



دانشگاه گوارزی و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و پنجم، شماره سوم، ۱۳۹۷

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.14489.2928

ارزیابی روش استوانه‌های دوگانه در اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب به خاک در بافت‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS

*اسماء موسوی‌دهموردی^۱، شجاع قربانی‌دشتکی^۲ و پریسا مشایخی^۳

^۱دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، استاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد، استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۶

چکیده

سابقه و هدف: نفوذپذیری یکی از پارامترهای مهم خاک می‌باشد، که بر روی بسیاری از فرآیندهای هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز تأثیرگذار است. اهمیت نفوذ سبب شده تا روش‌های صحرایی و آزمایشگاهی مختلفی به منظور اندازه‌گیری این فرایند مورد استفاده قرار گیرد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک وجود دارد که اساس همه آن‌ها بر اندازه‌گیری جریان عمودی آب به خاک استوار است. یکی از روش‌های استاندارد اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک، روش نفوذسنج‌های استوانه- دوگانه است. در این روش فرض بر آن است که استوانه خارجی مانع از ایجاد جریان جانبی و به وجود آوردن جریان کاملاً عمودی در خاک می‌شود. بنابراین پژوهش حاضر به منظور ارزیابی روش نفوذسنج استوانه دوگانه در اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب به خاک در مقایسه با داده‌های نفوذ عمودی واقعی شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D انجام گرفته شد.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، داده‌های نفوذ آب به خاک در چندین منطقه از کشور با بافت‌های مختلف با استفاده از روش نفوذسنج استوانه دوگانه اندازه‌گیری شد، سپس شرایط نفوذ آب به خاک در محیط نرم‌افزار HYDRUS-1D برای مناطق مورد نظر، شبیه‌سازی و داده‌های نفوذ عمودی آب به خاک به روش حل مستقیم معادله ریچاردز استخراج شدند. جهت کمی‌کردن پارامترهای هیدرولیکی در معادله ریچاردز از مدل ون‌گونختن- معلم استفاده گردید. بدین منظور پارامترهای هیدرولیکی مدل ون‌گونختن- معلم با استفاده از روش حل عددی معکوس در نرم‌افزار HYDRUS، برای خاک هر منطقه بهینه‌سازی شد و مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از آماره‌های میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) انجام شد.

یافته‌ها: نتایج مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده با استفاده از نرم‌افزار هایدروس با داده‌های اندازه‌گیری شده از طریق آزمایش استوانه‌های دوگانه نشان داد که نفوذ اندازه‌گیری شده در روش استوانه‌های دوگانه بسیار بیشتر از نفوذ عمودی آب به خاک است. نفوذ اندازه‌گیری شده در تمام بافت‌ها دارای اختلاف زیادی نسبت به داده‌های

* مسئول مکاتبه: aci.musavi@yahoo.com

شبیه‌سازی شده بود. در روش استوانه دوگانه کم‌ترین میزان خطا در اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک، در بافت لوم شنی که یک بافت سبک می‌باشد مشاهده شد. مقادیر آماره‌های ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطا و ریشه میانگین مربعات نرمال شده (R^2 , RMSE, ME و NRMSE) در این بافت به ترتیب برابر با ۰/۸۷، ۰/۵۱، ۴/۴۵، ۰/۱۸ بود.

نتیجه‌گیری: در اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک به روش استوانه‌های دوگانه اندازه استوانه‌های مورد استفاده و همچنین فضای بافری بین دو استوانه از اهمیت زیادی برخوردار است. بنابراین استفاده از استوانه‌هایی با اندازه‌های متفاوت بر مقادیر نفوذ نهایی تأثیرگذار است. روش نفوذسنج استوانه دوگانه در بافت شنی از خطای پایین‌تری نسبت به بافت‌های سنگین برخوردار است و سهم نفوذ جانبی در این بافت کم‌تر می‌باشد. بنابراین نفوذسنج استوانه دوگانه در بافت‌های سبک از دقت بالاتری برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، معادله ریچاردز، نفوذ آب به خاک، HYDRUS-1D

مقدمه

نفوذپذیری از جمله پارامترهای مهم خاک در بررسی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز محسوب می‌شود و نشان‌دهنده سرعت عمودی نفوذ آب به داخل خاک است (۲). فرآیند نفوذ یک ویژگی کلیدی در کنترل عملکرد گیاهان زراعی، انتقال آب و املاح در نیم‌رخ خاک، طراحی سیستم‌های آبیاری، افزایش راندمان مصرف و کاهش تلفات آب است. از این رو کمی‌کردن پدیده نفوذ آب به خاک در مدیریت حوضه‌های آبخیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (۲۰). در اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک از روش‌های صحرائی و آزمایشگاهی مختلفی استفاده می‌شود. اساس همه روش‌های اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک بر اندازه‌گیری سرعت نفوذ عمودی آب به خاک استوار است. در بسیاری از پژوهش‌های انجام‌شده در سال‌های اخیر، استوانه‌های دوگانه (Double-rings) به‌عنوان یک ابزار استاندارد برای تعیین نفوذ آب به خاک و اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع، استفاده شده است (۱۳ و ۱۷). این روش به دلیل سهولت کاربرد و کم‌هزینه بودن، استفاده گسترده‌ای دارد. در روش استوانه‌های دوگانه فرض بر

آن است که استوانه بیرونی مانع از ایجاد جریان جانبی در خاک و در نتیجه باعث ایجاد جریان کاملاً عمودی آب در آن می‌شود، در حالی که کوک (۲۰۰۲) عنوان کرد برای رسیدن به چنین هدفی استفاده از استوانه‌های بسیار بزرگ اجتناب‌ناپذیر است (۴).

بر اساس پژوهش‌های انجام‌گرفته، در آزمایش استوانه‌های دوگانه، اندازه استوانه‌های مورد استفاده به‌عنوان یک منبع خطا در اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب به خاک است (۹). چوداری و همکاران (۲۰۰۳) بیان نمودند که دقت اندازه‌گیری نفوذ نه تنها به روش اندازه‌گیری آزمایش نفوذ بستگی دارد بلکه به پارامترهای مختلفی مانند سرریز، قطر حلقه، رطوبت اولیه خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع نیز بستگی دارد (۳). بررسی میزان وابستگی بین قطر حلقه‌ها و اندازه‌گیری ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در رسانه‌های متخلخل توسط پژوهشگران مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است (۸، ۱۲ و ۱۳). در روش استوانه‌های دوگانه حد فاصل بین دو استوانه را فضای بافری می‌گویند. فضای بافری باعث کاهش نفوذ جانبی آب به خاک شده و باعث می‌شود که نفوذ به حالت نفوذ عمودی و یا یک‌بعدی نزدیک شود (۲۲). در صورت

سانتی‌متر، در شرایطی که قطر استوانه داخلی ۲۰ سانتی‌متر بود، میزان نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در حدود ۲۰ تا ۳۳٪ بیش‌تر از میزان نفوذ تجمعی یک‌بعدی برای سه نوع خاک مورد آزمون بود (۳۲). پژوهشگران مختلفی در آزمایش اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک با استفاده از نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، تأثیر اندازه استوانه‌های مورد استفاده، فاصله بافری بین دو استوانه، عمق جایگذاری استوانه‌ها، مدت زمان لازم برای به تعادل رسیدن جریان آب در خاک و ... را مورد بررسی قرار داده و خطاهای ناشی از اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب در خاک را در این روش، در شرایط مختلف بیان نموده‌اند (۱۲، ۱۳، ۲۲ و ۲۴). تولید داده‌های نفوذ عمودی واقعی آب به خاک از طریق حل عددی معادله ریچاردز امکان‌پذیر است. مدل ریچاردز (۱۹۳۱) به‌عنوان یک مدل عددی با اساس فیزیکی، برای توصیف حرکت آب در خاک تحت شرایط مختلف، قابل استفاده است (۱۸). در دهه‌های اخیر پیشرفت‌های قابل‌توجهی در زمینه درک مفهومی و توصیف ریاضی فرآیند انتقال آب و املاح در ناحیه غیراشباع خاک صورت گرفته است که منجر به ارائه مدل‌های عددی مختلفی شده است. مدل‌های عددی با شبیه‌سازی شرایط واقعی حرکت آب و املاح در محیط متخلخل، قادر به ارزیابی مناسب وضعیت آب و املاح خاک هستند و می‌توان از آن‌ها در پژوهش‌های آب و خاک استفاده کرد (۵). در بیش‌تر این مدل‌ها، از تکنیک‌های عددی برای حل معادله ریچاردز استفاده شده است. یکی از نرم‌افزارهای پیشرفته در ارتباط با تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک، نرم‌افزار HYDRUS است که توسط سیمونک و همکاران (۱۹۹۹) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است (۲۷). نرم‌افزار هایدروس (HYDRUS) یک برنامه پیشرفته تحت ویندوز است که محدوده وسیعی

مناسب بودن اندازه فضای بافری موجود بین دو استوانه، خطای اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب به خاک با استفاده از استوانه‌های دوگانه با توجه به کاهش جریان های جانبی قابل‌اغماض خواهد بود. اندازه فضای بافری از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۱۲):

$$b = \frac{d_o - d_i}{d_o} \quad (1)$$

که در آن، b اندازه محیط بافری، d_o قطر استوانه خارجی و d_i قطر استوانه داخلی است.

آهوچا و همکاران (۱۹۸۷) بیان کردند که در آزمایش استوانه‌های دوگانه، استفاده از یک استوانه داخلی با قطر ۳۰ سانتی‌متر و فاصله بافری ۹۰ سانتی‌متر، باعث از بین رفتن جریان‌های جانبی آب در خاک خواهد شد (۱). لی و همکاران (۲۰۱۰) به‌منظور بررسی اثرات ترکیبی اندازه قطرهای داخلی و خارجی در استوانه‌های دوگانه، ۷۲۲۴ شبیه‌سازی عددی در ارتباط با ترکیب بهینه اندازه قطرهای داخلی و خارجی برای مطالعه هدایت آبی اشباع با استفاده از ۲۴ نفوذسنج با ۶ قطر داخلی (۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ سانتی‌متر) و ۴ اندازه در فضای بافری (فاصله بین دو استوانه داخلی و خارجی) شامل ۰/۲، ۰/۳۳، ۰/۵ و ۰/۷۱ انجام دادند. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که در عمل اندازه استوانه داخلی نسبت به اندازه استوانه خارجی (شاخص بافری) از اهمیت بیش‌تری در ایجاد نفوذ یک‌بعدی و عمودی در خاک برخوردار است. در نهایت در اکثر موارد استفاده از استوانه‌های دوگانه با قطر داخلی بزرگ‌تر از ۸۰ سانتی‌متر و شاخص بافر بزرگ‌تر یا مساوی ۰/۳۳ را برای اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع خاک در شرایط مزرعه پیشنهاد نمودند (۱۳ و ۲۹).

در پژوهش انجام‌شده توسط وو و همکاران (۱۹۹۷) با افزایش قطر استوانه خارجی به اندازه ۱۲۰

فیزیکی آن‌ها مشخص بوده و آزمایش استوانه‌های دوگانه در آن انجام شده بود، با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز و به کمک نرم‌افزار HYDRUS-ID تولید شد. سپس داده‌های نفوذ عمودی تولیدشده با داده‌های نفوذ اندازه‌گیری‌شده به روش استوانه‌های دوگانه در بافت‌های متفاوت، مورد مقایسه قرار گرفت.

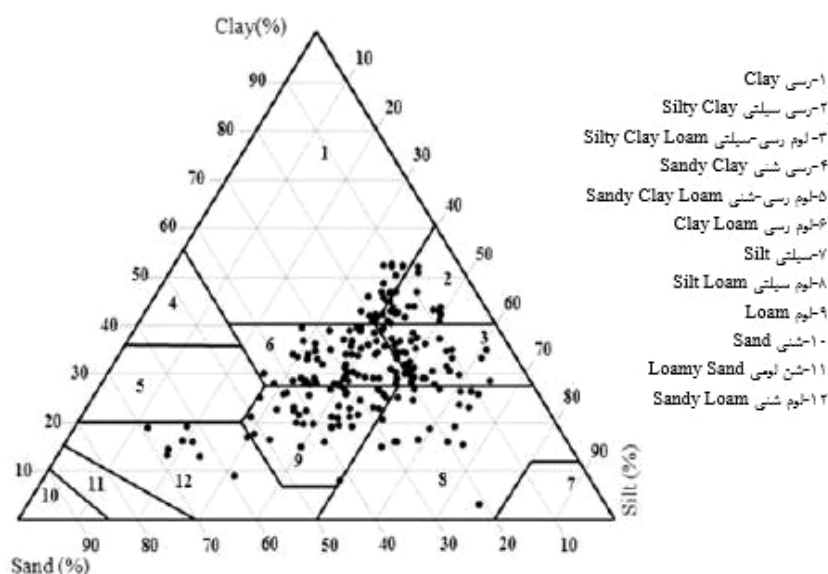
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، داده‌های مربوط به نفوذ آب به خاک با استفاده از آزمایش استوانه‌های دوگانه، با ۳ تکرار در ۱۱۴ نقطه در مناطق مختلف کشور جمع‌آوری شد. این داده‌ها حاصل نتایج پژوهش‌های خاکشناسی صورت گرفته در استان‌های مختلف کشور بوده است (۱۶). مناطق مورد پژوهش دارای تنوع آب و هوایی گرم و خشک تا سرد و مرطوب و در نتیجه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی متفاوت بودند. در همه این مناطق، با حفر خاک‌رخ در نزدیکی نقاط انجام آزمایش‌های نفوذپذیری، لایه‌های پدوژنیک خاک مشخص و از دو افق بالایی (پدوژنیک) نمونه‌برداری شده و برخی ویژگی‌های فیزیکی از جمله اجزای بافت خاک (شن، سیلت، رس)، میانگین هندسی ذرات، انحراف معیار هندسی ذرات، چگالی ظاهری، تخلخل، کربن آلی، آهک، رطوبت ظرفیت زراعی و رطوبت نقطه پژمردگی اندازه‌گیری شد. خاک‌های مناطق مورد مطالعه در رده‌های خاکی مالی‌سول، اینسپتی‌سول انتی‌سول و اریدی‌سول قرار دارند. توزیع بافتی مربوط به افق سطحی خاک‌های مورد مطالعه در شکل ۱ ارایه گردیده است. بافت خاک افق سطحی در مناطق مورد مطالعه شامل بافت‌های لوم، لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی، لوم رسی-سیلتی، رسی سیلتی و رسی بود. محدوده تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در جدول ۱، خاک‌های مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در محدوده وسیعی از تغییرات قرار داشتند.

از رویکردهایی که در شبیه‌سازی فرآیندهای غیریکنواخت مؤثر است را در بر می‌گیرد (۲۸). نرم‌افزار HYDRUS در پژوهش‌های فراوان آزمایشگاهی و مزرعه‌ای برای شبیه‌سازی و برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مورد استفاده قرار گرفته است (۱۴، ۱۵ و ۳۱).

مدل‌های یک‌بعدی جریان و انتقال املاح از درجه پیچیدگی کم‌تر و انعطاف‌پذیری و تعمیم‌پذیری بالاتری برای شرایط مزرعه‌ای برخوردار بوده و به داده‌های ورودی و زمان محاسباتی کم‌تری نیاز دارند (۳۳). متولی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) به‌منظور بررسی تأثیر آب برگشتی از آبیاری و بارندگی بر روی مقدار تغذیه آب زیرزمینی دشت جویین سبزوار که منطقه‌ای نیمه‌خشک است، از مدل HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی نفوذ استفاده کردند و مقدار تغذیه حاصل از شبیه‌سازی در زیر حوضه‌های جویین را ۳۰۱ میلیون مترمکعب برآورد کردند (۱۹). اسیگ و همکاران (۲۰۰۹) نفوذ و جریان عمقی در سطوح شیب‌دار را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش نتایج عددی با استفاده از مدل HYDRUS-1D و آزمایشگاهی مقایسه شدند. علاوه بر این نفوذپذیری و جریان عمقی در سطوح شیب‌دار توسط ترکیب آزمایش‌های کنترل‌شده با مدل‌های ریاضی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل HYDRUS توانایی قابل‌قبولی در برآورد نفوذ آب به خاک دارد (۷).

با توجه به اهمیت فرآیند نفوذ در زمینه‌های مختلف و از آنجایی‌که در بیش‌تر موارد هدف اصلی از اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک به‌دست آوردن نفوذ عمودی آب به خاک می‌باشد (۲۴)، بنابراین ارزیابی روش‌های اندازه‌گیری نفوذ امری مهم و ضروری است. در حالی‌که تا کنون پژوهش‌های محدودی در ارتباط با میزان خطای اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب به خاک در روش استوانه‌های دوگانه انجام شده است. در این پژوهش داده‌های نفوذ عمودی واقعی آب به خاک برای مناطق مختلفی از کشور که ویژگی‌های



شکل ۱- توزیع بافتی خاک افق سطحی در مناطق مورد مطالعه.

Figure 1. Distribution of soil texture in the studied areas.

جدول ۱- دامنه تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی در خاک‌های مورد مطالعه.

Table 1. Range of variations of some physical properties in the studied soils.

انحراف معیار CV	میانگین Mean	حداکثر Max	حداقل Min	واحد unite	ویژگی خاک Soil properties
15.19	28.37	81.0	2.0	%	شن Sand
11.14	42.2	81.7	7.0	%	سیلت Silt
11.04	29.41	60.2	3.1	%	رس Clay
0.049	0.042	0.391	0.005	(mm)	میانگین هندسی ذرات d_g
3.059	12.36	22.76	4.41	-	انحراف معیار هندسی ذرات σ_g
0.136	1.43	1.76	0.94	(g/cm ³)	چگالی ظاهری Bulk Density
5.08	43.4	54.2	28.4	%	تخلخل Porosity
0.51	0.74	3.05	0.07	%	کربن آلی Organic carbon
18.1	28.2	65.2	0.0	%	آهک CaCO ₃
0.062	0.256	0.440	0.060	(cm ³ cm ³)	رطوبت ظرفیت زراعی RFC
0.038	0.131	0.246	0.03	(cm ³ cm ³)	رطوبت نقطه پژمردگی PWP

استفاده از آماره آلفای کرونیباخ است. این آماره به صورت زیر تعریف می‌گردد (۲۱).

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^k s_i^2}{s_t^2} \right] \quad (2)$$

از آنجا که آزمایش نفوذپذیری در ۳ تکرار انجام شده است به منظور تعیین بهترین تکرار از روش تحلیل اعتباریابی به روش درونی استفاده گردید. یکی از روش‌های بررسی پایایی درونی یک آزمایش،

آب به خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه در محیط HYDRUS-1D پیاده‌سازی شد. از آنجا که در آزمایش استوانه‌های دوگانه تنها نفوذ تجمعی استوانه داخلی در برابر زمان اندازه‌گیری و مورد استفاده قرار می‌گیرد، وضعیت استوانه داخلی با توجه به ویژگی‌های فیزیکی خاک هر منطقه در محیط HYDRUS-1D شبیه‌سازی شد. شرط مرز ورودی برای استوانه درونی، بار آبی ثابت (Constant head) (ارتفاع آب روی سطح خاک برابر ۱۰ سانتی‌متر) و مرز پایینی (عمق خاک) به صورت زهکش آزاد (Free drainage) در نظر گرفته شد. همچنین از مدل ون‌گنوختن - معلم (رابطه‌های ۳ و ۴) با فرض $m=1-1/n$ برای کمی‌نمودن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در معادله ریچاردز استفاده شد.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m}, n > 1, m = 1 - \frac{1}{n} \quad (۳)$$

$$K(S_e) = K_s S_e \left[1 + \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (۴)$$

که در آن‌ها، $\theta(h)$ (L^3/L^3)، θ_r (L^3/L^3) و θ_s (L^3/L^3) به ترتیب رطوبت در مکش ماتریک h ، رطوبت باقی‌مانده و رطوبت اشباع، α و n پارامترهای شکل، K_s (L/T) هدایت هیدرولیکی اشباع، $K(S_e)$ (L/T)، S_e (-) و l به ترتیب هدایت هیدرولیکی غیراشباع، درجه اشباع مؤثر و پارامتر اعوجاج منافذ خاک می‌باشند. زمان نهایی نفوذ برای هر خاک برابر با زمان نهایی نفوذ اندازه‌گیری شده در مزرعه در نظر گرفته شد. از آنجایی که شرایط اولیه برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه، براساس پتانسیل ماتریک تعریف می‌شود (۱۷)، بدین ترتیب با توجه به رطوبت اولیه

که در آن، k تعداد تکرارها، S_i^2 واریانس تکرار نام و S_T^2 واریانس مجموع تکرارها است. در صورتی که تکرارها کاملاً از هم مستقل باشند، مجموع واریانس‌های تکرارها با واریانس مجموع تکرارها برابر بوده و مقدار آلفا برابر با صفر می‌گردد. همچنین، اگر تکرارها کاملاً مشابه با یکدیگر باشند، در این صورت مقدار آلفا برابر با ۱ خواهد بود (۲۱). به‌عنوان یک قاعده کلی، اگر مقدار این آماره بیش‌تر از ۰/۸ باشد، در این صورت، همه تکرارها قابل اعتماد محسوب می‌گردد. اگر مقدار آلفا کم‌تر از ۰/۸ باشد، در این صورت، حداقل یکی از تکرارها معتبر نیست (۱۰). در این پژوهش نیز به‌منظور تعیین بهترین تکرار آزمایش نفوذپذیری، مقدار آماره آلفای کرونباخ در صورت حذف هر یک از تکرارها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. به این ترتیب، تکراری که با حذف آن، مقدار این آماره کاهش بیش‌تری یافت، به‌عنوان بهترین تکرار انتخاب شد. همچنین، در صورتی که از مقدار این آماره برای هر سه تکرار کم‌تر از ۰/۸ بود و با حذف هیچ‌یک از تکرارها مقدار این آماره از این مقدار بیش‌تر نگردید، از نتایج آن آزمایش چشم‌پوشی شد و وارد دیگر مراحل تجزیه و تحلیل نشد.

شبیه‌سازی شرایط آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه در محیط HYDRUS-1D در مدل HYDRUS-1D برای حل معادله ریچاردز (۲۵) به تخمین اولیه‌ای از مقادیر پارامترهای هیدرولیکی مدل ون‌گنوختن - معلم (θ_r ، θ_s ، K_s ، α ، n) نیاز است. برای این منظور ابتدا پارامترهای هیدرولیکی مورد نظر با استفاده از روش حل عددی معکوس در محیط HYDRUS برای هر منطقه بر اساس ویژگی‌های فیزیکی خاک هر منطقه از جمله بافت و چگالی ظاهری خاک آن منطقه، بهینه‌سازی شد (۱۶). سپس به‌منظور تولید داده‌های نفوذ عمودی آب به خاک برای هر منطقه، شرایط نفوذ

اندازه‌گیری شده، X_{min} کم‌ترین نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در یک نوع خاک و n تعداد مشاهده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

محدوده مقادیر نفوذ تجمعی آب به خاک اندازه‌گیری شده توسط استوانه‌های دوگانه و برآورد شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D به تفکیک بافت خاک در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۲ مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه در مقایسه با مقادیر برآورد شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D در تمام کلاس‌های بافتی بیش‌تر بوده و دارای اختلاف زیادی می‌باشد. مقادیر میانگین نفوذ به‌دست آمده نشان می‌دهد که با سنگین‌تر شدن بافت خاک میزان نفوذ آب به خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده کاهش یافته است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، در انجام آزمایش نفوذ با استفاده از استوانه‌های دوگانه، عوامل مختلفی بر روی نتایج نهایی تأثیرگذار است. در اندازه‌گیری نفوذ به این روش نفوذ عمودی آب به خاک در استوانه درونی در برابر زمان مدنظر است و استوانه بیرونی تنها به‌منظور کاهش نفوذ جانبی آب به خاک به‌کار می‌رود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، به‌نظر می‌رسد که ابعاد استوانه بیرونی مورد استفاده در این پژوهش (قطر ۶۰ سانتی‌متر) و یا اندازه فضای بافری بین دو استوانه (۰/۵) در حدی بوده که نتوانسته مانع از ایجاد جریان‌های جانبی آب در خاک شود. این نتیجه با گزارش‌های ارائه شده توسط رینولدز و همکاران (۲۰۰۲) و سوارتزندرابر و اولسون (۱۹۷۴) همخوانی دارد (۲۴ و ۲۹).

موجود برای خاک هر منطقه، پتانسیل ماتریک معادل آن از معادله ون‌گنوختن - معلم (رابطه‌های ۲ و ۳) محاسبه شد و مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت مدل با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده معادله ون‌گنوختن - معلم برای خاک‌های مورد مطالعه و با شرایط مرزی و ابتدایی تعریف شده به‌صورت مستقیم اجرا و داده‌های نفوذ عمودی استخراج شدند.

ارزیابی داده‌های اندازه‌گیری شده: به‌منظور ارزیابی داده‌های اندازه‌گیری شده به روش استوانه دوگانه در برآورد نفوذ عمودی آب به خاک از آماره‌های میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (۱۶) (NRMSE) استفاده شد. هر کدام از آماره‌های زیر به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$ME = \frac{\sum_{j=1}^n I(p)_j - I(m)_j}{n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - I(m)_j)^2}{n}} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (I(m)_j - I(p)_j)^2}{\sum_{j=1}^n (I(m)_j - \bar{I}(m)_j)^2} \quad (7)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max} - X_{min}} \quad (8)$$

که در آن‌ها، $I(p)_j$ نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده، $I(m)_j$ نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده، $\bar{I}(m)_j$ میانگین نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده، X_{max} بیش‌ترین نفوذ تجمعی

جدول ۲- دامنه تغییرات نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در خاک‌های مورد مطالعه.

Table 2. The range of measured and simulated cumulative infiltration data in studied soils.

ضریب تغییرات CV	میانگین Mean	بیشینه min	کمینه max	نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) Cumulative infiltration (cm)	تعداد نمونه‌های خاک	بافت خاک Soil texture
0.70	6.17	15.9	0.4	اندازه‌گیری شده Measured	۸	رسی Clay
0.66	3.92	8.13	0.31	شبیه‌سازی شده Simulated		
1.24	11.71	158.9	0.2	اندازه‌گیری شده Measured	۱۰	رسی سیلتی Silty clay
0.96	6.15	99.41	0.08	شبیه‌سازی شده Simulated		
1.83	14.99	182.56	0.1	اندازه‌گیری شده Measured	۲۰	لوم رسی - سیلتی Silty clay loam
1.05	7.30	38.83	0.05	شبیه‌سازی شده Simulated		
1.33	17.72	158.9	0.1	اندازه‌گیری شده Measured	۲۶	لوم رسی Clay loam
1.30	8.52	99.41	0.05	شبیه‌سازی شده Simulated		
1.30	6.49	51.13	0.1	اندازه‌گیری شده Measured	۱۸	لوم سیلتی Silty loam
1.24	4.80	36.27	0.104	شبیه‌سازی شده Simulated		
1.19	12.27	114.9	0.1	اندازه‌گیری شده Measured	۲۳	لومی loam
1.09	6.99	60.42	0.08	شبیه‌سازی شده Simulated		
0.99	16.05	56.4	0.2	اندازه‌گیری شده Measured	۹	لوم شنی Sandy loam
0.89	11.59	47.21	0.02	شبیه‌سازی شده Simulated		

افزوده شده است (۲۴). نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که تنها راه برای رفع این مشکلات استفاده از استوانه‌هایی با اندازه‌های بزرگ‌تر می‌باشد. سوارترندرابر و اولسون (۱۹۷۴) نیز به منظور تعیین اثر فضای بافری بین دو استوانه در یک خاک شنی، یک سری آزمایش نفوذ با استفاده از نفوذسنج‌های استوانه دوگانه با

رینولدز و همکاران (۲۰۰۲) بیان کردند که نفوذ آب به خاک اندازه‌گیری شده در روش استوانه دوگانه به دلیل وجود نیروی موینگی در خاک زیر استوانه‌ها و همچنین به دلیل وجود لایه‌های محدودکننده در طول پروفیل خاک، کاملاً عمودی نبوده و جریان‌های جانبی نیز به مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده

نفوذ عمودی آب به خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه در بافت لوم رسی - سیلتی مشاهده شد. مقادیر آماره‌های ME ، $RMSE$ ، $NRMSE$ و R^2 در این بافت به ترتیب برابر با $۷/۶۷$ ، $۲۲/۸۹$ ، $۰/۵۹$ و $۰/۶۸۱$ بود.

با فرض یکسان بودن شرایط سطح، بارندگی و پوشش گیاهی مهم‌ترین عامل در نفوذ آب به خاک، بافت خاک و رطوبت اولیه خاک است (۱۱). با سنگین شدن بافت خاک دقت اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. که دلیل آن افزایش وابستگی فرآیند نفوذ به بافت خاک باشد (۲۳). یافته‌های واکنش‌پذیری و بن‌هور (۲۰۰۲) نیز نشان دادند که اندازه‌گیری نفوذ به شدت تحت تأثیر بافت خاک می‌باشد (۳۰). نتایج برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بین درصد سیلت با میزان نفوذ آب به خاک و تولید رواناب رابطه مثبتی وجود دارد و بر این اساس با افزایش درصد سیلت با اندازه‌های بین ۲ تا ۵ میکرون، میزان رواناب و فرسایش‌پذیری خاک به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. با افزایش درصد رس نیز میزان نفوذ آب به خاک کاهش می‌یابد، در حالی که بخش‌ش خاک باعث افزایش نفوذ آب به خاک می‌شود (۶).

سانتوس و همکاران (۲۰۰۳) بیان نمودند که در خاک‌های دارای بافت سبک‌تر وجود منافذ درشت باعث بیشتر بودن جریان‌های ثقلی آب در خاک در مقایسه با جریان‌های جانبی است. در حالی که خاک‌های ریزدانه به دلیل چسبندگی و تخلخل کم، دارای نفوذپذیری کم‌تری هستند. بنابراین نفوذ اندازه‌گیری شده در بافت لوم شنی نسبت به سایر بافت‌ها، به نفوذ عمودی نزدیک‌تر بوده و سهم نفوذ جانبی آب در خاک در این بافت، نسبت به بافت‌های ریزتر کم‌تر بوده است (۲۶).

اندازه‌های مختلف انجام دادند. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش فضای بافری در اطراف حلقه درونی، نفوذ آب به خاک تا حد زیادی به جریان یک‌بعدی نزدیک می‌شود (۲۹).

نتایج مقایسه آماری بین داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه و برآورد شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D بر اساس کلاس‌های بافتی متفاوت در مناطق مورد پژوهش در جدول ۳ ارائه شده است. در کل مقادیر نسبتاً بالای آماره‌های مورد بررسی (ME ، $RMSE$ و $NRMSE$) نشان می‌دهد که بین مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه و مقادیر برآورد شده توسط نرم‌افزار HYDRUS-1D اختلاف زیادی وجود دارد. مقادیر منفی آماره ME بیانگر این است که نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، نسبت به مقادیر برآورد شده توسط مدل بیش‌تر بوده است. در این جدول موردی که کم‌ترین مقادیر خطا و بیش‌ترین میزان ضریب تبیین را داشته باشد رتبه ۱ گرفته و با افزایش میزان خطا و کاهش کارایی و ضریب تبیین، رتبه افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ کم‌ترین میزان خطای برآورد نفوذ عمودی آب به خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه در بافت لوم شنی مشاهده شد. در این بافت مقادیر آماره‌های ME ، $RMSE$ ، $NRMSE$ و R^2 به ترتیب برابر با $۴/۴۵$ ، $۸/۵۱$ ، $۰/۱۸$ و $۰/۸۷$ بود. و پس از آن بافت لومی و لوم سیلتی در رتبه دوم قرار گرفتند. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه در بافت لوم شنی از دقت بالاتری نسبت به سایر بافت‌ها برخوردار بوده است. همچنین بیش‌ترین میزان خطا در اندازه‌گیری

جدول ۳- مقدار آماره‌های ارزیابی برای مدل Hydrus-1D در کلاس‌های بافتی خاک.

Table 3. Evaluation values for hydrus-1D model in in different soil textures.

رتبه نهایی The final rating	مجموع رتبه‌ها total rating	آماره ارزیابی Statistics				بافت خاک
		R ²	NRMSE (cm)	RMSE (cm)	ME (cm)	
3	14	0.686(5)	0.44(6)	3.46(1)	-2.25(2)*	رسی Clay
5	17	0.83(2)	0.43(5)	11.02(5)	-5.56(5)	رسی سیلتی Silty clay
6	26	0.681(6)	0.59(7)	22.89(7)	-7.67(6)	لوم رسی - سیلتی Silty clay loam
4	20	0.75(4)	0.176(3)	17.56(6)	-9.19(7)	لوم رسی Clay loam
2	12	0.48(7)	0.174(2)	6.29(2)	-1.69(1)	لوم سیلتی Silty loam
2	12	0.81(3)	0.16(1)	9.97(4)	5.28(4)	لومی Loam
1	11	0.87(1)	0.18(4)	8.51(3)	4.45(3)	لوم شنی Sandy loam

*رتبه از نظر آماره مورد بررسی

نتیجه‌گیری کلی

به مقادیر نفوذ عمودی واقعی آب به خاک نزدیک‌تر بوده است. بنابراین بر اساس نتایج به‌دست آمده نفوذ تجمعی اندازه‌گیری‌شده در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه در این بافت از دقت بالاتری نسبت به سایر بافت‌ها برخوردار بوده است. بنابراین نفوذ اندازه‌گیری‌شده در بافت لوم شنی نسبت به سایر بافت‌ها، به نفوذ عمودی نزدیک‌تر بوده و سهم نفوذ جانبی آب در خاک در این بافت، نسبت به بافت‌های ریزتر کم‌تر بوده است.

در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی روش استوانه‌های دوگانه در اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب به خاک در بافت‌های مختلف از نرم‌افزار HYDRUS-1D استفاده گردید. نتایج نشان داد که به‌طورکلی روش استوانه دوگانه در تمام بافت‌ها نفوذ آب به خاک را با اختلاف زیادی نسبت به مقادیر نفوذ عمودی واقعی آب به خاک اندازه‌گیری کرده است. همچنین مشاهده شد که مقادیر نفوذ اندازه‌گیری‌شده با استفاده از استوانه دوگانه در بافت لوم‌شنی که یک بافت سبک می‌باشد

منابع

- Ahuja, L.R., EL-Swaify, S.A., and Rahman, A. 1976. Measuring hydrologic properties of soil with a double-ring infiltrometer and multiple-deph tensiometers. Soil Science Society of American. 40: 4. 494-499.
- Alley, W.M. 2009. Groundwater Resources: Sustainability, Management and Restoration. Groundwater. 47: 4. 479-479.
- Chowdary, V.M., Rao, M.D., and Jaiswal, C.S. 2006. Study of infiltration process under different experimental conditions. Agricultural Water Management. 83: 69-78.
- Cook, F.J. 2002. The twin-ring method for measuring saturated hydraulic conductivity and sorptivity in the field. P 108-118, McKenzie, N. Coughlan, K. and H. Cresswell (ed.), Soil physical measurement and interpretation for land evaluation. CSIRO Publishing.

5. Droogers, P., Akbari, M., Torabi, M., and Pazira, E. 2000. Exploring field scale salinity using simulation modeling, Example for Rudasht area, Esfahan Province, Iran. IAERI-IWMI Research Reports. 2: 16.
6. 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.
7. Essig, E.T., Corradini, C., Morbidelli, R., and Gonindraj, S. 2009. Infiltration and deep flow over sloping surfaces: Comparison of numerical and experimental results. *J. Hydrol.* 374: 1. 30-42.
8. Fatehnia, M., Tawfiq, K., and Abichou, T. 2014. Comparison of the methods of hydraulic conductivity estimation from mini disk infiltrometer. *Elec. J. Geotech. Engin.* 19: 1047-1063.
9. Gregory J.H., Dukes, M.D., Miller, G.L., and Jones, P.H. 2005. Analysis of Double-Ring Infiltration Techniques and Development of a Simple Automatic Water Delivery System. *Applied Turfgrass Science*. 2: 1. 0-0.
10. Ho, R. 2006. *Handbook of Univariate and Multivariate Data Analysis and Interpretation with SPSS*, CRC Press.
11. 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.
12. Lai, J., and Ren, L. 2007. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 71: 6. 1667-1675.
13. Lai, J., Luo, Y., and Ren, L. 2010. Buffer index effects on hydraulic conductivity measurements using numerical simulations of double-ring infiltration. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 74: 5. 1526-1536.
14. Mashayekhi, P., Ghorbani-Dashtaki, S., Mosaddeghi, M.R., Shirani, H., Panahi, M., and Nouri, M.R. 2017. Estimation of soil hydraulic parameters using double-ring infiltrometer data via inverse method. *Iran. J. Soil Water Res.* 47: 4. 829-838. (In Persian)
15. 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.
16. Mashayekhi, P. 2016. Estimation of soil hydraulic properties using double-ring infiltrometer data via inverse solution. Ph.D. dissertation, University of Shahrekord, Faculty of Agriculture. 148p.
17. 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.
18. Menziani, M., Pugnaghi, S., and Vincenzi, S. 2007. Analytical solutions of the linearized Richards equation for discrete arbitrary initial and boundary condition. *J. Hydrol.* 332: 1. 214-225.
19. Motevalizade, M., Ghahreman, B., Davary, K., and Ghandehari, A. 2012. Infiltration modeling using Hydrus-1D in Sabzevar-Jovein plain. M.Sc. dissertation, Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)
20. Mukheibir, P. 2008. Water resources management strategies for adaptation to climate-induced impacts in South Africa. *Water Resources Management*. 22: 9. 1259-1276.
21. Parchami Araghi, F., Mirlatifi, S.M., Ghorbani-Dashtaki, Sh., and Mahdian, M.H. 2010. Evaluating Some Infiltration Models under Different Soil Texture Classes and Land Uses. *Iran. J. Irrig. Drain.* 4: 2. 193-205. (In Persian)
22. 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. *J. Irrig. Drain. Div.* 141: 2.
23. Rawls, W.J., and Brakensiek, D.L. 1985. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. P 293-299, In *Watershed management in the eighties*. ASCE.

24. Reynolds, W.D., Elrick, D.E., and Youngs, E.G. 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). P 818-826, In: Dane, J.H. and G.C. Topp (eds), Methods of soil analysis: Physical methods. SSSA Wisconsin, USA.
25. Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. J. Appl. Physic. 1: 5. 318-333.
26. 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.
27. Šimůnek, J., Šejna, M., and van Genuchten, M.Th. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0, IGWMC-TPS-70, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colo. 230p.
28. Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., and Šejna, M. 2011. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water Heat. and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Technical Manual. Version 2.0. PC Progress. Prague. Czech Republic. 230p.
29. Swartzendruber, D., and Youngs, E.G. 1974. A Comparison of physically-based infiltration equations. Soil Science, an Interdisciplinary Approach to Soil Research, 117: 3. 165-167.
30. Wakindiki, I.I.C., and Ben-Hur, M. 2002. Soil Mineralogy and Texture Effects on Crust Micromorphology, Infiltration, and Erosion. Soil Sci. Soc. Amer. J. 66: 3. 897-905.
31. Wang X.P., Cui, Y., Pan, Y.X., Li, X.R., Yu, Z., and Young, M.H. 2008. Effects of rainfall characteristics on infiltration and redistribution patterns in revegetation-stabilized desert ecosystems. J. Hydrol. 358: 1. 134-143.
32. Wu, L., Pan, L., Roberson, M., and Shouse, P.J. 1997. Numerical evaluation of ring-infiltrimeters under various soil conditions. Soil Science, an Interdisciplinary Approach to Soil Reserch. 162: 11. 771-777.
33. Zarebyaneh, H. 2006. Dynamics of mass transfer in laminated and nonlaminated soils. Ph.D. dissertation, Tabriz University, Irrigation department, Agriculture faculty. 184p. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 25(3), 2018

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2018.14489.2928

Evaluation of double-ring infiltrometers method for measuring the vertical infiltration in different soil textures using HYDRUS

*A. Mousavi Dehmurdi¹, Sh. Ghorbani-Dashtaki² and P. Mashayekhi³

¹M.Sc. Graduate, Dept. of Soil Science, Shahrekord University, ²Professor, Dept. of Soil Science, Shahrekord University, ³Assistant Prof., Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

Received: 12.30.2017; Accepted: 05.27.2018

Abstract

Background and Objectives: Infiltration is one of the important parameters of the soil, which affects many hydrological processes in the watersheds. The importance of the Infiltration has led to various laboratory methods used to measure this process. Various methods have been developed for measuring the infiltration, which are based on the measurement of the vertical flow of water to the soil. One of the standard methods for measuring infiltration, is double-ring infiltrometers method. In this method, it is assumed that the external cylinder prevents lateral flow and creates a completely vertical flow in the soil. Therefore, the present study was conducted to evaluate the double-ring infiltrometers method for measuring the vertical infiltration compared to actual vertical infiltration data simulated using HYDRUS-1D software.

Materials and Methods: In this study, in order to evaluate the double- ring infiltration data, infiltration was measured in several regions with different soil textures by double- ring infiltrometers. Then, HYDRUS-1D numerical model was used to simulate infiltration and the vertical infiltration data were obtained through forward solution of the Richards equation. The van Genuchten-Mualem model was used to quantitatively determine soil hydraulic properties of the Richards equation. The hydraulic parameters of van Genuchten-Mualem model were optimized using inverse modeling in the HYDRUS, for each region's soil. Assessment of measured data was performed using mean error (ME), root mean square error (RMSE), coefficient of determination (R^2) and normalized mean square root (NRMSE).

Results: Comparison of simulated and measured infiltration data showed that double ring infiltration data is much higher than the simulated vertical infiltration data. The measured infiltration data in all soil texture was much different from that of simulated data. The lowest error in the measurement of vertical infiltration was observed in sandy loam soil that is a light texture. The values of coefficient of determination, root mean square error, mean error and normalized mean square root (R^2 , RMSE, ME and NRMSE) in this texture were 0.87, 8.51, -4.45 and 0.18, respectively.

Conclusion: In measuring the infiltration of a double-rings, the size of the cylinders used, as well as the buffer index, is of great importance. Therefore, the use of cylinders of different sizes influences the final infiltration values. The double-ring infiltrometers method has a lower error in the sandy texture than heavy texture and the contribution of lateral infiltration is less in this texture. Therefore, the double-ring infiltrometers has a higher accuracy in light texture.

Keywords: HYDRUS-1D, Infiltration, Richards equation, Simulation

* Corresponding Author; Email: aci.musavi@yahoo.com

