

## ارزیابی نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D در شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک در بافت-های مختلف با استفاده از رویکرد حل معکوس

پریسا مشایخی<sup>۱\*</sup>، محسن دهقانی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۸)

### چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های حل عددی معکوس در حل مسائل حرکت آب در خاک مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش از نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک از طریق نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، در بافت‌های مختلف و با استفاده از رویکرد حل معکوس استفاده شد. برای این منظور، داده‌های حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری به روش استوانه‌های دوگانه در ۶۳ نقطه از مناطق مختلف استان اصفهان به عنوان ورودی مدل مورد استفاده قرار گرفت. خاک‌های مورد مطالعه در هفت کلاس بافتی شامل لوم‌شنی (SL)، لوم رس‌شنی (SCL)، لوم (L)، لوم سیلتی (SiL)، لوم رسی (CL)، لوم رس سیلتی (SiCL) و رس سیلتی (SiC) قرار گرفتند. بر اساس نتایج ارزیابی‌های آماری صورت گرفته، در همه بافت‌ها، همخوانی بسیار خوبی بین داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مشاهده شد. مقادیر ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای بافت‌های SL، SCL، L، SiL، CL، SiCL و SiC به ترتیب معادل ۰/۹۹۸، ۰/۹۹۹، ۰/۹۹۲، ۰/۹۹۶، ۰/۹۸۳، ۰/۹۷۶ و ۰/۹۹۵ بود. میزان خطای شبیه‌سازی با افزایش درصد رس در بافت خاک، افزایش پیدا کرد؛ به‌گونه‌ای که بیشترین خطای شبیه‌سازی در بافت SiC ( $NRMSE=0/045$ ) و کمترین میزان خطای شبیه‌سازی در بافت SL ( $NRMSE=0/015$ ) مشاهده شد که در حدود ۶۷ درصد بهبود در فرآیند شبیه‌سازی بوده است. در کل داده‌های نفوذ شبیه‌سازی شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه به کمک نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D و رویکرد حل عددی معکوس در همه بافت‌های مورد مطالعه، از دقت قابل قبولی و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار بودند.

واژه‌های کلیدی: استوانه‌های دوگانه، حل عددی معکوس، نفوذ تجمعی

مشایخی پ.، دهقانی م. ۱۴۰۱. ارزیابی نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D در شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک در بافت‌های مختلف با استفاده از رویکرد حل معکوس. تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۱۰، شماره ۱. صفحه: ۹۸-۱۱۰.

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان ایران  
۲- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان ایران

\* پست الکترونیک: [Mashayekhi\\_enj@yahoo.com](mailto:Mashayekhi_enj@yahoo.com)

## مقدمه

شناخت رفتار هیدرودینامیکی خاک به ویژه در برابر تغییراتی که انسان در قرن اخیر بر آن تحمیل کرده است و چگونگی تاثیر آن بر زیست بوم، بسیار ضروری است و به مدیریت زمین های کشاورزی و محیط زیست کمک زیادی می کند. ویژگی های هیدرولیکی خاک (شامل منحنی های نگه داشت آب  $h(\theta)$  و هدایت هیدرولیکی  $K(\theta)$ ) با تاثیر بر نفوذ آب به خاک، نقش بسیار مهمی در مدیریت منابع آب در زمین های کشاورزی و حوضه های آبخیز دارند (Wang *et al.*, 2002). امروزه روش های آزمایشگاهی مختلفی برای اندازه گیری مستقیم این ویژگی ها وجود دارد. با این وجود، پژوهش های مختلف نشان می دهد که به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی زیاد این ویژگی ها، ناهمگون بودن خاک و ماهیت غیر خطی منحنی مشخصه رطوبتی و نیز هدایت هیدرولیکی، اندازه گیری های صورت گرفته در مقیاس آزمایشگاهی بر روی نمونه های کوچک خاک، به هیچ عنوان قادر به توصیف دقیق جریانات و فرآیندهای نقل و انتقالات در مقیاس های بزرگتر مکانی در خاک نخواهند بود (Lai & Ren, 2016; Scell *et al.*, 2012). همین امر لزوم توسعه روش های جایگزین برای بدست آوردن ویژگی های هیدرولیکی خاک در مقیاس کاربرد مدل را ایجاد می کند. در نتیجه، روش های غیرمستقیم برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی خاک محبوبیت یافتند. از جمله این رویکردها که در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، روش مدل سازی معکوس است (Vogel *et al.*, 2008؛ Schelle *et al.*, 2012؛ Šimůnek *et al.*, 2012؛ Puhlmann *et al.*, 2012؛ Mashayekhi *et al.*, 2016). روش معکوس در مقایسه با سایر روش ها، ارزان و سریع است. در این روش، ویژگی های خاک بر پایه ی متغیرهای زود یافت در شرایط واقعی برآورد می شوند.

گریب و همکاران (Gribb *et al.*, 2009) و وریکن و همکاران (Vereecken *et al.*, 2010) دریافتند که ویژگی های هیدرولیکی که به صورت معکوس از طریق اندازه گیری های درجا شامل میزان اندازه گیری رطوبت خاک و یا پتانسیل ماتریک در شرایط طبیعی و واقعی برآورد می شوند، بسیار بهتر از اندازه گیری های انجام شده در مقیاس آزمایشگاهی و توابع انتقالی، شرایط جریان آب در خاک

را توصیف می کنند. در حل مسایل به روش معکوس، پارامترهای مربوط به یک مدل حاکم بر سیستم به گونه ای تنظیم می شوند که بهترین توصیف از شرایط واقعی به دست آید (Minasny & McBratney, 2002). معمولاً اندازه گیری پاسخ فرآیندهای جریان مانند نفوذ تجمعی یا تغییرات میزان آب خاک نسبت به سایر ویژگی های هیدرولیکی خاک، آسان تر است. به همین دلیل پژوهشگران مختلف برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک از داده های نفوذ تجمعی اندازه گیری شده به روش های مختلف در حل روش های عددی معکوس استفاده کرده اند. به عنوان مثال رئوف و پیل پایه (Raouf & Pilpayeh, 2011) از داده های اندازه گیری شده به وسیله نفوذسنج دیسکی (مکشی) (Tension/Disk Infiltrometer) و ون کلاستر و همکاران (Vanclouster *et al.*, 2007) از داده های اندازه گیری شده به وسیله نفوذسنج مخروطی (Cone Permeameter) برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی استفاده کردند. یکی از روش های استاندارد در اندازه گیری نفوذ آب به خاک روش استوانه های دوگانه است. همچنین در همه مطالعات تفصیلی خاک شناسی صورت گرفته در کشور، روش نفوذسنج های استوانه-دوگانه به عنوان روش استاندارد اندازه گیری نفوذ آب به خاک مورد استفاده قرار گرفته است؛ با این وجود تا کنون مطالعات چندانی در خصوص میزان سودمندی داده های نفوذ اندازه گیری به این روش جهت استفاده در روش های حل عددی معکوس در بافت های مختلف انجام نگرفته است.

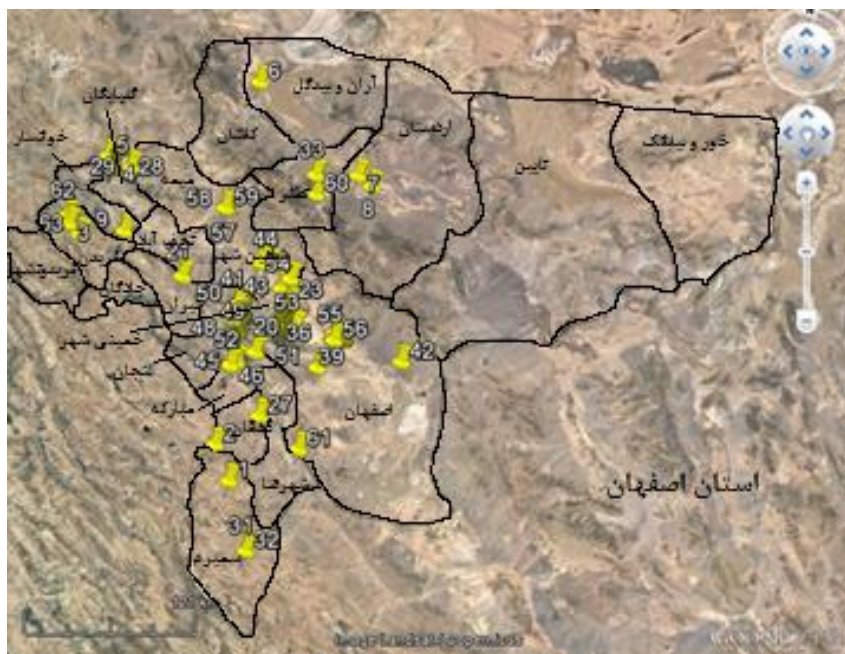
فراستی و شاکری (Ferasati & Shakeri, 2017) از نرم افزار HYDRUS-1D برای برآورد پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنوختن- معلم و شبیه سازی نفوذ آب به روش حل معکوس، در چهار خاک با بافت لومی استفاده کردند. در این پژوهش، نرم افزار HYDRUS-1D نفوذ تجمعی را، به ویژه در زمان های ابتدایی نفوذ، با دقت خوبی شبیه سازی کرد. هرچند اسما موسوی دهموردی و همکاران (Mousavi Dehmurdi *et al.*, 2018) در شبیه سازی نفوذ آب به خاک از طریق استوانه های دوگانه و به کمک نرم افزار HYDRUS-1D به این نتیجه رسیدند که نفوذ شبیه سازی شده بسیار بیشتر از نفوذ تجمعی اندازه گیری شده در خاک در بافت های مختلف بوده است. این پژوهشگران دلیل این امر را وجود جریان های جانبی در

نفوذ آب به خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه با رویکرد حل عددی معکوس در کلاس‌های بافتی مختلف خاک است.

### مواد و روش‌ها

**مناطق مورد مطالعه:** در پژوهش حاضر از نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D برای شبیه‌سازی نفوذ آب در خاک به روش معکوس، استفاده شد. برای این منظور، داده‌های نفوذ تجمعی به دست آمده از آزمایش نفوذسنج‌های استوانه‌های دوگانه که در مطالعات خاکشناسی انجام گرفته در نقاط مختلف استان اصفهان جمع‌آوری شده است، به عنوان ورودی مدل HYDRUS استفاده شد. این مناطق در شهرستان‌های اصفهان، نجف‌آباد، شاهین‌شهر و میمه، فریدن، شهرضا، تیران، مبارکه، آران و بیدگل، لنجان، گلپایگان، چادگان، فلاورجان، برخوار، سمیرم، نطنز، خوانسار و چادگان بوده است. شکل ۱ پراکنش جغرافیایی نقاط مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

طی نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های دوگانه دانستند. در این پژوهش مشخص شد که خطای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک در محیط HYDRUS-1D در بافت‌های ریزتر که نفوذ جانبی در آنها بیشتر اتفاق می‌افتد نسبت به بافت‌های درشت بیشتر است؛ بنابراین به نظر می‌رسد که علی‌رغم اینکه در آزمایش استوانه‌های دوگانه برای جلوگیری از جریان‌های جانبی در حد فاصل بین دو استوانه در ابتدا آب ریخته می‌شود، اما همچنان به‌ویژه در خاک‌های با بافت ریزتر جریانات جانبی علاوه بر جریان ثقلی آب وجود دارند. با توجه به این موارد استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه چندان مناسب به نظر نمی‌رسد. نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D امکان شبیه‌سازی جریان آب در خاک را در دو بعد افقی و عمودی فراهم ساخته و با توجه به وجود جریانات ثقلی و جانبی در خاک، شبیه‌سازی در چنین محیطی به شرایط واقعی نزدیک‌تر خواهد بود؛ لذا هدف از انجام این پژوهش ارزیابی کارایی نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D برای شبیه‌سازی



شکل ۱- پراکنش مناطق مطالعاتی دارای داده‌های نفوذ در استان اصفهان  
Figure 1. Study areas with infiltration data in Isfahan province

HYDRUS 2D/3D استفاده شد. یک برنامه پیشرفته تحت ویندوز برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک بوده و قادر به برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک و یا پارامترهای انتقال املاح

### پایه‌سازی شرایط آزمایش نفوذ آب به خاک در محیط نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی نفوذ غرقابی آب به خاک در استوانه‌های-دوگانه از نرم‌افزار-HYDRUS

که  $p$  بردار پارامترهای مربوط به مدل های هیدرولیکی مورد استفاده است.  $t_k$  و  $t_{k+1}$  به ترتیب گام های زمانی پیشین و کنونی در زمان محاسبه نفوذ آب به خاک می باشند. همچنین در معادله (۵)،  $t_{k+1/2} = t_k + \delta t_k / 2$  و  $t_k = t_{k+1} - \delta t_k$  می باشند. برای شبیه سازی عددی حرکت آب در خاک از مدل هیدرولیکی معلم ونگن اختن (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980) با فرض  $m = 1 - 1/n$  استفاده شد. که به ترتیب در ادامه می باشد.

$$\theta(h) = \theta_r \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (6)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l [1 + (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (7)$$

در روابط زیر  $\theta(h)$  ( $L^3 L^{-3}$ )،  $\theta_r$  ( $L^3 L^{-3}$ ) و  $\theta_s$  ( $L^3 L^{-3}$ ) به ترتیب رطوبت در مکش ماتریک  $h$ ، رطوبت باقی مانده و اشباع،  $\alpha$  ( $L^{-1}$ ) و  $n$  (-) پارامترهای شکل،  $K(S_e)$  ( $L T^{-1}$ )،  $S_e$  (-) و  $l$  به ترتیب هدایت هیدرولیکی غیراشباع، درجه اشباع مؤثر و پارامتر اعوجاج منافذ خاک است. بنابراین، بردار پارامترها که در معادله (۵) به آن اشاره شد ( $p$ ) به شکل زیر است:

$$p = [\theta_s, \theta_r, \alpha, l, n, K_s] \quad (8)$$

در رویکرد حل معکوس فرآیند بهینه سازی این پارامترها از طریق به حداقل رساندن اختلاف بین داده های نفوذ اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با کمک الگوریتم بهینه سازی لونبرگ-مارکواردت (Marquardt, 1963) انجام می گیرد.

محدوده خاک زیر استوانه های دوگانه به صورت یک ناحیه متقارن حول محوری به مرکزیت استوانه داخلی در نظر گرفته شد. شعاع استوانه های داخلی و خارجی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ سانتی متر، عمق جای گذاری استوانه ها در خاک ۱۰ سانتی متر و عمق خاک ۱۰۰ سانتی متر در نظر گرفته شد. شرط مرز ورودی برای استوانه های درونی و خارجی، بار آبی ثابت ارتفاع آب روی سطح خاک برابر ۱۰ سانتی - متر) در نظر گرفته شد که برای استوانه درونی ثابت و برای استوانه بیرونی با گذشت زمان متغیر و با تغییر جزئی (نزدیک به صفر) بود. شرایط مرزی برای محدوده سطح خاک در خارج از استوانه ها به صورت اتمسفری<sup>۳</sup> تعریف شد. همچنین دیواره استوانه ها شرایط بدون

به روش حل معکوس می باشد. این برنامه توسط سیمونک و همکاران (Šimůnek et al., 1999) در آزمایشگاه شوری خاک ایالات متحده پی ریزی شده که در بسیاری از پژوهش های مزرعه ای و آزمایشگاهی برای بهینه سازی و برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش حل معکوس مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن نسبتاً رضایت بخش بوده است (Alletto et al., 2015; El-Nesr et al., 2014; Pollalis & Valiantzas, 2015; Ramos et al., 2012; Rashid et al., 2015; Mashayekhi et al., 2016). در این نرم افزار تخمین ویژگی های هیدرولیکی خاک با استفاده از حل عددی مکرر معادله ریچاردز به روش معکوس صورت می پذیرد. معادله ریچاردز برای جریان آب در خاک به شکل زیر است (Richards, 1931):

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla [K(h) \nabla (h + z)] \quad (1)$$

که در این معادله  $C(h)$  به گنجایش ویژه رطوبتی خاک ( $L^{-1}$ ) معروف است و نشان دهنده ی شیب منحنی نگهداشت آب خاک (SWCC) است.  $h$  بار ماتریک آب خاک (پتانسیل ماتریک)  $[L]$  می باشد.  $t$  زمان  $[T]$ ،  $K$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک  $[L T^{-1}]$ ، و  $z$  نشان دهنده بار ثقلی  $[L]$  است.

شرایط مرزی و ابتدایی برای آزمایش نفوذ آب به خاک در آزمایش نفوذسنج استوانه-دوگانه با ارتفاع مشخص آب روی سطح خاک ( $h_0$ )، به صورت زیر است (Russo et al., 1991; Maa et al., 2010):

$$h = h_0 \quad \theta = \theta(h) \quad z = 0 \quad t > 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad z \rightarrow \infty \quad t > 0 \quad (3)$$

$$\theta = \theta_i \quad z > 0 \quad t = 0 \quad (4)$$

$\theta_i$  رطوبت اولیه خاک پیش از آزمایش نفوذ می باشد. حل معادله (۱) با در نظر گرفتن شرایط کمکی تعریف شده در روابط (۲) تا (۴)، نیم رخ رطوبتی خاک را تعیین می کند  $\theta = \theta(z, t; p)$ ، که به نوبه خود، می تواند برای محاسبه سرعت نفوذ آب به خاک یا  $q(0, t; p)$  مورد استفاده قرار گیرد:

$$q(0, t^{k+1/2}; p) = \int_0^z [\theta(z, t^{k+1/2}; p) - \theta(z, t^k; p)] dz / \delta t^k \quad (5)$$

3 Atmospheric boundary

1 Constant head  
2 Variable head

شده<sup>۵</sup> (NRMSE) استفاده شد. هرکدام از این آماره‌ها از روابط زیر قابل محاسبه هستند (Karimipour & Banitalebi, 2020):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{N}} \quad (10)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max} - X_{min}} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2} \quad (12)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i - \hat{I}_i)}{N} \quad (13)$$

در این فرمول‌ها N تعداد مشاهده‌ها،  $I_i$  میزان نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده،  $\hat{I}_i$  میزان نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده،  $X_{max}$  (cm<sup>3</sup>) بیشترین نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و  $X_{min}$  (cm<sup>3</sup>) کمترین نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در یک نوع خاک است که به عنوان ورودی مدل، برای بهینه‌سازی انتخاب می‌شوند.

### نتایج و بحث

خاک مناطق مورد مطالعه بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA)، در هفت گروه بافتی شامل تعداد ۱۱ نمونه بافت CL، ۱۳ نمونه بافت SiC، ۱۱ نمونه بافت SL، ۸ نمونه بافت L، ۸ نمونه بافت SCL، ۷ نمونه بافت SiCL و ۵ نمونه بافت SiL قرار گرفتند. میانگین نفوذ تجمعی نهایی اندازه‌گیری شده در بافت‌های CL، SiC، SL، L، SCL، SiCL و SiL به ترتیب معادل ۱۲/۸۸، ۲۰/۵۵، ۵۸/۰۲، ۲۵/۷، ۴۴/۹۴، ۱۲/۸۱ و ۱۳/۶ سانتی‌متر بوده است. بر این اساس بیشترین میزان نفوذ تجمعی در بافت SL و کمترین میزان در SiCL مشاهده شد. محدوده تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک-های مورد پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جریان و برای مرز پایینی (عمق خاک) زهکشی آزاداً تعریف شد. از آنجا که نرم افزار HYDRUS از روش اجزای محدود برای حل معادله ریچاردز استفاده می‌کند، فضای شبیه‌سازی با استفاده از زیر شاخه ایجاد مش بندی که در خود برنامه تعبیه شده است، مش بندی گردید. برای این منظور مش متغیر در نظر گرفته شد به این صورت که در اطراف مرزها مانند کناره‌های دیواره استوانه‌ها مش ریزتر انتخاب شد. داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده نیز به عنوان داده‌های ورودی مدل مورد استفاده قرار گرفتند. روش‌های حل عددی معکوس نسبت به تعداد پارامتر ورودی حساس بوده و با کاهش تعداد پارامترهای بهینه‌سازی دقت شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. به همین دلیل در حل مسائل معکوس ابتدا پارامترهای حساس تر با استفاده از آنالیز حساسیت شناسایی شده و همین پارامترها وارد فرآیند بهینه‌سازی می‌شوند. برای انجام تحلیل حساسیت نفوذ آب به خاک نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم شامل  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $K_s$ ،  $\theta_r$ )، برای هر بافت خاک پارامتر مورد نظر ۱ درصد تغییر داده شده و سایر پارامترها در مقدار اولیه خود ثابت نگه داشته می‌شوند و مدل با این ترکیب پارامتری اجرا شده و داده‌های نفوذ استخراج می‌گردد. در نهایت میزان حساسیت هر کدام از پارامترها از رابطه (۹) محاسبه می‌شود (Šimůnek *et al.*, 1999):

$$s(t, b) = \frac{|Y(b + \Delta b) - Y(b)|}{Y(b)} \quad (9)$$

که در آن  $s(t, b)$  ضریب حساسیت یا تغییر نسبی در متغیر Y (نفوذ تجمعی آب در خاک) به ازای یک درصد تغییر در پارامتر  $b$ ،  $t$  زمان و  $\Delta b = 0.01b$  است.

### ارزیابی شبیه‌سازی‌های انجام گرفته توسط HYDRUS-2D/3D

برای ارزیابی شبیه‌سازی عددی انجام گرفته توسط مدل از شاخص‌های آماری متفاوتی مانند ضریب تبیین<sup>۴</sup> ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> (RMSE)، میانگین خطای بایاس<sup>۶</sup> (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال

5 Root Mean Square Error  
6 Bias mean error  
Normalized Root Mean Square Error

1 No flux  
2 Free drainage  
3 Mesh Generation  
4 Coefficient of Determination

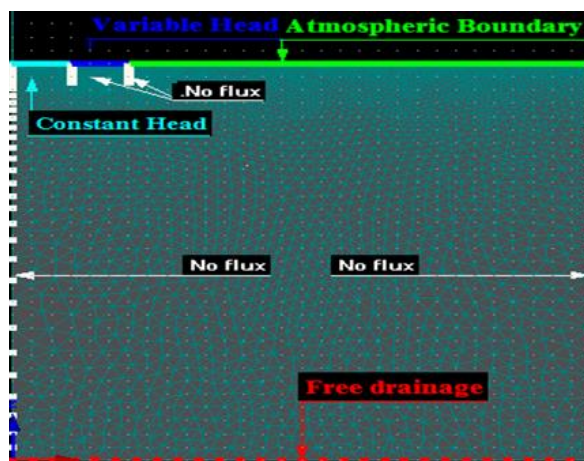
جدول ۱- برخی ویژگی های بافتی در خاک های مورد مطالعه  
Table 1. Some physical properties of the studied soils

soil properties	Max	Min	Mean	Standard
Sand (%)	78.0	7.0	28.50	14.97
Silt (%)	64.0	9.0	36.03	13.14
Clay (%)	76.0	8.0	35.4	16.56
Geometric mean diameter of soil particles(mm)	0.31	0.003	0.04	0.052
Geometric standard deviation of particles diameter	22.11	7.62	13.41	3.51

مورد مطالعه مشابه بود. در شکل ۳ ضرایب حساسیت مربوط به سه نمونه کلاس بافت خاک سنگین (SiC)، متوسط (L) و سبک (SL) برای نمونه ارائه شده است. بر اساس نتایج آزمون حساسیت، در همه خاک ها کمترین ضریب حساسیت مربوط به پارامترهای پیوستگی منافذ (l) و رطوبت باقی مانده ( $\theta_r$ ) در معادله ون گنوختن-معلم بود. از آنجا که رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) دارای مفهوم فیزیکی مشخصی است و به راحتی و با استفاده از روش وزنی قابل اندازه گیری است؛ بنابراین برای بهبود فرآیند شبیه سازی، این پارامتر هم به صورت ثابت در نظر گرفته شد و وارد فرآیند بهینه سازی نشد. در این پژوهش برای انجام شبیه سازی نفوذ آب به خاک پارامتر 1 بر اساس منابع برابر 0/5 در نظر گرفته شد (Abbasi et al., 2003).

همچنین رطوبت باقیمانده ( $\theta_r$ ) و رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) در مقادیری که توسط برنامه ROSETTA با توجه به بافت و چگالی ظاهری برای هر نوع خاک تخمین زده شد، ثابت در نظر گرفته شدند و تنها پارامترهای  $K_s$ ،  $n$  و  $\alpha$  وارد پروسه شبیه سازی شدند. در پژوهش انجام گرفته توسط مشایخی و همکاران (Mashayekhi et al., 2017) نیز گزارش کردند که در نفوذ آب به خاک در آزمایش استوانه های دوگانه، پارامترهای  $K_s$ ،  $n$  و  $\alpha$  از حساسیت بسیار بالاتری در فرآیند شبیه سازی برخوردار هستند. جدول ۲ محدوده مقادیر اولیه پارامترهای معادله ون-گنوختن-معلم را نشان می دهد که بر اساس نتایج آنالیز حساسیت ثابت در نظر گرفته شده و یا وارد فرآیند بهینه سازی شده اند.

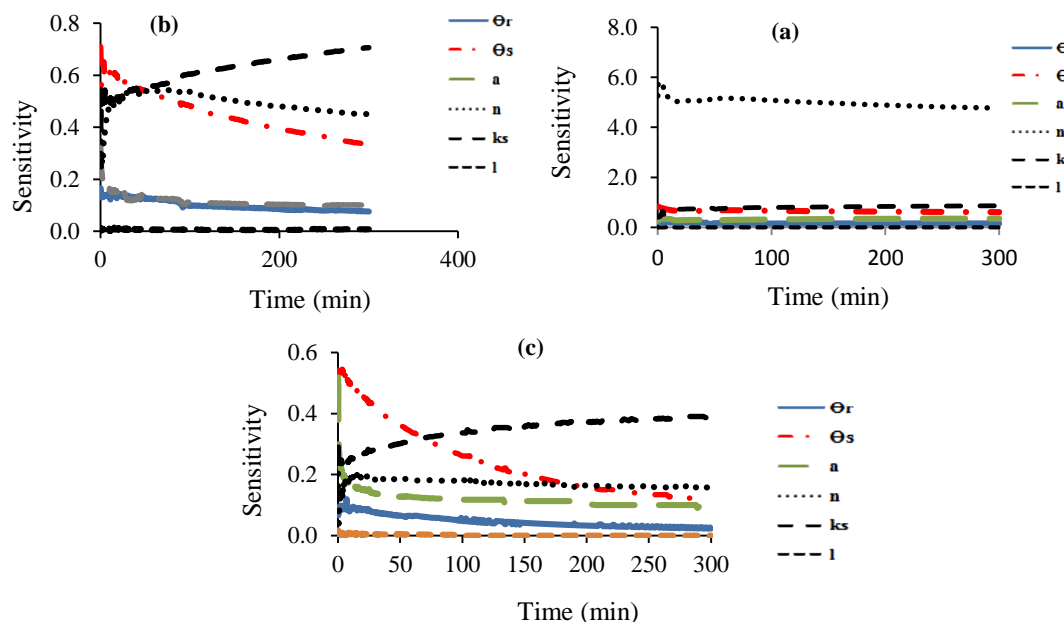
شبیه سازی های انجام شده نفوذ آب به خاک در محیط نرم افزار HYDRUS-2D/3D  
شکل ۲ شرایط مرزی تعریف شده برای شبیه سازی آزمایش نفوذ از طریق استوانه های دوگانه به وسیله مدل HYDRUS2D/3D را نشان می دهد.



شکل ۲- شرایط مرزی تعریف شده برای شبیه سازی آزمایش نفوذ از طریق استوانه های دوگانه به وسیله مدل HYDRUS2D/3D

Fig.2. The boundary conditions for infiltration simulation through double-ring infiltrometers by HYDRUS2D/3D model

شرایط اولیه برای شبیه سازی حرکت آب در خاک، بر اساس پتانسیل ماتریک تعریف شد. بدین ترتیب که با فرض خشک بودن خاک در سطح، پتانسیل ماتریک در سطح خاک برابر با ۱۰۰۰۰- سانتی متر در نظر گرفته شد که به صورت خطی با عمق تا مقدار ۴۰۰۰- در عمق ۱۰۰ افزایش یافت. نتایج آنالیز حساسیت در تمامی بافت های



شکل ۳- میزان حساسیت نفوذ تجمعی غرقابی آب به خاک به پارامترهای مدل ون-گنوختن-معلم در خاک‌های (a) SiC، (b) L و (c) SL

Fig. 3. Cumulative ponded infiltration sensitivity to the van Genuchten-Mualem model parameters in the soils (a) silty clay, (b) loam, and sandy loam (c)

جدول ۲- محدوده مقادیر اولیه پارامترهای مدل ون-گنوختن-معلم\* در خاک‌های مورد مطالعه

Table 2. The initial values of van Genuchten-Mualem model parameters for studied soils

soil properties	Units	Max	Min	Mean	Standard deviation
$\theta_r^{**}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0.225	0.01	0.065	0.033
$\theta_s^{**}$	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0.620	0.208	0.427	0.061
Ks	$\text{cm s}^{-1}$	0.500	0.0000	0.065	0.104
n	-	1.843	1.110	1.304	0.111
$\alpha$	$\text{cm}^{-1}$	0.278	0.001	0.034	0.039

\* پارامتر l بر اساس منابع، برای تمامی شبیه‌سازی‌ها معادل ۰/۵ در نظر گرفته شد.

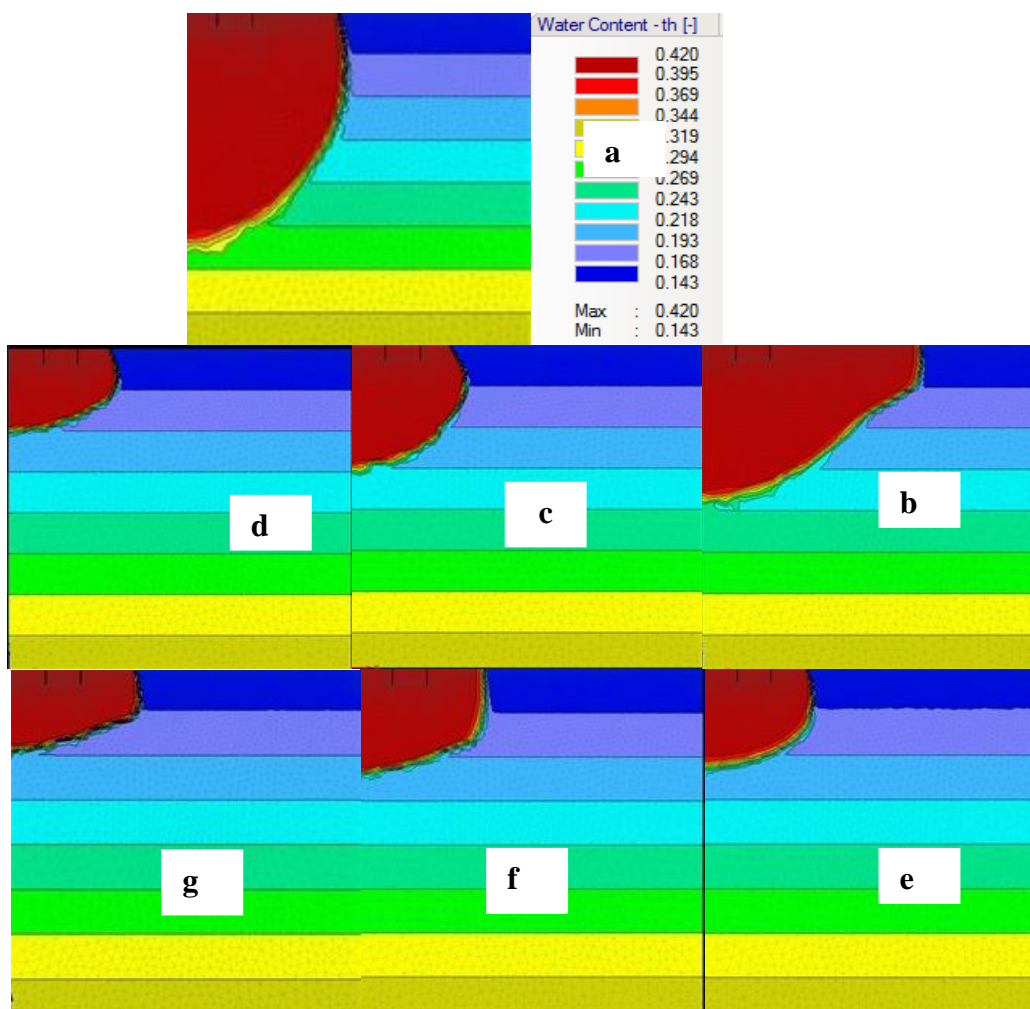
\* The parameter l was considered equal to 0.5 for all simulations, based on sources

\*\* پارامترهایی که ثابت در نظر گرفته شده و وارد فرآیند مدل‌سازی نشدند.

\*\* Parameters that were considered fixed and did not enter the modeling process

آب به خاک بسیار زیاد بوده است؛ ضمن اینکه وجود ذرات رس باعث افزایش مکش ماتریک در خاک شده و به گسترش پروفیل رطوبتی در جهت افقی کمک کرده است. به تدریج با سنگین‌تر شدن بافت خاک میزان توزیع رطوبت در خاک محدودتر می‌شود. در بافت لومی (شکل ۴- c) و بعد از آن CL و SiL (به ترتیب شکل ۴- d و e)، در مقایسه با سایر بافت‌ها) یک توزیع نسبتاً متعادلی از رطوبت در جهات افقی و عمودی مشاهده می‌شود. در بافت‌های SiCL (شکل ۴- f) و SiC (شکل ۴- g) به نظر می‌رسد که کشیدگی پروفیل رطوبت خاک در جهت افقی متأثر از درصد بالاتر رس در این بافت‌ها بوده است.

شکل ۴ یک نمونه از خروجی شبیه‌سازی انجام‌گرفته در مدل HYDRUS-2D/3D را در هر یک از هفت بافت مورد مطالعه نشان می‌دهد. این شکل چگونگی توزیع رطوبت در خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه را در پایان زمان نفوذ تعیین شده در بافت‌های مورد مطالعه خاک را نشان می‌دهد. در شکل ۴ تاثیر بافت تا حد زیادی بر چگونگی توزیع رطوبت در پروفیل خاک مشهود است. برای مثال در مورد بافت SL (شکل ۴- a) با توجه به درشت بودن بافت خاک و در نتیجه غالب بودن منافذ درشت‌تر، جریان ثقلی آب در خاک غالب بوده و پروفیل رطوبتی در جهت عمودی از کشیدگی بالاتری برخوردار است. در بافت SCL (شکل ۴- b)، اولاً به دلیل درشت بودن بافت خاک نفوذ



شکل ۴- شبیه‌سازی توزیع مکانی رطوبت در پروفیل خاک در پایان نفوذ در آزمایش استوانه‌های دوگانه در بافت‌های a (SL)، b، c، d، e، f، g (SiC)، (SiCL) f، (CL) e، (SiL) d، (L) c، (SCL) (SiC) g

Figure 4. Simulation of spatial distribution of moisture in soil profiles at the end of double rings runs in textures a (SL), b (SCL), c (L), d (SiL), e (CL), f (SiCL), g (SiC)

در مقایسه با جریان‌های جانبی است. در حالی که خاک-های ریزدانه به دلیل چسبندگی و تخلخل کم، دارای نفوذپذیری کم تری هستند.

نتایج ارزیابی شبیه‌سازی‌های انجام‌شده به روش حل معکوس با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری‌شده نتایج مقایسه‌های آماری بین داده‌های نفوذ تجمعی شبیه‌سازی‌شده به روش حل معکوس در محیط نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D و داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری-شده در شرایط آزمایش استوانه‌های دوگانه مربوط به نقاط مختلف استان اصفهان، برای بافت‌های متفاوت در جدول ۳ ارائه شده است.

ضمن اینکه در بافت SiC به دلیل سنگین‌تر شدن بافت خاک نفوذ عمقی آب هم کمتر شده است. با فرض یکسان بودن شرایط سطح، بارندگی و پوشش گیاهی مهمترین عامل در نفوذ آب به خاک، بافت خاک و رطوبت اولیه خاک است (Cook *et al.*, 2002). یافته‌های وکیندیکی و بن هور (Wakindiki & Ben-Hur, 2002) نیز نشان داد که اندازه-گیری نفوذ به شدت تحت تأثیر بافت خاک می‌باشد. همچنین سانتو و همکاران (Santos *et al.*, 2003) بیان نمودند که وجود منافذ درشت در خاک‌های دارای بافت سبک‌تر، باعث بیش‌تر بودن جریان‌ات ثقلی آب در خاک



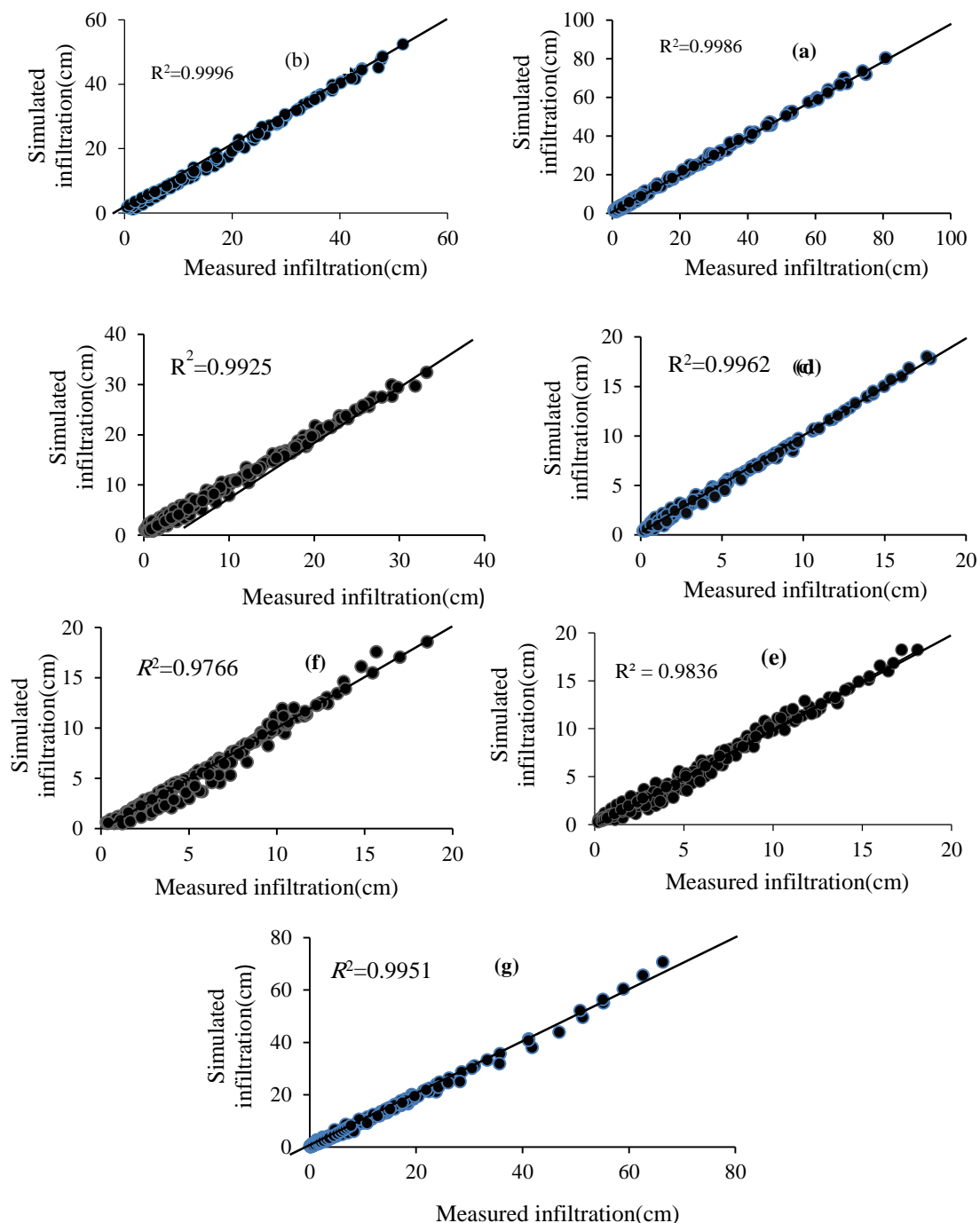
جدول ۳- نتایج ارزیابی‌های آماری نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده در بافت‌های مختلف توسط نرم‌افزار HYDRUS-2D/3D  
Table3. Results of statistical comparisons of simulation of cumulative infiltration into the different soil textures by HYDRUS-2D/3D

Soil texture	Number of soils	NRMSE	MBE (cm)	RMSE (cm)	R <sup>2</sup>
CL	11	0.044	-0.089	0.488	0.9836
L	1	0.028	-0.198	0.672	0.9925
SiC	13	0.045	-0.006	0.670	0.9951
SCL	8	0.018	0.034	0.743	0.9996
SL	11	0.015	0.323	0.874	0.9986
SiCL	7	0.043	-0.160	0.488	0.9766
SiL	5	0.020	0.063	0.226	0.9962

شبیه‌سازی در بافت SiC (NRMSE=۰/۰۴۵) مشاهده شد. این نتیجه با نتایج ارائه شده توسط مشایخی و همکاران (Mashayekhi *et al.*, 2016) همخوانی دارد. دلیل این امر وجود مقادیر بالاتر رس در خاک‌های با بافت ریز و وجود انبساط و انقباض بیشتر در این ذرات بوده که بر روی توزیع و چگونگی قرار گرفتن منافذ در خاک تاثیر گذار است و حتی در برخی موارد منجر به ایجاد درز و ترک و به وجود آمدن جریان‌های ترجیحی در خاک می‌شوند، از آنجا که این مورد در بسیاری از معادلات و مدل‌ها در نظر گرفته نمی‌شود، همین امر باعث افزایش خطا در فرآیند مدلسازی در خاک‌های با بافت ریز نسبت به خاک‌های درشت بافت می‌شود. همچنین موسوی دهموردی و همکاران (Mousavi Dehmurdiet *et al.*, 2018)، با شبیه‌سازی شرایط استوانه‌های دوگانه در محیط HYDRUS-1D و با روش حل مستقیم گزارش کردند که نفوذ تجمعی برآورد شده در بافت لوم شنی کمترین میزان خطا و در بافت لوم رسی - سیلتی بیشترین میزان خطا را داشت. هانگ و زاینینگ (Huang & Xining, 2013) نیز کاهش دقت اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک با سنگین شدن بافت خاک را گزارش و دلیل آن را افزایش وابستگی فرآیند نفوذ به بافت خاک گزارش نمودند.

شکل ۵ پراکنش مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط روش حل معکوس در آزمایش استوانه-های دوگانه را در اطراف خط یک به یک را برای خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.

مقادیر مثبت و منفی معیار خطای بایاس میانگین (MBE) به ترتیب نشان‌دهنده بیشتر و یا کمتر بودن مقادیر شبیه‌سازی شده به روش حل معکوس نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. بنابراین با توجه به مقادیر پارامتر MBE، در بافت‌های CL، L، SiC و SiCL، مقادیر شبیه‌سازی شده به روش حل معکوس نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر بوده است (جدول ۳). همچنین مقادیر RMSE در همه بافت‌ها در حد قابل قبول بوده است. با توجه به مقادیر RMSE ارائه شده در جدول ۳، کمترین میزان RMSE در بافت SiL (۰/۲۲۶) و بیشترین میزان آن در بافت SL (۰/۸۷۴) مشاهده شد. اما نکته‌ای که وجود دارد این است که میزان نفوذ آب به خاک در بافت‌های مختلف بسیار متفاوت است؛ به گونه‌ای که در زمان نهایی میزان نفوذ تجمعی در خاک‌های با بافت سنگین بسیار کمتر از خاک‌های دارای بافت سبک می‌باشد؛ در چنین شرایطی استفاده از معیارهای آماری بدون بعد مانند R<sup>2</sup> و NRMSE مناسب‌تر از آماره‌های SSE، RMSE و MBE که دارای بعد هستند می‌باشند و ارزیابی آماری بسیار دقیق‌تری را از جامعه مورد مطالعه ارائه می‌دهند. با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول ۳، در همه بافت‌های مورد مطالعه، همبستگی بسیار بالایی (R<sup>2</sup>) بین داده‌های نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وجود داشت. همچنین مقدار NRMSE در همه بافت‌های مورد مطالعه پایین و در حد قابل قبول بود. با توجه به مقادیر NRMSE، کمترین میزان خطای شبیه‌سازی در بافت SL (NRMSE=۰/۰۱۵) و بیشترین میزان خطای



شکل ۵- پراکنش مقادیر نفوذ تجمعی اندازه گیری شده و برآورد شده توسط روش حل معکوس در بافت های a (SL)، b (SCL)، c، (SCL) d، (L)، e، (CL)، f، (SiCL)، g، (SiC)

Figure 5. Measured vs. predicted cumulative infiltration using the inverse modeling in different soil textures: A (SL), B (SCL), C (L), D (SiL), E (CL), F (SiCL), G (SiC)

### نتیجه گیری کلی

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که نرم افزار HYDRUS 2D/3D، با رویکرد حل معکوس، نفوذ آب به خاک از طریق نفوذسنج استوانه های دوگانه را در بافت های مختلف با دقت قابل قبولی شبیه سازی کرد. در همه

همان طور که در شکل مشخص است، تقریباً در همه بافت ها، بین داده های نفوذ تجمعی اندازه گیری شده و تخمین زده شده هم خوانی خوبی دیده می شود. با توجه به شکل ۵ بیشترین میزان پراکنندگی داده ها و نیز بیشترین انحراف از خط ۱ به ۱ مربوط به بافت های SiCL و SiC بوده است.

ترک که در حالت واقعی و طبیعی در خاک‌های با بافت سنگین وجود دارد، در شرایط مدل‌سازی لحاظ نمی‌شود؛ حال آنکه این عوامل تاثیر زیادی بر روی چگونگی توزیع، شکل و نیز پیوستگی منافذ موجود در خاک و در نتیجه جریان آب در خاک دارد. به همین دلیل پیاده‌سازی مدل برای خاک‌های با بافت سبک‌تر به شرایط واقعی نزدیکتر بوده و داده‌های نفوذ جمعی آب به خاک با دقت بالاتری تخمین زده می‌شوند.

بافت‌ها همبستگی بسیار بالایی بین مقادیر نفوذ جمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه و مقادیر نفوذ جمعی شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار مشاهده شد. خطای شبیه‌سازی با سنگین شدن بافت خاک و افزایش میزان رس، افزایش پیدا کرد؛ به گونه‌ای که کمترین میزان خطای شبیه‌سازی مربوط به بافت SL و بیشترین خطای شبیه‌سازی در بافت SiC بود. دلیل این امر این است که اثرات انقباض و انبساط و یا وجود درز و

## References

- Abbasi F., Šimůnek J., Feyen J., van Genuchten MTh., and Shouse PJ. 2003. Simultaneous inverse estimation of soil hydraulic and solute transport parameters from transient field experiments: homogeneous soil. *Transactions of ASAE*, 46(4): 1085–1095.
- Alletto L., Pot, V., Giuliano S., Costes M., Perdrioux F., and Justes E. 2015. Temporal variation in soil physical properties improves the water dynamics modeling in a conventionally-tilled soil. *Geoderma*, 243 (244): 18–28.
- Cook F.J. 2002. The Twin-Ring Method for Measuring Saturated Hydraulic Conductivity and Sorptivity in the Field. McKenzie, N. Coughlan, K. and H. Cresswell (Ed.), *Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation*. CSIRO Publishing. Pp 108-118.
- Duiker S.W., Flanagan D.C., and Lal R. 2001. Erodibility and infiltration characteristics of fire major soils of southwest Spain. *Catena*, 45(2): 103-121.
- El-Nesr N. M., Alazba A. A., and Šimůnek J. 2014. HYDRUS simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrigation Science*, (32): 111–125.
- Farasati M., and Shakeri H. 2017. Simulation of water infiltration in the soil using HYDRUS1D software and field data. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(3):113-128. (In Persian)
- Gribb M. M., Forkutsa I., Hansen A., Chandler D. G., and McNamara J. P. 2009. The Effect of various soil hydraulic property estimates on soil moisture simulations. *Vadose Zone Journal*, 8(2): 321–331
- Huang J., Wu P., and Xining Z. 2013. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *Catena*, 104: 93-102.
- Jasper A., Vrugt P., Stauffer H., Wöhling T. H., Bruce A., and Velimir, V. 2008. Inverse modeling of Subsurface flow and transport properties: A review with new developments. *Vadose Zone Journal*, 7(2): 843–864.
- Karimipour A., and Banitalebi G. 2020. Sensitivity analysis of meteorological data in estimating reference evapotranspiration with the minimum data using wavelet-neuro-fuzzy, ANN and ANFIS models. *Water and Soil Resources Conservation*, 9(3). (In Persian)
- Lai J., and Ren L. 2016. Buffer index effects on hydraulic conductivity measurements using numerical simulations of double-ring infiltration. *Soil Science Society American Journal*, 74: 1526–1536.
- Maa Y., Feng S., Sua 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. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71: 40–47.
- Marquardt D W. 1963. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 11: 431–441.
- Mashayekhi P., Ghorbani Dashtaki S., Mosaddeghi M.R., Shirani H., and Mohammadi Nodoushan A.R. 2016. Different scenarios for inverse estimation of soil hydraulic parameters from double ring infiltrometer data using HYDRUS 2D/3D. *International Agrophysics*, 30(2): 203-210.
- Mashayekhi P., Ghorbani Dashtaki S., Mosaddeghi M.R., Shirani H., and Nouri M.R. 2017. Estimation of soil hydraulic parameters using double-ring infiltrometer data via inverse method. *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 47(4): 829-838. (In Persian)

- Mashayekhi P., Ghorbani Dashtaki S., Mosaddeghi M.R., Shirani H., Panahi M., and Nouri M.R. 2017. Inverse estimation of the soil water retention curve parameters using double-ring infiltration data. *Applied Soil Research*, 4(2): 26-37. (In Persian)
- Minasny B., and McBratney A.B. 2002. The Neuro- m method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America journal*, 66: 352– 361.
- Mousavi dehmurdi A., Ghorbani Dashtaki Sh., and Mashayekhi P. 2018. Evaluation of double-ring infiltrometers method for measuring the vertical infiltration in different soil textures using HYDRUS. *Journal of Water and Soil conservation*, 25 (3): 241-253. (In Persian)
- Mousavi Dehmurdi A., Ghorbani-Dashtaki Sh., and Mashayekhi P. 2019. Performance of some infiltration models based on obtained data from double-ring and HYDRUS-1D software. *Applied Soil Research*, 7(2): 182-195.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3): 513–522.
- Pollalis E. D., and Valiantzas J. D. 2015. Isolation of a 1D infiltration time interval under ring infiltrometers for determining sorptivity and saturated hydraulic conductivity: numerical, theoretical, and experimental approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(2). 10.1061/(ASCE)IR.1943- 774.0000796.
- Puhlmann H., von Wilpert K., Lukes M., and Dröge W. 2009. Multistep outflow experiments to derive a soil hydraulic database for forest soils. *European Journal of Soil Science*, 60: 792–806.
- Ramos T. B., Šimůnek J., Gonçalves M. C., Martins J. C., Prazeres A., and Pereira L. S. 2012. Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agricultural Water Management*, 111: 87–104.
- Rashid, N.S.A., Askari, M., Tanaka, T., Šimůnek, J. and van Genuchten, M.Th. (2015). Inverse estimation of soil hydraulic properties under oil palm trees. *Geoderma*, (241–242), 306–312.
- Russo D., Bresler E., Shani U., and Parker J.C. 1991. Analysis of infiltration events in relation to determining soil hydraulic properties by inverse problem methodology. *Water Resources Research*, (27): 1361–1373.
- Raouf M., and Pilpayeh A. R. 2013. Estimating soil wetting profile under saturated infiltration process by numerical inversion solution in land slopes. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 13(6): 732–736.
- Santos F.L., Reis J.L., Martins O.C., Castanheria N.L., and Serralherio R.P. 2003. Comparative assessment of infiltration, runoff and erosion of sprinkler irrigation soils. *Biosystems Engineering*, 86(3): 355-364.
- Schelle H., Iden S.C., Schlüter S., Vogel H. J., and Durner W. 2012. Identification of effective flow processes and properties from virtual soils using inverse modeling. *Geophysical Research Abstracts* 14.
- Richards L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1:318–333.
- Šimůnek J., and van Genuchten M. Th. 1996. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from tension disc data by numerical inversion. *Water Resources Research*, 32(9): 2683–2696.
- Šimůnek J., Kodesová R., and Gribb M. M. 1999. Estimating hysteresis in the soil water retention function from modified cone penetrometer test. *Water Resources Research*, 35: 1329–1345.
- Šimůnek J., Šejna M., and van Genuchten M. Th. 2012. HYDRUS: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4): 1261-1274.
- Vanclouster M., Javaux M., and Lambot S. 2007. Recent advances in characterizing flow and transport in unsaturated soil at the core and field. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 3: 19–35.
- 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.
- Vereecken H., Weynants M., Javaux M., Pachepsky Y., Schaap M.G., and van Genuchten M.Th. 2010. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 9: 795–820. doi:10.2136/vzj2010.0045
- Vogel H. J., Samouelian A., and Ippisch O. 2008. Multi-step and twostep experiments in heterogeneous porous media to evaluate the relevance of dynamic effects. *Advances in Water Resources*, 3:181– 188.
- Wakindiki I.I.C., and Ben-Hur M. 2002. Soil mineralogy and texture effects on crust micromorphology, infiltration, erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 66(3): 897-905.
- Wang Q.J., Horton R., and Shao M. A. 2002. Horizontal infiltration method for determining Brooks-Corey model parameters. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 1733–1739.

## Evaluation of HYDRUS- 2D/3D in Water Infiltration Simulation into Soil with Different Textures via Inverse Solution

Parisa Mashayekhi<sup>1\*</sup> , Mohsen Dehghani<sup>2</sup>

(Received: Desember 2020 Accepted: January 2021)

### Abstract

In recent years, inverse numerical solution methods have been considered by many researchers to address the problems of water movement in soil. In this study, HYDRUS-2D/3D software was used to simulate water infiltration through double-rings infiltrometers in soils with different textures using the inverse solution approach. For this purpose, the infiltration data obtained by double-rings method from 63 points of different regions in Isfahan were used as model input. The studied soils were classified into seven textural classes including Sandy Loam (SL), Sandy Clay Loam (SCL), Loam (L), Silty Loam (SiL), Clay Loam (CL), Silty Clay Loam (SiCL) and SiC (Silty Clay). Good agreement was observed between the measured and simulated cumulative infiltration data, in all soil textures. Coefficients of determination ( $R^2$ ) were 0.998, 0.999, 0.992, 0.996, 0.983, 0.976 and 995 for SL, SCL, L, SiL, CL, SiCL and SiC textures, respectively. Increasing the percentage of clay in the soil textures increased the simulation error. The highest simulation error was observed in SiC (NRMSE = 0.045) and the lowest simulation error was observed in SL (NRMSE = 0.015). In general, the simulated double-rings infiltration data using HYDRUS -2D / 3D software and the inverse numerical solution approach had acceptable accuracy and high reliability in all studied textures.

**Key words:** Cumulative infiltration, Double rings, Numerical inverse solution

Mashayekhi P., and Dehghani M. 2022. Evaluation of HYDRUS- 2D/3D in water infiltration simulation into soil with different textures via inverse solution. *Applied Soil Research*, 10(1): 98-110.

1. Associate Professor, Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

2. Associate Professor, Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

\* Corresponding Author Email: [mashayekhi\\_enj@yahoo.com](mailto:mashayekhi_enj@yahoo.com)