



ارزیابی روش استوانه‌های دوگانه در برآورد نفوذ عمودی آب به خاک با کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D در بافت‌های مختلف

اسماء موسوی دهموردی^۱، شجاع قربانی دشتکی^۲، پریسا مشایخی^۳

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
۳- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

چکیده

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک بیان شده است که تقریباً 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. به منظور ارزیابی داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده در این روش، نفوذ آب به خاک در چندین منطقه از سراسر کشور با بافت‌های مختلف اندازه‌گیری شد. شرایط نفوذ آب به خاک در محیط نرم‌افزار HYDRUS-1D برای مناطق مورد نظر، شبیه-سازی و داده‌های نفوذ عمودی آب به خاک به روش حل مستقیم استخراج شدند. مقایسه این داده‌ها 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. کمترین میزان خطا در اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک در این روش، در بافت لوم شنی مشاهده شد. مقادیر R^2 ، RMSE، ME و NRMSE در این بافت به ترتیب برابر با ۰/۸۷، ۸/۵۱، ۴/۴۵، ۰/۱۸ بود.

واژه‌های کلیدی: نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، نفوذ عمودی، HYDRUS-1D

مقدمه

نفوذ آب به خاک، فرآیند اولیه ورود آب از سطح خاک به داخل ناحیه غیراشباع خاک است. کمی کردن پدیده نفوذ آب به خاک در مدیریت حوزه‌های آبخیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Mukheibir, 2008). در پژوهش‌های اخیر، استوانه‌های دوگانه (Double-rings) به عنوان یک ابزار استاندارد برای تعیین نفوذ آب به خاک و اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع، استفاده شده است (Ben-Hur and Assouline, 2002). این روش به دلیل سهولت کاربرد و کم هزینه 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، درحالی‌که Cook (2002) عنوان کرد برای رسیدن به چنین هدفی استفاده از استوانه‌های بسیار بزرگ اجتناب‌ناپذیر است. در روش استوانه‌های مضاعف 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 یک بعدی نزدیک شود (Pollalis and Valiantzas, 2015). در صورت 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 جریان‌های جانبی قابل اغماض خواهد بود. اندازه فضای بافری از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Lai and Ren, 2010):

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

در رابطه بالا b اندازه محیط بافری، d_o قطر استوانه خارجی و d_i قطر استوانه خارجی است.



Pollalis and Valiantzas (2015) گزارش نمودند که در صورت 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 جریان‌های جانبی قابل اغماض خواهد بود. در پژوهش انجام شده توسط Wu et al (1997)، با افزایش قطر استوانه خارجی به اندازه ۱۲۰ سانتی متر، در شرایطی که قطر استوانه داخلی ۲۰ سانتی متر بود، میزان نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در حدود ۲۰ تا ۳۳٪ بیشتر از میزان نفوذ تجمعی یک بعدی برای سه نوع خاک مورد آزمون بود. پژوهشگران مختلفی در آزمایش اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک با استفاده از نفوذسنج استوانه‌های دوگانه، تاثیر 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 (Lai and Ren, 2010; Lai et al., 2007; Pollalis and Valiantzas, 2015).

تولید داده‌های نفوذ عمودی واقعی آب به خاک از طریق حل عددی معادله ریچاردز امکان‌پذیر است. مدل ریچاردز (۱۹۳۱) به عنوان یک مدل عددی با اساس فیزیکی، برای توصیف حرکت آب در خاک تحت شرایط مختلف، قابل استفاده است (Menziani et al, 2007). در دهه‌های اخیر استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی به عنوان ابزاری نوین در حل مسائل انتقال آب در خاک در حال توسعه است (جلینی و همکاران، ۱۳۸۴). در بیشتر این مدل‌ها، از تکنیک‌های عددی برای حل معادله ریچاردز استفاده شده است. یکی از نرم‌افزارهای پیشرفته در ارتباط با حرکت آب، املاح و گرما نرم‌افزار HYDRUS است که توسط سیمونک و همکاران (Šimůnek et al., 1999) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است. نرم‌افزار هایدروس (HYDRUS) یک برنامه پیشرفته تحت ویندوز برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک است (Šimůnek, 2011). تا کنون پژوهش‌های محدودی در ارتباط با میزان خطای اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب به خاک در این روش انجام شده است. در این پژوهش داده‌های نفوذ عمودی واقعی آب به خاک برای مناطق مختلفی از کشور که ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها مشخص بوده و آزمایش استوانه‌های دوگانه در آن انجام شده بود، با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز و به کمک نرم افزار HYDRUS-1D تولید شد. سپس داده‌های نفوذ عمودی تولید شده با داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده 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 (مشایخی، ۱۳۹۵). مناطق مورد مطالعه 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 ویژگی‌های موردنظر اندازه‌گیری شد. خاک‌های مناطق مورد مطالعه در رده‌های خاکی مالی‌سول، اینسپتی‌سول، انتی‌سول و اریدی‌سول قرار دارند. 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.

از سوی دیگر برای تولید داده‌های نفوذ عمودی آب به خاک برای هر منطقه، شرایط نفوذ 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 با فرض $m=1-1/n$ برای کمی‌نمودن ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در معادله ریچاردز استفاده شد. 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 (Mashayekhi et al., 2016)؛ بدین ترتیب با توجه به رطوبت اولیه موجود برای خاک هر منطقه، پتانسیل ماتریک معادل آن از معادله ون‌گنوختن-معلم (روابط ۲ و ۳) محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s + \theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m}, n > 1, m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[1 + \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (3)$$

در روابط فوق $\theta(h)$ (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 باقی مانده 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 موثر و پارامتر اعوجاج منافذ خاک می‌باشند. در ادامه مدل با شرایط مرزی و ابتدایی تعریف شده و با استفاده از پارامترهای بهینه شده معادله ون‌گنوختن-معلم برای خاک‌های مورد مطالعه (مشایخی و همکاران، ۲۰۱۶) به صورت مستقیم اجرا و داده‌های نفوذ عمودی استخراج شدند. سپس داده‌های نفوذ عمودی واقعی استخراج شده با کمک نرم‌افزار HYDRUS با داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه مورد مقایسه قرار گرفت. برای انجام این مقایسه‌ها از آماره‌های میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)، ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

نتایج و بحث

محدوده مقادیر نفوذ تجمعی آب به خاک اندازه‌گیری شده توسط استوانه‌های دوگانه و برآورد شده به کمک نرم افزار HYDRUS-1D در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- دامنه تغییرات نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و برآورد شده در خاک‌های مورد مطالعه

بافت خاک	نفوذ تجمعی (cm)	کمینه	بیشینه	میانگین	ضریب تغییرات
رسی	اندازه‌گیری شده	۰/۴	۱۵/۹	۶/۱۷	۰/۷۰
	برآورد شده	۰/۳۱	۸/۱۳	۳/۹۲	۰/۶۶
رسی سیلتی	اندازه‌گیری شده	۰/۲	۱۵۸/۹	۱۱/۷۱	۱/۲۴
	برآورد شده	۰/۰۸	۹۹/۴۱	۶/۱۵	۰/۹۶
لوم رسی-سیلتی	اندازه‌گیری شده	۰/۱	۱۸۲/۵۶	۱۴/۹۹	۱/۸۳
	برآورد شده	۰/۰۵	۳۸/۸۳	۷/۳۰	۱/۰۵
لوم رسی	اندازه‌گیری شده	۰/۱	۱۵۸/۹	۱۷/۷۲	۱/۳۳
	برآورد شده	۰/۰۵	۹۹/۴۱	۸/۵۲	۱/۳۰
لوم سیلتی	اندازه‌گیری شده	۰/۱	۵۱/۱۳	۶/۴۹	۱/۳۰
	برآورد شده	۰/۱۰۴	۳۶/۲۷	۴/۸۰	۱/۲۴
لومی	اندازه‌گیری شده	۰/۱	۱۱۴/۹	۱۲/۲۷	۱/۱۹
	برآورد شده	۰/۰۸	۶۰/۴۲	۶/۹۹	۱/۰۹
لوم شنی	اندازه‌گیری شده	۰/۲	۵۶/۴	۱۶/۰۵	۰/۹۹
	برآورد شده	۰/۰۲	۴۷/۲۱	۱۱/۵۹	۰/۸۹

با توجه به جدول (۱) مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه دوگانه در مقایسه با مقادیر برآورد شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D در تمام کلاس‌های بافتی بیشتر بوده و دارای اختلاف زیادی می‌باشد. همان‌طور که قبلاً هم

اشاره شد، ایجاد جریان یک بعدی در خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه در شرایط خاصی امکان‌پذیر است و احتمال ایجاد خطا در اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب به خاک در این روش به دلیل وجود جریان‌های جانبی آب در خاک بالا است (پولالیس و والیانتراس، ۲۰۱۵). با توجه به نتایج به‌دست آمده از جدول فوق، به نظر می‌رسد ابعاد استوانه بیرونی (قطر ۶۰ سانتی‌متر) در این پژوهش و یا اندازه فاصله بافری بین دو استوانه در حدی بوده است که نتوانسته مانع از ایجاد جریان‌های جانبی آب در خاک بشود. بنابراین میزان نفوذ تجمعی نهایی اندازه‌گیری شده بیشتر از نفوذ عمودی مورد انتظار بوده است. مقادیر آماره‌های ارزیابی نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه و برآورد شده به کمک نرم‌افزار Hydrus-1D براساس کلاس‌های بافتی متفاوت در مناطق مورد مطالعه در جدول (۲) 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 مثبت 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. همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده بوسیله‌ی استوانه‌های دوگانه، به دلیل وجود جریان‌های جانبی بیشتر از مقادیر نفوذ عمودی واقعی است.

جدول ۲- مقدار آماره‌های ارزیابی برای مدل Hydrus-1D در کلاس‌های بافتی خاک

رتبه نهایی	آماره‌های ارزیابی				بافت خاک
	R ²	NRMSE	RMSE	ME	
۱۴	۰/۶۸۶(۵)	۰/۴۴(۶)	۳/۴۶(۱)	۲/۲۵(۲)*	رسی
۱۷	۰/۸۳(۲)	۰/۴۳(۵)	۱۱/۰۲(۵)	۵/۵۶(۵)	رسی سیلتی
۲۶	۰/۶۸۱(۶)	۰/۵۹(۷)	۲۲/۸۹(۷)	۷/۶۷(۶)	لوم رسی-سیلتی
۲۰	۰/۷۵(۴)	۰/۱۷۶(۳)	۱۷/۵۶(۶)	۹/۱۹(۷)	لوم رسی
۱۲	۰/۴۸(۷)	۰/۱۷۴(۲)	۶/۳۹(۲)	۱/۶۹(۱)	لوم سیلتی
۱۲	۰/۸۱(۳)	۰/۱۶(۱)	۹/۹۷(۴)	۵/۲۸(۴)	لومی
۱۱	۰/۸۷(۱)	۰/۱۸(۴)	۸/۵۱(۳)	۴/۴۵(۳)	لوم شنی

*: رتبه از نظر آماره مورد بررسی

با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول (۲) 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 R² به ترتیب برابر با ۴/۴۵، ۸/۵۱، ۰/۱۸ و ۰/۸۷ بود. بنابراین بر اساس نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش نفوذسنج استوانه‌های دوگانه در این بافت از دقت بالاتری نسبت به سایر بافت‌ها برخوردار بوده است. در خاک‌های دارای بافت سبک‌تر وجود منافذ درشت باعث بیشتر بودن جریان‌ات ثقلی آب در خاک در مقایسه با جریان‌های جانبی است. 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.

منابع

پرچمی عراقی، ف. میر لطیفی، س.م. قربانی دشتکی، ش. و مهدیان، م.ح. ۱۳۸۹. ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی و کاربری‌های اراضی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. جلد ۴ (شماره ۲). صفحات ۱۹۳ تا ۲۰۳.



- جلینی، م. کاوه، ف. پذیرا، ا. پاره‌کار، م. و عابدی م. ۱۳۸۴. برآورد رطوبت در محدوده توسعه ریشه چغندرقلند با استفاده از مدل LEACH. مجله علوم کشاورزی منابع طبیعی، جلد ۵ (شماره ۱۲). صفحات ۲۸ تا ۳۸.
- مشایخی، پ. برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک با استفاده از داده‌های نفوذسنج استوانه-دوگانه با رویکرد حل معکوس. ۱۳۹۵. پایان نامه دکتری خاکشناسی، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد.
- Ben-Hur M. and Assouline S. 2002. Tillage effects on water and salt distribution in a Vertisol during effluent irrigation and rainfall. *American Society of Agronomy Journal*. 94:1295–1304.
- Bohne K. and Salzmann W. 2002. Inverse simulation of non-steady-state evaporation using nonequilibrium water retention data: A case study. *Geoderma*. 110:49–62.
- Cook F.J. 2002. The twin-ring method for measuring saturated hydraulic conductivity and sorptivity in the field. In: McKenzie, N. K. Coughlan and H. Cresswell. *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation*. Part 7. CSIRO Publishing. pp. 108-118.
- Lai J., Luo Y. and Ren L. 2010. Buffer index effects on hydraulic conductivity measurements using numerical simulations of double-ring infiltration. *Soil Science Society of American Journal*. 74:1526–1536.
- Lai J. and Ren L. 2007. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation. *Soil Science Society American Journal*. 71:1667–1675.
- Menziani M. Pugnaghi S. and Vincenzi S. 2007. Analytical solutions of the linearized Richards equation for discrete arbitrary initial and boundary condition. *Journal of Hydrology*. 332:214–225.
- 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: 203-210.
- Mukheibir P. 2008. Water resources management strategies for adaptation to climate-induced impacts in South Africa. *Water Resources Management*. 22:1259–1276.
- 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 the Irrigation and Drainage Division*. 141(2). 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000796.
- Richards L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*. 1:318–333.
- 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.
- Šimůnek J., Šejna M. and van Genuchten M.Th. 1999. HYDRUS-2D software for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Version 2.0. *Int. Ground Water Model. Ctr.* Colorado School of Mines. Golden.
- Wu L.L., Pan M. Roberson. and Shouse P.J. 1997. Numerical evaluation of ring-infiltrometers under various soil conditions. *Soil Science, An Interdisciplinary Approach to Soil Reserch*. 162:771–777.

Evaluation of double-ring infiltrometers method in estimating the vertical infiltration using HYDRUS-1D in different soil textures

A. Mousavi Dehmurdi¹, S. Ghorbani-Dashtaki², P. Mashayekhi³

1 and 2-MSc student and Prof. of Department of Soil Science, Faculty of agriculture, Shahrood University
3. Assist. Prof., Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center. Agricultural Research, Education and Extension organization (AREEO), Isfahan, Iran.

Abstract

Various methods have been developed for measuring water infiltration in soil, which almost all are based on the vertical flow of water in soil. One of the standard methods for measuring infiltration is double-ring infiltrometers method. In order to evaluate the double-ring infiltration data, infiltration was measured in several regions with different soil textures by double-ring infiltrometers. HYDRUS-1D numerical model was used to simulate infiltration and the vertical infiltration data were obtained through forward solution of the model. Comparison of simulated and measured infiltration data showed that double ring infiltration data is much higher than the simulated vertical infiltration data. The lowest error in the measurement of vertical infiltration was observed in sandy loam soil. The values of R^2 , RMSE, ME and NRMSE were 0.87, 8.51, 4.45, and 18.0 respectively in this texture.

Keywords: Double-ring infiltrometers, Hydrus 1-D, Vertical infiltration