Archive of SID

# مقایسه کارایی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک بر اساس داده‌های به دست آمده از استوانه‌های دوگانه و نرم‌افزار HYDRUS-1D

اسماء موسوی دهموردی[1*]، شجاع قربانی دشتکی[2]، پریسا مشایخی[2]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۹)

**چکیده**

نفوذ آب به خاک یکی از مهم‌ترین فرآیندهای فیزیکی خاک است. اهمیت فرآیند نفوذ سبب شده که مدل‌های فیزیکی و تجربی گوناگونی به‌منظور کمّی‌سازی این پدیده ارائه شود. هرکدام از این مدل‌ها بسته به روش اندازه‌گیری کارایی متفاوتی را نشان می‌دهند. لذا در پژوهش حاضر داده‌های حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری به روش استوانه‌های دوگانه در کلاس‌های بافتی متفاوت و از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری شد. سپس شرایط نفوذ آب به خاک در محیط نرم‌افزار HYDRUS-1D برای مناطق موردنظر، شبیه‌سازی و داده‌های نفوذ عمودی آب به خاک به روش حل مستقیم معادله ریچاردز استخراج شد. برای کمّی‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در معادله ریچاردز از مدل ون‌گنوختن-معلم استفاده شد. به این منظور پارامترهای هیدرولیکی مدل ون‌گنوختن-معلم با استفاده از روش حل عددی معکوس در محیط HYDRUS برای خاک هر منطقه بهینه‌سازی شد و مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های نفوذ هورتون، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز و فیلیپ بر اساس هر دو گروه داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده از آماره‌های میانگین خطا (ME)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدرمطلق میانگین خطا (MAME)، ضریب همبستگی پیرسون (r) و کارایی مدل (EF) استفاده شد. نتایج نشان داد که در داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده با استوانه‌های دوگانه در بافت‌های مختلف، مدل کوستیاکوف-لوییز و در داده‌های نفوذ شبیه‌سازی‌شده با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D، مدل هورتون بهترین عملکرد را در برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک داشتند. مدل فیلیپ نیز در هر دو گروه داده نفوذ اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده دارای کم‌ترین کارایی در برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک بود.

**واژه‌های کلیدی**: مدل کوستیاکوف-لوییز، مدل هورتون، مدل کوستیاکف، مدل فیلیپ، نفوذ آب به خاک

موسوی دهموردی ا.، قربانی دشتکی ش.، مشایخی پ. مقایسه کارایی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک بر اساس داده‌های به دست آمده از استوانه های دوگانه و نرم‌افزار HYDRUS-1D . تحقیقات کاربردی خاک. جلد ۷ شماره ۲. ص: ۱۸۲-۱۹۵.

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد (مکاتبه کننده)
۲-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
*پست الکترونیک :aci.musavi@yahoo.com


www.SID.ir

Archive of SID

**مقدمه**

نفوذ آب به خاک فرآیندی است که طی آن آب از سطح زمین وارد خاک شده و نشان‌دهنده‌ی حرکت رو به پایین آب در خاک است. فرآیند نفوذ آب به خاک به‌طور مستقیم بر میزان رواناب تأثیرگذار است. از طرفی پیش‌بینی سیل‌خیزی، فرسایش خاک و انتقال آلاینده‌ها نیاز به آگاهی از میزان رواناب ایجادشده دارد (Tsanis, 2006). هم‌چنین فرآیند نفوذ وظیفه‌ی انتقال مقداری از بارش به سیستم خاک برای دسترسی ریشه گیاه را بر عهده دارد. کمّی‌سازی پدیده‌ی نفوذ آب به خاک در مدیریت حوزه‌های آبخیز از اهمیّت بسیار زیادی برخوردار است (Mukheibir, 2008).

تاکنون مدل‌های فیزیکی و تجربی گوناگونی به‌منظور کمّی‌سازی پدیده نفوذ ارائه‌شده است. مهم‌ترین مزیت مدل‌های فیزیکی این است که بر اساس قوانین فیزیکی وضع شده‌اند و با در اختیار داشتن برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک معادله نفوذ قابل حل کردن خواهد بود (Smith, 1976). از جمله مدل‌های فیزیکی می‌توان به مدل‌های گرین-آمپ (Green & Ampt, 1911) و فیلیپ (Philip, 1975) اشاره کرد. مدل‌های تجربی بر اساس ترسیم منحنی بین سرعت نفوذ و زمان، تحلیل‌شده و ویژگی‌های فیزیکی به خصوصی از خاک را در برنمی‌گیرند. هرکدام از این مدل‌ها در شرایطی معین مناسب‌ترین برازش را با داده‌های تجربی داشته‌اند. ازجمله مدل‌های تجربی می‌توان مدل هورتون (Horton, 1940)، کوستیاکوف (Kostiakov, 1932) و کوستیاکوف-لوییز (Mezencev, 1948) را نام برد. مهم‌ترین ویژگی این مدل‌ها دقت بالای آن‌ها به دلیل منعکس کردن بیش‌تر شرایط و عوامل مؤثر در فرآیند نفوذ است (Hillel, 1998). در طول سال‌ها پژوهش‌های زیادی در زمینه مقایسه مدل‌های نفوذ به‌منظور ارزیابی آن‌ها و انتخاب بهترین مدل برای خاک‌های مختلف و در شرایط متفاوت انجام شده است (Mishra *et al.*, 2003; Rashidi & Seyfi, 2007; Zolfaghari *et al.*, 2012).

باماتوز و همکاران (Bamutaze *et al.*, 2010) با بررسی کارایی برخی مدل‌های نفوذ در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده به‌وسیله‌ی استوانه‌های دوگانه به این نتیجه رسیدند که مدل‌های فیلیپ و کوستیاکوف برآورد بهتری از نفوذ تجمعی آب به خاک نسبت به مدل‌های هورتون و گرین-آمپ داشتند. ذوالفقاری و همکاران (Zolfaghari *et al.*, 2012) به‌منظور تعیین بهترین مدل نفوذ در یک خاک کشاورزی، با مقایسه مدل‌های شوارتزندربر، کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح‌شده، هورتون، SCS (سازمان حفاظت خاک آمریکا) و فیلیپ، نتیجه گرفتند که مدل SCS دارای کم‌ترین توانایی در برآورد مقدار نفوذ بود. واقفی و موحدزاده (Vaghefi & Movahedzadeh, 2012) با انجام آزمایش نفوذپذیری با استفاده از استوانه‌های دوگانه با سه تکرار در سواحل رودخانه مند از توابع شهرستان دشتی و رودخانه باهوش در تنگستان واقع در استان بوشهر، به بررسی و مقایسه هشت مدل نفوذ پرداختند. نتایج بررسی نشان داد که مدل‌های فیلیپ، کوستیاکوف و SCS (سازمان حفاظت خاک آمریکا) به‌ترتیب دارای کم‌ترین خطا در برآورد نفوذ آب به خاک در میان سایر مدل‌های مورد بررسی بودند و بهترین تطابق را با این حوزه آبخیز داشتند. در اندازه-گیری نفوذ آب به خاک و تعیین پارامترهای آن روش‌های مختلفی بیان شده است. اساس تمام این روش‌ها بر اندازه-گیری سرعت جریان عمودی آب به خاک استوار است (Reynolds, 1993). این روش‌ها به دو دسته کلی صحرایی و آزمایشگاهی تقسیم‌بندی می‌شوند. از معایب روش‌های صحرایی و آزمایشگاهی به‌هم‌خوردگی نمونه خاک در هنگام انجام آزمایش و اتلاف وقت و هزینه می-باشد. در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر، استوانه‌های دوگانه (Double-rings) به عنوان یک ابزار استاندارد برای تعیین نفوذ آب به خاک و اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع، استفاده شده است (Lai *et al.*, 2010; Mashayekhi *et al.*, 2016). این روش به دلیل سهولت کاربرد و کم‌هزینه بودن، استفاده‌ای گسترده دارد. در روش استوانه‌های دوگانه فرض بر آن است که استوانه‌ی بیرونی مانع از ایجاد جریان جانبی آب در خاک و در نتیجه باعث ایجاد جریان کاملاً عمودی آب در خاک می‌شود. درحالی‌که کوک (Cook, 2002) عنوان کرد برای دستیابی به چنین هدفی استفاده از استوانه‌های بسیار بزرگ اجتناب‌ناپذیر است. ایجاد جریان یک‌بعدی در خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه در شرایط خاصی امکان-پذیر خواهد بود و احتمال ایجاد خطا در اندازه‌گیری نفوذ عمودی آب به خاک در این روش به دلیل وجود جریان-های جانبی آب در خاک بالا است (Pollalis &


www.SID.ir

Archive of SID

Valiantzas, 2015). 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 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 & Ren., 2007; Lai *et al*., 2010; Pollalis & Valiantzas, 2015).

تولید داده‌های نفوذ عمودی واقعی آب در خاک از طریق حل عددی معادله ریچاردز امکان‌پذیر است. مدل ریچاردز (Richards, 1931) به‌عنوان 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 به‌عنوان ابزاری نوین، روز به روز در حال توسعه است (Jalini *et al*., 2007). مدل‌های عددی در بسیاری از پژوهش‌ها برای پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل حرکت آب و فرآیندهای حمل و نقل آلاینده‌ها در زیر سطح زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد (Simunek *et al*., 2012). در سال‌های اخیر مدل‌های کامپیوتری مبتنی بر شبیه‌سازی عددی به‌طور فزآینده‌ای در زمینه‌های مختلف، از سوی پژوهشگران مورد استفاده قرار گرفته است. در بیش‌تر این مدل‌ها، از روش‌های عددی برای حل معادله ریچاردز استفاده شده است.

یکی از نرم‌افزارهای پیشرفته در ارتباط با حرکت آب، املاح و گرما، نرم‌افزار HYDRUS بوده که توسط سیمیونک و همکاران (Simunek *et al*., 1999) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است. نرم‌افزار HYDRUS یک برنامه پیشرفته تحت ویندوز برای تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی حرکت آب، املاح و گرما در خاک است (Šimůnek *et al*., 2012). تولید داده‌های نفوذ آب به خاک بدون خطا (error free) از طریق پیاده‌سازی شرایط نفوذ آب به خاک از طریق استوانه‌های مضاعف در محیط HYDRUS با اعمال شرایط اولیه و مرزی مشخص، امکان‌پذیر است (Mashayekhi *et al*., 2016).

روش اندازه‌گیری نفوذ و دقت ابزار اندازه‌گیری یکی از عوامل تأثیرگذار بر نتایج مدل‌های نفوذ آب به خاک و تعیین مدل مناسب در مناطق مختلف می‌باشد. هم‌چنین در بیش‌تر موارد هدف اصلی از اندازه‌گیری نفوذ، دانستن نفوذ عمودی آب به خاک می‌باشد. درحالی‌که پژوهش‌ها نشان می‌دهد در روش استوانه دوگانه جریان آب در زیر استوانه فقط به شکل عمودی نبوده بلکه جریان‌های جانبی نیز به وجود می‌آیند. بنابراین، سرعت نفوذ عمودی بیش‌تر از مقدار واقعی آن به دست می‌آید (Bouwer, 1986; Reynolds *et al*., 2002). هدف از انجام این پژوهش ارزیابی مدل‌های هورتون، فیلیپ، کوستیاکوف و کوستیاکوف-لوییز در برآورد نفوذ آب به خاک با استفاده از دو گروه داده اندازه‌گیری شده توسط آزمایش استوانه‌های دوگانه و داده‌های نفوذ عمودی شبیه‌سازی‌شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D است.

## مواد و روش‌ها

### عملیات صحرایی و آزمایشگاهی

در این پژوهش، از داده‌های مورد استفاده در پژوهش‌های پیشین استفاده شده است (Mashayekhi, 2016(a,b)). برای این منظور، داده‌های نفوذ با استفاده از آزمایش استوانه‌های دوگانه با سه تکرار در ۱۱۴ نقطه از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری شد. این داده‌ها حاصل پژوهش‌های خاکشناسی صورت گرفته در استان‌های مختلف کشور بوده است. شکل (۱) پراکنش مناطق مطالعاتی در سطح کشور را نشان می‌دهد. مناطق مورد مطالعه دارای تنوع آب و هوایی گرم و خشک تا سرد و مرطوب و در نتیجه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی متفاوت بودند. خاک‌های مناطق مورد مطالعه در رده‌های خاکی مالی‌سول، اینسپتی‌سول، انتی‌سول و اریدی‌سول قرار دارند. در همه این مناطق، با حفر خاک‌رخ در نزدیکی نقاط انجام آزمایش‌های نفوذپذیری، لایه‌های پدوژنیک خاک مشخص و از دو افق بالایی (پدوژنیکی) نمونه برداری شده و ویژگی‌های موردنظر اندازه‌گیری شد. رطوبت اولیه خاک به روش وزنی، جرم ویژه ظاهری خاک به روش سیلندر (Blake & hartge, 1986)، فراوانی نسبی ذرات به روش هیدرومتر (Klute, 1986)، میزان ماده آلی به روش والکلی و بلک (Walkley & Blake, 1934)، درصد سنگ‌ریزه به روش حجمی (Burt, 2004) و مقدار آهک خاک به روش کلسیمتری (Nelson, 1982) اندازه‌گیری شد. دامنه تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.


www.SID.ir

Archive of SID

**شکل ۱- پراکنش مناطق مطالعاتی در سطح کشور**

Figure 1. Distribution of studied areas in the country (White signs on the map)

**جدول ۱- دامنه‌ی تغییرات برخی ویژگی‌های فیزیکی در خاک‌های مورد مطالعه**

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

| Soil properties | unite | Min | Max | Mean | CV |
|---|---|---|---|---|---|
| Sand | % | 2.0 | 81.0 | 28.37 | 15.19 |
| Silt | % | 7.0 | 81.7 | 42.2 | 11.14 |
| Clay | % | 3.1 | 60.2 | 29.41 | 11.04 |
| $d_g^*$ | (mm) | 0.005 | 0.391 | 0.042 | 0.049 |
| $\sigma_g^*$ | - | 4.41 | 22.76 | 12.36 | 3.059 |
| Bulk Density | (g $cm^{-3}$) | 0.94 | 1.76 | 1.43 | 0.136 |
| Porosity | % | 28.4 | 54.2 | 43.4 | 5.08 |
| Organic carbon | % | 0.07 | 3.05 | 0.74 | 0.51 |
| $CaCo_3$ | % | 0.0 | 65.2 | 28.2 | 18.1 |
| RFC* | ($cm^3$ $cm^{-3}$) | 0.060 | 0.440 | 0.256 | 0.062 |
| PWP* | ($cm^3$ $cm^{-3}$) | 0.03 | 0.246 | 0.131 | 0.038 |

*RFC: field capacity water content, PWP: permanent wilting water content, $d_g$: Geometric mean diameter, $\sigma_g$: Geometric standard deviation

با توجه به جدول ۱، خاک‌های مورد پژوهش از نظر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در محدوده وسیعی از تغییرات قرار داشتند. هم‌چنین بافت خاک مناطق مورد مطالعه بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA)، در هفت گروه بافتی شامل لوم‌شنی، لوم، لوم سیلتی، لوم رسی سیلتی، لوم رسی، رس سیلتی و رس، قرار گرفت. از آنجاکه آزمایش نفوذپذیری در سه تکرار انجام شد، لذا به‌منظور تعیین بهترین تکرار از روش تحلیل اعتباریابی به روش درونی استفاده شد. یکی از روش‌های بررسی پایایی درونی یک آزمایش، استفاده از آماره‌ی آلفای کرونباخ است. این آماره به صورت زیر تعریف می‌شود (Bland & Altman, 1997).

$$\alpha = \frac{k}{k-1}\left[1 - \frac{\sum_{i-1}^{k} s_i^2}{s_t^2}\right] \qquad (۱)$$

که در آن k تعداد تکرارها، $s_i^2$ واریانس تکرار iام و $s_t^2$ واریانس مجموع تکرارها است. درصورتی‌که تکرارها کاملاً از هم مستقل باشند، مجموع واریانس‌های تکرارها با واریانس مجموع تکرارها برابر بوده و مقدار آلفا برابر با صفر می‌شود. هم‌چنین، اگر تکرارها کاملاً مشابه با یکدیگر باشند، در این صورت، مقدار آلفا برابر با یک خواهد بود (Bland & Altman, 1997). به‌عنوان یک قاعده کلی، اگر مقدار این آماره بیش‌تر از ۰/۸ باشد، در این صورت، همه تکرارها قابل اعتماد محسوب می‌شود. اگر مقدار آلفا کم‌تر از ۰/۸ باشد، در این صورت، حداقل یکی از تکرارها معتبر نیست (Ho, 2006). در این پژوهش نیز به منظور تعیین


www.SID.ir

Archive of SID

بهترین تکرار آزمایش نفوذپذیری، مقدار آماره آلفای کرونباخ در صورت حذف هریک 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 هیچ یک از تکرارها مقدار این آماره از این مقدار بیش‌تر نشد، از نتایج آن آزمایش چشم‌پوشی شد و وارد دیگر مراحل تجزیه و تحلیل نشد.

**شبیه‌سازی نفوذ آب به خاک در محیط نرم‌افزار HYDRUS-1D**

برای تولید داده‌های نفوذ عمودی آب به خاک در نرم‌افزار HYDRUS-1D برای هر منطقه، شرایط نفوذ آب به خاک در آزمایش استوانه‌های دوگانه در محیط نرم‌افزار پیاده‌سازی شد. در شبیه‌سازی نفوذ به کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D، ستون خاک مطبق (دو لایه) به عمق ۱۵۰ سانتی‌متر، شرط مرز ورودی بار آبی ثابت (Constant Head) و مرز پایینی به صورت زهکش آزاد (Free Drainage) برای تمام نقاط در نظر گرفته شد (Mashayekhi *et al.*, 2017). برای کمّی‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک در معادله ریچاردز، از مدل ون-گنوختن-معلم (روابط ۲ و ۳) با فرض m=1-1/n استفاده شد. زمان نهایی نفوذ برای هر خاک هر منطقه برابر با زمان نهایی نفوذ در مزرعه در نظر گرفته شد.

$$\theta(h)=\theta_r+\frac{\theta_s+\theta_r}{\left[1+(\alpha h)^n\right]^m}\quad ,n>1, m=1-\frac{1}{n} \qquad (۲)$$

$$K(S_e)=K_s S_e^l\left[1+\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \qquad (۳)$$

در روابط فوق $\theta(h)$ ($L^3\ L^{-3}$) رطوبت در مکش ماتریک $h$، $\theta_r$ ($L^3\ L^{-3}$) رطوبت باقی مانده و $\theta_s$ ($L^3\ L^{-3}$) رطوبت اشباع می‌باشند. $\alpha$ و n پارامترهای شکل، $K_s$ ($LT^{-1}$) هدایت هیدرولیکی اشباع، $K(S_e)$ ($L\ T^{-1}$)، $S_e$ (-) و $l$ به‌ترتیب هدایت هیدرولیکی غیراشباع، درجه اشباع مؤثر و پارامتر اعوجاج منافذ خاک است. مقادیر بهینه این پارامترها با توجه به ویژگی‌های فیزیکی خاک هر منطقه از جمله بافت، جرم ویژه ظاهری، میزان رطوبت موجود در خاک در نقطه ظرفیت زراعی خاک و غیره با استفاده از روش حل عددی معکوس در محیط HYDRUS برآورد شد. در ادامه مدل با شرایط مرزی و ابتدایی تعریف شده و با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده معادله ون‌گنوختن-معلم برای خاک‌های مورد مطالعه در هر منطقه (Mashayekhi *et al.*, 2016 a and b)، به‌صورت مستقیم اجرا و داده‌های نفوذ عمودی استخراج شدند.

**ارزیابی مدل‌های نفوذ آب به خاک با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری‌شده و برآورد شده**

مدل‌های نفوذ مورد استفاده در این پژوهش شامل مدل کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز، فیلیپ و هورتون بود. معادله‌های مربوط به این مدل‌ها به همراه ضرایب آن‌ها در جدول ۲ آمده است. ضرایب مدل‌های نفوذ آب به خاک در هر یک از این مدل‌ها از طریق برازش داده‌های نفوذ اندازه‌گیری شده و برآورد شده، از طریق کاهش شاخص آماری مجموع مربعات خطا (SSE) با استفاده از ابزار Solver نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۳ انجام شد. برای این منظور تابع هدف به‌صورت زیر تعریف شد (Ghorbani Dashtaki et al., 2009):

$$SSE=\sum_{j=1}^{n}\left(I(m)_j-I(p)_j\right)^2 \qquad (۴)$$

که در آن SSE: مجموع مربعات خطا ($cm^2$)، $I(m)_j$: مقدار نفوذ اندازه‌گیری شده در زمان j ام (cm)، $I(p)_j$: مقدار نفوذ تولید شده با استفاده از معادله برای زمان j ام (cm) و $n$: تعداد مقایسه‌ها می‌باشد. هم‌چنین به‌منظور ارزیابی مدل‌های نفوذ بر اساس هر دو گروه داده اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمایش استوانه‌های دوگانه و شبیه‌سازی شده با کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D از آماره‌های میانگین خطا (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی پیرسون (r)، قدر مطلق میانگین خطاها (MAME) و ضریب کارایی مدل (EF) استفاده شد. آماره‌های بالا به صورت زیر محاسبه شدند (Parchami Araghi et al., 2010):

$$ME=\frac{\sum_{j=1}^{n}I(p)_j-I(m)_j}{n} \qquad (۵)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n}\left(I(p)_j-I(m)_j\right)^2}{n}} \qquad (۶)$$

$$r=\frac{\sum_{j=1}^{n}\left(I(p)_j-\bar{I}(p)_j\right)\left(I(m)_j-\bar{I}(m)_j\right)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(I(p)_j-\bar{I}(p)_j\right)^2\times\sum_{j=1}^{n}\left(I(m)_j-\bar{I}(m)_j\right)^2}} \qquad (۷)$$


www.SID.ir

Archive of SID

$$MAME = \frac{\sum_{j=1}^{n} \left| I(p)_j - I(m)_j \right|}{n} \quad (۸)$$

$$EF = \frac{\sum_{j=1}^{n} (I(p)_j - I(m)_j)^2}{\sum_{j=1}^{n} (I(m)_j - \bar{I}(m)_j)^2} \quad (۹)$$

در این فرمول‌ها $I(p)_j$ نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده، $I(m)_j$ نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده، $\bar{I}(m)_j$ میانگین نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده، $\bar{I}(p)_j$ میانگین نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده و $n$ تعداد مشاهده‌ها می‌باشد.

**جدول ۲- مدل‌های نفوذ بکار رفته در این پژوهش***

Table 2. Infiltration models used in this research*

| Model | Coefficients | Equation |
|---|---|---|
| Horton | c, m and a: Fixed coefficients of the equation | $I = ct + m[1 - \exp(-at)]$ |
| Kostiakov | K and b: the experimental coefficients of the equation | $I = Kt^b$ |
| Kostiakov-Lewis | K', b' and A: The experimental coefficients of the equation | $I = K't^{b'} + At$ |
| Philip | S and $K_s$: Sorptivity and Saturated Hydraulic conductivity | $I = st^{1/2} + k_s t$ |

* I: نفوذ تجمعی (سانتی‌متر)، t: زمان (دقیقه)* (I: cumulative infiltration (cm), t: time (min))

## نتایج و بحث

محدوده‌ی تغییرات نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده به‌وسیله استوانه‌های دوگانه و برآورد شده به کمک نرم-افزار HYDRUS-1D در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ 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. پولالیس و والیانتزاس (Pollalis and Valiantzas, 2015) نیز بیان کردند که مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در آزمایش استوانه‌های دوگانه به دلیل وجود جریان‌های جانبی آب در خاک دارای خطا می‌باشد.

**جدول۳- دامنه تغییرات نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در خاک‌های مورد مطالعه**

Table 3. The range of measured and simulated cumulative infiltration data in studied soils

| Soil texture | Cumulative infiltration(cm) | max | min | Mean | CV |
|---|---|---|---|---|---|
| Clay | Measured | 0.4 | 15.9 | 6.17 | 0.70 |
| | Simulated | 0.31 | 8.13 | 3.92 | 0.66 |
| Silty clay | Measured | 0.2 | 158.9 | 11.71 | 1.24 |
| | Simulated | 0.08 | 99.41 | 6.15 | 0.96 |
| Silty clay loam | Measured | 0.1 | 182.56 | 14.99 | 1.83 |
| | Simulated | 0.05 | 38.83 | 7.30 | 1.05 |
| Clay loam | Measured | 0.1 | 158.9 | 17.72 | 1.33 |
| | Simulated | 0.05 | 99.41 | 8.52 | 1.30 |
| Silty loam | Measured | 0.1 | 51.13 | 6.49 | 1.30 |
| | Simulated | 0.104 | 36.27 | 4.80 | 1.24 |
| Loam | Measured | 0.1 | 114.9 | 12.27 | 1.19 |
| | Simulated | 0.08 | 60.42 | 6.99 | 1.09 |
| Sandy loam | Measured | 0.2 | 56.4 | 16.05 | 0.99 |
| | Simulated | 0.02 | 47.21 | 11.59 | 0.89 |

**مقایسه عملکرد مدل‌های نفوذ در کلاس‌های بافتی مختلف**: محدوده‌ی تغییرات ضرایب مدل‌های مورد بررسی و مقادیر آماره‌ی SSE بر اساس داده‌های اندازه-گیری‌شده با استفاده از استوانه‌های دوگانه و داده‌ای شبیه‌سازی شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D در جداول ۴ و ۵ آمده است. مقایسه مقادیر آماره مجموع مربعات خطا (SSE) در جدول ۴ نشان می‌دهد که معادله کوستیاکوف-لوییز بهترین برازش را بر داده‌های نفوذ استوانه دوگانه داشته است. در خصوص نتایج به دست


www.SID.ir

Archive of SID

آمده برای ضرایب مدل‌های مورد بررسی بر اساس داده-های HYDRUS-1D ، از بین مدل‌های هورتون، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز و فیلیپ، معادله کوستیاکوف بهترین برازش را بر داده‌های شبیه‌سازی شده داشت (جدول ۵).

**جدول۴-محدوده‌ی مقادیر ضرایب مدل‌های نفوذ بر اساس داده‌های استوانه دوگانه**

Table 4. The range of parameter values of infiltration models based on double-rings data

| Model name | Model Parameters | Min | Max | Mean | CV |
|---|---|---|---|---|---|
| Horton | C | 0 | 0.372 | 0.090 | 0.838 |
| | m | 0.169 | 291.991 | 8.586 | 3.195 |
| | a | 0.000 | 2.335 | 0.120 | 1.771 |
| | SSE | 0.009 | 7807.892 | 139.744 | 6.695 |
| Kostiakov | k | 0.030 | 7.255 | 0.791 | 1.227 |
| | b | 0.236 | 1.039 | 0.642 | 0.255 |
| | SSE | 0.006 | 7778.363 | 71.992 | 8.849 |
| Kostiakov-Lewis | K | 0.0095 | 7.255 | 1.02 | 1.01 |
| | b | 0.013 | 1.20 | 0.478 | 0.35 |
| | a | 0 | 0.25 | 0.041 | 1.31 |
| | SSE | 0.005 | 7778.361 | 64.25 | 9.86 |
| Philip | $S(cm\ min^{-1/2})$ | 0 | 8.340 | 0.876 | 1.050 |
| | $k(cm\ min^{-1})$ | 0 | 0.348 | 0.057 | 1.088 |
| | SSE | 0.007 | 7734.833 | 68.253 | 9.231 |

**جدول۵-محدوده‌ی مقادیر ضرایب مدل‌های نفوذ بر اساس داده‌های HYDRUS-1D**

Table 5. The range of parameter values of infiltration models based on HYDRUS-1D data

| Model name | Model Parameters | Min | Max | Mean | CV |
|---|---|---|---|---|---|
| Horton | C | 0.0005 | 0.26 | 0.047 | 0.94 |
| | m | 0.31 | 12.70 | 3.99 | 0.71 |
| | a | 0.000 | 1.48 | 0.096 | 1.60 |
| | SSE | 0.003 | 10875.14 | 92.68 | 10.7 |
| Kostiakov | k | 0.05 | 3.431 | 0.63 | 0.95 |
| | b | 0.11 | 0.94 | 0.59 | 0.24 |
| | SSE | 0.001 | 10633.68 | 91.80 | 3.34 |
| Kostiakov-Lewis | K | 0.06 | 3.432 | 0.68 | 0.98 |
| | b | 0.11 | 0.94 | 0.56 | 0.28 |
| | a | 0 | 0.25 | 0.006 | 3.94 |
| | SSE | 0.0004 | 10641.38 | 153.166 | 7.67 |
| Philip | S | 0 | 1.82 | 0.58 | 0.65 |
| | k | 0 | 0.22 | 0.02 | 1.46 |
| | SSE | 0.0004 | 10746.99 | 96.38 | 10.17 |

مقادیر آماره‌های ارزیابی و رتبه عملکرد هریک از مدل های نفوذ مورد بررسی بر اساس هر دو گروه داده نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده به‌وسیله استوانه‌های دوگانه و برآورد شده با کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D، به تفکیک بافت خاک در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. در این جداول مدلی که کم‌ترین مقادیر خطا و بیش‌ترین میزان کارایی و ضریب همبستگی را داشته باشد رتبه یک گرفته و با افزایش میزان خطا و کاهش کارایی و ضریب همبستگی رتبه افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۶، مقایسه مقادیر آماره‌ی ME بیانگر آن است که مدل هورتون در تمام بافت‌ها به‌جز بافت لوم سیلتی، مقدار نفوذ را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط استوانه‌های دوگانه کم-برآورد نموده است. مدل کوستیاکوف نیز در بافت‌های رسی، رسی-سیلتی و لوم-رسی-سیلتی مقدار نفوذ را نسبت به مقادیر نفوذ اندازه‌گیری‌شده، بیش‌تر و در بافت-های لوم-رسی، لوم-سیلتی، لومی و لوم شنی مقدار نفوذ را کم‌تر برآورد نموده است. مدل کوستیاکوف-لوییز نیز در بافت‌های رسی، رسی-سیلتی، لوم-رسی-سیلتی و لوم-رسی بیش برآورد و در بافت‌های لوم-سیلتی، لومی و لوم-شنی کم‌برآورد بوده -است. هم‌چنین نتایج نشان داد


www.SID.ir

Archive of SID

که مدل فیلیپ میزان نفوذ تجمعی آب به خاک را در تمامی بافت‌ها کم‌تر از نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده برآورد کرده است. مقادیر RMSE بیانگر آن است که مدل کوستیاکوف-لوییز در تمام بافت‌ها به جز بافت‌های رسی و لوم-رسی، مقادیر نفوذ تجمعی را در مقایسه با سایر مدل‌ها با خطای کم‌تری برآورد نموده است. مقدار این آماره برای مدل هورتون در بافت لوم-سیلتی و برای مدل¬های کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز و فیلیپ در بافت لومی به حداکثر مقدار خود رسیده است. هم‌چنین، بررسی ضریب همبستگی پیرسون نشان می‌دهد که مدل کوستیاکوف-لوییز در تمام بافت‌ها برازش بهتری بر داده های اندازه‌گیری شده با استفاده از آزمایش استوانه¬های دوگانه داشته است.

**جدول ۶- ارزیابی آماری مدل‌های نفوذ بر اساس داده‌های استوانه‌های دوگانه در بافت‌های مختلف خاک**

Table 6. Statistical evaluation of infiltration models based on double-rings data in different soil textures

| Soil texture | Statistics | Horton | Kostiakov | Kostiakov-Lewis | Philip |
|---|---|---|---|---|---|
| Clay | ME | -0.045 | 0.001 | 0.001 | -0.265 |
| | RMSE | 0.168(1) | 0.2251(2) | 0.2253(3) | 0.889(4) |
| | MPearson | 0.9994(1) | 0.9986(2) | 0.9986(2) | 0.9855(3) |
| | MAME | 0.1435(1) | 0.16761(2) | 0.16762(3) | 0.6053(4) |
| | EF | 0.9984(2) | 0.9973(3) | 0.9973(3) | 0.9999(1) |
| | The final rating | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Silty clay | ME | -0.086 | 0.012 | 0.055 | -1.109 |
| | RMSE | 0.543(2) | 0.611(3) | 0.535(1) | 1.099(4) |
| | MPearson | 09994(1) | 0.9992(3) | 0.9994(1) | 0.9977(4) |
| | MAME | 0.3783(2) | 0.40340(3) | 0.3009(1) | 0.6164(4) |
| | EF | 0.9988(1) | 0.9985(2) | 0.9988(1) | 0.9953(3) |
| | The final rating | 2 | 3 | 1 | 4 |
| Silty clay loam | ME | -0.079 | 0.005 | 0.043 | -0.015 |
| | RMSE | 0.559(2) | 0.739(3) | 0.077(1) | 0.992(4) |
| | MPearson | 0.9988(4) | 0.9994(2) | 0.9995(1) | 0.9991(3) |
| | MAME | 0.2816(2) | 0.3141(3) | 0.2490(1) | 0.4378(4) |
| | EF | 0.9994(1) | 0.9989(3) | 0.9990(2) | 0.9983(4) |
| | The final rating | 2 | 3 | 1 | 4 |
| Clay loam | ME | -0.085 | -0.075 | 0.022 | -0.018 |
| | RMSE | 0.482(1) | 0.709(3) | 0.548(2) | 0.734(4) |
| | MPearson | 0.9997(1) | 0.9995(3) | 0.9997(1) | 0.9994(4) |
| | MAME | 0.3205(2) | 0.4327(4) | 0.2382(1) | 0.3669(3) |
| | EF | 0.9995(1) | 0.9990(3) | 0.9994(2) | 0.9989(4) |
| | The final rating | 1 | 3 | 2 | 4 |
| Silty loam | ME | 0.747 | -0.036 | -.0.004 | -0.029 |
| | RMSE | 24.243(4) | 0.245(2) | 0.156(1) | 0.277(3) |
| | MPearson | 0.9208(3) | 0.9997(2) | 0.9999(1) | 0.9997(2) |
| | MAME | 3.3308(4) | 0.1733(2) | 0.1079(1) | 0.1793(3) |
| | EF | 0.8239(4) | 0.9995(2) | 0.9998(1) | 0.9994(3) |
| | The final rating | 4 | 2 | 1 | 3 |
| Loam | ME | -0.197 | -0.459 | -0.385 | -0.450 |
| | RMSE | 4.227(4) | 3.428(2) | 3.411(1) | 3.449(3) |
| | MPearson | 0.9669(4) | 0.98750(2) | 0.97855(1) | 0.9782(3) |
| | MAME | 0.924(4) | 0.7227(3) | 0.5969(1) | 0.7185(2) |
| | EF | 0.9337(4) | 0.9563(3) | 0.9568(2) | 0.9743(1) |
| | The final rating | 4 | 2 | 1 | 3 |
| Sandy loam | ME | -0.074 | -0.130 | -0.009 | -0.036 |
| | RMSE | 0.464(3) | 0.606(4) | 0.306(1) | 0.379(2) |
| | MPearson | 0.9997(3) | 0.9995(4) | 0.99988(1) | 0.99981(2) |
| | MAME | 0.3279(3) | 0.4456(4) | 0.1997(1) | 0.2614(2) |
| | EF | 0.9994(3) | 0.9990(4) | 0.9997(2) | 0.9998(1) |
| | The final rating | 3 | 4 | 1 | 2 |
| total final rating | | 17(2) | 19(3) | 10(1) | 21(4) |


www.SID.ir

Archive of SID

مقادیر ضریب کارایی به‌دست آمده برای تمام مدل‌ها در بافت‌های مختلف دارای مقادیر بالا می‌باشد (نزدیک به یک) که نشان‌دهنده کارایی مناسب تمام مدل‌ها در بافت های مختلف است. بر اساس رتبه نهایی به‌دست آمده برای هر مدل مشاهده شد که مدل کوستیاکوف-لوییز در تمام بافت‌ها به جز بافت رسی و لوم-رسی دارای بهترین عملکرد در مقایسه با سایر مدل¬ها بوده است. مجموع رتبه‌های نهایی نیز حاکی از آن است که در کل مدل کوستیاکوف-لوییز دارای بالاترین دقت در برآورد نفوذ آب به خاک در بافت‌های مختلف می‌باشد و پس از آن مدل های هورتون، کوستیاکوف و فیلیپ به‌ترتیب در رتبه‌های دوم تا چهارم قرار گرفته‌اند. نتایج به‌دست آمده با یافته های پرچمی عراقی و همکاران (Parchami Araghi *et al.*, 2010)، ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*,2012) و هاورکمپ و همکاران (Haverkamp *et al.*, 1987) مطابقت دارد. در حالی‌که نتایج پژوهش‌های کاووسی و همکاران (kavoosi *et al.*,2013) و فاخر نیکچه و همکاران (Fakher Nikche *et al.*, 2014) نشان دادند که مدل کوستیاکوف در بافت‌های مختلف بهترین کارایی را دارد، که با نتایج به‌دست آمده هم‌خوانی ندارد. این موضوع نشان‌دهنده کارایی متفاوت مدل-های نفوذ در هر نوع بافت خاک و منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

مقایسه‌ی مقادیر آماره‌ی ME در جدول ۷ نشان داد که مدل هورتون در تمام بافت‌ها به‌جزء بافت لوم-سیلتی، مقادیر نفوذ عمودی را کم‌برآورد نموده است. مدل کوستیاکوف نیز در بافت‌های رسی، لوم-رسی و لوم-سیلتی بیش‌برآوردگر و در بافت‌های رسی-سیلتی، لوم-رسی-سیلتی، لومی و لوم-شنی کم‌برآوردگر بوده است. مدل کوستیاکوف-لوییز نیز در اکثر بافت‌ها مقدار نفوذ را بیش‌تر از مقادیر نفوذ تجمعی شبیه‌سازی‌شده، برآورد نموده است. هم‌چنین مدل فیلیپ در تمام بافت‌ها به‌جزء بافت لوم-سیلتی مقادیر نفوذ را نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده به کمک نرم افزار HYDRUS-1D کم‌تر رآورد نموده است. مقادیر آماره RMSE بیانگر آن است در مقایسه با سایر مدل‌ها، مدل هورتون در اکثر بافت‌ها نفوذ عمودی را با خطای کم‌تری برآورد نموده است. در حالی‌که مدل فیلیپ در بافت‌های مختلف مقادیر نفوذ عمودی را با خطای بالایی برآورد کرده است. هم‌چنین با مقایسه ضریب همبستگی پیرسون نیز نتیجه گیری می‌شود که مدل هورتون در بیش‌تر بافت¬ها برازش خوبی با داده‌های نفوذ عمودی واقعی داشته است. مقایسه ضریب کارایی مدل‌ها نیز نشان داد مدل‌های مورد بررسی در تمام بافت‌ها به‌جزء بافت لوم-سیلتی از کارایی خوبی برخوردار هستند. مجموع رتبه‌های نهایی نشان داد که مدل هورتون دارای بهترین عملکرد در برآورد نفوذ عمودی در بافت‌های مختلف بوده و مدل‌های کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز و فیلیپ نیز به‌ترتیب در رده‌های دوم تا چهارم ارزیابی مدل‌ها قرار گرفته‌اند. نتایج محمدی کنگرانی و همکاران (Mohamadi Kangarani *et al.*, 2011) نیز حاکی از برتری مدل هورتون در برآورد نفوذ آب به خاک می‌باشد.

**جدول ۷- ارزیابی آماری مدل‌های نفوذ بر اساس داده‌های HYDRUS-1D در بافت‌های مختلف خاک**

Table 6. Statistical evaluation of infiltration models based on HYDRUS-1D data in different soil textures

| Soil Texture | Evaluation statistic | Model | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Horton | Kostiakov | Kostiakov-Lewis | Philip |
| Clay | ME | -0.048 | 0.0382 | 0.0383 | -0.114 |
| | RMSE | 0.156(1) | 0.4346(2) | 0.4347(3) | 0.621(4) |
| | MPearson | 0.9987(1) | 0.9862(2) | 0.9862(2) | 0.9739(3) |
| | MAME | 0.1177(1) | 0.2933(2) | 0.2934(3) | 0.3830(4) |
| | EF | 0.9963(1) | 0.9719(3) | 0.9916(2) | 0.9427(4) |
| | The final rating | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Silty clay | ME | -0.053 | -0.002 | -0.002 | -0.005 |
| | RMSE | 0.209(1) | 0.2533(3) | 0.2536(4) | 0.241(2) |
| | MPearson | 0.9994(1) | 0.9990(3) | 0.9990(3) | 0.9991(2) |
| | MAME | 0.1624(2) | 0.1807(3) | 0.1808(4) | 0.1460(1) |
| | EF | 0.9987(1) | 0.9981(3) | 0.9981(3) | 0.9983(2) |
| | The final rating | 1 | 3 | 4 | 2 |


www.SID.ir

Archive of SID

**ادامه جدول ۷- ارزیابی آماری مدل‌های نفوذ بر اساس داده‌های HYDRUS-1D در بافت‌های مختلف خاک**

Continue table 6. Statistical evaluation of infiltration models based on HYDRUS-1D data in different soil textures

| Soil Texture | Evaluation statistic | Model | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Horton | Kostiakov | Kostiakov-Lewis | Philip |
| Silty clay loam | ME | -0.079 | -0.018 | 0.726 | -0.008 |
| | RMSE | 0.329(3) | 0.287(2) | 4.560(4) | 0.261(1) |
| | MPearson | 0.9991(3) | 0.9993(2) | 0.8939(4) | 0.9994(1) |
| | MAME | 0.2212(3) | 0.1795(2) | 0.8912(4) | 0.1446(1) |
| | EF | 0.9981(3) | 0.9986(2) | 0.6498(4) | 0.9988(1) |
| | The final rating | 3 | 2 | 4 | 1 |
| Clay loam | ME | -0.042 | 0.036 | 0.009 | -0.114 |
| | RMSE | 0.184(1) | 0.486(3) | 0.394(2) | 0.672(4) |
| | MPearson | 0.9998(1) | 0.9990(3) | 0.9993(2) | 0.9982(4) |
| | MAME | 0.1319(1) | 0.3027(3) | 0.2566(2) | 0.3482(4) |
| | EF | 0.9997(1) | 0.9980(3) | 0.9987(2) | 0.9963(4) |
| | The final rating | 1 | 3 | 2 | 4 |
| Silty loam | ME | 1.114 | 1.129 | 1.141 | 1.100 |
| | RMSE | 6.133(4) | 6.068(1) | 6.069(2) | 6.107(3) |
| | MPearson | 0.7366(4) | 0.7395(1) | 0.7391(2) | 0.7380(3) |
| | MAME | 1.283(1) | 1.314(3) | 1.288(2) | 1.359(4) |
| | EF | -0.066(4) | -0.043(1) | -0.044(2) | -0.057(3) |
| | The final rating | 4 | 1 | 2 | 3 |
| Loam | ME | -0.047 | -0.019 | -0.007 | -0.076 |
| | RMSE | 0.232(1) | 0.355(3) | 0.334(2) | 0.599(4) |
| | MPearson | 0.9995(1) | 0.9989(3) | 0.9990(2) | 0.9970(4) |
| | MAME | 0.1627(1) | 0.2279(3) | 0.1972(2) | 0.2750(4) |
| | EF | 0.9990(1) | 0.9978(3) | 0.9980(2) | 0.9938(4) |
| | The final rating | 1 | 3 | 2 | 4 |
| Sandy loam | ME | -0.067 | -0.031 | -0.007 | -0.38 |
| | RMSE | 0.389(2) | 0.408(3) | 0.266(1) | 1.501(۴) |
| | MPerson | 0.9993(2) | 0.9992(3) | 09996(1) | 0.9909(۴) |
| | MAME | 0.3116(3) | 0.2898(2) | 0.1986(1) | 0.7634(۴) |
| | EF | 0.9986(2) | 0.9984(3) | 0.9993(1) | 0.9792(۴) |
| | The final rating | 2 | 3 | 1 | 4 |
| Total final rating | | 13(1) | 15(2) | 18(3) | 22(4) |

## نتیجه گیری کلی

در این پژوهش از نرم‌افزار HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی نفوذ عمودی آب به خاک استفاده شد. نتایج به دست آمده از ارزیابی عملکرد مدل‌های هورتون، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز و فیلیپ در برآورد نفوذ آب به خاک در مقایسه با دو گروه داده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در بافت‌های مختلف نشان داد که هرکدام از مدل‌های موردبررسی در شرایط مختلف، عملکردهای متفاوتی داشتند. بر اساس ارزیابی عملکرد مدل‌های موردبررسی در مقایسه با داده‌های اندازه‌گیری شده به کمک استوانه‌های دوگانه در بافت‌های مختلف، مدل کوستیاکوف-لوییز بهترین عملکرد و مدل فیلیپ کم‌ترین دقت را در برآورد نفوذ آب به خاک داشته‌اند. بنابراین می‌توان گفت در مناطق مورد پژوهش، مدل کوستیاکوف-لوییز بهترین مدل برای بیان کمی فرآیند نفوذ آب به خاک بوده است. ازآنجاکه روش تعیین پارامترهای مدل‌های یاد شده روشی برازشی بود، یکی از دلایل برتری مدل کوستیاکوف-لوییز، بیش‌تر بودن تعداد پارامترهای آن نسبت به مدل‌های کوستیاکوف و فیلیپ است. درواقع این ویژگی باعث انعطاف‌پذیری بیش‌تر این


www.SID.ir

Archive of SID

مدل به هنگام تعیین پارامترها می‌شود. ارزیابی مدل‌های مورد بررسی در مقایسه با داده‌های شبیه‌سازی شده به کمک نرم‌افزار HYDRUS-1D در بافت‌های مختلف نشان داد که مدل هورتون بهترین عملکرد را در برآورد نفوذ عمودی آب به خاک داشته است و پس از آن مدل‌های کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز و فیلیپ در رتبه‌های دوم تا چهارم ارزیابی قرار گرفتند.

**References**


Bamutaze Y. Makooma T. Gilbert M. Vanacker V. Bagoora F. Magunda M. Obando J. and Wasigeh J. 2010. Infiltration characteristics of volcanic sloping soils on Mt. Elgon, Eastern Uganda Yazidhi. *Catena*, 80(2):122–130.

Bhardwaj A. and Singh R. 1992. Development of a portable simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies. *Agricultural Water Management*, 22(4):235-248.

Blake, G.R. and Hartge, K.H. 1986. Bulk Density. In: Klute, A. (Ed). Methods of soil analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph, No. 9, *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison, pp: 363-375

Bland, J.M. and Altman, D.G., 1997. Statistics notes: Cronbach's alpha. Bmj, 314(7080), 572p.

Bouwer H. 1986. Intake rate. Cylinder infiltrometer. *In*: Klute A. (Eds.). Methods of soil analysis. Part 1. America Society of Agronomy. *Soil Science Society of American*. Madison. Wisconsin USA. pp: 825-843.

Burt R. 2004. Soil Survey Laboratory Methods Manual. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. USA, 700p.

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.

Duan, R. Fedler, C.B. and Borrelli, J. 2011. Field evaluation of infiltration models in lawn soil. *Irrigation Science*, 29(5): 379-389.

Fakher Nikcheh A., Vafakhah M., and Sadeghi S.H.R. 2014. Evaluation of different cumulative infiltration model performance in different land use and soil texture, using rainfall simulator. *Journal Water Soil Know*, 3(1): 183-193.

Ghorbani Dashtaki1 Sh., Homaee M., and Mahdian M.H. 2009. Estimating soil water infiltration parameters using Artificial Neural Networks. *Journal of water and soil*, 23(1): 185-198. (in Persian)

Green W.H. and Ampt G. 1911. Studies of soil physics. *Journal of Agricultural Science*. 4(1): 1-24.

Haverkamp R. Rendon L. and Vachaud G.1987. Infiltration equations and their applicability for predictive use. In: Yu- SI Fok (Ed.) Infiltration Development and Application. Honolulu, Hawai, pp: 142-152

Hillel D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. New York. 771p.

Ho, R. 2006. Handbook of univariate and multivariate data analysis and interpretation with SPSS. CRC Press. 406p.

Horton R.E. 1940. An Approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5(C): 399-417.

Jalini M., Kaveh F., Pazira A., Parehkar M., and Abedi M. 2007. Moisture estimation in the root zone of sugar beet by LEACHM model. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 12(5): 28-38.

Klute. A. 1986. Methods of Soil Analysis. Part 1, Physical and Mineralogical Methods. 2nd Ed., Agronomy No. 9. ASA/SSSA Inc., Madison, Wisconsin, USA.

Kostiakov A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. Transactions Congress International. *Society for Soil Science*, Moscow, pp: 17-21.

Kavoosi S.M., Vafakhah M., and Mahdian M.H. 2013. Evaluation of some equations of infiltration of water into soil in different land use, Kojoor catchments. *Journal Irrigation Water Engineering*, 4(13) 1-13.



www.SID.ir

Archive of SID

Lai J., and Ren L. 2007. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infi ltrometers and numerical simulation. *Soil Science Society American Journal*, 71(6):1667–1675.

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(5):1526–1536.

Mashayekhi P. 2016 (a). Estimation of soil hydraulic properties using double-ring infiltrometer data via inverse solution. PhD. dissertation, Univercity of shahrekord, Faculty of Agriculture.

Mashayekhi P., Ghorbani-Dashtaki S., Mosaddeghi M.R., Shirani H., and Mohammadi Nodoushan A.R. 2016 (b). 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 Mohammadi Nodoushan A.R. 2017. Estimation of soil hydraulic parameters using double-ring infiltrometer data via inverse method. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4): 829-838. (In Persian)

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.

Mezencev V.J. 1948. Theory of formation of the surface runoff. Meteorologiae Hidrologia, 3: 33-40.

Mishra K., Tyagi V., and Singh P. 2003. Comparison of infiltration models. *Hydrological Processes*, 17(13): 2629-2652.

Mohamadi kangarani H., Khalilzadeh M., and helisaz A. 2011. Investigating the Relationship Between Land Use Change and Soil Penetration Rate and Its Impact on the Flood in 2008 in the Nehavard Forest Watershed. *Journal management system*, 4(11): 75-88. (In Persian)

Mukheibir P. 2008. Water resources management strategies for adaptation to climate-induced impacts in South Africa. *Water Resources Management*, 22(9):1259-1276.

Nelson R.E. 1982. Carbonate and Gypsum. *In*: Page, A.L., R.H. Miller, and D.R. Keeney, (Eds.). Methods of Soil Analysis-Part 2. Chemical and microbiological properties-Agronomy Monograph No. 9. *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison, pp: 181-197

Neyshabouri MR., Fakhery-Fard A., Farsadizade D., Sadeghian N., Kheiry J. 2009. Coeficients of Kostiakov, Modified Kostiakov and Philip Infiltration Models on the Basis of Soil Bulk Density and Initial Water Content. *Water and soil science*, 1(19): 57-69. (In Persian)

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. *Iranian Journal Irrigation and drainage*, 4(2): 193-205. (In Persian)

Philip J.R. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83(5): 345-357.

Pollalis E.D., and Valiantzas J.D. 2014. 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): 04014050.

Rashidi M., and Seyfi, K. 2007. Field comparison of different infiltration models to determine the soil infiltration for border irrigation method. *Journal Agriculture and Environment Science*, 2(6): 628-632.

Reynolds W.D. 1993. Unsaturated hydraulic conductivity: Field measurement. In M.R. Carter (Ed.) Soil sampling and methods of analysis. *Canada Society Soil Science*. Lewis Publish., Boca Raton, FL. pp. 633-644

Reynolds W.D. Elrick D.E. and Youngs E.G. 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). In: Dane, J.H. and G.C. Topp (Eds), Methods of soil analysis--Part 4. Physical methods, SSSA, Wiconsin, USA, pp: 818-826.

Richards L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1:318–333.

Silva L.L. 2007. Fitting infiltration equations to center-pivot irrigation data in a Mediterranean soil. *Agricultural Water Management*, 94(1): 83–92.


www.SID.ir

Archive of SID

Šimůnek J. Šejna M. and van Genuchten M.Th. 1999. HYDRUS-2D software for simulating water fl ow and solute transport in two-dimensional variably saturated media. Version 2.0. Int. Ground Water Model. Ctr. Colorado School of Mines. Golden.

Šimůnek J. Van Genuchten M.Th. and Šejna M. 2012. HYDRUS: Model use, calibration and validation, In Special issue on Standard/ Engineering Procedures for Model Calibration and Validation, Stransactions of the ASABE, vol. 55, 2012, no. 4, pp: 1261–1274.

Smith E. R. 1976. Approximation for vertical infiltration rate patterns. ASAE. Annual international meeting, pp: 75-2010.

Tsanis I.K. 2006. Modelling leachate contamination and remediation of groundwater at a landfill site. *Water Resources Management*, 20(1):109–132.

Vaghefi M., and Movahedzadeh M. 2012. Evaluation and comparison of Three Infiltration Methods in the Tow Catchment Area of in boshehr state by Use Double Ring Tests. *Journal of Engineering Geology*, 6(1): 1445-1458. (In Persian)

Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-39.

Zolfaghari A.A., Mirzaee S., and Gorji M. 2012. Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. *Journal of Soil Science*, 7(3): 108-115.


www.SID.ir

Archive of SID

# Performance of Selected Infiltration Models Based on Obtained Data from Double-ring and HYDRUS-1D Software

**Asma Mousavi Dehmurdi[1*], Shoja Ghorbani-Dashtaki[2], Parisa Mashayekhi[2]**

(Received: January 2018 Accepted: April 2018)

## Abstract

Water infiltration is one of the most important properties of soil. The importance of infiltration process has led to development of several theoretical and empirical infiltration models. However, the applicability of these models is strongly subjected to the method of infiltration measurement. In this study, double ring infiltration data were collected from different regions of Iran with different soil textures. On the other hand, HYDRUS-1D model was used to simulate vertical infiltration through forward solution of the Richards' equation. Van Genuchten-Mualem model was used to quantify the soil hydraulic properties. For this purpose, the hydraulic parameters of van Genuchten-Mualem model were optimized using inverse modeling in the HYDRUS, for each region's soil and were used for simulation. In order to evaluate the accuracy of the Horton, Kostiakov, Kostiakov-Louis and Philip models, based on measured and simulated infiltration data, mean error (ME), root mean square error (RMSE), mean absolute mean error (MAME), Pearson correlation coefficient (r) and modeling efficiency (EF) statistics were used. The results indicated that the Kostiakov-Lewis model has had the best performance in different soil textures based on measured double ring infiltration data. Horton model has had the best performance based on HYDRUS simulated infiltration data in different soil textures. The Philip model had the least efficiency in estimating cumulative infiltration based on both measured and simulated infiltration data.

**Keywords:** Horton model, Infiltration, Kostiakov-Lewis model, Kostiakov model, Philip model

Mousavi Dehmurdi A., Ghorbani-Dashtaki Sh. ,Mashayekhi P. Performance of some infiltration models based on obtained data from double-ring and HYDRUS-1D software *Applied Soil Research*, 7(2): 182-195.

1- MSc Student, Department of Soil Science, Shahrekord University, Iran
2- Professor, Department of Soil Science, Shahrekord 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.
* Corresponding Author Email: aci.musavi@yahoo.com


www.SID.ir