

بررسی انتشارپذیری یون نیترات در خاک ماسه‌ای با استفاده از مدل HYDRUS-1D

عاطفه آزادی فر^{۱*}، امیر سلطانی محمدی^۲، هادی معاضد^۳، احمد فرخیان فیروزی^۴

۱. کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۲. استادیار، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳. استاد، گروه محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴. استادیار، گروه علوم خاک، دانشگاه شهید چمران اهواز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۹/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۲/۲۵)

چکیده

افزایش استفاده از کودهای ازته به دلیل پویایی زیاد نیترات در خاک تهدیدی جدی برای آب‌های زیرزمینی و در نتیجه سلامت انسان است. هدف از این پژوهش بررسی مقادیر انتشارپذیری نیترات در خاک‌های ماسه‌ای درشت، متوسط و ریز در فواصل انتقال ۲۰، ۴۰ و ۸۰ سانتی‌متری در شرایط آزمایشگاهی با مدل HYDRUS-1D می‌باشد. بدین منظور محلول نمک خالص نیترات پتاسیم به‌عنوان آلاینده پایدار تحت رژیم ماندگار با غلظت ۱۶۰ میلی‌گرم بر لیتر به ستون‌های خاک اضافه شد، سپس به‌منظور استخراج پارامترهای موردنیاز برای رسم منحنی رخنه غلظت نیترات خروجی در حجم‌های تخلخل متفاوت اندازه‌گیری و منحنی رخنه برای هر ستون رسم گردید. نتایج نشان داد با افزایش اندازه ذرات خاک انتشارپذیری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش متوسط فاصله انتقال در ماسه درشت و متوسط، مقدار انتشارپذیری نیترات بیشتر شد. اما در ماسه ریز مقدار انتشارپذیری با افزایش فاصله انتقال کاهش یافت. مقادیر انتشارپذیری برای ماسه ریز از ۳۰/۵۰ تا ۴۲/۵۵ سانتی‌متر، ماسه متوسط ۵۷/۰۶ تا ۶۸/۵۱ سانتی‌متر و ماسه درشت ۶۸/۰۸ تا ۹۷/۲۶ سانتی‌متر، محاسبه شد. درصد متوسط خطای مدل (E_r) در تخمین پارامتر ضریب انتشارپذیری برای خاک ماسه‌ای ریز کم‌تر و مقدار ضریب تعیین (R^2) در آن نسبتاً بیشتر از خاک‌های ماسه‌ای درشت و متوسط به‌دست آمد که به معنای پایین‌تر بودن روند کلی مقدار خطا و بالاتر بودن دقت در شبیه‌سازی انتقال نیترات در این مدل برای خاک ماسه‌ای ریز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: فاصله انتقال، منحنی رخنه، خاک ماسه‌ای همگن، انتقال آلاینده

مقدمه

یکی از چالش‌های درازمدت، مسئله کیفیت آب ناشی از مواد مغذی کودی و سموم موجود در رواناب اراضی کشاورزی و باغات می‌باشد. در تولیدات کشاورزی، قسمت اعظم ازت موردنیاز گیاهان از طریق کودها تأمین می‌شود. از آنجاکه این عنصر به حد کافی در خاک وجود ندارد، به‌منظور تأمین نیاز گیاهان، کشاورزان مجبور به استفاده از کودهای ازته می‌باشند (Moradzadeh et al 2012). نیترات یکی از شکل‌های اصلی ازت در خاک می‌باشد. از جمله مهم‌ترین آلودگی‌هایی که در اثر توسعه کشاورزی به وجود می‌آید، آلودگی‌های ناشی از کودهای ازته از جمله نیترات است. به‌رحال صرف‌نظر از چگونگی تولید مواد آلاینده و همچنین فرآیندهای کاهش، چرخه و تصفیه آن‌ها، سرانجام مکان استقرار نهایی آلاینده‌ها خاک است.

بنابراین نشت آلاینده‌ها از خاک به سمت آب‌های زیرزمینی باعث آلودگی آن‌ها می‌شود. تأثیر پارامترها و مشخصات فیزیکی خاک بر انتقال آلاینده‌ها در خاک یکی از بزرگ‌ترین معضله‌ها در زمینه حفاظت منابع آب‌های زیرزمینی است و در این میان تشخیص محل و فرآیندهایی که عامل انتقال آلاینده‌ها به داخل سیستم‌های جریان آب زیرزمینی هستند، از اهم مسائل به‌شمار می‌آید. به‌طورکلی جابجایی و انتشار نمک‌ها در خاک با سه مکانسیم انتقال توده‌ای^۱، پخشیدگی^۲ مولکولی و انتشار هیدرودینامیکی^۳ انجام می‌گیرد. با در نظر گرفتن تأثیر همزمان این سه فرآیند بر حرکت یون‌ها و نمک‌ها در خاک معادله یک بعدی جابه‌جایی - انتشار^۴ (CDE) برای محلول پایدار در محیط متخلخل همگن تحت شرایط جریان دائمی به صورت زیر

1. Mass flow or convection
2. Diffusion
3. Hydrodynamics dispersion
4. Advection - Dispersion

می‌باشد (Maroufpour et al, 2008):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial z} + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن، D: ضریب انتشار هیدرودینامیکی ($M^2 \cdot L^{-1}$)، C: غلظت نمک یا یون موردنظر ($M \cdot L^{-3}$)، z: فاصله (L)، v: متوسط سرعت واقعی آب ($L \cdot T^{-1}$) و t: زمان (T) است. برای محاسبه ضریب انتشار هیدرودینامیکی مدل‌های زیادی وجود دارد که می‌توانند میزان آن را با دقت قابل قبولی محاسبه کنند. این مدل‌ها بر پایه معادله جابه‌جایی - انتشار (CDE) برای تحلیل حرکت مواد بدون واکنش (پایدار) در آب‌های زیرزمینی پایه‌ریزی شده‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل HYDRUS-1D اشاره کرد. از مدل HYDRUS-1D در مطالعات متعددی برای تحلیل رطوبت و شوری خاک و نیز مسائل مرتبط با رشد گیاه استفاده شده است (Forkutsa et al, 2009؛ Dontsova et al؛ Jacques et al, 2008؛ Simunek et al, 2008؛ Al-Tabbaa et al. (Xie et al, 2011؛ Jiang et al, 2009؛ 2009؛ 2000) در پژوهشی وابستگی انتشارپذیری به فاصله انتقال را تأیید کرده‌اند. Sayyad et al (2008)، از مدل HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی حرکت کادمیوم، مس، سرب و روی در یک خاک آهکی تحت کشت گندم و گلرنگ استفاده نمودند. نتایج نشان داد که اگرچه مدل HYDRUS-1D توانست برآورد خوبی از روند حرکت فلزات در خاک انجام دهد ولی مقادیر بهینه‌شده (برازش داده‌شده توسط مدل HYDRUS-1D) غلظت فلزات فوق توسط مدل از میزان تعیین‌شده در آزمایشگاه بسیار کم‌تر بود. Derakhshannejad et al (2010) به منظور بررسی حرکت نیترات در خاک تحت کشت نیشکر از مدل HYDRUS-1D استفاده نمودند، نتایج نشان داد که گرچه این مدل توانست برآورد خوبی از روند حرکت نیترات در خاک انجام دهد، ولی مقادیر بهینه‌شده (برازش داده‌شده) توسط آن از میزان تعیین‌شده در آزمایش‌های صحرایی کمتر بود. Zhi-Ming et al (2012) در پژوهشی به مدل‌سازی انتقال کادمیوم در ستون‌های خاک با طول ۵۰ سانتی‌متر و قطر ۱۲/۵ سانتی‌متر با هدف مطالعه و بررسی پارامترهای معادله جابه‌جایی - انتشار کادمیوم و همچنین بررسی تغییر پارامترها با تغییر عمق پرداختند. نتایج نشان داد ضریب انتشار هیدرودینامیک (D) به عمق خاک وابستگی زیادی دارد. Asadian feli (2013) برای بررسی انتقال نیترات در یک خاک لوم شنی تیمار شده با زئولیت از نرم‌افزار HYDRUS-1D استفاده نمود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که این مدل برآورد خوبی از انتقال نیترات در خاک دارد. دامنه ضریب همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و آزمایشگاهی

بین ۰/۹۴ تا ۰/۹۷ محاسبه شد. Moradzadeh et al (2012) با استفاده از مدل‌سازی معکوس با نرم‌افزار HYDRUS-1D ایزوترم‌های جذب و ضرایب پخشیدگی و انتشار یون نیترات را تعیین کرد. نتایج نشان داد به دلیل دست‌خورده بودن نمونه‌های خاک، برآورد مدل CDE به مقادیر برآورد شده به مقادیر مشاهداتی نزدیک بود. Vrugt et al (2001) در تحقیقی نشان دادند مدل HYDRUS-1D با تعیین خواص هیدرولیکی دقیق خاک، ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی حرکت فلزات در خاک‌ها می‌تواند باشد. Heatwole and Mccary (2007) مدل HYDRUS-1D را به منظور مدل‌سازی انتقال نیتروژن به کار بردند. نتایج حاکی از دقت بالای مدل در تخمین انتقال نیترات حاصل از فاضلاب بود. Moradi et al (2005) انتقال کادمیوم را با استفاده از نرم‌افزارهای HYDRUS-1D و MACRO شبیه‌سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که با وجود کارایی هر دو نرم‌افزار، نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار MACRO به مشاهدات آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. Simunek et al (2006)، نشان دادند با استفاده از مدل HYDRUS-1D بررسی پدیده آبشویی عناصر سمی و انتقال آنها به آب‌های زیرزمینی می‌توان جواب‌های منطقی به‌دست‌آمده آورد اما این در صورتی است که در این مدل خواص هیدرولیکی خاک به‌طور صحیح در نظر گرفته شود. Simunek et al (2008)، شبیه‌سازی حرکت غیر تعادلی آب و املاح را با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که آلایند در محیط‌های درشت‌دانه کاملاً پیوسته از محل ورود به توده خاک به‌صورت منظم توزیع می‌شود. Jellali et al (2010)، در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که استفاده از مدل HYDRUS-1D ابزار بسیار خوبی برای شبیه‌سازی حرکت آمونیوم در ستون‌های آزمایشی است. Ramos et al (2011) در پژوهشی از مدل HYDRUS-1D برای تجزیه و تحلیل دو فرآیند مهم خاک (انتقال و واکنش نمک نیتروژن در پروفیل خاک) استفاده کردند، نتایج به‌دست‌آمده از این مدل قابل‌قبول ارزیابی شد Saifadeen and Gladnyeva (2012)، با شبیه‌سازی حرکت یک‌بعدی انتقال املاح غیر واکنش‌گر با استفاده از مدل HYDRUS-1D به این نتیجه رسیدند؛ که انتقال جریان آب و املاح در موارد بدون پسماند رطوبتی سریع‌تر است و اثر پسماند رطوبتی در خاک‌های درشت‌دانه بارزتر می‌باشد. WenZhi et al (2014) در تحقیقات خود نشان دادند که مدل HYDRUS-1D می‌تواند با دقت به شبیه‌سازی آب و نمک در خاک بپردازد. هدف از انجام این پژوهش بررسی وابستگی انتشارپذیری محیط متخلخل به اندازه

آزمایش‌های این پژوهش در ستون‌های پلی‌اتیلن به قطر داخلی ۱۰/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵۰، ۷۰ و ۱۱۰ سانتی‌متر که به ترتیب تا ارتفاع ۲۰، ۴۰ و ۸۰ سانتی‌متر از ماسه پر شدند انجام گرفت. یک ستون خاک و اتصالات آن به‌صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.

نیروی موردنیاز برای تزریق آب (آب مقطر) و آلاینده از اختلاف سطح ایجادشده در محل خروج آب و آلاینده اعمال می‌شد. برای تنظیم سطح آب و ثابت نگه‌داشتن بار آبی روی ستون یک سرریز در بالای ستون تعبیه شده بود. دبی خروجی با استفاده از حجم‌سنجی و ثبت زمان انجام می‌شد. برای تأمین فشار مخازن آب (برای اشباع نمودن خاک از پایین به‌منظور اطمینان کامل از خروج حباب‌های هوا و تزریق پالس محلول زمینه) و مخزن آلاینده (برای تزریق پالس آلاینده) در ارتفاعی بالاتر از مدل و با اختلاف حدود ۲ متر قرار گرفت. برای تنظیم دبی خروجی از مخزن، ارتفاع مخازن متغیر و قابل تنظیم بود. روش انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که در ابتدا خاک ماسه-ای را مرطوب کرده و سپس به‌تدریج از بالا به‌طور یکنواخت به ستون اضافه می‌گردید و سپس سعی می‌شد تا حد ممکن و تا قرارگیری کامل ذرات در منافذ خاک به‌طور یکنواخت کوبیده شوند. این روش پس از افزودن ماسه تا رسیدن به ارتفاع موردنظر ادامه می‌یافت. پیش از شروع آزمایش، یکنواختی جریان خروجی بررسی می‌شد. پس از آن مخزن آب و آلاینده در جای خود قرار داده شدند. سپس تزریق محلول زمینه (آب مقطر) به ستون خاک آغاز شده و پس از مدتی جریان در خروجی ستون ظاهر می‌گردید. کم‌کم بر میزان آب خروجی افزوده شد تا شدت جریان ورودی و خروجی برابر شود. پس از به‌تعداد رسیدن خاک با محلول زمینه، شیر مخزن تزریق‌کننده آب بسته و شیر مخزن آلاینده باز می‌شد. در اینجا با تزریق آلاینده به محیط متخلخل آزمایش شروع شده و پس از گذشت زمانی مشخص در بازه‌های زمانی معینی (با توجه به بافت و فاصله انتقال در هر ستون خاک مورد آزمایش) نمونه‌گیری صورت می‌گرفت. بعد از تزریق با توجه به بافت و فاصله انتقال، حدود ۲ تا ۳ حجم تخلخل (تعداد حجم تخلخل = حجم کل تقسیم بر یک حجم تخلخل) شیر مخزن آلاینده بسته و شیر مخزن آب با شدت جریان مشابه باز می‌شد. انتخاب شدت جریان مشابه آب و آلاینده برای احتراز از ایجاد تلاطم در محیط ناشی از تغییر در تراز آب در بالادست و پایین‌دست بود. نمونه‌گیری در ظرف‌های نمونه‌گیری ۸۰ میلی‌لیتری انجام می‌شد. برای جلوگیری از تبدیل نیترات به آمونیوم و ایجاد خطا در نمونه‌ها، نمونه‌ها سریعاً به یخچال (در دمای زیر ۴ درجه سانتی-

اندازه ذرات و فاصله انتقال در خاک‌های ماسه‌ای همگن در شرایط اشباع با مدل HYDRUS-1D بود. لذا در پژوهش حاضر با اندازه‌گیری غلظت یون نیترات خروجی از ستون‌هایی با بافت و فاصله انتقال مختلف و رسم منحنی‌های رخنه^۱ (BTC) مربوط به نیترات به بررسی انتشارپذیری این یون در خاک اشباع پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

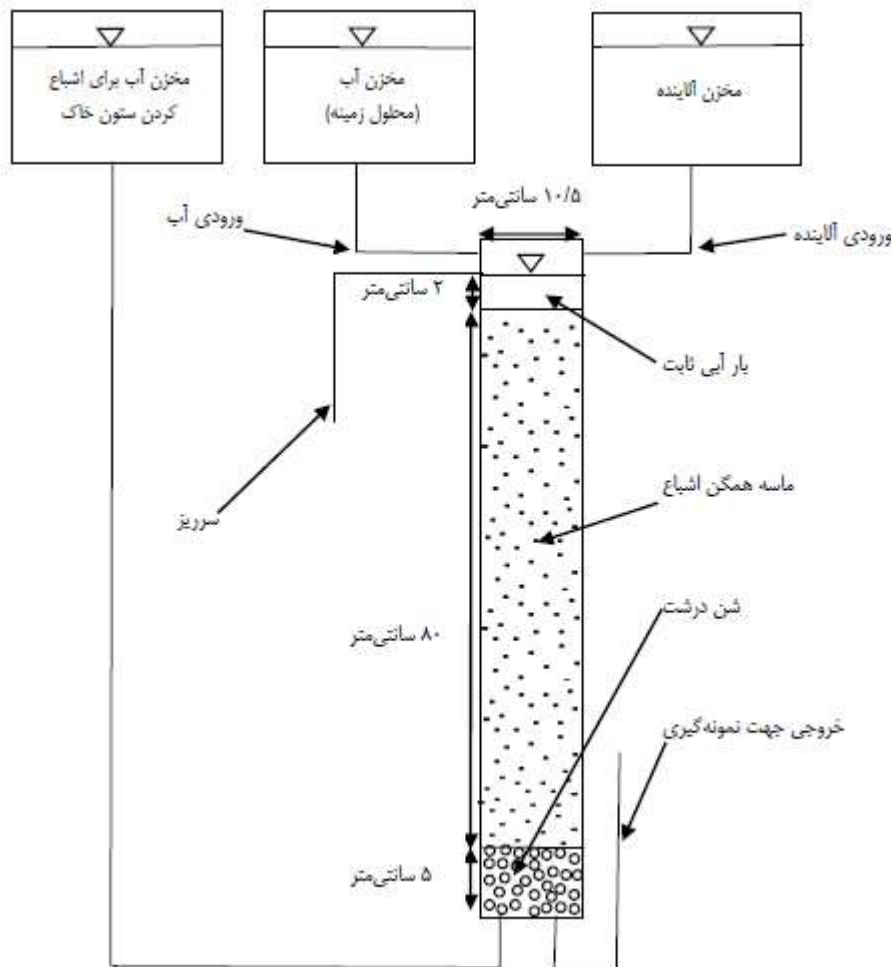
آزمایش‌ها در قالب طرح آماری فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کاملاً تصادفی شامل دو تیمار فاصله انتقال و دانه‌بندی ذرات خاک در سه تکرار انجام شد. اغلب خاک تشکیل‌دهنده آبخوان‌ها ماسه-هایی هستند که هنوز تحکیم نشده‌اند، لذا در این تحقیق از خاک ماسه‌ای در سه اندازه درشت، متوسط و ریز استفاده گردید. از دلایل اصلی انتخاب خاک ماسه‌ای عدم وجود واکنش‌های شیمیایی در این خاک‌ها برای رسیدن به نتایج دقیق است. در بیش‌تر مطالعات آزمایشگاهی انتقال املاح از آلاینده‌های پایدار، خنثی و غیر جذبی استفاده می‌شود. در خاک‌های ماسه‌ای امکان جذب عناصر و ترکیبات بسیار اندک است، به‌نحوی که مقدار جذب عناصر در این خاک‌ها تقریباً صفر فرض می‌شود. بنابراین استفاده از آلاینده پایدار برای مطالعه جنبه‌های مختلف انتشارپذیری کفایت می‌نماید. به دلیل مخاطرات بهداشتی ناشی از نیترات، سازمان جهانی بهداشت (WHO)^۲ حداکثر غلظت مجاز یون نیترات در آب آشامیدنی را ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر توصیه کرده است، لذا در این پژوهش از محلول نمک خالص نیترات پنتاسیم (مرک آلمان) با غلظت ۱۶۰ میلی‌گرم بر لیتر به‌عنوان آلاینده پایدار مصنوعی استفاده گردید. خاک ماسه‌ای درشت دارای ذرات با قطر کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر و بزرگ‌تر از ۰/۸۵ میلی‌متر، خاک ماسه‌ای متوسط دارای ذرات با قطر کوچک‌تر از ۰/۶ میلی‌متر و بزرگ‌تر از ۰/۲ میلی‌متر و خاک ماسه‌ای ریز دارای ذرات با قطر کوچک‌تر از ۰/۲ میلی‌متر (عبوری از الک شماره ۸۰) بود. در این تحقیق قطر متوسط ذرات خاک ماسه‌ای درشت حدود سه برابر خاک ماسه‌ای متوسط و ۱۱/۲ برابر خاک ماسه‌ای ریز و قطر متوسط ذرات خاک ماسه‌ای متوسط حدود ۴ برابر خاک ماسه‌ای ریز می‌باشد، بدین ترتیب اثر اندازه ذرات روی انتشارپذیری در آزمایش‌ها قابل مشاهده می‌باشد. ویژگی‌های خاک مورد استفاده در جدول (۱) ارائه گردیده است.

1. Breakthrough curve
2. World Health Organization

گراد) منتقل می‌شد. بعد از اتمام آزمایش غلظت نیترات در نمونه‌ها در آزمایشگاه و با دستگاه اکسپکتروفوتومتر مدل (Hach DR500) اندازه‌گیری می‌شد.

جدول ۱- مشخصات خاک مورد استفاده در پژوهش

نوع خاک	جرم مخصوص ظاهری (g.cm ⁻³)	اندازه متوسط ذرات خاک D ₅₀ (mm)	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm.sec ⁻¹)	سرعت داریسی (cm.sec ⁻¹)	تخلخل (درصد)
ماسه درشت	۱/۳۲	۱/۶۸	۰/۱۵	۰/۵۳	۵۱
ماسه متوسط	۱/۳۵	۰/۵۸	۰/۱۴	۰/۲۵	۵۰
ماسه ریز	۱/۷۶	۰/۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۳۳



شکل ۱- شماتیک ستون‌های ماسه مورد استفاده

این مدل معادله ریچاردز اصلاح شده برای بررسی حرکت آب در خاک به صورت عددی (Simunek et al, 2008) حل می‌شود که به صورت معادله (۲) بیان می‌گردد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \beta \right) \right] - s \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن θ : رطوبت حجمی ($L^3.L^{-3}$), t : زمان (T), $K(\theta)$: هدایت هیدرولیکی غیراشباع ($L.T^{-1}$), h : مکش ماتریک (L), β : زاویه بین مسیر جریان و محور عمودی (برای حرکت

مدل HYDRUS -1D

این مدل یکی از مدل‌های پیشرفته با قابلیت شبیه‌سازی حرکت یک‌بعدی آب، املاح، حرارت و جذب آب توسط ریشه و همچنین رشد ریشه در شرایط اشباع و غیراشباع در خاک می‌باشد. این مدل توسط سیمونیک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا بسط داده شده است (Simunek et al, 1998). مدل HYDRUS -1D از معادله جابه‌جایی - انتشار (CDE) برای بررسی حرکت املاح و گرما در خاک استفاده می‌کند. در

این نوع شرط مرزی اغلب برای ستون‌های خاک در شرایط آزمایشگاهی و برای حالتی که ستون‌های خاک از پایین با هوا و فشار صفر در تماس هستند استفاده می‌شوند. برای شرط اولیه نیز شرط ارتفاع فشار انتخاب شد، زیرا فشار در بالا و پایین ستون‌های آزمایش همواره در طول آزمایش ثابت بود.

شرایط مرزی و مقادیر اولیه برای انتقال املاح

از آنجایی که آلاینده (با غلظت ۱۶۰ میلی‌گرم بر لیتر) به صورت یک جریان از بالا به خاک اضافه شد، شرط مرزی بالادست برای انتقال نمک‌ها در مدل، شرط شدت جریان نمک‌ها^۷ (J_c) انتخاب گردید:

$$J_c = qC \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن، q : سرعت جریان آب در خاک ($L.T^{-1}$) و C : غلظت یون ورودی در ستون خاک ($M.L^{-3}$) می‌باشد که در اینجا با توجه به غلظت محلول نیترات پتاسیم که ۱۶۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد، برای یون نیترات محاسبه و وارد نرم‌افزار شد. شرط مرزی پایین‌دست نیز در مدل برای انتقال نمک‌ها شرط گرادیان صفر^۸ در نظر گرفته شد؛ زیرا از پایین، ستون‌های خاک با هوا در تماس بودند. لازم به ذکر است که در آزمایش از ماسه شسته شده استفاده گردید لذا غلظت یون نیترات در ستون خاک (صفر) نیز به‌عنوان شرط اولیه در مدل در نظر گرفته شد.

پروفیل خاک (برای فواصل انتقال ۰.۸، ۴۰ و ۲۰ سانتی-متری) به ۱۰۱ گره با فاصله مساوی تقسیم شد. اطلاعات ورودی به نرم‌افزار علاوه بر شرایط مرزی و اولیه شامل اطلاعات مربوط به ستون خاک، زمان انجام آزمایش، اطلاعات منحنی رطوبتی خاک، پارامترهای مربوط به معادله انتقال املاح، اطلاعات مربوط به خصوصیات خاک (درصد اجزای بافت خاک، تعداد لایه‌های خاک، عمق خاک)، چگالی ظاهری شرایط اولیه پروفیل خاک از نظر رطوبت و غلظت می‌باشد. از میان پارامترهای مختلف هیدرولیکی و انتقال املاح، با استفاده از تحلیل حساسیت^۹، پارامترهای اصلی که با تغییر مقدار آن‌ها، نتایج مدل دستخوش تغییر قابل‌ملاحظه می‌شود، شناسایی گردیدند. در مدل HYDRUS-1D مقادیر پارامترهای انتقال املاح و ضریب انتشارپذیری هیدرودینامیکی، با استفاده از روش معکوس تعیین گردیدند. ملاک عمل برای به پایان رساندن اجرای برنامه و قبول پارامترهای تعیین‌شده توسط مدل نمایه

عمودی آب در خاک $\beta = 0$ ، برای حرکت افقی $\beta = 90$ و برای سایر مسیرها $0 < \beta < 90$ می‌باشد)، s : آب جذب‌شده توسط ریشه ($L^3.L^{-3}.T^{-1}$) و x : فاصله (L) است. در معادله ریچاردز برای توصیف مشخصات هیدرولیکی خاک نظیر منحنی رطوبتی و هدایت آبی روابط متعددی تعریف شده است که معمول‌ترین آن‌ها رابطه ون‌گنوختن - معلم^۱ می‌باشد (Abbasi et al, 2003):

$$\theta(h) = \left\{ \begin{array}{l} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + \alpha h^n]^m} \\ m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \end{array} \right. \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$k(s_e) = k_s s_e^l [1 - (1 - s_e^{1/m})^m]^2 \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه‌های بالا، θ_s مقدار رطوبت اشباع، θ_r مقدار رطوبت باقیمانده، n : پارامتر شکل منحنی رطوبت می‌باشد، این پارامتر در خاک‌های درشت‌بافت که منحنی رطوبتی خاک در آن‌ها شیب تندی دارد، بزرگ‌تر از خاک‌های ریزبافت است (Yiang et al, 2010)، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع ($L.T^{-1}$)، α : 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 می‌باشد، S_e : اشباع نسبی^۲ یا درجه اشباع مؤثر^۳، l : پارامتر پیوستگی خلل و فرج است که برای اکثر خاک‌ها ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (Mualem, 1976). از آنجایی که این پارامترها با استفاده از خصوصیات فیزیکی خاک‌ها تخمین زده می‌شوند، لذا باید با دقت بیشتری برآورد گردند. این برنامه برازش هم‌زمان پارامترهای مدل را به منحنی رخنه با استفاده از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات بر اساس الگوریتم لونبرگ - مارکواردت^۴ فراهم می‌کند.

تحلیل حساسیت مدل نشان داد که مدل HYDRUS-

1D نسبت به مقادیر رطوبت اشباع و ضریب انتشارپذیری، ضرایب n و α حساس می‌باشد. بنابراین در مرحله واسنجی مدل این پارامترها آن‌قدر تغییر داده شدند تا بهترین تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حاصل گردید.

شرایط مرزی و مقادیر اولیه برای جریان آب

در مرز بالایی ستون برای جریان آب، شرایط فشار ثابت^۵ در نظر گرفته شد. بدین دلیل که در شرایط آزمایشگاهی نیز در کل زمان آزمایش همواره فشار دو سانتی‌متر به ستون‌های خاک اعمال شد. برای مرز پایینی، شرط نشت^۶ در نظر گرفته شد، زیرا

1. Van Genuchten and Mualem
2. Relative saturation
3. Effective degree of saturation
4. Levenberg-Marquardt
5. Constant Pressure Head
6. Seepage Face

7. Concentration flux BC
8. Zero gradient
9. Sensitivity Analysis

(SSQ)^۱ می‌باشد. این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SSQ = \sum_{i=1}^N (x_{i_{obs}} - x_{i_{sim}})^2 \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در آن $X_{i_{obs}}$ و $X_{i_{sim}}$: به ترتیب مقادیر مشاهده شده آزمایشگاهی، غلظت یونها و مقادیر شبیه‌سازی شده به وسیله مدل می‌باشند. به این ترتیب که پس از وارد کردن مقادیر اولیه هر کدام از متغیرها در مدل، نرم‌افزار به پردازش داده‌ها می‌پردازد و مقادیر نهایی را برآورد می‌کند. در هر تکرار هم‌زمان با برآورد متغیرها پارامتر مجموع مربعات (SSQ) نیز محاسبه می‌شود. پس از هر بار اجرای مدل، دوباره مقادیر جدید محاسبه شده (بهینه‌شده) در مدل قرار می‌گیرد و دوباره این عمل تکرار می‌گردد. پایان محاسبات زمانی است که مقادیر برآورد شده به یک مقدار ثابت و مجموع مربعات (SSQ) نیز به یک مقدار ثابت و حداقل میل کند. به این ترتیب مدل واسنجی گردید.

مقایسه آماری برای ارزیابی دقت مدل HYDRUS-1D

برای این کار با استفاده از برخی روش‌های آماری دقت مدل HYDRUS-1D در برازش مشاهدات آزمایشگاهی منحنی رخنه بررسی می‌شود. بدین منظور از آماره‌هایی که Esfandiari and Maheshwari (2001) و Moradzadeh *et al* (2012) در تحقیقات خود به آن اشاره کرده‌اند، استفاده شد:

$$a = \frac{X_{i_{sim}}}{X_{i_{obs}}} \quad X_{i_{sim}} = aX_{i_{obs}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه بالا، $X_{i_{sim}}$: مقادیر شبیه‌سازی شده، $X_{i_{obs}}$: مقادیر مشاهده شده و a : شیب خط برازش می‌باشد. در این معادله مقادیر $a > 1$ نشان‌دهنده پیش‌بینی کمتر از مقدار واقعی و مقادیر $a < 1$ نشان‌دهنده پیش‌بینی بیش‌تر از مقدار واقعی است. بهینه‌ترین مقدار a برابر یک و این شاخص نشان‌دهنده روند کلی مقدار خطا می‌باشد. شاخص ضریب تعیین (R^2)، مشخص‌کننده مناسب بودن برازش معادله رگرسیونی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهده شده می‌باشد و بهینه‌ترین مقدار (R^2) برابر یک است (Ebrahimian and Liaghat, 2011)؛ که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (X_{i_{sim}} - \overline{X_{i_{sim}}})(X_{i_{obs}} - \overline{X_{i_{obs}}}) \right)^2}{\sum_{i=1}^N (X_{i_{sim}} - \overline{X_{i_{sim}}})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (X_{i_{obs}} - \overline{X_{i_{obs}}})^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

در رابطه فوق $X_{i_{sim}}$ و $X_{i_{obs}}$: به ترتیب مقادیر متوسط داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای می‌باشد.

مقدار درصد متوسط خطای مدل HYDRUS-1D در برازش مشاهدات آزمایشگاهی منحنی رخنه (E_r) توسط رابطه زیر بیان می‌گردد:

$$E_r = |(1-a)| \times 100 \quad (\text{رابطه ۹})$$

به‌طور کلی شاخص E_r نشان‌دهنده روند کلی مقدار خطا می‌باشد.

در نهایت تجزیه و تحلیل آماری انتشارپذیری نیترات در بافت‌ها و فاصله انتقال‌های مختلف با نرم‌افزار SAS صورت گرفت.

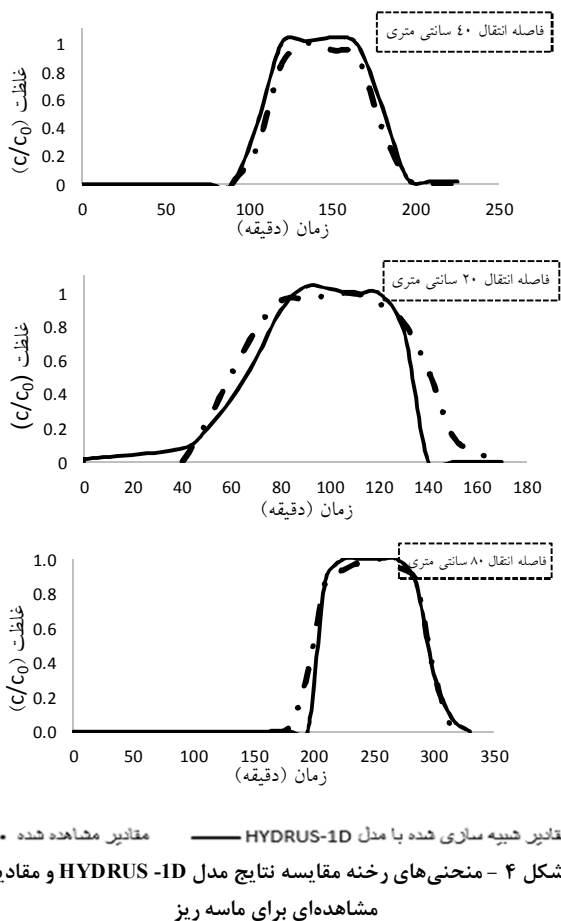
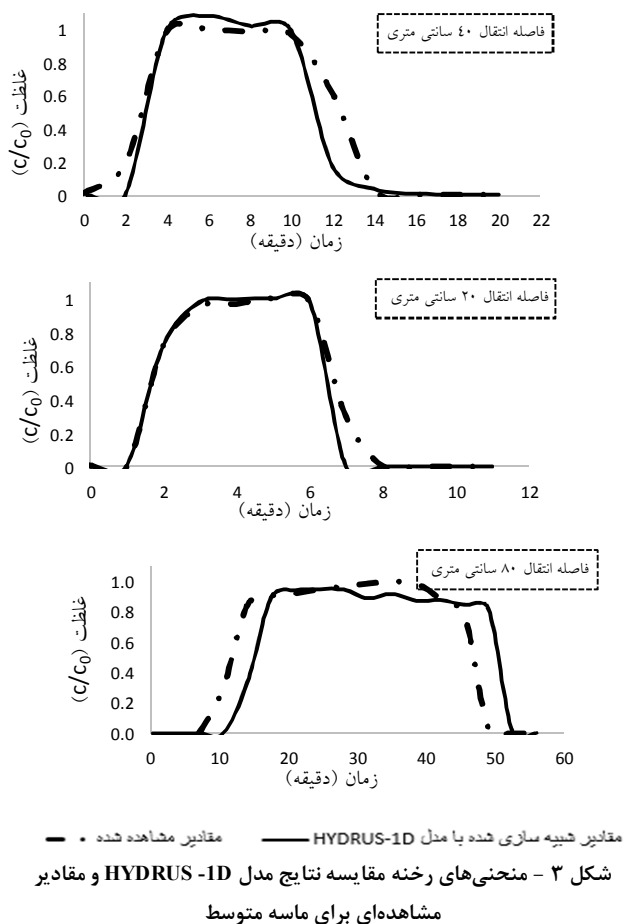
نتایج و بحث

مقادیر انتشارپذیری به‌دست‌آمده برای یون نیترات در جدول (۲) آورده شده است.

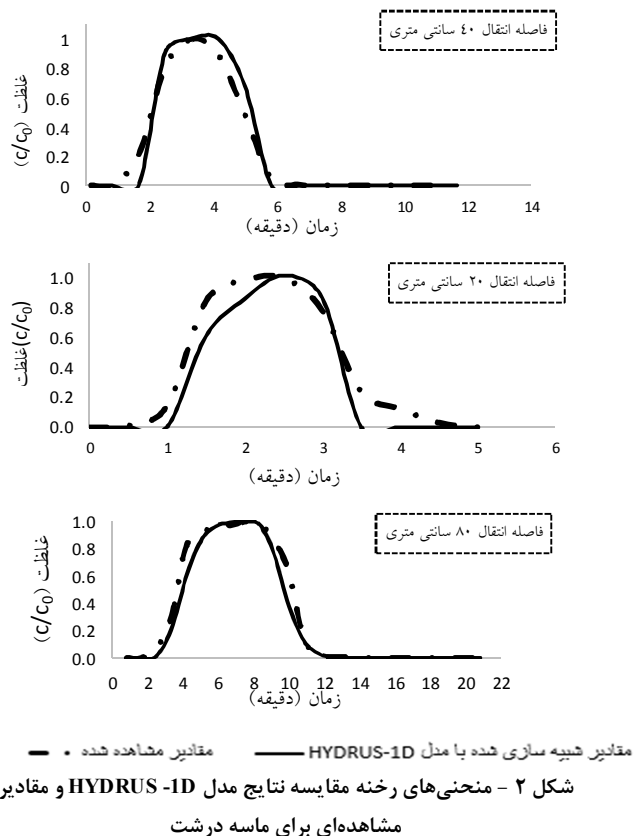
جدول ۲- مقادیر انتشارپذیری به‌دست‌آمده برای یون نیترات

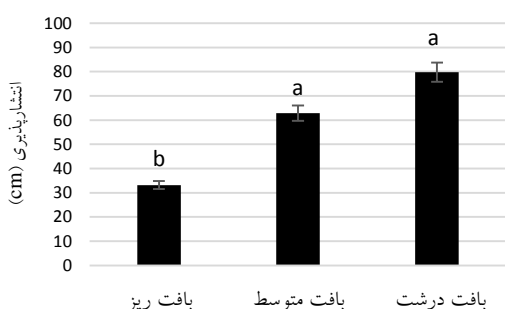
بافت خاک	فاصله انتقال (cm)	λ (cm)	SSQ (mg.l ⁻¹)
درشت	۲۰	۶۸/۰۸	۰/۲۷
	۴۰	۷۴/۰۲	۰/۰۵
	۸۰	۹۷/۲۶	۰/۰۷
متوسط	۲۰	۵۷/۰۶	۰/۰۵
	۴۰	۶۲/۹۳	۰/۱۱
	۸۰	۶۸/۵۱	۰/۰۲
ریز	۲۰	۴۲/۵۵	۰/۲۲
	۴۰	۳۶/۴۸	۰/۰۴
	۸۰	۳۰/۵۰	۰/۰۲

که در جدول (۲) مشاهده می‌شود به توجه به کم بودن نمایه آماری مجموع مربعات (SSQ) مدل برآورد خوبی از ضرایب دارد. محدوده مقادیر به‌دست‌آمده و صحت نتایج، با مطالعات Asadian *et al* (2012)، Moradi *et al* (2005)، Asadian *et al* (2013) مطابقت دارد. همچنین با مقایسه متوسط انتشارپذیری به‌دست‌آمده برای خاک‌های ماسه‌ای درشت، متوسط و ریز (جدول ۲)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش هدایت هیدرولیکی و قطر ذرات خاک، مقدار انتشارپذیری افزایش می‌یابد. پارامتر β ($\beta = \frac{vL}{D}$) برای تعیین فواصل انتقال طولانی و کوتاه پیشنهاد شده است. چنانچه مقادیر β بین ۱۲۵ و ۵۰۰ قرار گیرد اطمینان کامل حاصل می‌گردد که فاصله انتقال طولانی و اگر این مقدار کم‌تر از ۱۲۵ باشد فاصله انتقال کوتاه می‌باشد (Maroufipour *et al*, 2008؛ Al-Tabbaa *et al*, 2000). با توجه به مقادیر پارامتر β به‌دست‌آمده برای ماسه



درشت و متوسط (پارامتر β در محدوده ۴۵ تا ۶۰ که این مقادیر با افزایش فاصله انتقال کاهش یافت)، همه فواصل انتقال در این دو نوع بافت خاک در محدوده فاصله انتقال کوتاه قرار گرفتند. مقادیر انتشارپذیری محاسبه‌شده توسط هر سه مدل برای ماسه درشت و متوسط نشان داد که با افزایش فاصله انتقال مقدار انتشارپذیری افزایش می‌یابد. اما با محاسبه انتشارپذیری برای ماسه ریز مشاهده شد که با افزایش فاصله انتقال مقدار انتشارپذیری کاهش می‌یابد. پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که متوسط سرعت حرکت آلاینده در فواصل انتقال کوتاه بیش‌تر از متوسط سرعت حرکت آب در خلل و فرج محیط متخلخل است (Al-Tabbaa *et al*, 2000) و با کاهش مقدار پارامتر β ، $\beta = \frac{vL}{D}$ سرعت انتقال آلاینده افزایش می‌یابد (Brigham, 1974) که نتیجه آن افزایش انتشارپذیری آلاینده می‌باشد. بررسی مقادیر محاسبه‌شده پارامتر β برای ماسه ریز در پژوهش حاضر (مقادیر پارامتر β در محدوده ۲ تا ۱۴۵) نشان داد که مقدار این پارامتر با افزایش فاصله انتقال شدیداً افزایش می‌یابد و این بیان‌کننده بیشتر بودن سرعت انتقال آلاینده نسبت به سرعت حرکت آب در خلل و فرج در فواصل کوتاه‌تر ماسه ریز و همان‌گونه در نتیجه افزایش انتشارپذیری آن با افزایش فاصله انتقال می‌باشد. منحنی‌های رخنه مقایسه نتایج مدل عددی HYDRUS-1D و مقادیر مشاهده‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است.





شکل ۴- بررسی اثر بافت خاک با مدل HYDRUS-1D

مقایسه میانگین تأثیر فاصله انتقال و بافت خاک به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. بیش‌ترین مقدار انتشارپذیری به‌دست‌آمده برای بافت درشت‌دانه و فاصله انتقال ۸۰ سانتی‌متری و کم‌ترین آن برای فاصله انتقال ۲۰ سانتی-متری و بافت ریزدانه به‌دست آمده است. همان‌گونه که در شکل (۳) و (۴) مشاهده می‌شود انتشارپذیری به‌دست‌آمده برای فاصله انتقال ۲۰ سانتی‌متری تفاوت معناداری با فواصل انتقال ۸۰ و ۴۰ سانتی‌متری و مقدار انتشارپذیری به‌دست‌آمده برای بافت ریزدانه تفاوت معناداری با بافت درشت و متوسط دارد که دلیل آن را می‌توان تفاوت در سرعت حرکت آلاینده و مقدار β عنوان کرد. جدول (۴) نشان‌دهنده شاخص‌های آماری به‌کاررفته در این پژوهش برای نتایج حاصل از اندازه‌گیری غلظت یون نیترات برای مدل HYDRUS-1D می‌باشد.

با دقت در جدول (۴) مشاهده می‌شود مدل HYDRUS-1D توانایی خوبی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی غلظت یون نیترات داشته است. به‌طوری‌که مقدار شاخص ضریب تعیین (R^2) مدل بین ۰/۹۱ و ۰/۹۸ در نوسان می‌باشد. به‌طورکلی برای سه خاک ماسه ریز، متوسط و درشت برای تمامی فواصل انتقال مقدار a بین مقادیر ۰/۶۵ تا ۱/۰۹ در نوسان می‌باشد. مقادیر a بیش‌تر موارد کم‌تر از یک می‌باشد که نشان از این دارد که اکثر پیش-بینی‌ها توسط مدل HYDRUS-1D کم‌تر از مقادیر واقعی بوده است. یکسان نبودن نتایج می‌تواند به‌دلیل وجود خطاهای آزمایشگاهی در روند اندازه‌گیری باشد که به‌دلیل نزدیک بودن بسیار زیاد پیش‌بینی‌ها به مقادیر واقعی قابل‌قبول است. شاخص مقدار درصد خطای پیش‌بینی (E_r) بین مقادیر ۰/۱۵ و ۳۴/۳۶ در تغییر بوده است. مقدار (E_r) برای خاک ماسه‌ای ریز کم‌تر و مقدار (R^2) در آن نسبتاً بیش‌تر از خاک‌های ماسه‌ای درشت و متوسط می‌باشد که به معنای پایین‌تر بودن روند کلی مقدار خطا و بالاتر بودن دقت در شبیه‌سازی انتقال نیترات در این مدل برای خاک ماسه‌ای ریز می‌باشد. (Asadian feli 2013)

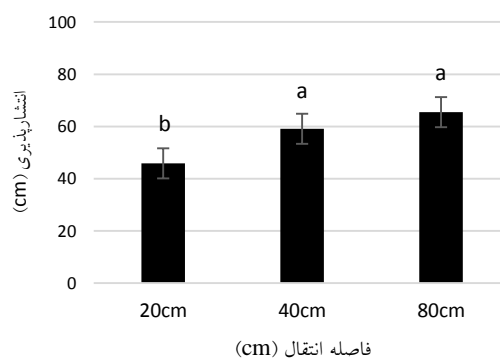
همان‌گونه که در شکل‌های (۲) تا (۴) مشاهده می‌گردد منحنی‌های رخنه برازش داده‌شده با مدل HYDRUS-1D تطابق بسیار بالایی با مقادیر مشاهده‌شده در آزمایشگاه از خود نشان داد. در اکثر آزمایش‌ها مقادیر غلظت برآورد شده توسط مدل HYDRUS-1D کم‌تر از مقادیر مشاهده‌شده در آزمایشگاه بود. (Moradzadeh et al 2010) Derakhshanejad et al و (2012) نیز در پژوهش‌های خود این مسئله را تأیید کرده‌اند. نتایج حاصل از آزمون آماری دانکن در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- تجزیه واریانس ضریب انتشارپذیری به‌دست‌آمده مدل HYDRUS-1D

منابع تغییرات	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)
بلوک	۲	۰/۰۰۷۱ ^{ns}
بافت	۲	۱/۵۲ ^{**}
فاصله انتقال	۲	۰/۰۱۵۲ [*]
بافت×فاصله انتقال	۴	۰/۵۱۲ ^{ns}
خطای آزمایش (e)	۱۶	۰/۰۵۰۲
ضریب تغییرات (cv)		۱۴/۸۷

ns, * و ** به ترتیب غیر معنی‌داری، معنی‌دار در سطح پنج درصد و معنی‌دار در سطح یک درصد را نشان می‌دهند.

تجزیه واریانس ضریب انتشارپذیری به‌دست‌آمده مدل HYDRUS-1D نشان می‌دهد که اثر بافت خاک بر ضریب انتشارپذیری محاسبه‌شده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد، همچنین نشان می‌دهد اثر فاصله انتقال بر ضریب انتشارپذیری در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار و اثر متقابل بافت و فاصله انتقال معنی‌دار نشده است (جدول ۳). مقایسه میانگین مقدار ضریب انتشارپذیری محاسبه‌شده برای مدل HYDRUS-1D در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است.



شکل ۳- بررسی اثر فاصله انتقال با مدل HYDRUS-1D

مقادیر مشاهداتی نزدیک بود. این مسئله در پژوهش‌های پیشین نیز تأیید شده است (Moradzadeh et al, 2012؛ Abbasi et al, 2004). به‌طور کلی مقایسه تمامی شاخص‌های آماری نشان می‌دهد که شبیه‌سازی حرکت یون نیترات، توسط نرم‌افزار HYDRUS-1D خوب انجام شده است.

نیز در پژوهشی پایین بودن دقت مدل HYDRUS-1D را در خاک‌های با خلل و فرج درشت‌تر گزارش کرده‌اند. مدل (CDE) در شرایط پایدار رطوبتی به‌ویژه در حالت اشباع و همچنین در خاک‌های دست‌خورده کارایی بالایی دارد. در این پژوهش نیز به دلیل دست‌خورده بودن نمونه‌های خاک، مقادیر برآورد شده به

جدول ۴- مقایسه آماری غلظت یون نیترات اندازه‌گیری شده و برازش داده‌شده به‌وسیله مدل HYDRUS-1D

E_r	R^2	α	فاصله انتقال (cm)	بافت خاک
۳۴/۳۶	۰/۹۱	۰/۶۵	۲۰	درشت
۲۳/۰۰	۰/۹۲	۰/۷۷	۴۰	
۸/۰۰	۰/۹۷	۰/۹۲	۸۰	
۱۳/۰۰	۰/۹۶	۰/۸۷	۲۰	متوسط
۲/۰۰	۰/۹۸	۱/۰۲	۴۰	
۰/۱۵	۰/۹۷	۰/۸۵	۸۰	
۴/۰۰	۰/۹۶	۰/۹۶	۲۰	ریز
۹/۰۰	۰/۹۶	۱/۰۹	۴۰	
۵/۰۰	۰/۹۷	۱/۰۵	۸۰	

نتیجه‌گیری

آزمایش‌ها مقادیر غلظت برآورد شده توسط مدل HYDRUS-1D کم‌تر از مقادیر مشاهده‌شده در آزمایشگاه بود. مقدار E_r برای خاک ماسه‌ای ریز کم‌تر و مقدار ضریب تعیین (R^2) در آن نسبتاً بیش‌تر از خاک‌های ماسه‌ای درشت و متوسط به‌دست آمد که به معنای پایین‌تر بودن روند کلی مقدار خطا و بالاتر بودن دقت در شبیه‌سازی انتقال نیترات در این مدل برای خاک ماسه‌ای ریز می‌باشد. بر اساس شاخص‌های آماری دیده شد که مدل HYDRUS-1D در پیش‌بینی انتقال نیترات از کارایی بالایی برخوردار است به‌گونه‌ای که مقدار شاخص ضریب تعیین مدل بین ۰/۹۱ و ۰/۹۸ در نوسان بود.

در این مطالعه برای بررسی انتشارپذیری یون نیترات و شبیه‌سازی توزیع غلظت آن در بافت‌ها و فواصل انتقال مختلف از نرم‌افزار HYDRUS-1D استفاده شد. تحلیل حساسیت مدل نشان داد که مدل HYDRUS-1D نسبت به مقادیر رطوبت اشباع و ضریب انتشارپذیری و همچنین مقدار ضرایب n و α (ضرایب معادله ونگنوختن - معلم) حساس می‌باشد. نتایج نشان داد با افزایش اندازه ذرات خاک انتشارپذیری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش متوسط فاصله انتقال در ماسه درشت و متوسط، مقدار انتشارپذیری نیترات بیش‌تر شد. اما در ماسه ریز مقدار انتشارپذیری با افزایش فاصله انتقال کاهش یافت. در اکثر

REFERENCES

- Abbasi, F., Feyen, J. and van Genuchten, M. Th. (2004). Two dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: Model calibration and validation. *Journal of Hydrology* 290 (1-2): 63-79. (In Farsi)
- Abbasi, F., Jacques, D., Simunek, J., Feyen, J. and Genuchten, M. Th. (2003). Inverse estimation of the soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: heterogeneous soil. *Trans, ASAE* 46 (4), 1097-1111. (In Farsi)
- Al-Tabbaa, A., Ayotamuno, j.m. and R.J, Martin. (2000). One- dimensional Solute transport in stratified sands at short travel distances. *Journal of Hazardous Materials*, 73, 1-15.
- Asadian feli, Z. (2013). Effect of irrigation with municipal wastewater and potassium zeolite to retention and transport nitrate in sandy-loam soil. master thesis, Faculty of Water Sci, Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Farsi)
- Brigham, W.E. (1974). Mixing equations in short laboratory columns. *Journal of society Petroleum Engineering*, 14, 91-99.
- Derakhshannejad, Z., Sayyad, GH. and jafarnejadi, A. R. (2010). Simulation of nitrate transportation in a soils under sugarcane cultivation using HYDRUS-1D solute transport model. *First National Conference on Sustainable agriculture and healthy product production*, Research Center for Agriculture and Natural Resources of Isfahan, 9-10 November. (In Farsi)
- Dontsova, KM., Pennington, JC., Hayes, C., Simunek, J. and Williford. CW. (2009). Dissolution and

- transport of 2, 4-DN and 2, 6-DNT from M1 propellant in soil. *Chemosphere*, 77(4), 29-41.
- Ebrahimiyan, H. and Liaghat, A. (2011). Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. *Soil and Water Research*, 6(2), 91-101.
- Esfandiari, B.L. and Maheshwari. (2001). Field evaluation of furrow irrigation models. <http://www.idealibrary.com> on IDE.
- Forkutsa, I., Sommer, R., Shirokova, Y.I., Lamers, J.P.A., Kienzler, K., Tischbein, B., Martius, C. and Vlek .P.L.G. (2009). Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II. Soil salinity dynamics, *Irrig. Sci* 27, 319-330.
- Heatwole, K.K. and Mccary, J.E. (2007). Modeling potential vadose-zone transport of nitrogen from onsite wastewater at the development scal. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91, 184-201.
- Jacques, D., Simunek, J., Mallants, D. and Van Genuchten, M. Th. (2008). Modelling coupled water flow, salt transport and geochemical reactions affecting heavy metal migration in a podzol soil. *Geoderma*, 145, 449-461.
- Jellali, S., Diamantopoulos, E., Kallali, H., Bennaceur, S., Anane, M. and Jadidi, N. (2010). Dynamic sorption of ammonium by sandy soil in fixed bed columns: Evaluation of equilibrium and non-equilibrium transport processes. *Journal of Environmental Management*, 91, 897-905.
- Jiang, Sh., Pang, L., Buchan, G.D., Simunek, J., Noonan, M.J. And Close, M.E. (2009). Modeling water flow and bacterial transport in undisturbed lysimeters under irrigation of dairy shed effluent and water using HYDRUS-1D. *Water Research*, 44, 1050-1061.
- Maroufpour, E., Kashcoli, H., Moazed, H. and Vali samani, H.M. (2008). Comparative study of mathematical models of Fried-Comberous Brigham to dispersion of conservative pollutants in the homogeneous sandy soil. *Journal of Agricultural Scientific*, 30, 77-89. (In Farsi)
- Moradi, A., Abbaspour, K. C. and Afyuni, M. (2005). Modling field-scale cadmium transport below the root zone of a sewage sludge amended soil in arid region of central Iran. *Journal of Contaminant Hydrology*, 42, 99-111.
- Moradzadeh, M., Moazed, H. and Sayyad, G.H. (2012). Simulation of Nitrate Ion Leaching in a Sandy - Loam Soil Treated with Zeolite using Hydrus-1D Model. *Journal of Science Soil and Water*, 23, (1), 95-107.(In Farsi)
- Mualem , Y. (1976). A new model for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12 (3), 13-522.
- Ramos, T.B., Simunk, J., Goncalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., Castanheira, N.I. and Pereira. (2011). Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soil irrigated with saline water , *Journal of Hydrology*, 407, 129-144.
- Saifadeen, A. and Gladnyeva, H. (2012). Modeling of solute transport in the unsaturated zone using HYDRUS-1D, paper 81.
- Sayyad, G.H., Mousavi, S.F., Abbaspoor, K. and Afuni, M. (2008). Simulation of Cd, Cu, Pb and Zn transport though an undisturbed calcareous soil under wheat and safflower using HYDRUS-1D solute transport model. *Journal of Agricultural Sciences in Iran*, 39(1), 187-200. (In Farsi).
- Simunek, J., D. Jacque., Van Genuchten, M. Th. and Malleants, D. (2006). Multicomponent Geochemical Transport Modeling using Hydrus-1D and HP1. *Journal of the American water resources Association*, 42(6), 1537-1547.
- Simunek, J., M Sejna and van Genuchten ,M. Th. (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
- Simunek, J., van Genuchten, M.Th. and Sejna, M. (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vad. Zo. Jour*, 7, 587-600.
- Vrugt, J. A., Hopmans, J. W. and Simunek, J. (2001). Calibration of a two-dimensional root water uptake model, *Soil Science Society of American Journal*, 65(4), 1027-1037
- WenZhi , Z., XU, Ch., WU, J. and HUANG, J. (2014). Soil salt leaching under different irrigation regimes:HYDRUS-1D modelling and analysis, *Springer* , 6(1), 44-58.
- Xie, T., Liu, X. and Sun, T. (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 Modeling*, 222, 241-252.
- Yiang, M., Shaoyuan, F., Dongyuan, S., Guangyuo, G. and Zailin, H. (2010). Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71, 40-47.
- Zhi-Ming, Q. I., Shao-Yuan, F. and HELMERS ,M. J. (2012). Modeling Cadmium Transport in Neutral and Alkaline Soil Columns at Various Depths. *Pedosphere*, 22(3), 273-282.