

اندازه‌گیری و شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح در خاک‌های مطبق

فرشته نسیمی^۱، کامران زینالزاده^{۲*}، سینا بشارت^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۳

چکیده

شبیه‌سازی دقیق حرکت آب و املاح در محیط متخلخل، در مطالعات آب و خاک اهمیت زیادی دارد. هدف از این تحقیق، اندازه‌گیری و شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح در تیمارهای خاک با لایه‌بندی متفاوت بود. در این تحقیق، تاثیر تغییر چگالی ظاهری خاک و ترتیب لایه‌بندی خاک بر حرکت آب و املاح در ۵ تیمار و هر تیمار در دو تکرار اندازه‌گیری و با مدل HYDRUS-1D شبیه‌سازی شد. به این منظور، از ۱۰ ستون PVC با ارتفاع ۱۰۵ و قطر داخلی ۳۱/۵ سانتیمتر و سه بافت خاک شامل شن لومی، لوم شنی-رسی و لومرسی استفاده گردید. ستون‌ها با آب آبیاری و آب شور با شوری‌های به ترتیب ۰/۶۷ و ۴/۴۶ دسی زیمنس بر متر آبیاری شدند. در طول آزمایش، مقدار رطوبت (با رطوبت‌سنج از نوع TDR) و شوری (اندازه‌گیری هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع)، در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ سانتیمتری اندازه‌گیری گردید. نتایج تحقیق نشان داد حرکت آب در خاک تحت تاثیر موقعیت قرارگیری لایه‌ای با کمترین میزان نفوذپذیری است و زمانی که لایه ریزبافت در بالا قرار می‌گیرد زمان خروج آب بیشترین مقدار خواهد شد. همچنین، نتایج نشان داد در تمام ستون‌ها مقدار EC در لایه بالایی بیشترین مقدار بوده و بدون توجه به تغییر ترتیب قرارگیری لایه‌ها، از بالا به پایین کاهش می‌یابد. بررسی شاخص nRMSE بیانگر دقت بالای مدل HYDRUS در شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک مطبق می‌باشد. کمترین خطای شبیه‌سازی در خاک همگن بود.

واژه‌های کلیدی: چگالی ظاهری خاک، رطوبت‌سنج TDR، ستون خاک، HYDRUS-1D

مقدمه

خاک‌های مختلف، رفتارهای متفاوتی را در رابطه با حرکت آب و املاح و میزان ذخیره رطوبت از خود نشان می‌دهند. تاثیر توزیع لایه‌ها با بافت‌های مختلف می‌تواند بسیار پیچیده باشد. در خاک‌های مطبق، پتانسیل آب خاک از لایه‌ای به لایه‌ای دیگر متفاوت است. تحقیقات بسیاری در خصوص میزان و نحوه حرکت آب و املاح و نیز مدلسازی آنها با مدل‌های ریاضی مختلف انجام شده است. شارما و همکاران حرکت آلاینده‌ها را در ستون‌های متشکل از خاک مطبق بررسی و شبیه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که برای یک ستون خاک مطبق اشباع شده، صرف نظر از مشخصه‌های آب و املاح، ترتیب لایه‌بندی تاثیری بر روی توزیع و تجمع املاح ندارد. (Sharma et al., 2014). سیمونک و همکاران حرکت غیرماندگار آب و املاح را با استفاده از مدل HYDRUS-1D شبیه‌سازی نموده و نتیجه گرفتند که HYDRUS یک ابزار کارآمد در تجزیه و تحلیل مستقیم و

معکوس است (Simunek et al., 2008). کومار و همکاران مطالعه‌ای بر روی انتقال املاح تحت شرایط جریان غیرماندگار داشتند و طی آن به این نتیجه رسیدند که شوری خاک با افزایش عمق افزایش می‌یابد و این افزایش، به افزایش میزان رس و کاهش نفوذپذیری در اعماق پروفیل خاک مورد مطالعه بستگی دارد. آنها گزارش نمودند که تجمع املاح در خاک، ارتباط مستقیمی با ظرفیت نفوذپذیری و نوع خاک دارد (Kumar et al., 2015). ریتز و همکاران با استفاده از TDR و روش معکوس، انتقال املاح را در یک خاک آشفشانی کشاورزی مطبق توصیف کردند. نتایج نشان دهنده‌ی تجمع بالای Fe و Al در قسمت تحتانی پروفیل خاک بدلیل ته‌نشینی این املاح در اثر فعالیت‌های کشاورزی متمرکز و شدید بود (Ritter et al., 2005). هو و همکاران تاثیر یک لایه‌ی رسی را بر روی انتقال آب و املاح در خاک، تحت شرایط تبخیر شبیه‌سازی کردند. آنها نتیجه گرفتند که در یک پروفیل خاک لوم شنی-رسی، با افزایش ضخامت لایه‌ی رسی، اثر این لایه در ایجاد تاخیر در زهکشی آب افزایش می‌یابد. همچنین آنها گزارش کردند زمانیکه خاک سطحی رسی باشد، اثر تاخیر ضعیف‌تر است (Hu et al., 2004). هوانگ و همکاران فرآیند نفوذ و زهکشی در خاک‌های درشت بافت مطبق را

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(* نویسنده مسئول: (Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir

به‌این منظور، سه بافت خاک شن‌لومی، لوم‌شنی-رسی و لوم‌رسی با چگالی ظاهری به ترتیب ۱/۴۴، ۱/۳۶ و ۱/۳۸ گرم بر سانتیمتر مکعب از دشت نازلو واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه انتخاب گردید. مشخصات ذرات تشکیل دهنده خاک‌های مورد مطالعه و تیمارها به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است. رطوبت اشباع و نقطه پژمردگی با نمونه‌برداری توسط آگر از پروفیل ستون خاک و به کمک صفحات فشار تعیین شد. خاک‌ها پس از انتقال به آزمایشگاه، به وسیله الک شماره ۱۰ (قطر ذره ۲ میلی‌متر) غربال شدند. برای ساخت ستون‌های آزمایش، از لوله‌های پلی‌اتیلنی به ارتفاع ۱۰۵ سانتیمتر و قطر ۳۱۵ میلی‌متر استفاده گردید. به‌منظور حفظ تعادل و سهولت در خروج زه‌آب، ستون‌ها در داخل تشتک‌های مشبک قرار گرفته و انتهای آنها (در محل تماس با تشتک) برای جلوگیری از نشست زه‌آب، آییندی شد. تشتک‌ها بر روی پایه‌های فلزی به ارتفاع ۲۵ سانتیمتر قرار گرفتند. سطح داخلی ستون‌ها به‌منظور ایجاد خاصیت آبگریزی و جلوگیری از ایجاد جریان ترجیحی، بطور کامل با استفاده از گریس چرب گردید. تیوب‌های دستگاه TDR در مرکز ستون‌ها نصب گردید. به‌منظور سهولت در خروج زه‌آب، پایین ستون‌ها به ارتفاع ۲۰ سانتیمتر با گراول پر شدند. قبل از پر کردن ستون‌ها، رطوبت اولیه‌ی خاک به صورت وزنی و با تهیه نمونه‌های حدود ۱۰۰ گرم و قراردادن آنها در آن به مدت ۲۴ ساعت و دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد تعیین گردید. برای دستیابی به چگالی ظاهری مورد نظر برای هر سه بافت خاک مورد استفاده در تحقیق، وزن خاک مورد نیاز برای ایجاد لایه‌هایی با حجم مشخص محاسبه گردید و خاک به‌دقت بصورت لایه‌لایه (مطابق جدول ۲) به درون ستون‌ها ریخته شدند. در هر استوانه با توجه به لایه‌بندی مدنظر، پس از ریختن مقدار معینی از خاک با بافت مورد نظر، چگالی ظاهری خاک با تعداد ضربه مشخص توسط وزنه ۳۵۰ گرمی بر روی سطح خاک اعمال گردید. تعداد ضربات وزنه، با پیش‌آزمایش مشخص شده بود. ترتیب قرارگیری لایه‌های بافتی مختلف در شکل (۱) نشان داده شده است.

در این تحقیق، آبیاری توسط قطره‌چکان مستقر در سطح خاک در بالای ستون‌های آزمایش انجام و آب طی آن، وارد خاک شده و پس از عبور از لایه‌های مختلف، از بخش تحتانی ستون‌ها خارج گردید. در طول آزمایش، شرایط مرزی ابتدا و انتهای جریان آب در ستون‌ها، ثابت نگاه‌داشته شد. در بالای ستون‌ها، یک ارتفاع آب ۳ سانتیمتری بطور ثابت برای کل دوره نفوذ آب به خاک برقرار گردید. به این منظور، یک مخزن آب برای تامین آب و بار آبی مورد نیاز بر روی پایه‌ای در ارتفاع ۳ متری بالاتر از ستون‌ها قرار داده شد و با نصب سرریز در دیواره ستون در ارتفاع ۳ سانتیمتری روی سطح خاک و قرار دادن تعدادی قطره‌چکان بر روی هر ستون، بار آبی ثابت به میزان ۳ سانتیمتر در طول آزمایش برقرار گردید (شکل ۱).

بررسی نمودند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی نشان داد پروفیل خاک با ناهمگنی بافتی در جهت عمودی، آب بیشتری نسبت به پروفیل خاک همگن، تحت شرایط زهکشی آزاد، در خود نگهداری می‌کند (Huang et al., 2011). ما و همکاران مطالعه‌ای بر روی مدلسازی نفوذ و حرکت آب در یک ستون خاک به عمق ۳ متر و با لایه‌بندی مختلف (متشکل از پنج لایه) انجام دادند. در این مطالعه، مقادیر سرعت نفوذ لحظه‌ای، نفوذ تجمعی و عمق جبهه‌ی خیس شده بدست آمده از مدل Green-Ampt اصلاح شده با نتایج مدل HYDRUS-1D مقایسه شد. نتایج بیانگر کاهش سرعت نفوذ آب با افزایش عمق در یک ستون خاک با لایه‌بندی مختلف بود. آنها دلیل این امر را فشردگی خاک با افزایش عمق بیان نمودند (Ma et al., 2010). تاران و نورآبادی (۱۳۹۵) تاثیر ترتیب قرارگیری لایه‌های خاک با ضخامت‌های مختلف در انتقال محلول سدیم کلرید را بررسی نمودند. نتایج نشان داد وقتی لایه درشت بافت شن لومی در زیر لایه ریزبافت لوم رسی قرار دارد، رخنه محلول سریع‌تر از حالت عکس قرارگیری لایه‌ها است. در این تحقیق مشاهده شد که با افزایش ضخامت لایه‌ها، تاثیر ترتیب قرارگیری لایه‌ها بر انتقال محلول افزایش می‌یابد. همچنین، آنها گزارش کردند ترتیب قرارگیری لایه‌ها در مقایسه با طول ستون تاثیر بیشتری بر انتقال محلول دارد. بررسی تحقیقات گذشته بیانگر توجه زیاد محققین به موضوع مهم حرکت آب و املاح در خاک است. با توجه به مطالعات محدود صورت گرفته در بررسی توام تاثیر ترتیب لایه‌بندی و تغییر چگالی ظاهری خاک و اهمیت این موضوع به‌خصوص در منطقه توسعه ریشه، ضرورت انجام تحقیقات بیشتر برای درک اثرات پیچیده‌ی عوامل مذکور روی ذخیره‌ی رطوبت و تجمع املاح در پروفیل خاک وجود دارد. این تحقیق، با هدف بررسی تاثیر تغییر چگالی ظاهری و ترتیب لایه‌بندی خاک بر حرکت آب و املاح انجام گرفت. در این مطالعه، تلاش شد فرایند نفوذ و انتقال املاح در ترتیب‌های مختلف قرارگیری لایه‌ها اندازه‌گیری گردد. در نهایت، قابلیت مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی فرایند انتقال آب و املاح در خاک‌های مطبق تحت شرایط مختلف قرارگیری لایه‌ها بررسی و ارزیابی گردید.

مواد و روش‌ها

این مطالعه در آزمایشگاه گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه انجام شد. در این تحقیق، ۵ تیمار هر کدام با دو تکرار (در مجموع ۱۰ ستون آزمایشی) برای بررسی تاثیر تغییر چگالی ظاهری (در دو تیمار، ستون‌های شماره ۱ و ۲) و تاثیر تغییر ترتیب لایه‌بندی خاک (در سه تیمار، ستون‌های شماره ۳، ۴ و ۵) بر حرکت آب و املاح مورد بررسی قرار گرفت. بعبارتی، برای هر تیمار دو ستون مشابه و مجزا تهیه شد و آزمایش در آنها همزمان و با شرایط یکسان انجام گردید.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد استفاده در آزمایش

کلاس بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	چگالی ظاهری (gr/cm ³)	تخلخل (%)
شن لومی	۸۵/۳۲	۵/۰۴	۹/۶۴	۱/۴۴	۴۵
لوم شنی-رسی	۵۱/۲۸	۱۵/۳۹	۳۳/۳۳	۱/۳۶	۴۸
لومرسی	۴۱/۸۹	۲۷/۹۸	۳۰/۱۳	۱/۳۸	۴۷

جدول ۲- مشخصات لایه‌بندی ستون‌های خاک

تیمارهای آزمایش	شماره لایه	ارتفاع لایه‌ها (cm)	کلاس بافتی هر لایه	چگالی ظاهری هر لایه (gr/cm ³)
ستون ۱	۱	۷۵	متوسط (لوم شنی-رسی)	۱/۳۶
	۲	۳۷/۵	متوسط (لوم شنی-رسی)	۱/۳۶
ستون ۲	۱	۲۵	سبک (شن لومی)	۱/۴۴
	۲	۲۵	متوسط (لوم شنی-رسی)	۱/۳۶
ستون ۳	۱	۲۵	سنگین (لوم رسی)	۱/۳۸
	۲	۲۵	متوسط (لوم شنی-رسی)	۱/۳۶
ستون ۴	۱	۲۵	سنگین (لوم رسی)	۱/۳۸
	۲	۲۵	متوسط (لوم شنی-رسی)	۱/۳۶
ستون ۵	۱	۲۵	متوسط (لوم شنی-رسی)	۱/۳۶
	۲	۲۵	سبک (شن لومی)	۱/۴۴
ستون ۶	۱	۲۵	متوسط (لوم شنی-رسی)	۱/۳۶
	۲	۲۵	سبک (شن لومی)	۱/۴۴
ستون ۷	۱	۲۵	متوسط (لوم شنی-رسی)	۱/۳۶
	۲	۲۵	سبک (شن لومی)	۱/۴۴
ستون ۸	۱	۲۵	متوسط (لوم شنی-رسی)	۱/۳۶
	۲	۲۵	سبک (شن لومی)	۱/۴۴

شبیه‌سازی جریان آب و املاح با مدل HYDRUS-1D

معادلات حاکم بر جریان آب و انتقال املاح

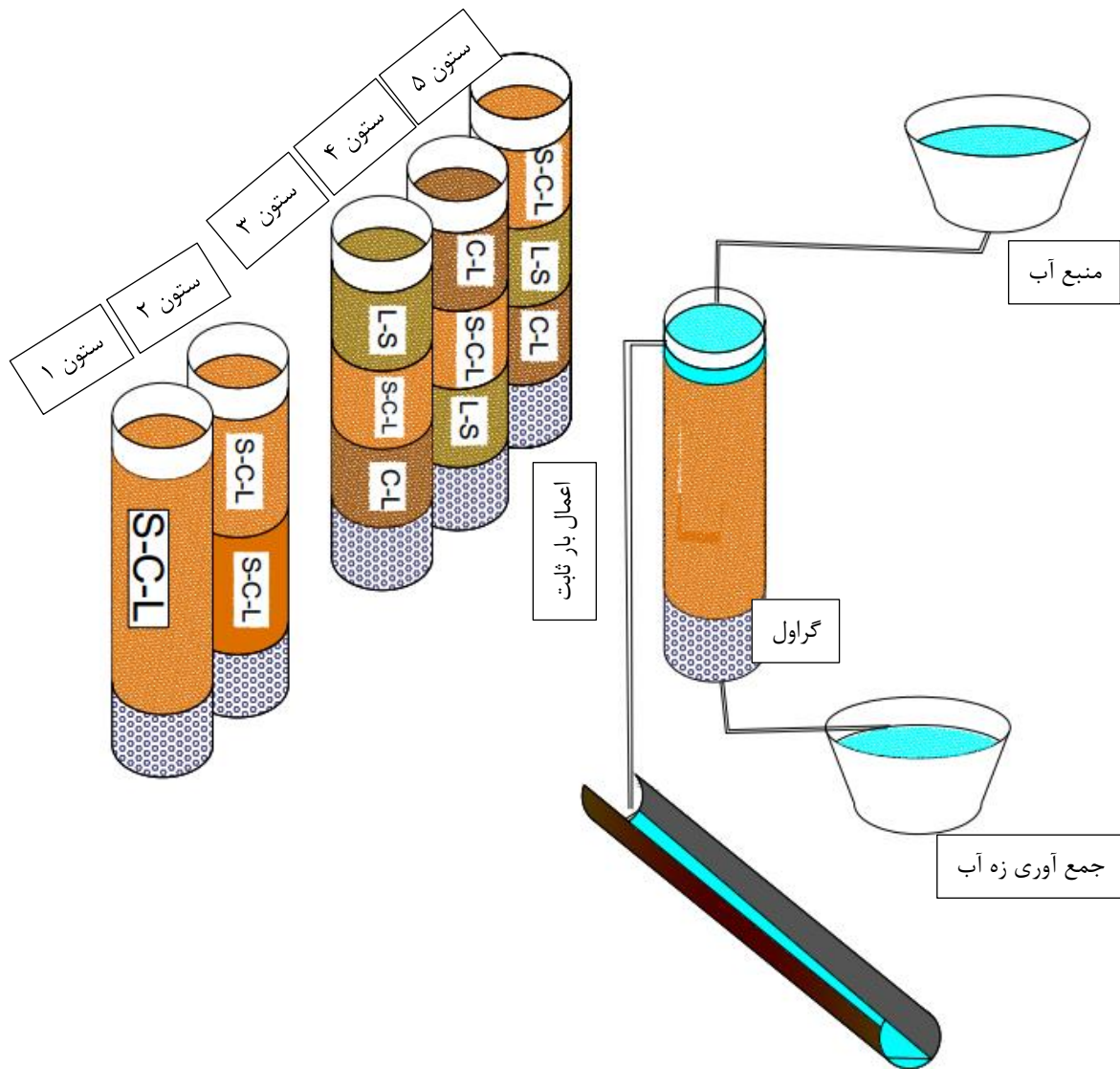
مدل هایدروس، یک مدل پیشرفته و پرکاربرد در شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک است که توسط سیمونک و همکاران (Simunek et al., 1999) ارائه شده است. در این مدل، از معادله حاکم بر حرکت آب در خاک (معادله ریچاردز) استفاده می‌شود. این معادله در واقع حرکت آب در خاک غیراشباع را شبیه‌سازی می‌کند. این معادله برای جریان یک بعدی، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، θ مقدار رطوبت حجمی [L³L⁻³]، t زمان [T]، z عمق [L]، h بار فشاری [L] و K هدایت هیدرولیکی (LT⁻¹) است. $\theta(h)$ که بیانگر رطوبت متناظر با بار فشاری است با استفاده از معادله ونگنختن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n \right]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

بررسی حرکت آب و تجمع املاح در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله اول، اثر تراکم و لایه‌بندی روی حرکت آب و ذخیره رطوبت در لایه‌های مختلف خاک بررسی شد. در این آزمایش، شوری آب ۰/۶۷ دسی‌زیمنس بر متر بود. مقادیر رطوبت در فواصل زمانی ۱۰ الی ۲۰ دقیقه و در عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ سانتیمتری توسط TDR قرائت گردید. بلافاصله پس از شروع آبیاری، رطوبت خاک توسط TDR اندازه‌گیری گردید. آبیاری تا زمانی که جبهه‌ی رطوبتی به انتهای ستون‌های خاک برسد ادامه یافت. مقادیر رطوبت تا زمانی که در انتهای ستون‌ها تغییر محسوس مشاهده نشد، قرائت گردید. در مرحله دوم آزمایش، تجمع املاح در لایه‌های مختلف خاک مورد بررسی قرار گرفت. در این مرحله، از محلول NaCl با شوری ۴/۴۶ دسی‌زیمنس بر متر استفاده شد. آبیاری به تدریج بر روی ستون‌های نمونه اعمال گردید و پس از مشاهده‌ی خروج زه‌آب، آزمایش خاتمه یافت. سپس، از لایه‌های مختلف ستون‌های آزمایش (تمام ۱۰ ستون تحقیق) نمونه‌برداری شد. نمونه‌های دست‌نخورده پس از انتقال به آزمایشگاه بصورت گل اشباع درآمد و پس از ۲۴ ساعت توسط کیف بوخنر برای خروج عصاره اشباع تحت مکش قرار گرفتند.



شکل ۱- ترتیب قرارگیری لایه‌های خاک در تیمارهای مورد مطالعه (سمت چپ) و نحوه اعمال آب، املاح و جمع آوری زه آب در هر ستون (سمت راست)

انتخاب شد. شرایط اولیه پروفیل خاک نیز، براساس مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده توسط TDR قبل از شروع آزمایش لحاظ گردید. همچنین، برای شبیه‌سازی حرکت املاح از شرط مرزی غلظت ثابت برای مرز بالادست و گرادیان غلظت برابر صفر برای مرز پایین‌دست استفاده گردید. غلظت اولیه در هر ستون و در هر بافت خاک نیز، بر اساس اندازه‌گیری اولیه تعیین شد. در این شبیه‌سازی، برای وزن‌دهی مکانی از روش عناصر محدود Galerkin و برای وزن‌دهی زمانی از روش Crank-Nicholson استفاده گردید.

واسنجی مدل

پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل به علت وجود داده‌های

در این رابطه، θ_r رطوبت باقی‌مانده در خاک (نزدیک به رطوبت در نقطه پژمردگی)، θ_s رطوبت اشباع، α ، m و n پارامترهای حاصل از برازش هستند. به منظور شبیه‌سازی انتقال املاح در خاک نیز، از معادله همرفت-انتشار به صورت زیر استفاده می‌گردد:

$$\frac{\partial(\theta c + \rho_b s)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(J_w c - \theta D_e \frac{\partial c}{\partial z} \right) - S \quad (3)$$

در رابطه فوق، ρ_b چگالی ظاهری خاک، c غلظت نمک مورد نظر، D_e ضریب انتشار، s جذب سطحی و J_w شدت جریان آب در خاک است که با استفاده از قانون داریسی محاسبه می‌شود. در شبیه‌سازی حرکت آب، شرایط مرزی در تمام ستون‌ها برای مرز بالادست، بار فشاری ثابت (به ارتفاع ۳ سانتیمتر) و برای مرز پایین، زهکشی آزاد

الف)، حرکت جبهه‌ی رطوبتی در این پروفیل از روند نسبتاً یکنواختی پیروی کرده و در فواصل زمانی تقریباً یکنواخت، عمق‌های مختلف پروفیل خاک را طی نموده است. پروفیل خاک در این ستون، پس از گذشت ۲۸۵ دقیقه به طور کامل اشباع شد. در ستون شماره ۲ با توجه به وجود یک بافت با دو چگالی متفاوت، حرکت آب در لایه اول و تا عمق ۳۰ سانتیمتری یکنواخت بود. اما در هنگام رسیدن به لایه متراکم، سرعت حرکت جبهه رطوبتی کاهش یافت به طوری که زمان اشباع شدن خاک از عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتیمتری ۱۴۰ دقیقه طول کشید در حالیکه همین روند در ستون اول ۱۱۰ دقیقه به طول انجامید و زمان اشباع شدن پروفیل خاک ۳۳۰ دقیقه بود (شکل ۲ ب). در شکل ۳، مقایسه دقیق‌تر حرکت جبهه رطوبتی در ستون یک و دو تحت تاثیر تغییر چگالی ظاهری خاک در عمق‌های مختلف صورت گرفته است. با توجه به نمودارها، در عمق‌های مختلف مشاهده می‌شود که حرکت آب در عمق ۲۰ و ۳۰ سانتیمتری که بافت و خصوصیات خاک مشابه هم می‌باشند، تقریباً یکسان بوده اما با تغییر چگالی ظاهری و افزایش آن در لایه پایین که باعث از بین رفتن منافذ درشت خاک و همچنین کاهش درصد رطوبت اشباع شده است، سرعت حرکت آب کند گردید. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش چگالی ظاهری خاک سرعت حرکت آب کند شده و از درصد رطوبت اشباع آن کاسته می‌شود. نتایج تحقیقات مک‌کنزی و ما و همکاران نیز بیانگر کاهش سرعت نفوذ آب با افزایش عمق در یک ستون خاک با لایه‌بندی مختلف بود. آنها دلیل این امر را فشردگی خاک با افزایش عمق بیان نمودند (McKenzie, 2010 و Ma et al., 2010).

شکل‌های ۴ و ۵ تاثیر ترتیب لایه‌بندی خاک بر حرکت آب را در ستون‌های ۳، ۴ و ۵ نشان می‌دهند. بررسی ستون ۳ (شکل ۴ الف) نشان می‌دهد که جبهه رطوبتی بعد از گذشت ۲۰ دقیقه از لایه درشت بافت شنی عبور کرده و وارد لایه دوم با بافت متوسط می‌گردد. حرکت جبهه رطوبتی در این لایه کندتر از لایه‌ی شنی بوده و جبهه رطوبتی پس از گذشت ۹۰ دقیقه از این لایه عبور کرده است. این موضوع در خصوص لایه سوم با بافت سنگین نیز صادق بوده به طوری که حرکت جبهه رطوبتی و افزایش رطوبت در آن به کندی صورت گرفته و جبهه رطوبتی پس از گذشت ۱۱۰ دقیقه از ابتدای آزمایش به عمق ۶۰ سانتیمتری رسید است. در ستون ۴ (شکل ۴ ب) ترتیب قرارگیری لایه‌ها از بالا به پایین به ترتیب شامل بافت سنگین، متوسط و سبک بود. در لایه بالایی این ستون، حرکت جبهه رطوبتی بسیار کند صورت گرفته به طوری که از عمق ۱۰ تا ۲۰ سانتیمتری، ۷۰ دقیقه به طول انجامید. همچنین، رطوبت بعد از ۱۵۵ دقیقه از ابتدای آزمایش به عمق ۳۰ سانتیمتری رسید که نشان‌دهنده‌ی افزایش ۱۲۵ دقیقه‌ای این زمان نسبت به ستون ۳ می‌باشد.

کامل اندازه‌گیری شده از ستون‌های خاک، با دقت بالا مورد واسنجی قرار گرفت. برای واسنجی مدل از یک فرایند سه مرحله‌ای استفاده گردید. در مرحله اول، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی Rosetta و اطلاعات مربوط به هر بافت خاک، مقادیر اولیه پارامترهای هیدرولیکی هر خاک تعیین گردید. در مرحله دوم، مقادیر اولیه پارامترهای هیدرولیکی پیش‌بینی شده مرحله اول با استفاده از نرم‌افزار RETC و داده‌های صفحات فشاری و استفاده از حل معکوس بهینه شدند. در مرحله سوم، مقادیر مرحله دوم در مدل HYDRUS-1D و با استفاده از ۴۰٪ اطلاعات رطوبتی جمع‌آوری شده در هر ستون، به روش حل معکوس برای بهینه‌سازی مجدد مورد استفاده قرار گرفت. در پایان، مقادیر مرحله سوم به عنوان تخمین نهایی انتخاب و در شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند.

ارزیابی مدل

در تحقیق حاضر، به منظور ارزیابی مدل از شاخص‌های $nRMSE$ ، R^2 و CRM استفاده شد. اگر مقدار $nRMSE$ (رابطه (۴)) کمتر از ۰/۱ باشد نشان دهنده شبیه‌سازی عالی مدل، بین ۰/۱ تا ۰/۲ شبیه‌سازی خوب، بین ۰/۲ تا ۰/۳ شبیه‌سازی متوسط و بیشتر از ۰/۳ نشان دهنده شبیه‌سازی ضعیف است. R^2 (رابطه (۵)) بیان‌کننده روند شبیه‌سازی است و هرچه به یک نزدیکتر باشد روند شبیه‌سازی دقیق‌تر است. مقدار CRM (رابطه (۶)) نشان دهنده بیش‌برآوردی (اگر منفی باشد) و کم‌برآوردی (اگر مثبت باشد) مدل می‌باشد. اگر مقادیر این پارامتر برابر صفر باشد نشان دهنده تطابق کامل بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی است (بشارت و همکاران ۱۳۹۰ و جوادزاده و همکاران ۱۳۹۵).

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

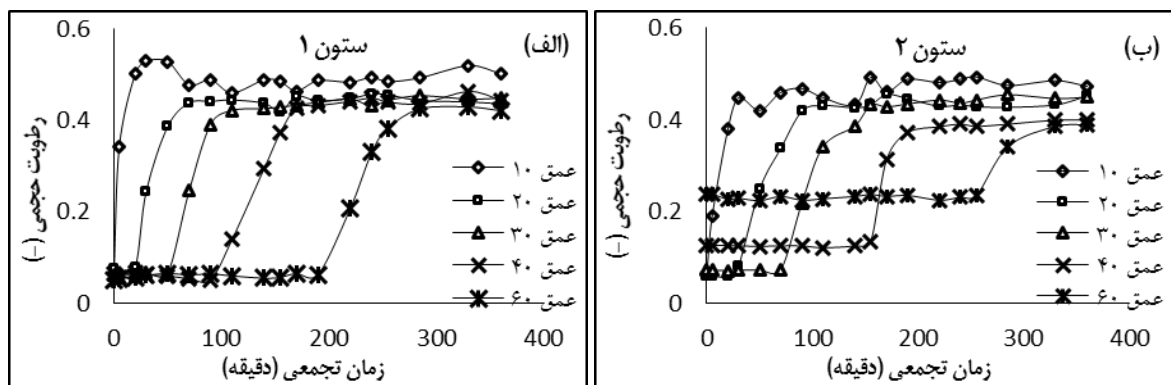
$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (6)$$

که در آن‌ها، n تعداد مشاهدات، O_i مقدار مشاهده‌ای داده، \bar{O} میانگین مقادیر مشاهده‌ای داده، P_i مقدار پیش‌بینی شده برای داده موردنظر است.

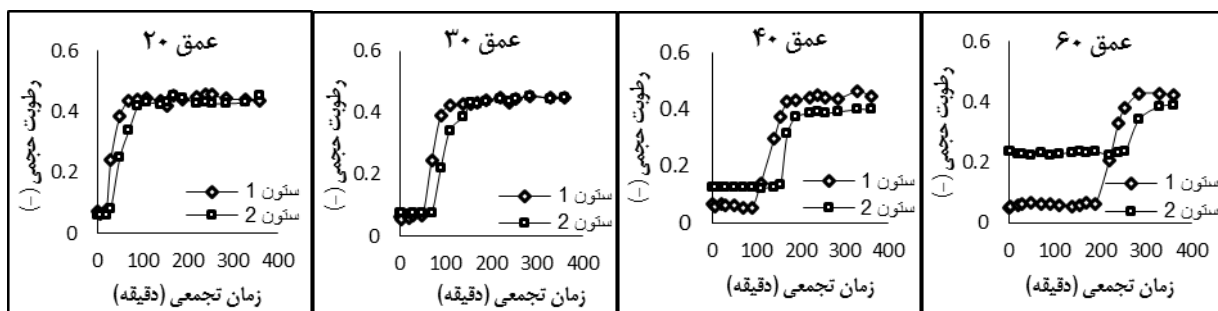
نتایج و بحث

بررسی حرکت آب در ستون‌ها

بررسی شکل‌های ۲ و ۳، تاثیر تغییر چگالی ظاهری خاک بر حرکت آب را نشان می‌دهد. در طول تحقیق، تغییرات رطوبت در پروفیل خاک با استفاده از رطوبت سنج از نوع TDR اندازه‌گیری شد. با توجه به همگن بودن بافت خاک در ستون شماره ۱ (شکل ۲



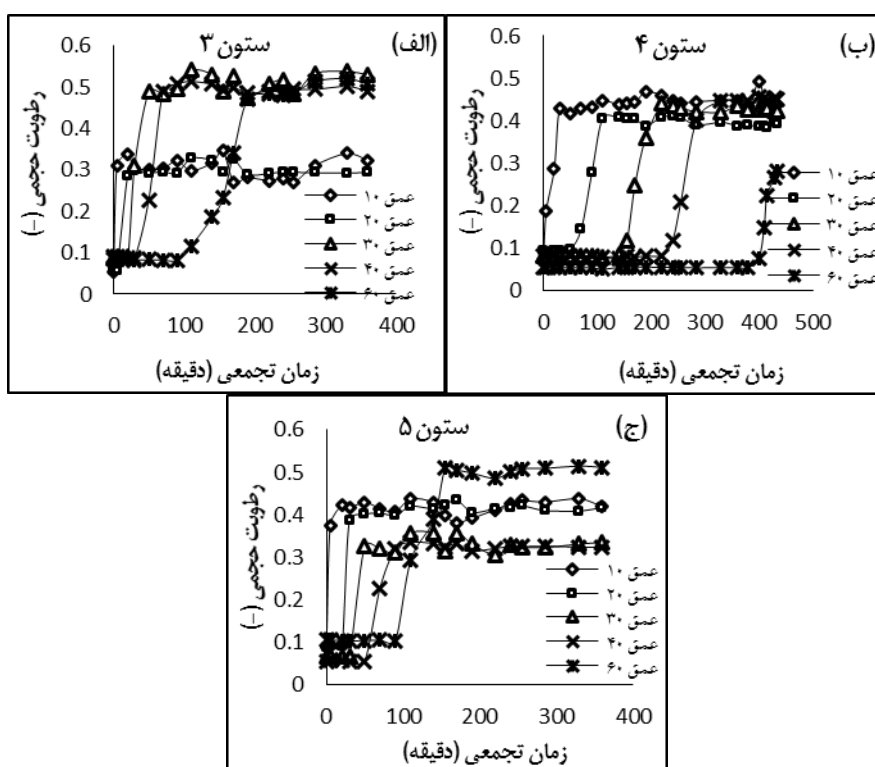
شکل ۲- تغییرات رطوبتی اندازه‌گیری شده در ستون شماره ۱ (الف) و ستون شماره ۲ (ب)



شکل ۳- مقایسه حرکت جبهه رطوبتی در ستون یک و دو تحت تاثیر تغییر چگالی ظاهری خاک

جبهه‌ی رطوبتی در ستون‌های شماره ۳ تا ۵ و در عمق‌های مختلف را مشخص می‌کند. ملاحظه می‌گردد با توجه به اینکه ضخامت لایه‌ها در این ستون‌ها یکسان است، تغییر در ترتیب قرارگیری آنها بر روی حرکت جبهه‌ی رطوبتی تاثیر گذاشته است. در ستون ۳ پس از گذشت ۳۳۰ دقیقه از ابتدای آزمایش عمق ۶۰ سانتیمتری به حالت اشباع رسید اما در ستون شماره ۴، ۴۳۵ دقیقه طول کشید. دلیل این امر سرعت بالای تخلیه‌ی رطوبت از لایه‌ی درشت بافت بالایی به لایه‌ی پایینی می‌باشد. شیب منحنی ستون شماره ۵ که در آن لایه‌ی درشت بافت در زیر لایه متوسط بافت قرار داشت، تندتر از شیب منحنی ستون ۳ و ۴ می‌باشد. دلیل این موضوع آن است که وقتی جریان از یک لایه‌ی ریزبافت بالایی به یک لایه‌ی درشت بافت پایینی می‌رسد، به جای پیشروی با یک جبهه‌ی صاف و ملایم، در محل‌های مشخصی متمرکز شده و به صورت جریان چند شاخه‌ای وارد لایه‌ی پایینی می‌شود. از آن به بعد به جای اینکه به طور یکنواخت از تمام لایه درشت بافت عبور کند، از طریق منافذ و مجاری درشت حرکت می‌کند. لذا سرعت آن افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات تاران و نورآبادی (۱۳۹۵) نیز نشان داد وقتی لایه درشت بافت شن لومی در زیر لایه ریزبافت لوم رسی قرار دارد، رخنه محلول سریع‌تر از حالت عکس قرارگیری لایه‌ها است.

حرکت رطوبت در لایه میانی که در زیر لایه سنگین قرار گرفته است، نسبت به همین لایه در ستون ۳ که زیر لایه سبک بافت قرار گرفته بود بسیار متفاوت می‌باشد. انتقال رطوبت از عمق ۳۰ تا ۴۰ سانتیمتری در ستون ۴، ۸۵ دقیقه طول کشید که این مدت زمان در ستون ۳ برابر ۲۰ دقیقه بود این نتایج نشان دهنده‌ی سرعت انتقال اندک لایه‌ی ریز بافت بالایی می‌باشد. همچنین رطوبت بعد از گذشت ۴۱۰ دقیقه از ابتدای آزمایش به عمق ۶۰ سانتیمتری رسید که نشان دهنده‌ی افزایش ۳۰۰ دقیقه‌ای نسبت به ستون ۳ است. در شکل ۴ ج مشاهده می‌شود که سرعت حرکت جبهه رطوبتی در این ستون بسیار سریع بوده به طوری که پس از ۱۱۰ دقیقه از ابتدای آزمایش، جبهه رطوبتی به عمق ۶۰ سانتیمتری رسیده است. دلیل این امر را می‌توان تفاوت در خصوصیات خاک در مقایسه با بقیه ستون‌ها بیان نمود زیرا که امکان مشابه بودن ۱۰۰ درصدی نمونه‌ها عملاً وجود ندارد. در این ستون با توجه به ترتیب قرارگیری لایه‌ها، مشاهده می‌شود که میزان رطوبت اشباع در لایه با بافت سبک بیشتر از لایه مشابه در ستون‌های ۳ و ۴ می‌باشد که دلیل آن را می‌توان در موقعیت قرارگیری این لایه و محبوس شدن بیشتر آب در این لایه در مواجهه با لایه‌ی سنگین زیرین دانست. شکل ۵ روند کلی تاثیر ترتیب لایه‌بندی بر سرعت حرکت



شکل ۴- اطلاعات رطوبتی اندازه‌گیری شده در ستون شماره ۳ (الف)، ۴ (ب) و ۵ (ج)



شکل ۵- مقایسه حرکت جبهه رطوبتی در ستون سه، چهار و پنج در عمق‌های مختلف تحت تاثیر بافت‌های مختلف خاک

نتایج شبیه‌سازی

در جدول ۳ مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک بهینه شده برای پنج ستون آزمایشات ارائه شده است. دلیل تفاوت مقادیر پارامترها برای یک خاک مشابه را می‌توان به دلیل تغییرات در تراکم و ساختمان خاک بیان نمود. بررسی نتایج مشاهداتی و برآوردی (جدول ۴) نشان می‌دهد مقدار R^2 برای ستون‌های ۱ تا ۵ در بازه ۰/۹۵ تا ۰/۹۹ قرار دارد (بیشترین مقدار در ستون ۱ و کمترین مقدار در ستون ۳). بررسی مقدار پارامتر CRM نشان می‌دهد تنها در ستون ۳ بیش‌برآوردی صورت گرفته و در بقیه موارد کم‌برآوردی مشاهده شد.

نتایج شاخص nRMSE نیز بیانگر دقت شبیه‌سازی در ستون‌های ۱، ۲ و ۵ در سطح عالی و در ستون‌های ۳ و ۴ در سطح خوب است. بررسی همزمان شاخص‌ها بیانگر این است که بیشترین دقت در ستون ۱ مشاهده شد که می‌تواند به دلیل همگن بودن تمام ستون خاک باشد. مقادیر nRSME و R^2 ذکر شده در جدول ۴، دقت بالای مدل HYDRUS-1D را در پیش‌بینی داده‌ها نشان می‌دهد (مشابه با نتایج تحقیقات: محمدی و دلبری ۱۳۹۴، ذاکری‌نیا و همکاران ۱۳۸۶، محمدی و همکاران ۱۳۹۲، عباسی و تاجیک ۱۳۸۶ و عباسی ۱۳۸۷).

جدول ۳- مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک در لایه‌های مختلف در ستون‌های مورد آزمایش

پارامتر	لایه اول	لایه دوم	لایه سوم	
θ_r (-)	۰/۰۵	-	-	ستون ۱
θ_s (-)	۰/۴۴	-	-	
α (1/cm)	۰/۰۲۵	-	-	
n (-)	۲/۴۵	-	-	
K_s (cm/min)	۰/۰۴۴	-	-	
θ_r (-)	۰/۰۵	۰/۰۵	-	ستون ۲
θ_s (-)	۰/۴۴	۰/۴	-	
α (1/cm)	۰/۰۲۵	۰/۰۵	-	
n (-)	۲/۵	۱/۳۴	-	
K_s (cm/min)	۰/۰۴	۰/۰۱۹	-	
θ_r (-)	۰/۰۵۷	۰/۰۸	۰/۰۸	ستون ۳
θ_s (-)	۰/۳	۰/۵	۰/۵	
α (1/cm)	۰/۱۲۴	۰/۰۵۹	۰/۰۱۹	
n (-)	۲/۲۸	۱/۵	۱/۳۱	
K_s (cm/min)	۰/۲۱	۰/۰۶	۰/۰۰۷	
θ_r (-)	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۰۵	ستون ۴
θ_s (-)	۰/۴۱	۰/۴۵	۰/۳	
α (1/cm)	۰/۰۵	۰/۰۵۹	۰/۲	
n (-)	۲/۵	۱/۵	۳/۴۵	
K_s (cm/min)	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۸	
θ_r (-)	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۸	ستون ۵
θ_s (-)	۰/۴۲	۰/۳۲	۰/۵	
α (1/cm)	۰/۰۵۹	۰/۱	۰/۰۲۵	
n (-)	۱/۴۸	۱/۷	۱/۳	
K_s (cm/min)	۰/۰۶۵	۰/۰۸	۰/۰۲۳	

جدول ۴- مقادیر پارامترهای آماری برای ارزیابی دقت مدل HYDRUS در شبیه‌سازی

ستون	R^2	CRM	nRMSE
۱	۰/۹۹	۰	۰/۰۷
۲	۰/۹۶	۰/۰۱۶	۰/۱
۳	۰/۹۵	-۰/۰۱۲	۰/۱۲
۴	۰/۹۵۹	۰/۰۰۵	۰/۱۴
۵	۰/۹۶۴	۰/۰۱۸	۰/۱

اشباع شدن خاک کم شده و در پایان آزمایش به مقدار نهایی خود نزدیک می‌شود. در ستون دو به دلیل افزایش چگالی خاک لایه دوم که باعث کاهش خلل و فرج درشت و هدایت هیدرولیکی خاک شده است، یک شکستگی در شدت نفوذ در هنگام ورود آب به لایه دوم مشاهده می‌شود. ما و همکاران نیز گزارش کردند با افزایش تراکم خاک شدت نفوذ آب به خاک کاهش می‌یابد (Ma et al., 2010).

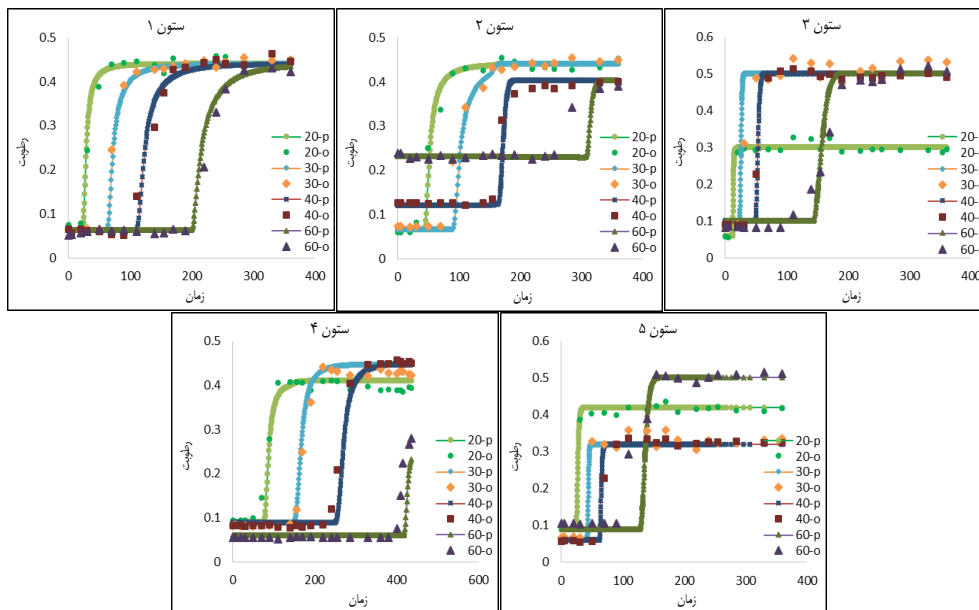
شکل ۶ مقادیر رطوبتی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده و شکل ۷ مقایسه تغییرات شدت نفوذ آب به خاک را برای پنج ستون نمونه نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود در ستون یک به دلیل وجود یک لایه خاک، شدت نفوذ آب به خاک حالت یکنواختی داشته است. مقدار شدت نفوذ زیاد در ابتدا ناشی از دو عامل مکش زیاد در اثر خشک بودن خاک و نیروی ثقل است. این مقدار با گذشت زمان و

همانطور که در شکل ۶ مشخص است دقت شبیه‌سازی مدل HYDRUS بسیار بالا بوده است و تغییرات رطوبت در لایه‌های مختلف خاک با وجود لایه‌ای بودن تیمارها با دقت شبیه‌سازی شده است. این امر نشان می‌دهد مدل توانسته تغییرات از یک لایه به لایه‌ی دیگر را که از پیچیدگی هیدرولیکی بالایی برخوردار است به خوبی ارائه کند.

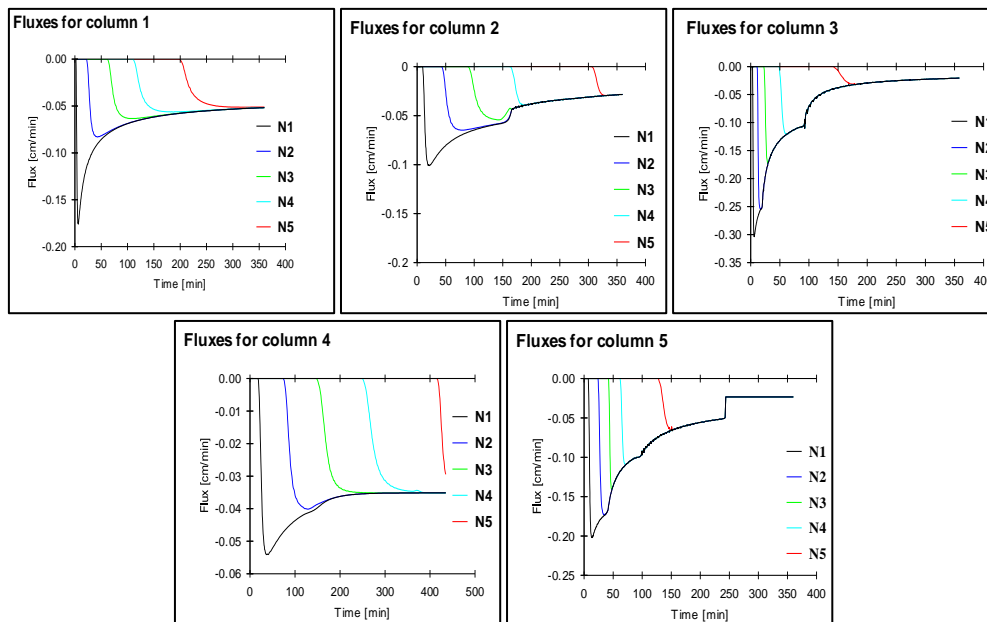
بررسی حرکت شوری

جدول ۵ مقادیر شوری خاک حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در ستون‌های نمونه را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی حرکت املاح در پروفیل خاک ستون‌های نمونه در شکل ۸ نشان داده شده است. در تمام موارد، زمان شبیه‌سازی ۲۰۰۰ دقیقه می‌باشد. این زمان برابر زمان شروع آزمایش تا زمان نمونه‌برداری بود. شکل ۸ الف و ۸ ب مقایسه شوری خاک بعد از اعمال سدیم کلرید در ستون یک و ستون دو تحت تاثیر تغییر چگالی ظاهری خاک را نشان می‌دهند. بررسی این شکل‌ها بیانگر ملایم‌تر بودن شیب شوری خاک در ستون ۲ از ستون ۱ است و بیشترین مقدار تجمع املاح در لایه بالایی قرار گرفته است. این در حالی است که شیب تند نمودار در ستون ۱ حاکی از توزیع یکنواخت و حرکت سریع املاح در اثر بافت همگن می‌باشد. از دلایل تجمع املاح در لایه بالایی ستون ۲ می‌توان به کند شدن حرکت آب در اثر تراکم لایه زیرین و از بین رفتن منافذ درشت و فرصت بیشتر برای ترکیب اشاره کرد.

این تحقیق، در ستون ۳ که ترتیب قرارگیری لایه‌ها به صورت سبک، متوسط و سنگین است مشاهده می‌شود که در ابتدا با توجه به بافت سبک شدت نفوذ زیاد بوده است که در هنگام رسیدن به لایه دوم به دلیل تغییر بافت خاک و کاهش هدایت هیدرولیکی به مقدار زیادی از شدت نفوذ کاسته شده است. همچنین این اتفاق در هنگام ورود به لایه سوم نیز مشابه می‌باشد. همچنین وقتی لایه سنگینی در زیر لایه سبک قرار می‌گیرد به دلیل کاهش شدت نفوذ، تجمع آب در لایه‌های درشت بافت صورت می‌گیرد. بنابراین عامل کنترل کننده جریان در این حالت بافت سنگین خواهد بود. در مورد ستون چهار که ترتیب قرارگیری لایه‌ها به صورت سنگین، متوسط و سبک است مشاهده می‌شود که شدت نفوذ تحت تاثیر مکش و ثقل در ابتدا زیاد بوده و با اشباع شدن خاک کاهش یافته است. اما در این حالت به دلیل بالا بودن بافت سنگین که کنترل کننده شدت نفوذ است شکستگی مشاهده نمی‌شود و تقریباً حالتی یکنواخت دارد. اما تغییر محسوسی که در هنگام ورود به لایه دوم مشاهده می‌شود در اثر تغییر بافت از سنگین به متوسط است که در این حالت در فصل مشترک دو خاک یک توقف در جریان آب رخ داده است. علت توقف، مکش بیشتر خاک سنگین نسبت به خاک متوسط است. در ستون ۵ ترتیب لایه‌ها به صورت متوسط، سبک و سنگین بود. بنابراین حالتی مشابه با ستون سه خواهد داشت با این تفاوت که شدت نفوذ در ابتدا کمتر از ستون سه خواهد بود و دلیل آن وجود بافت متوسط در بالا و هدایت هیدرولیکی کمتر نسبت به لایه سبک است. در این حالت نیز بافت سنگین زیرین عامل کنترل کننده جریان است و باعث تجمع آب در بافت سبک خواهد شد.



شکل ۶- مقایسه تغییرات رطوبتی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده در ستون‌های یک تا پنج (در تمام نمودارها واحد زمان بر حسب دقیقه و واحد رطوبت حجمی بی بعد است)



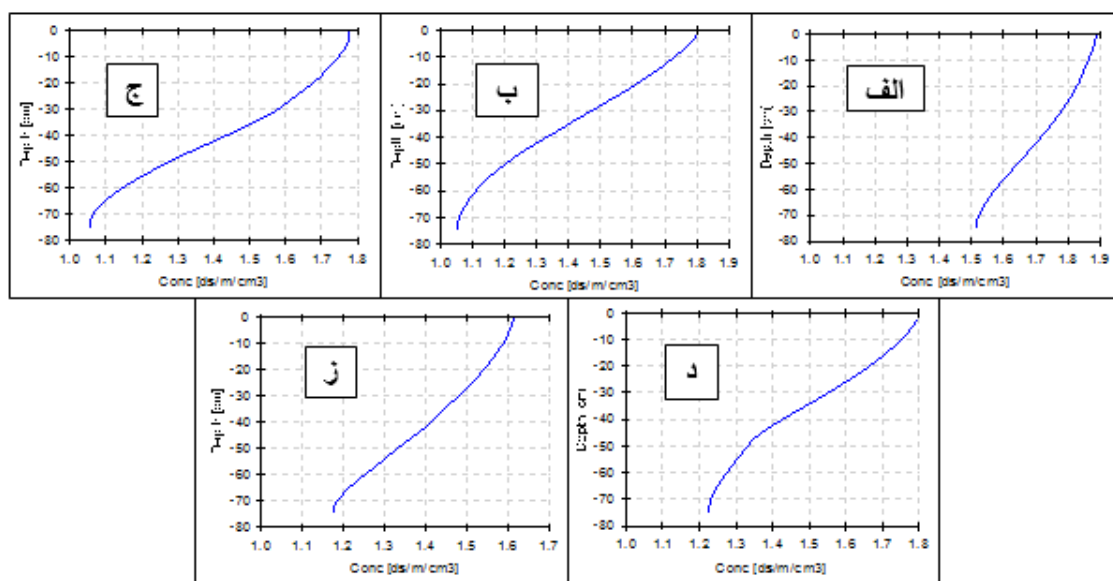
شکل ۷- مقایسه تغییرات شدت نفوذ آب به خاک در ستون‌های یک تا پنج تحت تاثیر تغییر و ترتیب قرارگیری بافت خاک

جدول ۵- مقادیر میانگین شوری در خاک حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی

پروفیل خاک		عمق (cm)	ستون
EC (dS/m) شبیه‌سازی	EC (dS/m) مشاهده‌ای		
۱/۷۱	۱/۸۱	۷۵-۰	۱ ستون
۱/۵۹	۱/۵۶	۳۷/۵-۰	۲ ستون
۱/۲۱	۱/۱۴	۷۵-۳۷/۵	
۱/۷۱	۱/۷۱	۲۵-۰	۳ ستون
۱/۴۶	۱/۳۸	۵۰-۲۵	
۱/۱۴	۱/۱	۷۵-۵۰	۴ ستون
۱/۷	۱/۷۹	۲۵-۰	
۱/۴۶	۱/۳۶	۵۰-۲۵	
۱/۲۷	۱/۲۲	۷۵-۵۰	۵ ستون
۱/۵۹	۱/۵۶	۲۵-۰	
۱/۴۲	۱/۴۱	۵۰-۲۵	
۱/۲۵	۱/۲۹	۷۵-۵۰	

ترتیب قرارگیری لایه‌ها تاثیری در تجمع و توزیع املاح نداشته و مقدار آن از بالا به پایین کاهش یافته است. شارما و همکاران نیز گزارش نمودند ترتیب لایه‌بندی خاک تاثیری در توزیع املاح ندارد (Sharma et al., 2014). در این تحقیق، دلیل برخی از تفاوت‌ها در بافت‌های یکسان را می‌توان در اثر تغییرات خصوصیات خاک از یک ستون به ستون دیگر و همچنین تفاوت در مقدار رطوبت اولیه آنها دانست.

شکل‌های ۸ ج، شوری خاک بعد از اعمال سدیم کلرید در ستون‌های ۳، ۴، ۵ و ۸ را تحت تاثیر تغییر بافت و لایه‌بندی خاک نشان می‌دهد. در ستون ۳ که ترتیب لایه‌ها از بالا به پایین به صورت سبک، متوسط و سنگین است روندی مشابه با ستون ۲ دارد. در ستون ۴ به دلیل در بالا قرار گرفتن لایه سنگین، حرکت آب و املاح کند بوده و بنابراین تجمع املاح در لایه بالایی بیشتر از بقیه لایه‌ها مشاهده شد. در ستون ۵ نیز مقدار بیشتر املاح در لایه بالا مشاهده می‌شود. با بررسی همزمان سه نمودار مربوطه می‌توان نتیجه گرفت که



شکل ۸- مقایسه شوری خاک بعد از اعمال سدیم کلرید در ستون های ۱ (الف)، ۲ (ب)، ۳ (ج)، ۴ (د) و ۵ (ز) تحت تاثیر تغییر بافت و لایه بندی خاک

نتیجه گیری

این تحقیق با هدف بررسی تاثیر لایه بندی، بافت و تراکم خاک بر نحوه توزیع رطوبت و انتقال املاح در خاک های چند لایه انجام گرفت. نتایج آزمایشات و شبیه سازی نشان داد حرکت آب در خاک تحت تاثیر موقعیت قرارگیری لایه ای که کمترین میزان نفوذ پذیری را دارد، می باشد و زمانی که لایه ریز بافت در بالا قرار می گیرد زمان طی شدن رطوبت در طول ستون بیشترین مقدار خواهد شد. همچنین در این حالت رطوبت اشباع لایه های زیرین به دلیل وقوع جریان های انگشتی کاهش خواهد یافت. با تغییر و افزایش چگالی ظاهری خاک در لایه پایین، کاهش درصد رطوبت اشباع و کند شدن سرعت حرکت آب مشاهده گردید. در مرحله شبیه سازی حرکت آب، شاخص nRMSE نشان داد که دقت شبیه سازی در ستون های ۱، ۲ و ۵ عالی و در ستون ۳ و ۴ خوب بوده است. کمترین و بیشترین خطا به ترتیب در ستون ۱ و ۴ با مقادیر ۰/۰۷ و ۰/۱۴ برآورد گردید. به طور کلی، با بررسی همزمان شاخص ها بیشترین دقت در ستون ۱ مشاهده شد که می تواند به دلیل همگن بودن خاک در ستون و بافت خاک یکنواخت آن باشد. بررسی حرکت و تجمع املاح در خاک نشان داد که در تمام ستون ها مقدار EC از لایه بالایی تا لایه زیرین به ترتیب از بیشترین تا کمترین مقدار تغییر یافت و این تغییر، بدون توجه به ترتیب قرارگیری لایه ها بود. بنابراین، ترتیب قرارگیری لایه ها تفاوتی در روند تجمع املاح ایجاد نکرد. نتایج این تحقیق می تواند در شناخت تغییرات رطوبت و املاح در پروفیل خاک های چند لایه موثر باشد.

پیشنهاد می گردد با توجه به اهمیت توزیع املاح در خاک و افزایش خطر آلودگی آب های زیرزمینی در سالهای اخیر، منحنی رخنه املاح مورد استفاده در کودهای شیمیایی و سموم دفع آفات مورد استفاده در کشاورزی در خاک های مطبق بررسی و شبیه سازی گردد.

منابع

- بشارت، س.، ناظمی، الف.، صدرالدینی، ع. و شهمراد، ص. ۱۳۹۰. استفاده از نرم افزار HYDRUS در شبیه سازی حرکت و جذب آب در خاک و ارائه نرم افزار SWMRUM. نشریه دانش آب و خاک. ۴: ۲۱-۱۲۱-۱۳۷.
- تاران، ف. و نورآبادی، س. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی و شبیه سازی تاثیر ترتیب قرارگیری لایه های خاک و ضخامت آنها در انتقال محلول. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۰: ۶۳-۷۲.
- جوادزاده شاخالی، ف.، خالدیان، م.، نوایان، م. و شاهین رخسار، پ. ۱۳۹۵. شبیه سازی رطوبت حجمی خاک با مدل HYDRUS-2D از منبع تغذیه خطی با شوری های متفاوت آب آبیاری و مقایسه با مشاهدات میدانی. نشریه علوم آب و خاک. ۲۰: ۷۵.
- ذاکری نیا، م.، عباسی، ف.، سهرابی، ت. ۱۳۸۶. بررسی تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از روش معکوس. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۳۰: ۱۷-۳۰.
- عباسی، ف. ۱۳۸۷. ارزیابی برخی روش های تخمین ویژگی های

- Kumar, A., Sharma, A.K. and Rani, A. 2015. Transport of solutes under transient flow conditions—A case study—Yamuna river sub basin. *International Soil and Water Conservation Research*. 3: 209-223.
- McKenzie, R. H. 2010. *Agricultural Soil Compaction: Causes and Management*. Agri. facts. Practical information for Alberta's Agriculture Industry. Agdex 510-1. 10p.
- Ma, Y., Feng, Sh., Su, D., Gao, G. and Huo, Z. 2010. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D. *Journal of Computers and Electronics in Agriculture*. 71S: S40-S47.
- Ritter, A., Munoz-Carpena, R. and Regalado, C.M. 2005. Using TDR and inverse modeling to characterize solute transport in a layered agricultural volcanic soil. *Vadose Zone Journal*. 4: 300-309.
- Sharma, P.K., Savant, V.A., Shukla, S.K. and Khan, Z. 2014. Experimental and numerical simulation of contaminant transport through layered soil. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 8(4):345-351.
- Šimůnek, J., Kohne, J.M., Kodesova, R. and Sejna, M. 2008. Simulating Nonequilibrium Movement of Water, Solutes and Particles Using HYDRUS—A Review of Recent Applications. *Soil and Water Research*. 3:S42-S51.
- هیدرولیکی خاک برای شبیه‌سازی رطوبت. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۹، شماره ۴، صفحات ۳۱-۴۴.
- عباسی، ف.، تاجیک، ف. ۱۳۸۶. برآورد همزمان پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در خاک به روش حل معکوس در مقیاس مزرعه. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، جلد ۱۱، شماره ۱، صفحات ۱۱۱-۱۲۲.
- محمدی، الف.، دلبری، م.، ۱۳۹۴. شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در خاک با استفاده از نرم افزار HYDRUS-1D. نشریه ی دانش آب و خاک، ۲۵: ۶۷-۷۸.
- محمدی، الف.، دلبری، م.، محمدی چاری، م.، محمدی، م.، ۱۳۹۲. مدل HYDRUS-1D و شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک، در: دومین کنفرانس بین المللی مدلسازی گیاه، آب، خاک و هوا. اردیبهشت ماه، دانشگاه کرمان.
- Huang, M., Barbour, S.L., Elshorbagy, A., Zettl, J.D. and Cheng Si, B. 2011. Infiltration and drainage processes in multilayered coarse soils. *Journal of Soil Science*. 91: 169-183.
- Hu, K., Li, B. and Chen, D. 2004. Comparison of water drainage and nitrate leaching calculated by soil water balance model and dynamic process model. *Advances in Water Science*. 15: 87-93.

Measuring and Simulating of Water Movement and Solute Transport in layered soils

F. Nasimi¹, K. Zeinalzadeh^{2*}, S. Besharat³

Received: Mar.16, 2019

Accepted: Jun.24, 2019

Abstract

The precise simulation of water and solute transfer in porous media is very important in soil and water studies. The purpose of this study was to measure and simulate water movement and solutes transfer of layered soils. In this study, the effect of soil bulk density changes and different soil layering on water and solute movement were measured and simulated with HYDRUS-1D model in 5 treatments and two replications. For this purpose, 10 columns of PVC with a height of 105 cm and an inner diameter of 31.5 cm, and three soil textures including loamy sand, sandy-clay loam and clay loam were used. The columns were irrigated with irrigation water and saline water with salinity of 0.67 and 4.46 ds/m, respectively. During the experiment, moisture content (using TDR moisture meter) and salinity (by saturated mud extraction method) were measured at depths of 10, 20, 30, 40 and 60 cm. The results of the study showed that the water movement in the soil is affected by the position of the layers with the least permeability and when the fine texture layer is placed on top, the time of water exit is the highest. Also, the results showed that in all columns the EC value was the highest in the upper layer and decreased from top to bottom regardless of the order of the arrangement of the layers. The survey of the nRMSE index indicates the high accuracy of the HYDRUS model in simulating the movement of water and solute in the layered soil. The lowest error in simulation was in homogeneous soil.

Keywords: Soil bulk density, TDR moisture meter, Soil column, HYDRUS-1D

1- Graduated from the Master of Irrigation and Drainage, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

(* - Corresponding Author Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir)