soil cores. *Journal of Contaminant Hydrology* 81 (1-4): 63-88.
- Romano, N., B., Brunone, A. Santini, 1998. Numerical analysis of one-dimensional unsaturated flow in layered soils. *Advances in Water Resources* 21 (4): 315-324.
- Rudra, R. P., S. C., Negi, N. Gupta, 2005. Modelling approaches for subsurface drainage water quality management. *Water Quality Research Journal of Canada* 40 (1): 71-81.

Schaap, M. G, F. J, Leij, M. Th. van Genuchten, 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251 (3-4): 163-176.

Sherlock, M. D, J. J, McDonnell, D. S, Curry, A. T. Zumbuhl, 2002. Physical controls on septic leachate movement in the vadose zone at the hillslope scale, Putnam County, New York, USA. *Hydrological Processes* 16 (13): 2559–2575.

Simunek, J., M., Sejna, H., Saito, M., Sakai, M. Th. van Genuchten, 2009. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. 4.08 ed.

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

Toride, N., F., Leij, M. Th. van Genuchten, 1995. The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments, version 2.1. California: US Salinity Laboratory, Riverside.

van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44 (5), 892–898.

van Genuchten, M. T, J. C. Parker, 1984. Boundary-conditions for displacement experiments through short laboratory columns. *Soil Science Society of America Journal* 48 (4):703–8.

Vanderborght, J., R., Kasteel, M., Herbst, M., Javaux, D., Thiery, M., Vanclooster, C., Mouvet, H. Vereecken, 2005. A set of analytical benchmarks to test numerical models of flow and transport in soils. *Vadose Zone Journal* 4 (1): 206-221.

Wang, H., X., Ju, Y., Wei, B., Li, L., Zhao, K. Hu, 2010. Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain. *Agricultural Water Management* 97 (10): 1646-1654.

Yu, C., B., Gao, R.M., Carpena, Y., Tian, L., Wu, O. P. Ovilla, 2011. A laboratory study of colloid and solute transport in surface runoff on saturated soil. *Journal of Hydrology* 402 (1-2): 159-164.

Zhu, Y., L., Shi, L., Lin, J., Yang, M. Ye, 2012. A fully coupled numerical modeling for regional unsaturated-saturated water flow. *Journal of Hydrology* 475: 188–203.

Zhu, Y., L., Shi, J., Yang, J., Wu, D.Mao, 2013. Coupling methodology and application of a fully integrated model for contaminant transport in the subsurface system. *Journal of Hydrology* 501: 56–72.

An Investigation into the Effects of Soil Slope and Rainfall Intensity on Solute Transport Using Laboratory Experiments and HYDRUS-2D Model

Farshid Taran¹, Amirhossein Nazemi², Aliashraf Sadraddini³, Yaghub Dinpazhuh⁴

Abstract

Soil is not only a medium for plant growth but also a transmitter of contaminants to atmosphere, surface water and ground water. Therefore, studying the movement of substances in soil is important. In this study, the effects of soil slope and rainfall intensity on solute transport in soil were investigated under laboratory conditions. The experiments were conducted in two sloping and not-sloping soil bulk and included injection of a conservative solute (NaCl) with two different intensities. The results showed that the soil slope increases the solute transport in the lateral direction, and the increase of injection intensity accelerates the solute movement towards the depths and increases the peak concentration. Solute movement was well simulated using Hydrus-2D model with the coefficient of determination (R^2) between 0.848-0.907, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (EF) between 0.805-0.907 and the low values of the root mean square error (RMSE).

Keywords: Hydrus-2D, Rainfall Intensity, Slope, Solute Transport.

¹ PhD student of Water engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, farshidtaran@yahoo.com (Corresponding Author)

² Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, ahnazemi@yahoo.com

³ Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, alisadraddini@yahoo.com

⁴ Associate prof. Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, dinpashoh@yahoo.com