

مقاله علمی-پژوهشی

اشتقاق و ارزیابی توابع انتقالی ضرایب معادلات نفوذ آب به خاک در مناطق مختلف

رحمان باریده<sup>۱</sup>، سینا بشارت<sup>۲\*</sup>، حبیب خداوردیلو<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۴

چکیده

نفوذ آب به خاک نقش مهمی در چرخه‌ی آبی طبیعت دارد و از آنجا که اندازه‌گیری مستقیم این پارامتر در هر جایی امکان‌پذیر نیست، لذا این پژوهش به منظور بررسی امکان برآورد توابع انتقالی تخمین ضرایب معادلات نفوذ آب به خاک کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس، هورتن و سازمان حفاظت خاک آمریکا با استفاده از ویژگی‌های زود یافت فیزیکی خاک و ارزیابی این توابع در خارج از منطقه اشتقاق آن‌ها انجام گرفت. بنابراین ویژگی‌های فیزیکی خاک و نفوذ تجمعی در دو منطقه متفاوت (T1 و T2) اندازه‌گیری شد. با استفاده از اندازه‌گیری‌های محل T1 و رگرسیون خطی چندگانه، توابع انتقالی شکل گرفت و با استفاده از اندازه‌گیری‌های مستقل T2 کارایی برون‌یابی این توابع بررسی شد. نفوذ تجمعی در ۷۸ نقطه به وسیله استوانه دوگانه با سه تکرار اندازه‌گیری شد. بیشترین دقت توابع انتقالی در مرحله اشتقاق، مربوط به ضرایب معادله SCS با مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) برابر ۰/۶۶ و کمترین دقت با مقدار  $R^2$  برابر ۰/۰۴ مربوط به توان معادله هورتن بود. در مرحله اعتبارسنجی در خارج از محل اشتقاق، دقت توابع انتقالی کاهش زیادی نشان داد به طوری که بازه تغییرات  $R^2$  از ۰/۰۰ تا ۰/۲۶، بازه تغییرات ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) از ۱/۷۶ تا ۸۰/۹۳ و بازه تغییرات نسبت خطای میانگین هندسی (GMER) از ۰/۹۴ تا ۱/۷۳ به دست آمد. بنابراین نتایج نشان داد که استفاده از توابع انتقالی تخمین ضرایب معادلات نفوذ فقط در محل اشتقاقشان کارآمد است و امکان استفاده از این توابع در خارج از محل اشتقاق آن‌ها بدون واسنجی امکان‌پذیر نیست.

واژه‌های کلیدی: استوانه دوگانه، رگرسیون خطی چندگانه، معادلات نفوذ، نفوذ تجمعی

مقدمه

نفوذ آب به خاک نقش بسیار مهمی در چرخه‌ی آبی طبیعت، ذخیره‌ی رطوبتی خاک و در نتیجه استقرار و تنوع پوشش گیاهی، اکولوژی منطقه، میزان رواناب و فرسایش خاک، انتقال املاح و آلودگی آب‌های زیرزمینی دارد. دستیابی به مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح سیستم آبیاری، ذخیره‌ی رطوبتی مطلوب خاک در مناطق خشک، عملکرد زراعی قابل قبول و سامانه پایدار حفاظتی خاک در گرو مدنظر قرار دادن نفوذپذیری آب به خاک است (قربانی دشتکی و همکاران، ۱۳۸۸). به طور کلی پدیده‌ی نفوذ تعیین‌کننده‌ی سرنوشت آب‌رسیده به سطح خاک است (محمدی و رفاهی، ۱۳۸۴).  
شدت نفوذ آب به خاک با ویژگی‌های از خاک از قبیل بافت

Brady and Weil, 1996)، ساختمان خاک (Brady and Weil, 1996)، جرم ویژه ظاهری (Assouline, Lin et al., 1999 و 1996)، درجه تراکم (Hillel, 1982)، تخلخل خاک (Ehlers, 2006)، شیب سطح خاک (Lal and Hillel, 1982 و Šimůnek et al., 2003)، رطوبت اولیه و نوع پوشش گیاهی (Ehlers, 1975)، شیب سطح خاک (Lal and Shukla, 2004 و Hatt and LeCoustumer, 2008)، شدت بارش و احتباس هوا در خاک (Wangemann et al., 2000)، نوع کانی-های رسی (Ben-Hur and Assouline, 2002) و عوامل مدیریتی (Moroke et al., 2009) در ارتباط است.

برای کمی کردن پدیده نفوذ، معادلات پرشماری ارائه شده است که به سه دسته تحلیلی مانند معادله ریچاردز (۱۹۳۱)، نیمه تحلیلی یا فیزیکی مانند معادلات گرین-آمپت (۱۹۱۱) و فیلیپ (۱۹۵۷) و تجربی مانند معادلات کاستیاکف (۱۹۳۲)، کاستیاکف-لوییس (۱۹۴۸)، سازمان حفاظت خاک آمریکا (۱۹۷۲) و غیره تقسیم‌بندی می‌شوند. یکی از روش‌های غیرمستقیم برای برآورد ویژگی‌های نفوذ خاک توابع انتقالی (Pedotransfer functions) است. در این روش ویژگی‌های دیر یافت خاک که اندازه‌گیری آن‌ها دشوار، پرهزینه و

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب، گرایش آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه، ایران  
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، گرایش آبیاری و زهکشی، دانشگاه ارومیه، ایران  
۳- دانشیار گروه علوم خاک، گرایش فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه ارومیه، ایران  
(\* نویسنده مسئول: Email: sina323@yahoo.com)

DOR: 20.1001.1.20087942.2021.15.4.3.3

فیزیکی خاک ارائه شده است. با این حال ارزیابی کارایی این گونه توابع فقط در محلی که شکل گرفته اند صورت گرفته و کارایی آن‌ها برای برون‌یابی در مناطقی خارج از محدوده اشتقاق توابع بررسی نشده است.

بنابراین، هدف از این مطالعه پاسخ به این سؤال است که آیا امکان کاربرد توابع انتقالی ایجاد شده برای ضرایب معادلات نفوذ در خارج از منطقه اشتقاق آن‌ها وجود دارد یا خیر؟ برای دستیابی به این مهم داده‌های مورد نیاز در دو منطقه اندازه‌گیری گردید و کاربرد توابع به دست آمده در یک منطقه برای برآورد ضرایب معادلات نفوذ در محل دیگر مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. همچنین کارایی مدل‌های تجربی برآورد نفوذ آب به خاک در هر منطقه بررسی شد.

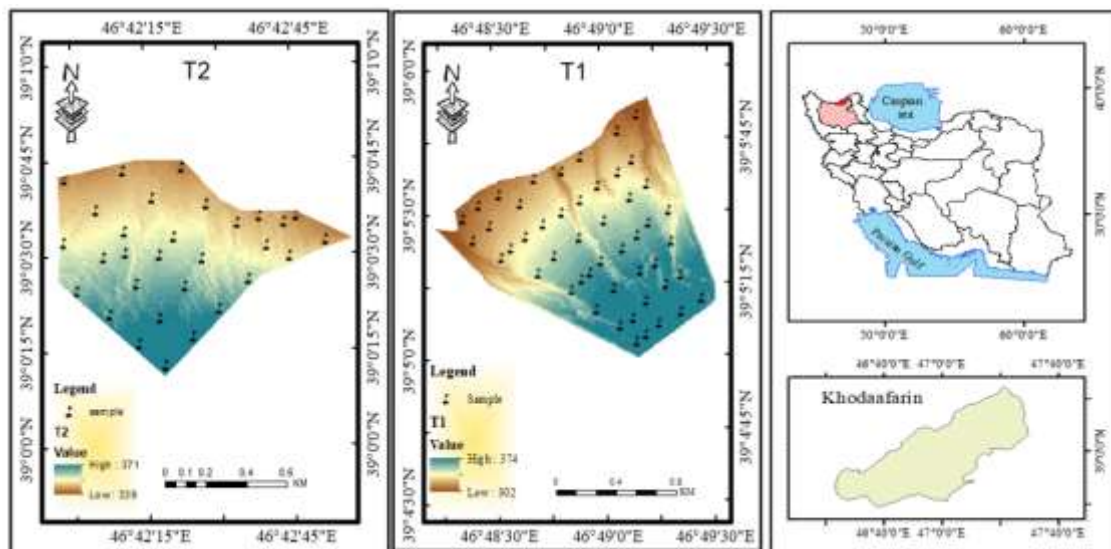
### مواد و روش‌ها

#### ویژگی‌های محدوده مطالعاتی

به منظور دستیابی به اهداف پژوهش، آزمایش‌ها در دو محل با فاصله ۱۵ کیلومتر از هم در شهرستان خداآفرین واقع در شمال استان آذربایجان شرقی صورت گرفت. محل T1 به مساحت ۱۲۵ هکتار و محل T2 به مساحت ۸۲ هکتار از اراضی کشاورزی انتخاب گردید. اقلیم منطقه با توجه روش‌های آمبرژه و دومارتین به ترتیب نیمه‌خشک معتدل و نیمه‌خشک به دست آمد. میانگین دمای روزانه منطقه ۱۳/۸ درجه سانتیگراد، متوسط روزهای یخبندان سالانه ۶۷ روز، متوسط رطوبت نسبی سالانه منطقه ۶۹ درصد و بارندگی متوسط سالانه ۳۵۴ میلی‌متر بود. در شکل (۱) موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

زمان بر می‌باشد، به کمک ویژگی‌های زود یافت خاک مانند فراوانی نسبی ذرات، جرم ویژه ظاهری و ماده آلی خاک که اندازه‌گیری آن‌ها سریع و آسان و کم‌هزینه است برآورد می‌شوند. بدین منظور از روش‌های رگرسیون خطی و غیرخطی و شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده می‌شود. عبارت توابع انتقالی خاک اولین بار توسط بوما در سال ۱۹۸۹ پیشنهاد و در فیزیک خاک برای برآورد برخی از ویژگی‌های دیر یافت خاک به کار گرفته شد (Bouma, 1989).

به‌طور کلی هدف از بررسی معادلات نفوذ، بهینه‌سازی آن معادلات در شرایط و مناطق مختلف برای برآورد دقیق مقدار آب نفوذ یافته یا شدت نفوذ آب به خاک جهت مدیریت مصرف آب در کشاورزی، طراحی سامانه‌های آبیاری و زهکشی، طراحی و اجرای طرح‌های آبخوان‌داری و آبخیزداری و برآورد فرسایش و بهینه‌سازی اقدامات حفاظت خاک و آب است. معادلات مورد استفاده بیشتر به صورت تجربی بوده و مبتنی بر داده‌های حاصل از آزمایش‌ها می‌باشند. اما نتایج این معادلات برای شرایطی که در آن اندازه‌گیری شده‌اند کاربرد دارد و برون‌یابی با استفاده از آن‌ها نیازمند ارزیابی توابع و احتمالاً باز-واسنجی مدل اشتقاق یافته است. همچنین امکان انجام آزمایش‌های صحرایی در همه مناطق به عنوان مثال در مناطق کوهستانی وجود ندارد (Pandey and Pandey, 2018) و یا دشوار و پرهزینه هستند (Patle et al., 2019). بر همین اساس توابع انتقالی برآورد ضرایب معادلات نفوذ کمک شایانی به کاهش موانع یاد شده، خواهد نمود. در این راستا می‌توان به پژوهش‌های قربانی و همکاران، نیشابوری و همکاران (۱۳۸۸) و محمدی و رفاهی (۱۳۸۴) اشاره نمود (Ghorbani-Dashtaki et al., 2016). در این پژوهش‌ها، توابع انتقالی برای تخمین ضرایب معادلات نفوذ بر اساس ویژگی‌های



شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مورد مطالعه و محل انجام آزمایش‌ها

هم خوردگی سطح خاک در هنگام اضافه کردن آب به داخل استوانه دوگانه از ورقه پلاستیکی در داخل استوانه‌ها استفاده شد (Pandey and Pandey, 2018). رطوبت اولیه و چگالی ظاهری خاک به روش نمونه‌برداری حجمی و خشک کردن در آون (Grossman and Reinsch, 2002 و Punamia et al., 2005)، بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Or, 2002)، مواد آلی به روش والکی-بلک (Walkley and Black, 1934) اندازه‌گیری گردید.

### اندازه‌گیری‌های صحرائی

در ۴۹ نقطه از محل T1 و در ۲۷ نقطه از محل T2 آزمایش نفوذ به وسیله استوانه دوگانه با سه تکرار صورت گرفت و نمونه‌های مورد نیاز برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک تهیه شد (شکل ۲). بدین منظور در ابتدا بدون آسیب به سطح خاک محل انجام اندازه‌گیری، گیاهان موجود به وسیله چاقو از پایین‌ترین حد ممکن حذف گردید (شاکر و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین برای جلوگیری از به



شکل ۲- نحوه انجام آزمایش‌ها و تهیه نمونه خاک در محل

که در این معادلات  $n$  تعداد گروه‌های جداگانه خاک (شن، سیلت و رس)،  $F_i$  درصد ذرات تشکیل دهنده،  $M_i$  میانگین دو محدوده متوالی اندازه قطر ذرات،  $D$  بعد فراکتال و  $OC$  کربن آلی خاک است.

### معادلات مورد بررسی

در این پژوهش چهار معادله کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس، هورتن و سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۱) که دقت و کارایی هر معادله در هر منطقه با استفاده از روش رتبه‌بندی شاخص‌های آماری بررسی گردید. در مرحله بعد توابع انتقالی تخمین ضرایب آن معادلات با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی خاک شکل گرفت.

### اشتقاق توابع انتقالی

در مرحله اول، ضرایب معادلات مورد بررسی با استفاده از روش حداقل کردن مربعات خطا با نرم‌افزارهای Excel و STATA به دست آمد. در مرحله بعد برای اشتقاق توابع انتقالی تخمین ضرایب معادلات نفوذ بعد از بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از دو آزمون شاپیرو-ویلک و کولموگروف-اسمیرنوف، از روش رگرسیون خطی چندگانه و انتخاب بهترین گزینش در نرم‌افزار SPSS استفاده گردید.

### پارامترهای محاسباتی

میانگین هندسی ( $dg$ ) (معادله ۱) و انحراف معیار هندسی قطر ذرات ( $\sigma_g$ ) (معادله ۲) به‌عنوان نمایه‌هایی از توزیع اندازه ذرات به روش شیرازی و بورسما (Shirazi and Boersma, 1984) (معادله ۳)، سطح ویژه حجمی خاک از روش محاسباتی سپاسخواه و تافته (Sepaskhah and Tafteh, 2013) و شاخص پایداری ساختمان خاک (SSI) به روش پیری (Pieri, 1992) (معادله ۴) اندازه‌گیری شد. اگر SSI کمتر از ۵ درصد باشد نشان می‌دهد که خاک از لحاظ ساختمانی تخریب شده است، ۷-۵ درصد بیانگر خطر زیاد تخریب ساختمان خاک، ۹-۷ درصد خطر کم تخریب، بیش از ۹ درصد حاکی از وجود مقادیر کافی کربن آلی جهت بقا و پایداری ساختمان خاک است (Pieri, 1992 و Reynolds et al., 2009).

$$d_g = e^a; a = 0.01 \sum_{i=1}^n F_i \ln M_i \quad (1)$$

$$\sigma_g = e^b; b^2 = 0.01 \sum_{i=1}^n F_i \ln^2 M_i - a^2 \quad (2)$$

$$SSA = e^{(10.66 \times D - 25.06)}; \quad (3)$$

$$D = 3 - 0.118 \left[ \left( \frac{Si + Sa}{100} \right) - \ln \left( \frac{Cl}{100} \right) \right]$$

$$SSI = \left( \frac{OC \times 1.724}{Cl + Si} \right) \times 100 \quad (4)$$

جدول ۱- تعریف معادلات نفوذ و پارامترهای آنها

$I = akt^{bk}$	معادله کاستیاکف: $ak$ و $bk$ ضرایب معادله، $t$ زمان و بر حسب دقیقه، $I$ نفوذ تجمعی بر حسب سانتی متر
$I = akl t^{bkl} + f_0 t$	معادله کاستیاکف-لوپیس: $akl$ و $bkl$ ضرایب معادله، $f_0$ مقدار ثابت و برابر شدت نفوذ نهایی بر حسب سانتی متر بر دقیقه، $t$ زمان و بر حسب دقیقه، $I$ نفوذ تجمعی بر حسب سانتی متر
$I = i_f t + \frac{(i_0 - i_f)}{b} (1 - e^{-bht})$	معادله هورتن: $bh$ توان معادله، $i_0$ و $i_f$ مقادیر ثابت و برابر شدت نفوذ نهایی و اولیه بر حسب سانتی متر بر دقیقه، $t$ زمان و بر حسب دقیقه، $I$ نفوذ تجمعی بر حسب سانتی متر
$I = ast^{bs} + c$	معادله سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS): $as$ و $bs$ ضرایب معادله، $c$ ضریب ثابت معادله بر حسب میلی متر بر دقیقه، $t$ زمان و بر حسب دقیقه، $I$ نفوذ تجمعی بر حسب میلی متر

می شود. هر چه این آماره کوچک تر باشد نشان دهنده صحت برازش داده ها است. نسبت خطای میانگین هندسی (GMER) بیان کننده هم خوانی مقادیر مشاهده ای و برآورد شده است. چنانچه مقدار این ضریب برابر ۱ باشد نشان دهنده برازش دقیق بین داده های اندازه گیری شده و برآورد شده است و مقادیر کمتر یا بیشتر از ۱ به ترتیب کم برآوردی یا بیش برآوردی مدل را نشان می دهد. که در آنها،  $n$  تعداد مشاهدات،  $O_i$  مقدار مشاهده ای داده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده ای داده،  $P_i$  مقدار برآورد شده برای داده مورد نظر است (Pandey and Pandey, Ghorbani-Dashtaki et al., 2016) و (Patle et al., 2019 و 2018).

نتایج و بحث

ویژگی های فیزیکی خاک

در جدول (۲ و ۳) خلاصه ویژگی های فیزیکی خاک های محل  $T_1$  و  $T_2$  نشان داده شده است. بیشترین و کمترین درصد شن، سیلت و رس در  $T_1$  به ترتیب در بازه ۵۸/۶-۲۵/۳، ۵۵/۷-۱۴/۹ و ۴۶/۱-۷/۲ با چگالی ظاهری ۱/۳۴ تا ۱/۵۸ گرم بر سانتی متر مکعب به دست آمد. بازه مواد آلی در  $T_1$  از ۰/۴۲ تا ۴/۷۲ درصد متغیر بود. با در نظر گرفتن بازه حداقل و حداکثر شاخص SSI که بین ۰/۳ تا ۹/۹ درصد قرار دارد و نزدیک بودن مقدار میانگین به محدوده ۵ درصد و مقدار چارک سوم که برابر ۶/۳۲ درصد است می توان بیان کرد که ۵۰ درصد ساختمان خاک  $T_1$  تخریب شده، ۲۰ درصد در خطر زیاد تخریب و ۳۰ درصد در خطر کم تخریب قرار دارد (بر اساس طبقه بندی (Pieri, 1992)). همچنین بازه درصد شن، سیلت و رس در  $T_2$  به ترتیب برابر ۵۹/۲-۲۷/۱، ۴۷/۴-۱۰/۸ و ۴۲/۲-۱۹/۴ با چگالی ظاهری ۱/۳۱ تا ۱/۶۷ گرم بر سانتی متر مکعب اندازه گیری شد. مواد آلی  $T_2$  با میانگین ۲/۵۹ درصد در بازه ۱/۱۶ تا ۴/۴ درصد قرار گرفت. با توجه به بازه شاخص SSI که در بین ۱/۷۷ تا ۷/۵۸ قرار دارد و مقدار چارک سوم برابر ۵/۲۱ که تقریباً نزدیک به مرز ۵ درصد است می توان نتیجه گرفت که در ۷۵ درصد موارد ساختمان خاک تخریب شده و در ۲۵ درصد دیگر آن در معرض خطر زیاد تخریب قرار دارد (بر اساس طبقه بندی (Pieri, 1992)).

توابع انتقالی با استفاده از ۸۵ درصد داده های  $T_1$  ایجاد شدند و با استفاده از ۱۵ درصد داده های باقیمانده مورد ارزیابی قرار گرفتند. توابع انتقالی به دست آمده در محل  $T_1$ ، با استفاده از داده های محل  $T_2$  اعتبارسنجی شدند. هدف از این کار بررسی کارایی مدل های ارائه شده در خارج از منطقه اشتقاق آنها است. برای این منظور ویژگی های فیزیکی خاک اندازه گیری شده در محل  $T_2$  در توابع انتقالی به دست آمده در محل  $T_1$  جایگذاری و مقادیر به دست آمده با مقادیر واقعی مقایسه و تجزیه و تحلیل شدند.

شاخص های آماری

به منظور ارزیابی کارایی معادلات نفوذ آب به خاک و توابع اشتقاق یافته از آماره های زیر استفاده گردید (معادلات ۵ تا ۹).

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

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (7)$$

$$AE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \quad (8)$$

$$GMER = \exp \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left( \frac{P_i}{O_i} \right) \right] \quad (9)$$

ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیان کننده روند برآوردها است و هرچه به عدد یک نزدیک تر باشد روند برآوردها دقیق تر است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بیان کننده تفاوت میان مقدار برآورد شده توسط مدل و مقدار واقعی است. مقدار آن همواره مثبت بوده و بهترین حالت عملکرد زمانی است که مقدار آن صفر شود. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) مقدار این آماره بیان کننده وضعیت مدل سازی است. مقدار کمتر از ۱۰٪ وضعیت ایده آل، بازه ۱۰ تا ۲۰٪ و ۲۰ تا ۳۰٪ به ترتیب نشانگر وضعیت مناسب و متوسط مدل در برآورد و بیشتر از ۳۰٪ نشان دهنده عدم اطمینان به مدل است (Bannayan et al., 2009). درصد خطای نسبی مطلق (AE) برای برآورد مطمئن نفوذ تجمعی از آماره درصد خطای نسبی مطلق استفاده

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک محل T1

پارامتر	T1						
	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	چارک اول	چارک سوم	انحراف معیار	درصد تغییرات
Sand (%)	۲۵,۳	۵۸,۶	۳۹,۳	۳۳,۸	۴۴,۴	۷,۷	۱۹,۷
Silt (%)	۱۴,۹	۵۵,۷	۳۴,۲	۲۷,۲	۴۱,۲	۸,۷	۲۵,۴
Clay (%)	۷,۲	۴۶,۱	۲۶,۴	۱۸,۶	۳۲,۴	۱۰,۲	۳۸,۵
Porosity (-)	۰,۴	۰,۵	۰,۴۵	۰,۴۳	۰,۴۷	۰,۰۲	۵,۵
pb (gr/cm <sup>3</sup> )	۱,۳۴	۱,۵۸	۱,۴۶	۱,۴	۱,۵۱	۰,۰۶	۴,۴۱
θv (-)	۰,۱۷	۰,۳۳	۰,۲۵	۰,۲۳	۰,۲۹	۰,۰۴	۱۴,۱۸
OM (%)	۰,۴۲	۴,۷۲	۲,۶۵	۱,۸۷	۳,۳۵	۰,۹۵	۳۵,۷۳
dg (mm)	۰,۰۲	۰,۱۵	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۷	۰,۰۳	۵۸,۸۷
σg (-)	۹,۰۴	۲۴,۱۹	۱۵,۶۳	۱۲,۹۲	۱۸,۵۵	۳,۴۵	۲۲,۰۵
SSA (m <sup>2</sup> /gr)	۱۱,۴۹	۱۹۳,۹۹	۸۲,۴	۴۴,۰۵	۱۰۴,۷۴	۴۸,۷۵	۵۹,۱۶
SSI (%)	۰,۳	۹,۹	۴,۹۲	۳,۱۱	۶,۳۲	۲,۲۶	۴۵,۸۹

Sand: شن، Silt: سیلت، Clay: رس، Porosity: تخلخل، pb: چگالی ظاهری، θv: رطوبت حجمی، OM: مواد آلی، dg: میانگین هندسی اندازه ذرات، σg: انحراف معیار هندسی اندازه ذرات، SSA: سطح ویژه خاک، SSI: شاخص پایداری ساختمان خاک

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک محل T2

پارامتر	T2						
	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	چارک اول	چارک سوم	انحراف معیار	درصد تغییرات
Sand (%)	۲۷,۱	۵۹,۲	۴۰,۷	۳۴,۹	۴۶,۸	۷,۷	۱۸,۹
Silt (%)	۱۰,۹	۴۷,۴	۲۹,۵	۲۲,۱	۳۶,۸	۸,۸	۲۹,۷
Clay (%)	۱۹,۵	۴۲,۲	۲۹,۸	۲۷,۲۹	۳۲,۶	۵	۱۶,۹
Porosity (-)	۰,۳۷	۰,۵	۰,۴۵	۰,۴۲	۰,۴۸	۰,۰۳	۷,۴
pb (gr/cm <sup>3</sup> )	۱,۳۱	۱,۶۷	۱,۴۶	۱,۳۸	۱,۵۳	۰,۰۹	۶,۰۴
θv (-)	۰,۱۹	۰,۳۲	۰,۲۶	۰,۲۲	۰,۲۸	۰,۰۴	۱۴,۵۸
OM (%)	۱,۱۶	۴,۴	۲,۵۹	۱,۸۶	۲,۹۹	۰,۷۹	۳۰,۶۸
dg (mm)	۰,۰۲	۰,۰۹	۰,۰۵	۰,۰۳	۰,۰۶	۰,۰۲	۳۵,۲۶
σg (-)	۱۲,۳۱	۲۲,۶۲	۱۷,۸۷	۱۵,۶۸	۲۰,۶۳	۲,۷۸	۱۵,۵۸
SSA (m <sup>2</sup> /gr)	۴۶,۹۵	۱۶۵,۰۶	۹۳,۰۶	۷۹,۲	۱۰۶,۰۶	۲۶,۱۳	۲۸,۰۸
SSI (%)	۱,۷۷	۷,۵۸	۴,۴۷	۳,۳۸	۵,۲۱	۱,۵۳	۳۴,۲۱

Sand: شن، Silt: سیلت، Clay: رس، Porosity: تخلخل، pb: چگالی ظاهری، θv: رطوبت حجمی، OM: مواد آلی، dg: میانگین هندسی اندازه ذرات، σg: انحراف معیار هندسی اندازه ذرات، SSA: سطح ویژه خاک، SSI: شاخص پایداری ساختمان خاک

### بررسی دقت معادلات نفوذ

دقت معادلات نفوذ کاستیاکف، کاستیاکف-لوویس، هورتن و سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) در مرحله برآزش به داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در جدول (۴) نشان داده شده است. حداکثر و حداقل مقدار میانگین R<sup>2</sup> و RMSE در T1 به ترتیب مربوط به معادله کاستیاکف و SCS با مقادیر ۰/۹۹-۰/۸۹ و ۰/۴۵-۰/۱۴ سانتیمتر بود. در T2 بیشترین مقدار R<sup>2</sup> مربوط به معادلات کاستیاکف، کاستیاکف-لوویس و هورتن با مقدار ۰/۹۹ بود. با توجه به آماره nRMSE در T1 و T2 برآزش معادلات کاستیاکف، کاستیاکف-

لوویس و هورتن در رده عالی و SCS در رده مناسب قرار گرفت. در T1 و بر اساس مقادیر GMER در معادلات کاستیاکف و SCS کم برآوردی و در معادلات کاستیاکف-لوویس و هورتن بیش برآوردی مشاهده شد و در T2 معادله کاستیاکف کم برآورد و بقیه معادلات بیش برآورد بودند. در نهایت دقت معادلات بر اساس رتبه‌بندی شاخص‌های آماری جدول (۳) محاسبه شد و دقت عملکرد معادلات در هر دو محل به ترتیب کاستیاکف، کاستیاکف-لوویس، هورتن و SCS به دست آمد. پژوهش‌های زیادی در خصوص مقایسه و عملکرد معادلات نفوذ در برآورد آب به خاک صورت گرفته که ترتیب دقت

منطقه‌ای دیگر مورد استفاده قرار داد زیرا با تغییر مشخصات خاک ضرایب آن معادلات تغییر کرده و برای استفاده از آن باید آزمایش نفوذ صورت گیرد و از آنجا که این امکان در هر جایی امکان‌پذیر نیست و یا زمان‌بر و هزینه‌بر است لذا استفاده از توابع انتقالی تخمین ضرایب معادلات نفوذ می‌تواند جایگزین مناسبی باشد. بنابراین در این پژوهش دقت درون‌یابی و برون‌یابی توابع انتقالی مورد بررسی قرار گرفت.

معادلات در هر پژوهش با شرایط مختلف و حتی شرایط مشابه متفاوت بوده است (سپهوند و همکاران، ۱۳۹۰؛ نشاط و پاره کار، ۱۳۸۶؛ فاخر نیکچه و همکاران، ۱۳۹۳؛ ثامنی و همکاران، ۱۳۹۳). دلیل این تفاوت می‌تواند به دلیل وابستگی نفوذ آب به خاک به شرایط محیطی و همچنین دقت روش‌های مختلف اندازه‌گیری باشد (Chowdary et al., 2006؛ Corradini et al., 2011؛ Deborah and Moody, 2001). بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که نمی‌توان معادله به دست آمده برای یک نقطه یا منطقه را در نقطه یا

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری و رتبه‌بندی معادلات کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس، هورتن و SCS در T1 و T2

T1								
رتبه	جمع رتبه	mean GMER (-)	mean AE (%)	mean nRMSE (%)	mean RMSE (cm)	mean R <sup>2</sup> (-)	بازه تغییرات ضرایب	مدل
۱	5	۰٫۹۹ <sup>۱</sup>	۴٫۶۵ <sup>۱</sup>	۴٫۹۸ <sup>۱</sup>	۰٫۴۵ <sup>۱</sup>	۰٫۹۹ <sup>۱</sup>	ak (۱/۳۵-۰/۲۷) bk (۰/۷۴-۰/۵۷)	کاستیاکف
۲	10	۱٫۰۴ <sup>۲</sup>	۱۰٫۴۱ <sup>۲</sup>	۵٫۴۸ <sup>۲</sup>	۰٫۵۲ <sup>۲</sup>	۰٫۹۹ <sup>۱</sup>	akl (۲/۴-۰/۴۷) bkl (۰/۴-۰/۰۸)	کاستیاکف لوییس
۳	11	۱٫۰۱ <sup>۱</sup>	۷٫۸۴ <sup>۲</sup>	۹٫۵۹ <sup>۳</sup>	۰٫۹۲ <sup>۳</sup>	۰٫۹۸ <sup>۲</sup>	bh (۰/۱۷-۰/۰۳)	هورتن
۴	18	۰٫۸۴ <sup>۳</sup>	۲۲٫۶۱ <sup>۴</sup>	۲۰٫۱۴ <sup>۴</sup>	۲٫۱۴ <sup>۴</sup>	۰٫۸۹ <sup>۳</sup>	as (۳/۸۳-۱/۶) bs (۰/۸۱-۰/۷۸)	SCS
T2								
۱	7	۰٫۹۹ <sup>۱</sup>	۳٫۹۵ <sup>۱</sup>	۵٫۲۹ <sup>۲</sup>	۰٫۳۲ <sup>۲</sup>	۰٫۹۹ <sup>۱</sup>	ak (۱/۱۹-۰/۱۴) bk (۰/۸۲-۰/۵۶)	کاستیاکف
2	8	۱٫۰۳ <sup>۲</sup>	۹٫۴۵ <sup>۲</sup>	۴٫۶۸ <sup>۱</sup>	۰٫۲۷ <sup>۱</sup>	۰٫۹۹ <sup>۱</sup>	akl (۱/۸-۰/۱۴) bkl (۰/۷-۰/۱۳)	کاستیاکف لوییس
3	10	۱٫۰۱ <sup>۱</sup>	۶٫۶۷ <sup>۲</sup>	۷٫۹۲ <sup>۳</sup>	۰٫۴۶ <sup>۳</sup>	۰٫۹۹ <sup>۱</sup>	bh (۰/۱۷-۰/۰۶)	هورتن
4	17	۱٫۱۵ <sup>۳</sup>	۲۶٫۰۱ <sup>۴</sup>	۱۸٫۶۲ <sup>۴</sup>	۰٫۹۹ <sup>۴</sup>	۰٫۹۲ <sup>۲</sup>	as (۳/۴۷-۱/۵) bs (۰/۸۱-۰/۷۷)	SCS

۱، ۲، ۳ و ۴ نشان دهنده رتبه هر شاخص است.

تا ۰/۸۲ متغیر بود و نتیجه گرفتند که امکان استفاده از توابع انتقالی برای تخمین معادلات نفوذ وجود دارد (Ghorbani-Dashtaki et al., 2016). اما با این وجود امکان کاربرد این توابع در خارج از شرایط اشتقاق آن‌ها، بررسی نشده است.

لذا توابع انتقالی به دست آمده در T1 این پژوهش با استفاده از ۱۵ درصد داده‌های محل اشتقاق خود (T1) (درون‌یابی) و با استفاده از داده‌های خارج از منطقه اشتقاق (T2) (برون‌یابی) مورد ارزیابی قرار گرفتند که دقت هر یک از مراحل در جدول (۶) و شکل (۳) نشان داده شده است. در مرحله شکل‌گیری توابع انتقالی، برآورد همه ضرایب با دقت قابل قبول به غیر از توان معادلات کاستیاکف-لوییس و هورتن امکان‌پذیر بود.

#### بررسی توابع انتقالی ضرایب معادلات نفوذ

در جدول (۵) توابع انتقالی اشتقاق یافته برای تخمین ضرایب معادلات نفوذ کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس، هورتن و SCS نشان داده شده است. این توابع با استفاده از برازش ۸۵ درصد داده‌های T1 به دست آمد. بیشترین مقدار R<sup>2</sup> مربوط به ضرایب معادله SCS با مقدار ۰/۶۶ و کمترین مقدار R<sup>2</sup> مربوط به توان معادله هورتن با مقدار ۰/۰۴ بود. محمدی و رفاهی (۱۳۸۴) توابع انتقالی برای تخمین ضرایب معادلات نفوذ کاستیاکف، هورتن و فیلیپ بر پایه ویژگی‌های فیزیکی خاک با R<sup>2</sup> بالا و محدوده تغییرات ۰/۶۷۲ - ۰/۸۱۳ ارائه کردند. همچنین قربانی و همکاران توابع انتقالی مختلفی برای ضرایب معادلات نفوذ کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس، هورتن و فیلیپ با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی خاک ارائه دادند که این توابع بر اساس نوع کاربری اراضی طبقه‌بندی شدند. بازه تغییرات R<sup>2</sup> زیاد و از ۰/۱۹

جدول ۵- توابع انتقالی اشتقاق یافته برای ضرایب معادلات کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس، هورتن و SCS

$ak=1.734-5.07\times\theta_v+0.082\times OM+0.001\times SSA$	$R^2=0.64$
$bk=0.467+0.768\times\theta_v-0.005\times SSI$	$R^2=0.36$
$akl=2.89-8.32\times\theta_v+0.133\times OM+0.003\times SSA$	$R^2=0.59$
$bkl=0.034+0.189\times pb$	$R^2=0.05$
$bh=-0.0003\times Silt-0.089\times pb-0.131\times\theta_v+0.0019\times OM+0.216\times dg-0.0003\times SSI+0.256$	$R^2=0.04$
$as=1.96+1.88\times pb+0.096\times OM-0.057\times Sa$	$R^2=0.66$
$bs=0.034\times pb-0.018\times\theta_v+0.0013\times OM-0.284\times dg-0.0008\times\sigma_g+0.0006\times SSI+0.781$	$R^2=0.66$

ak و bk: ضرایب معادله کاستیاکف، akl و bkl: ضرایب معادله کاستیاکف-لوییس، bh: ضریب معادله هورتن، as و bs: ضرایب معادله SCS

فیزیکی زود یافت خاک و بررسی کارایی درون‌یابی و برون‌یابی این توابع و همچنین بررسی دقت معادلات نفوذ در برازش به داده‌های نفوذ تجمعی پرداخته شد. برای این منظور داده‌های مورد نیاز در دو منطقه مختلف (T1 و T2) اندازه‌گیری شد که توابع انتقالی با استفاده از ۸۵ درصد داده‌های T1 و روش رگرسیون خطی چندگانه ایجاد شدند. در نهایت با استفاده از داده‌های باقی‌مانده T1 و T2 کارایی درون‌یابی و برون‌یابی توابع انتقالی بررسی گردید.

در مرحله برازش معادلات نفوذ به داده‌های نفوذ تجمعی حداکثر و حداقل مقدار میانگین  $R^2$  و RMSE در T1 به ترتیب مربوط به معادله کاستیاکف و SCS با مقادیر  $0.99-0.89$  و  $0.45-0.14$  سانتیمتر بود. در T2 بیشترین مقدار  $R^2$  مربوط به معادلات کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس و هورتن با مقدار  $0.99$  بود. با توجه به آماره nRMSE در T1 و T2 برازش معادلات کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس و هورتن در رده عالی و SCS در رده مناسب قرار گرفت. در نهایت دقت معادلات بر اساس رتبه‌بندی شاخص‌های آماری در هر دو محل به ترتیب کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس، هورتن و SCS به دست آمد.

در مرحله ارزیابی در محل T1 دقت پیش‌بینی در محدوده مرحله برازش و قابل قبول به دست آمد. در مرحله ارزیابی خارج از منطقه اشتقاق دقت توابع انتقالی کاهش زیادی نشان داد. بازه تغییرات  $R^2$  از  $0.00$  تا  $0.26$ ، بازه تغییرات nRMSE از  $1/76$  تا  $80/93$  و بازه تغییرات GMER از  $0.94$  تا  $1/73$  به دست آمد. دلیل اصلی ناکارآمد بودن برون‌یابی توابع انتقالی به علت همبستگی متفاوت ضرایب معادلات نفوذ با مشخصات فیزیکی خاک در محل T1 و T2 بود، بنابراین این موضوع باعث می‌شود که ضرایب ثابت متغیرهای تشکیل دهنده توابع انتقالی به دست آمده در یک منطقه قابل استفاده برای منطقه دیگر نباشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که توابع انتقالی به دست آمده فقط در محل اشتقاق خود دارای دقت مناسب هستند و امکان استفاده از این توابع در خارج از منطقه بدون واسنجی میسر نیست.

### نتیجه‌گیری

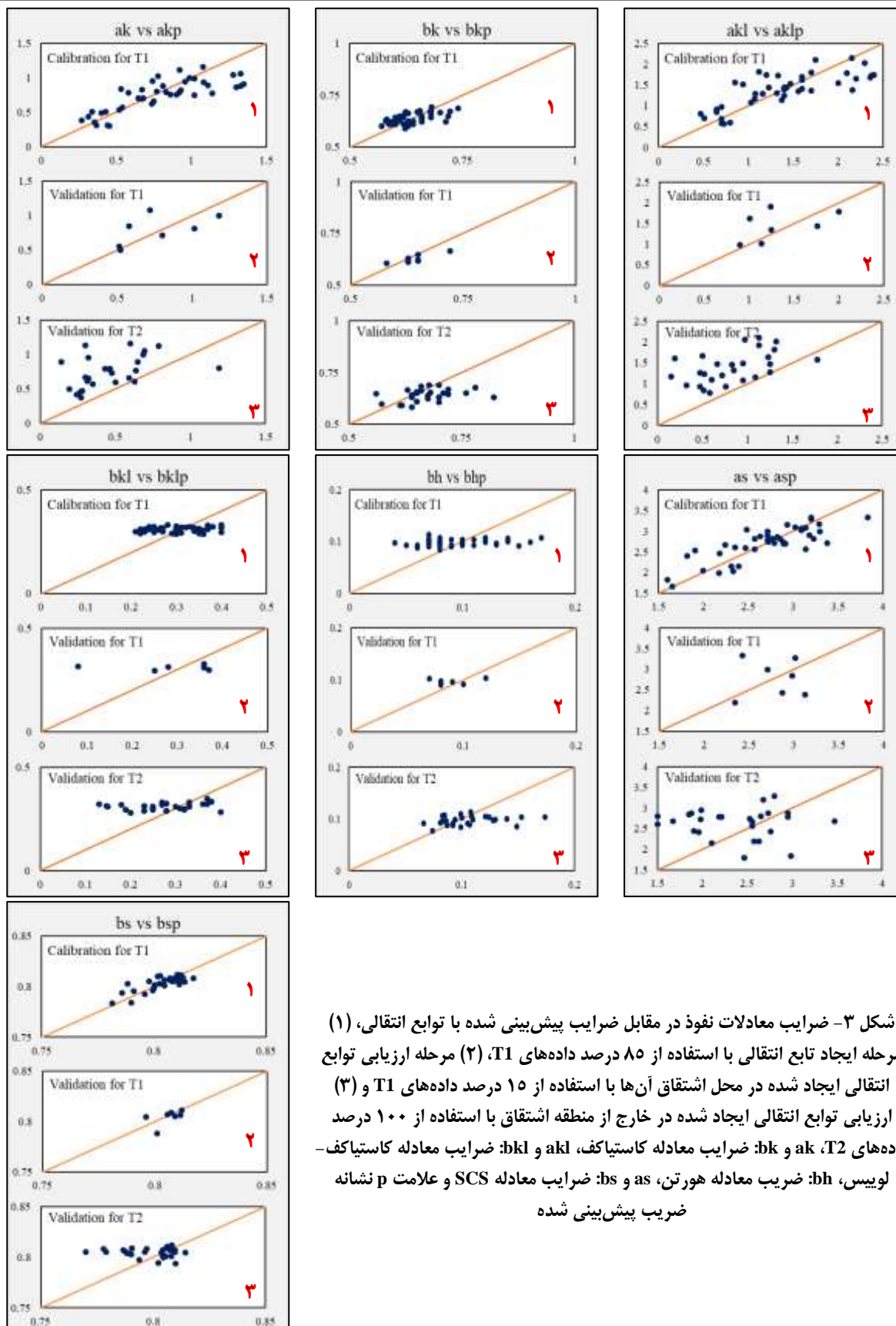
در این پژوهش به بررسی امکان برآورد توابع انتقالی تخمین ضرایب معادلات نفوذ آب به خاک کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس، هورتن و سازمان حفاظت خاک آمریکا با استفاده از ویژگی‌های

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری سنجش توابع انتقالی ضرایب معادلات نفوذ

	ak	bk	akl	bkl	bh	as	bs
$R^2[c]$	0.61	0.36	0.55	0.04	0.04	0.59	0.66
$R^2[vt1]$	0.93	0.4	0.86	0.05	0.05	0.3	0.28
$R^2[vt2]$	0.17	0.11	0.23	0.02	0.08	0.01	0.01
RMSE[c]	0.19	0.03	0.28	0.06	0.03	0.31	0.00
RMSE[vt1]	0.06	0.03	0.15	0.06	0.02	0.34	0.01
RMSE[vt2]	0.39	0.06	0.65	0.12	0.03	0.67	0.01
nRMSE[c]	24.62	5.46	27.01	20.38	30.99	11.41	0.6
nRMSE[vt1]	7.62	4.62	11.47	19.51	19.21	12.38	0.78
nRMSE[vt2]	84.79	9.37	78.44	28.88	24.55	28.16	1.76
GMER[c]	1.02	1.00	1.02	1.01	1.07	1.01	1.00
GMER[vt1]	0.97	1.01	1.01	0.93	1.01	1.00	1.00
GMER[vt2]	1.05	0.96	1.07	1.05	0.94	1.17	1.01

ak و bk: ضرایب معادله کاستیاکف، akl و bkl: ضرایب معادله کاستیاکف-لوییس، bh: ضریب معادله هورتن، as و bs: ضرایب معادله SCS. [c]: مرحله

برازش، [vt1]: مرحله ارزیابی در T1 و [vt2]: مرحله ارزیابی در T2



شکل ۳- ضرایب معادلات نفوذ در مقابل ضرایب پیش‌بینی شده با توابع انتقالی، (۱) مرحله ایجاد تابع انتقالی با استفاده از ۸۵ درصد داده‌های T1، (۲) مرحله ارزیابی توابع انتقالی ایجاد شده در محل اشتقاق آن‌ها با استفاده از ۱۵ درصد داده‌های T1 و (۳) ارزیابی توابع انتقالی ایجاد شده در خارج از منطقه اشتقاق با استفاده از ۱۰۰ درصد داده‌های T2، ak و bk: ضرایب معادله کاستیاکف، akl و bkl: ضرایب معادله کاستیاکف-لوییس، bh: ضریب معادله هورتن، as و bs: ضرایب معادله SCS و علامت p نشانه ضریب پیش‌بینی شده



نیشابوری، م.، فاخری فرد، ا.، قرسادی زاده، د.، صادقیان، ن. و خیری، ج. ۱۳۸۸. ضرایب مدل های نفوذ فیلیپ، کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح شده بر مبنای جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اولیه خاک. مجله دانش آب و خاک. ۱-۱۹.

Assouline, S. 2006. Modeling the relationship between soil bulk density and the hydraulic conductivity function. *Vadose Zone Journal*. 5(2): 697-705.

Bannayan, M and Hoogenboom, G. 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crop Research*. 111:290-302.

Ben-Hur, M. and Assouline, S. 2002. Tillage effects on water and salt distribution in a Vertisol during effluent irrigation and rainfall. *Agronomy Journal*. 94(6): 1295-1304.

Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advanced Soil Science*. 9. 177-213.

Brady, N.C. and Weil, R.R. 1996. The nature and properties of soils. Prentice-Hall Inc.

Chowdary, V.M., Damodhara-Rao M. and Jaiswal, C.S. 2006. Study of infiltration process under different experimental conditions. *Agricultural water management*. 83(1-2): 69-78.

Corradini, C., Morbidelli, R., Flammioni, A. and Govindaraju, R.S. 2011. A parameterized model for local infiltration in two-layered soils with a more permeable upper layer. *Hydrology*. 396(3-4): 221-232.

Deborah, A.M. and Moody, J.A. 2001. Comparison of soil infiltration rates in burned and unburned mountainous watersheds. *Hydrological Process*. 15(15): 2893-2903.

Ehlers, W. 1975. observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil. *Soil Science*. 119(3): 242-249.

Gee, G.W. and Or, D. 2002. Particle-size analysis. In: Dane J.H., and Topp G.C. (Eds.), *Methods of soil analysis- Part 4. SSSA Book Series No. 5. SSSA, Madison*. 255-293.

Ghorbani-Dashtaki, GH., Homaei, M. and Loiskandl, W. 2016. Towards using pedotransfer functions for estimating infiltration parameters, *Hydrological Sciences Journal*. 61(8): 1477-1488.

Green, W.H. and Ampt, G.A. 1911. Studies on soil physics. *The Journal of Agricultural Science*. 4(1): 1-24. doi:10.1017/S002185960001441.

Grossman, RB. and Reinsch, TG. 2002. Bulk density and linear extensibility. In: Dane JH, Topp CG (eds) *Methods of soil analysis: part 4, physical methods SSSA Book Ser. 5.4. SSSA, Madison*. 201-228

ایجاد توابع انتقالی (در T1) برای همه ضرایب معادلات نفوذ (به غیر از توان معادلات کاستیاکف-لوییس و هورتن) با دقت قابل قبول امکان پذیر بود و دقت پیش بینی در مرحله ارزیابی در محل شکل-گیری شان (درون یابی)، در محدوده مرحله برازش به دست آمد. در مرحله ارزیابی خارج از منطقه اشتقاق (برون یابی) دقت توابع انتقالی کاهش زیادی نشان داد به طوری که بازه تغییرات  $R^2$  از ۰/۰۰ تا ۰/۲۶، بازه تغییرات nRMSE از ۱/۷۶ تا ۸۰/۹۳ و بازه تغییرات GMER از ۰/۹۴ تا ۱/۷۳ به دست آمد. بنابراین نتایج نشان داد که توابع انتقالی به دست آمده فقط در محل اشتقاق خود دارای دقت مناسب هستند و امکان استفاده از این توابع در خارج از منطقه بدون واسنجی میسر نیست. که دلیل اصلی آن همبستگی متفاوت ضرایب معادلات نفوذ با ویژگی های فیزیکی خاک در مکان های مختلف بود. لذا پیشنهاد می شود قبل از بکار گرفتن این گونه توابع واسنجی صورت گیرد.

## منابع

ثامنی، ع.، پاکجو، م.، موسوی، ع. و کامکار، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی چند رابطه نفوذ آب به خاک با کاربرد آب های شور و سدیمی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸(۲). ۳۹۵-۴۰۸.

سپهوند، ع.، طایبی-سمیرمی، م.، میرنیا، س. و مرادی، ح. ۱۳۹۰. ارزیابی حساسیت مدل های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک. آب و خاک. ۲۵(۲).

شاکر، پ.، خداوردیلو، ح. و ممتاز، ح. ۱۳۹۶. آزمون ورودی های جدید برای برآورد هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک. تحقیقات کاربردی خاک. ۵(۱).

فاخر، ا.، وفاخواه، م. و صادقی، ح. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد مدل های مختلف نفوذ تجمعی در کاربری ها و بافت های مختلف خاک با استفاده از شبیه ساز باران. دانش آب و خاک. ۲۴(۱). ۱۸۳-۱۹۳.

قربانی، ش.، همایی، م. و مهدیان، م. ۱۳۸۸. برآورد پارامترهای نفوذ آب به خاک با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی. مجله آب و خاک. ۲۳-۱.

محمدی، م. و رفاهی، ح. ۱۳۸۴. تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳۶(۶). ۱۳۹۱-۱۳۹۸.

نشاط، ع. و پاره کار، م. ۱۳۸۶. مقایسه روش های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۴(۳): ۱۸۶-۱۹۶.

- Pieri, C.J.M.G. 1992. Fertility of Soils: A Future for Farming in the West African Savannah. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Punamia, B.C., Jain, A.K. and Jain, A.K. 2005. Soil mechanics and foundations (16th thoroughly revised and enlarged edition). Laxmi Pub. House, New Delhi, p 8170087910. ISBN: 9788170087915.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of fluid through porous mediums. Physics. 1:318-333.
- Sepaskhah, A. and Tafteh, A. 2013. Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution. Archives of Agronomy and Soil Science. 59(1). doi: 10.1080/03650340.2011.602632.
- SCS (Soil Conservation Service). 1972. National engineering handbook, section 4: hydrology. Washington, DC: Department of Agriculture, 762.
- Shirazi, M.A. and Boersma, L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. Soil Science Society of America Journal. 48: 142-147.
- Šimůnek, J., Jarvis, N.J., van Genuchten, M.T. and Gärdenäs, A. 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. Journal of Hydrology 272(1). 14-35.
- Patle, G.H., Sikar, T.T., Singh-Rawat, K. and Singh, S. 2019. Estimation of infiltration rate from soil properties using regression model for cultivated land. Geology, Ecology, and Landscapes. 3(1). <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1481633>.
- Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. J. Soil Sci. 37: 29-37.
- Wangemann, S., Kohl, R. and Molumeli, P. 2000. Infiltration and percolation influenced by antecedent soil water content and air entrapment. TRANSACTIONS of the ASAE 43(6), 1517-1523.
- Hatt, B. and Le-Coustumer, S. 2008. PRACTICE NOTE 1: In Situ Measurement of Hydraulic Conductivity.
- Hillel, D. 1982. Introduction to soil physics, 364. Academic press New York.
- Horton, R.E. 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society of America Journal. Proc. 5:399-417.
- Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from the dynamic point of view for the purposes of amelioration. Transactions of the Sixth Committee of the International Society of Soil Science. 1: 7-21.
- Lal, R. and Shukla, M.K. 2004. Principles of soil physics. CRC Press.
- Lin, H., McInnes, K., Wilding, L. and Hallmark, C., 1999. Effects of soil morphology on hydraulic properties II. Hydraulic pedotransfer functions. Soil Science Society of America Journal. 63(4): 955-961.
- Moroke, T., Dikinya, O. and Patrick, C. 2009. Comparative assessment of water infiltration of soils under different tillage systems in eastern Botswana. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 34(4): 316-323.
- Navabian, M., Liaghat, A.M. and Homaei, M. 2004. Estimating soil saturated hydraulic conductivity using pedotransfer functions. Journal of Agricultural Engineering Research. 4(16): 1-11.
- Pandey, P.K. and Pandey, V. 2018. Estimation of infiltration rate from readily available soil properties (RASPs) in fallow cultivated land. Sustainable Water Resources Management. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0268y>.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A. and Yang X.M. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. Geoderma. 152(3): 252-263.
- Philip, J.R. 1957. Theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. Soil Science. 83: 435-448. doi:10.1097/00010694-195706000-00003.

## Derivation and Validation of Parametric Pedotransfer Functions of Soil Water Infiltration in Different Regions

R. Barideh<sup>1</sup>, S. Besharat<sup>2\*</sup>, H. Khodaverdiloo<sup>3</sup>  
Received: Jan. 24, 2021 Accepted: Apr. 24, 2021

### Abstract

Soil water Infiltration plays an important role in the water cycle of nature. However, since the direct measurement of soil water infiltration is laborious, time-consuming and expensive. Therefore, in this study was conducted to investigate the possibility of estimating the coefficients of water infiltration equations such as Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Horton and USA Soil Conservation Service (SCS) using readily available soil properties and to evaluate the validity of these functions outside of their derivation regions. Therefore, soil physical properties and cumulative infiltration were measured in two different regions (T1 and T2). Parametric functions were derived using T1 location measurements and validation was performed using independent T2 measurements. Cumulative infiltration was measured using double rings with three replications at 78 points. Parametric functions were created using multiple linear regression. The highest accuracy of parametric functions in the derivation stage was related to SCS equations with the coefficient of explanation ( $R^2$ ) equal to 0.66 and the lowest accuracy with the value of  $R^2$  equal to 0.04 was related to the power of Horton equation. In the validation stage, the accuracy of the functions showed a large decrease.  $R^2$  changes range from 0.00 to 0.26, normalized root mean square error (nRMSE) range from 1.76 to 80.93 and geometric mean error ratio (GMER) range from 0.94 to 1.73 Was obtained. Therefore, in this study, the use of parametric functions to estimate the coefficients of infiltration equations outside of their derivation regions was not efficient.

**Keywords:** Cumulative infiltration, Infiltration equations, Multiple linear regression, Double ring

1- Ph.D Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

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

3- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(\*- Corresponding Author Email: sina323@yahoo.com)