

## مقاله علمی - پژوهشی

# بررسی تغییرات ضرایب معادلات نفوذ و امکان کاربرد آن‌ها در رطوبت‌ها و چگالی‌های مختلف

رحمان باریده<sup>۱</sup>، فرشته نسیمی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۸

### چکیده

نفوذ یک فرآیند کلیدی است که در برنامه‌ریزی، طراحی، مدیریت و بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ بنابراین انتخاب یک مدل نفوذ مناسب در بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی و بررسی چرخه آب در مقیاس کوچک و بزرگ ضروری است. هدف از این پژوهش بررسی تغییرات ضرایب معادلات نفوذ کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس و هورتن نسبت به تغییر هم‌زمان رطوبت اولیه و چگالی ظاهری خاک و تأثیر آن بر عملکرد معادلات نفوذ در خاک‌های مختلف بود. برای این منظور داده‌های نفوذ تجمعی در هشت بافت خاک، سه چگالی ظاهری شامل ۱/۳، ۱/۴ و ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و پنج سطح رطوبت حجمی ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ با استفاده از HYDRUS-1D تهیه گردید. به‌منظور بیان تأثیر تغییرات ضرایب معادلات نفوذ بر کارایی آن معادلات در رطوبت‌ها و چگالی‌های مختلف، ابتدا ضرایب معادلات برای همه سری‌های نفوذ تجمعی محاسبه (مرحله برازش) و در مرحله بعد در یک رطوبت و چگالی مشخص برای هر خاک محاسبه و برای رطوبت‌ها و چگالی‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفت (مرحله ارزیابی). بر اساس نتایج حساسیت ضرایب معادلات نفوذ نسبت به تغییرات رطوبت و چگالی ظاهری از زیاد به کم به ترتیب ضریب معادله کاستیاکف (ak)، ضریب معادله کاستیاکف-لوییس (akl)، توان معادله کاستیاکف (bk)، ضریب معادله هورتن (bh) و توان معادله کاستیاکف-لوییس (bkl) به دست آمد. میانگین افزایش RMSE معادله کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس و هورتن در مرحله ارزیابی به ترتیب ۳/۲۵، ۳۴ و ۲/۸ برابر مرحله برازش به دست آمد؛ بنابراین کمترین حساسیت در عملکرد معادله هورتن و بیشترین حساسیت در معادله کاستیاکف-لوییس رخ داده است.

### واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، معادلات نفوذ، نفوذ تجمعی، HYDRUS-1D

### مقدمه

گرین-آپت (۱۹۱۱) و فیلیپ (۱۹۵۷) و تجربی مانند معادلات کاستیاکف (۱۹۳۲)، کاستیاکف-لوییس (۱۹۴۸)، سازمان حفاظت خاک آمریکا (۱۹۷۲) قرار گرفته‌اند. استفاده و حل معادلات تحلیلی و فیزیکی به‌سادگی امکان‌پذیر نبوده و نیازمند صرف هزینه و وقت زیاد است؛ بنابراین در عمل از معادلات تجربی نفوذ که به نسبت دقیق و ساده هستند، بیشتر استفاده می‌شود. میرزایی و همکاران در مطالعه‌ای، توانایی هشت مدل نفوذ مختلف شامل گرین-آپت، فیلیپ، SCS، کاستیاکف، کاستیاکف اصلاح‌شده (MK)، هورتن، Swartzendruber و کاستیاکف اصلاح‌شده بازنگری شده (RMK) را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل RMK بهترین مدل برای خاک‌های لومی، لوم رسی و لوم رسی سیلتی بود، اما مدل MK بهترین مدل برای خاک‌های لوم سیلتی بود (Mirzaee et al., 2014). فرید و همکاران به بررسی دقت معادلات کاستیاکف، کاستیاکف-لوییس و فیلیپ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که معادله فیلیپ بهترین عملکرد را دارد (Farid et al., 2019). در بررسی‌های جوادی و همکاران (۱۳۹۶) در شرایط مختلف کیفیت آب آبیاری معادله هورتن مناسب‌ترین مدل و کاستیاکف ضعیف‌ترین مدل نفوذ بود. در تحقیقات

نفوذ آب به منطقه اشباع‌نشده یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیک است (Iovino et al., 2017) و با رواناب سطحی، حرکت آب در خاک و تولید محصولات زراعی رابطه نزدیک دارد (basha, 2011). نفوذ یک فرآیند کلیدی است که می‌تواند برای برنامه‌ریزی، طراحی، مدیریت و بهینه‌سازی سیستم‌های آبیاری در نظر گرفته شود (Rahman et al., 2016 و Patle et al., 2019)؛ بنابراین انتخاب یک مدل نفوذ مناسب در بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی و بررسی چرخه آب در مقیاس کوچک و بزرگ ضروری است. در این زمینه معادلات مختلفی ارائه شده و در سه دسته تحلیلی مانند معادله ریچاردز (۱۹۳۱)، نیمه‌تحلیلی یا فیزیکی مانند معادلات

۱ دانشجوی دکتری مهندسی آب، گرایش آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی آب، گرایش آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

(\*- نویسنده مسئول: (Email:Fereshteh\_nasimi@yahoo.com)

رسی (CL)، لوم رسی سیلتی (SiCL) و رس سیلتی (SiC)، سه چگالی ظاهری شامل ۱/۳، ۱/۴ و ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب و پنج سطح رطوبت حجمی ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ (۱۲۰ سری داده نفوذ تجمعی) با استفاده از HYDRUS-1D تهیه گردید. این مدل در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا، دانشگاه کالیفرنیا طراحی و ارائه شده است (Šimůnek et al., 2008) که به صورت گسترده در بررسی انتقال آب و املاح قرار گرفته است و دقت آن مورد تأیید پژوهشگران است (Yiang، Dontsova et al., 2009؛ Jacques et al., 2008؛ et al., 2010؛ Ebrahimian et al., 2012؛ باریده و همکاران ۱۳۹۶، محمدی و دلبری ۱۳۹۴). برای تهیه داده‌های نفوذ، پروفیل خاک به عمق ۲۰۰ سانتی‌متر با شرایط مرزی بار آبی ثابت در بالادست و زهکشی آزاد در پایین دست در نظر گرفته شد (شکل ۱). همچنین از مدل هیدرولیکی وان گنوختن-معلم استفاده گردید (Van Genuchten, 1980) (معادله ۱ و ۲). مشخصات هیدرولیکی خاک با استفاده از پایگاه داده Rosseta بر اساس بافت و چگالی ظاهری خاک تخمین زده شد. خلاصه مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h|^n\right)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (1)$$

$$k(h) = K_s S_e \left[ 1 - \left( 1 - S_e^m \right)^2 \right], \quad S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (2)$$

که در آن،  $h$  بار فشار آب در خاک (cm)،  $\theta_r$  رطوبت باقیمانده خاک (-)،  $\theta_s$  رطوبت اشباع خاک (-)،  $\alpha$  (1/cm)،  $n$  و  $m$  پارامترهای شکل معادله،  $K_s$  هدایت آبی اشباع (cm/min) و  $S_e$  اشباع نسبی است.

#### معادلات نفوذ

در این پژوهش معادلات کاستیاکف، کاستیاکف-لوئیس و هورتن مورد بررسی قرار گرفتند. معادلات و شرح ضرایب آن‌ها در زیر بیان شده است.

#### معادله کاستیاکف

$$I = akt^{bk} \quad (3)$$

سیهاگ و همکاران مدل کاستیاکف لوئیس بهترین نتایج را نشان داد (Sihag et al., 2017).

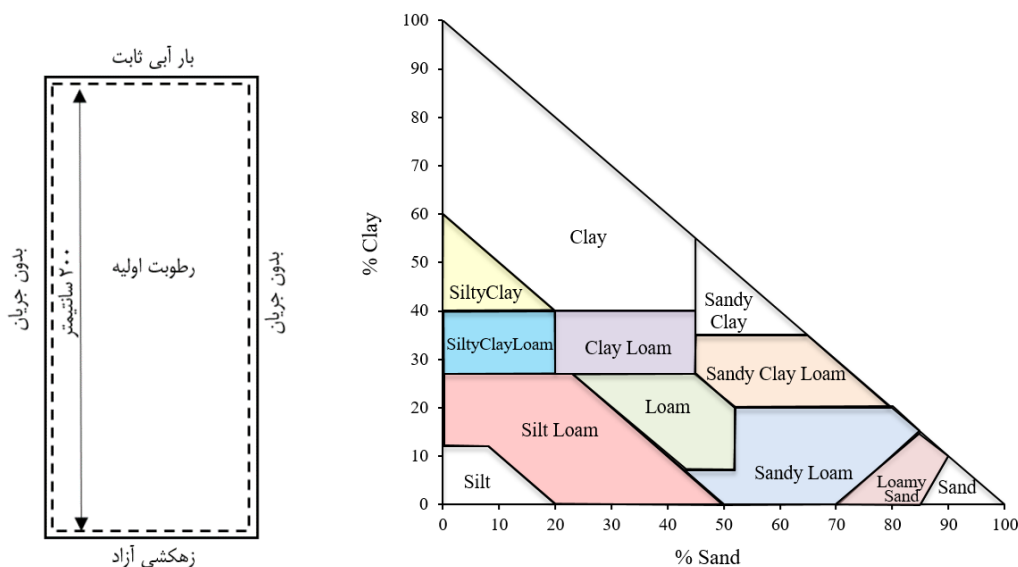
با بررسی تحقیقات صورت گرفته مشخص می‌شود که معادلات نفوذ تحت شرایط مختلف خاک واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند و نیاز به بررسی حساسیت آن‌ها نسبت به شرایط خاک در زمان اندازه‌گیری است. در این راستا واعظی و همکاران (۱۳۹۸) مدل هورتن را برای بررسی تغییرات نفوذ آب به خاک تحت شرایط مختلف رطوبتی پیشنهاد کردند. سپهوند و همکاران (۱۳۸۹) به ارزیابی حساسیت معادله‌های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک پرداختند. نتایج نشان داد که معادله کاستیاکف دقیق‌ترین برآوردها و معادله سازمان حفاظت خاک آمریکا ضعیف‌ترین برآوردها را داشت. جواد و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که مدل هورتن حساس‌ترین مدل نسبت به تغییر بار آبی و رطوبت اولیه بود. در تحقیقات دربندی و همکاران (۱۳۸۴) مدل فیلیپ کمترین حساسیت و مدل کاستیاکف-لوئیس بیشترین حساسیت را نسبت به رطوبت اولیه خاک داشتند. نیشابوری و همکاران (۱۳۸۸) میزان وابستگی ضرایب مدل‌های نفوذ فیلیپ، کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح شده به جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اولیه خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در هر سه مدل وابستگی ضرایب به تغییرات چگالی ظاهری به مراتب بیشتر از تبعیت آن‌ها از رطوبت اولیه بود. محمد زاده هایلی و حیدر پور (۱۳۹۸) تأثیر رطوبت اولیه خاک بر پارامترهای معادله تجربی کاستیاکف را در دو ستون خاک ماسه‌ای با سه رطوبت متفاوت بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که توان این معادله مقدار ثابتی بوده و مستقل از مقدار رطوبت اولیه خاک؛ ولی مقدار ضریب این معادله به شدت متأثر از رطوبت اولیه خاک است.

بنابراین بررسی مطالعات صورت گرفته نشان داد که در مناطق مختلف و شرایط متفاوت خاک حساسیت و کارایی مدل‌های نفوذ متفاوت بوده است. اما در پژوهش‌هایی که به این موضوع پرداخته‌اند به دلیل دشواری، هزینه و زمان بر بودن آزمایش‌های صحرائی از تعداد محدودی آزمایش استفاده شده است. همچنین تأثیر تغییرات ضرایب بر کارایی معادلات نفوذ بررسی نشده است. لذا هدف از انجام این تحقیق بررسی حساسیت ضرایب معادلات نفوذ کاستیاکف، کاستیاکف-لوئیس و هورتن نسبت به تغییر هم‌زمان رطوبت اولیه و چگالی ظاهری خاک و تأثیر آن بر عملکرد معادلات نفوذ با استفاده از داده‌های نفوذ تجمعی به دست آمده از نرم‌افزار HYDRUS-1D بود.

#### مواد و روش‌ها

##### داده‌های نفوذ تجمعی

نفوذ تجمعی در هشت بافت خاک شامل شن لومی (LSa)، لوم شنی (SaL)، لوم (L)، لوم سیلتی (SiL)، لوم رسی شنی (SaCL)، لوم



شکل ۱- بافت خاک‌های مورد بررسی (هاشور شده) و پروفیل یک‌بعدی خاک در آزمایش‌های نفوذ تجمعی

جدول ۱- خلاصه مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی خاک‌های مورد مطالعه

$\alpha$ (1/cm)	n (-)	$\theta_s$ (-)	$\theta_f$ (-)	هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/day)	چگالی ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	
۰/۰۰۵	۱/۳۳۸	۰/۳۶	۰/۰۴۲	۴/۵	۱/۳	۵	۱۳	۷	حداقل
۰/۰۰۹	۱/۳۹۴	۰/۴۰	۰/۰۴۷	۹/۳	۱/۳	۱۱	۱۶	۱۵	چارک اول
۰/۰۲۰	۱/۵۱۱	۰/۴۲	۰/۰۶۸	۴۴/۲	۱/۴	۲۴	۳۶	۴۰	میانگین
۰/۰۲۷	۱/۵۸	۰/۴۵	۰/۰۸۸	۴۶/۰	۱/۵	۳۵	۵۳	۶۴	چارک سوم
۰/۰۷۶	۱/۸۹۷	۰/۵۰	۰/۰۹۹	۳۳۷/۳	۱/۵	۴۵	۵۵	۸۲	حداکثر
۰/۰۱۶	۰/۱۴۷	۰/۰۳	۰/۰۱۹	۶۰/۳	۰/۰۸	۱۳	۱۶	۲۵	انحراف معیار

### تعیین ضرایب معادلات نفوذ

برای محاسبه ضرایب معادلات نفوذ، معادلات مورد بررسی به داده‌های نفوذ تجمعی در هر آزمایش برآزش داده شدند. این مرحله با استفاده از نرم‌افزار اکسل و نرم‌افزار آماری STATA به روش حداقل کردن مربعات خطا صورت گرفت. در مرحله بعد تغییرات ضرایب به دست آمده نسبت به چگالی ظاهری و رطوبت حجمی مورد بررسی قرار گرفت.

### ارزیابی دقت معادلات

به منظور ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ آب به خاک از شاخص‌های زیر استفاده گردید.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

که در آن،  $a_k$  و  $b_k$  ضرایب معادله،  $t$  زمان و بر حسب دقیقه،  $I$  نفوذ تجمعی بر حسب سانتی‌متر است.

### معادله کاستیاکف-لوییس

$$I = a_k t^{b_k} + i_f t \quad (4)$$

که در آن،  $a_k$  و  $b_k$  ضرایب معادله،  $i_f$  برابر شدت نفوذ نهایی بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه،  $t$  زمان و بر حسب دقیقه،  $I$  نفوذ تجمعی بر حسب سانتی‌متر است.

### معادله هورتن

$$I = i_f t + \frac{(i_0 - i_f)}{bh} (1 - e^{-bht}) \quad (5)$$

که در آن،  $bh$  ضریب معادله،  $i_f$  و  $i_0$  مقادیر شدت نفوذ نهایی و اولیه بر حسب سانتی‌متر بر دقیقه،  $t$  زمان و بر حسب دقیقه،  $I$  نفوذ تجمعی بر حسب سانتی‌متر است.

رطوبت خاک قرار داشته است. در شکل (۲) حساسیت bk در مقابل تغییرات  $\theta_v$  و pb بدون در نظر گرفتن بافت خاک نشان داده شده است. کمترین مقدار bk زمانی رخ داد که چگالی در بیشترین مقدار و رطوبت در کمترین مقدار خود قرار داشتند.

شکل (۳) الف و ب) تغییرات ضریب کاستیاکف-لوئیس (akl) را نسبت به تغییرات رطوبت و چگالی ظاهری خاک نشان می‌دهد. ضریب akl روندی مشابه با ضریب ak داشت و با افزایش رطوبت و چگالی ظاهری روند کاهشی نشان داد. بیشترین حساسیت akl در خاک لومی-رسی مشاهده گردید. همبستگی بین ak و akl برابر ۰/۷۷ و همچنین همبستگی منفی akl با  $\theta_v$  و pb به ترتیب برابر ۰/۵۷- و ۰/۴۷- بود که بیانگر حساسیت زیاد آن نسبت به تغییرات  $\theta_v$  و pb است. شکل (۳) ج و د) روند تغییرات توان معادله کاستیاکف لوئیس (bkl) را بیان می‌کند. بر اساس نمودارها این پارامتر روند مشخصی را نسبت به تغییرات رطوبتی و چگالی ظاهری خاک نشان نداد. این مورد بر اساس همبستگی bkl با رطوبت (۰/۰۲) و چگالی ظاهری (۰/۰۴) نیز قابل تفسیر است.

توان معادله هورتن (bh) نیز همانند توان معادله کاستیاکف-لوئیس روند مشخصی نسبت به تغییرات رطوبت و چگالی نداشت (شکل ۴). به‌طور کلی رابطه منفی و ضعیفی با pb (مقدار همبستگی برابر ۰/۰۲-) مشاهده گردید و بیشتر تحت تأثیر رطوبت خاک (با همبستگی ۰/۲۲-) بود (جدول ۲). علی‌رغم تغییرات اندک bh نسبت به تغییرات  $\theta_v$  و pb نمی‌توان بیان کرد که این موضوع باعث افزایش دقت معادله در رطوبت‌ها و چگالی‌های مختلف می‌شود؛ زیرا در شکل معادله هورتن از نفوذ نهایی و نفوذ اولیه استفاده شده است که این پارامترها با افزایش رطوبت و چگالی ظاهری تغییر می‌کنند. همچنین ابیانه و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی بر اساس آزمایش‌های صحرایی بیان کردند که با افزایش رطوبت سرعت نفوذ اولیه و نهایی کاهش پیدا کرد.

بنابراین برای بررسی تأثیر تغییرات ضرایب معادلات نفوذ بر امکان کاربرد آن معادلات در رطوبت‌ها و چگالی‌های مختلف دو مورد بررسی گردید. در حالت اول ضرایب معادلات برای همه سری‌های نفوذ تجمعی محاسبه گردید و در حالت دوم ضرایب معادلات به‌دست‌آمده در یک رطوبت، چگالی و خاک مشخص برای رطوبت و چگالی‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از شاخص RMSE و nRMSE به مقایسه این دو حالت پرداخته شد.

در حالت اول عملکرد کلی معادلات نفوذ در برازش به داده‌های نفوذ تجمعی در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس nRMSE و  $R^2$  عملکرد معادله کاستیاکف لوئیس در همه خاک‌ها بهتر از معادلات دیگر بود. در مرحله بعد معادله کاستیاکف و هورتن قرار گرفتند. مقدار nRMSE معادلات کاستیاکف-لوئیس و کاستیاکف کمتر از ۱۰٪ و برای معادله هورتن در بازه ۴/۶ تا ۱۶/۶ متغیر بود؛ بنابراین دقت همه

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$nRMSE = 100 \times \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (8)$$

ضریب تبیین ( $R^2$ ) بیان‌کننده روند شبیه‌سازی است و هرچه به عدد یک نزدیک‌تر باشد روند شبیه‌سازی دقیق‌تر است. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بیان‌کننده تفاوت میان مقدار پیش‌بینی 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 بیان‌کننده وضعیت مدل‌سازی 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 پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰٪ نشان‌دهنده عدم اطمینان به مدل است (جوادی و همکاران ۱۳۹۳).

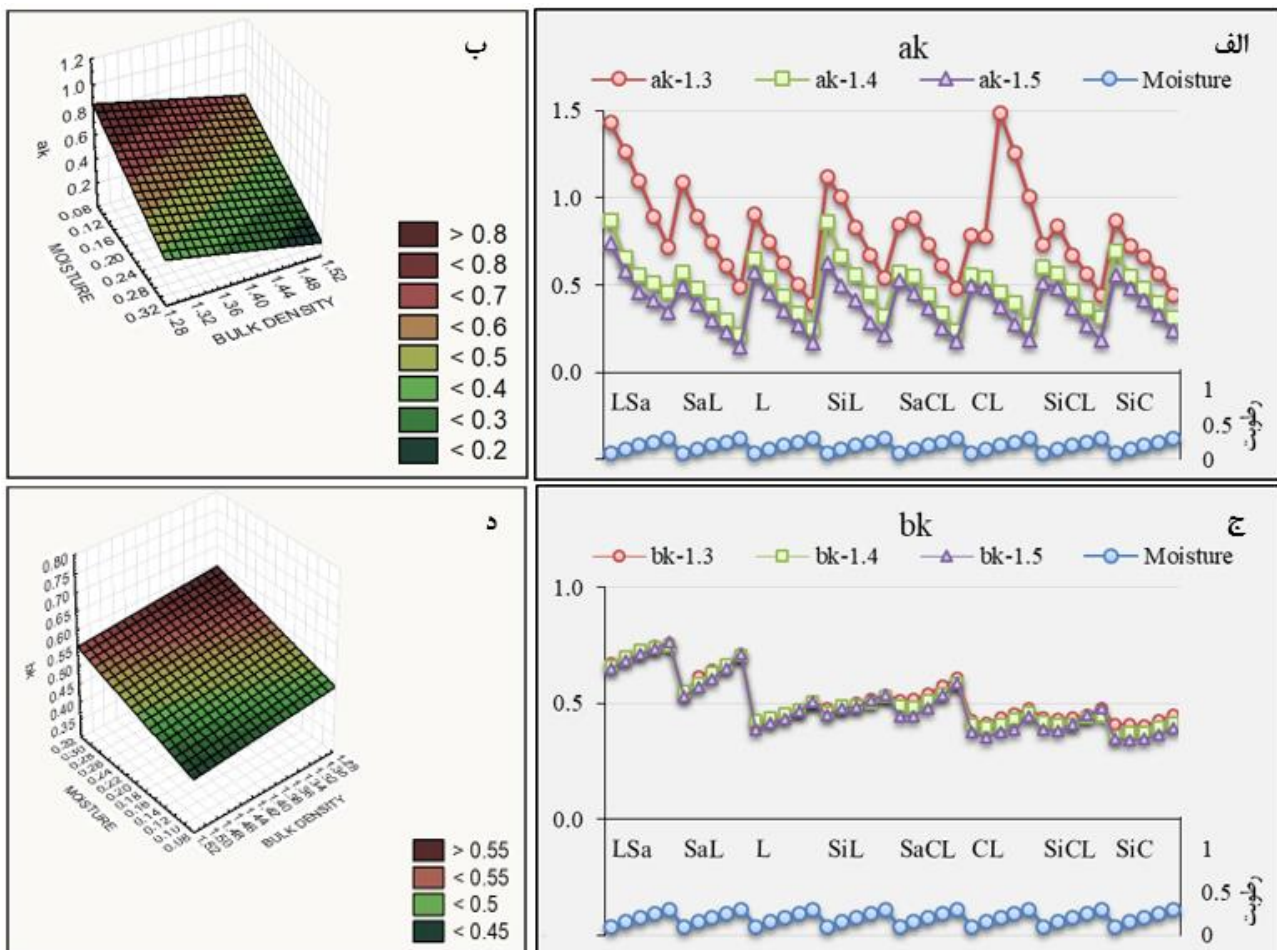
## نتایج و بحث

در شکل (۲) الف) تغییرات ضریب معادله کاستیاکف (ak) نسبت به تغییر رطوبت و چگالی ظاهری در بافت‌های مختلف خاک نشان داده شده است. با توجه به شکل در همه خاک‌ها ak نسبت به افزایش رطوبت و چگالی ظاهری روند کاهشی داشت. بیشترین تغییرات ak در خاک لوم-رسی و لوم-سنی و کمترین تغییرات آن در خاک لوم-رسی-سیلتی مشاهده شد. همبستگی بین ak با رطوبت و چگالی ظاهری به ترتیب برابر ۰/۷۶- و ۰/۴۹- بود (جدول ۲) که بیان‌کننده حساسیت زیاد ak نسبت به تغییرات  $\theta_v$  و pb است. همچنین محمدزاده هابیلی و حیدر پور (۱۳۹۸) در تحقیقی در خاک‌های سنی بیان کردند که مقدار ضریب معادله کاستیاکف به‌شدت متأثر از رطوبت اولیه خاک است. در شکل (۲) ب) تأثیر هم‌زمان  $\theta_v$  و pb بر ak بدون در نظر گرفتن بافت خاک نشان داده شده است. با توجه به این شکل کمترین مقدار ak زمانی رخ می‌دهد که رطوبت و چگالی ظاهری در بیشترین مقدار خود قرار گرفته‌اند.

بر اساس شکل (۲) ج) توان معادله کاستیاکف (bk) با افزایش رطوبت خاک روند افزایشی و با افزایش چگالی ظاهری خاک روند کاهشی جزئی نشان داد. bk در خاک‌های سبک متأثر از رطوبت خاک و در خاک‌های سنگین متأثر از چگالی ظاهری بود، به‌طوری‌که در خاک‌های سبک تغییر چگالی ظاهری و در خاک‌های سنگین تغییرات رطوبت تأثیری بر bk نداشت. مقدار همبستگی مثبت با رطوبت خاک برابر ۰/۲۸ و همبستگی منفی با چگالی ظاهری برابر ۰/۱۱- به دست آمد (جدول ۲)؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که bk بیشتر تحت تأثیر

اطلاعات جدول، مقدار nRMSE از ۲۸ تا ۵۰ درصد متغیر بود که بیان‌کننده عدم اطمینان به برآورد را نشان می‌دهد. مقدار nRMSE زمانی که ضرایب هر معادله برای هر رطوبت و چگالی محاسبه گردید کمتر از ۱۶ درصد به دست آمد اما در حالت دوم این مقادیر افزایش زیادی نشان دادند. بنابراین امکان کاربرد معادله نفوذ به دست‌آمده در یک رطوبت برای رطوبت‌های دیگر وجود ندارد.

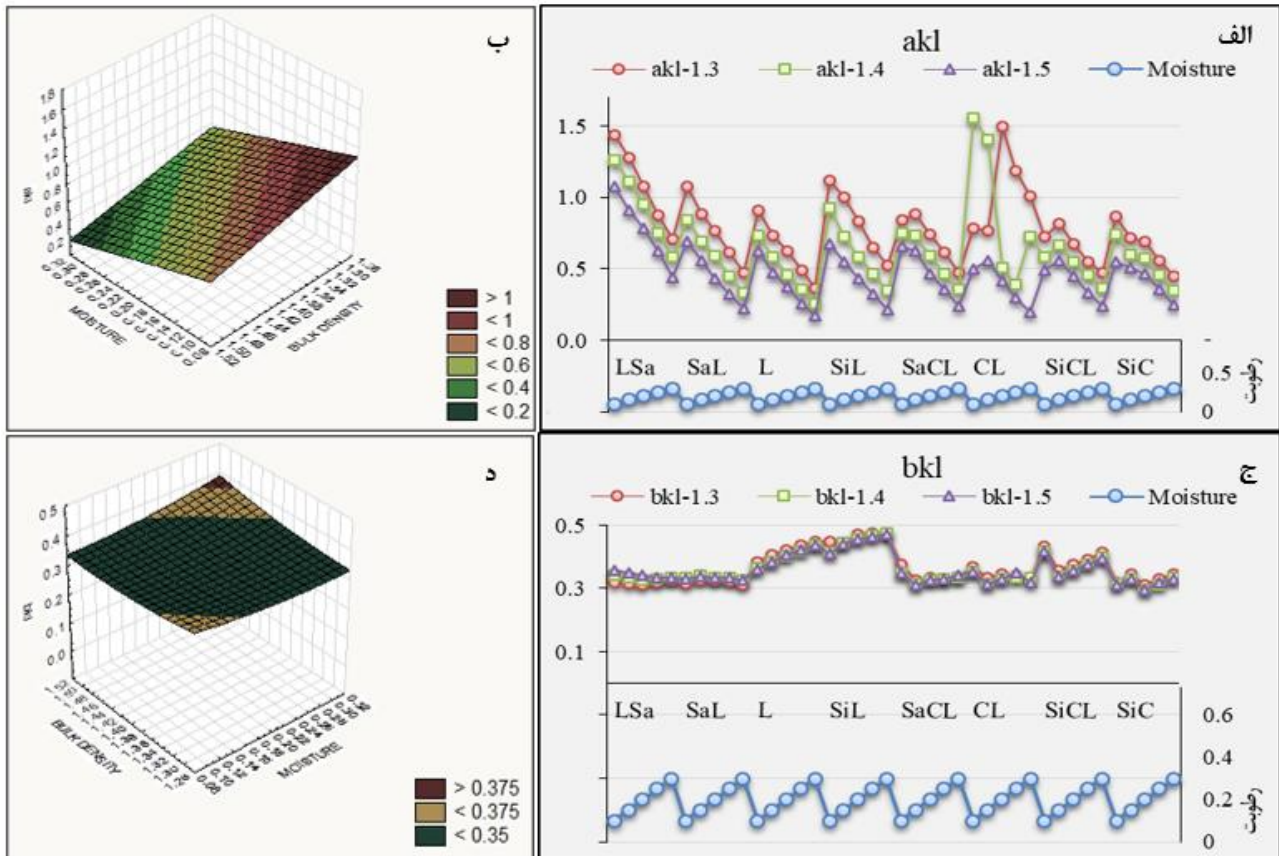
معادلات در رده عالی و مناسب قرار گرفتند. در حالت دوم ضرایب معادلات نفوذ،  $i_0$  و  $i_f$  در هر خاک برای چگالی ظاهری مشخص و رطوبت ۰/۱ محاسبه گردید. در مرحله بعد بدون تغییر آن‌ها، نفوذ تجمعی در رطوبت‌های ۰/۱۵، ۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ پیش‌بینی و با داده‌های اصلی مقایسه شد. مقادیر RMSE و nRMSE این مرحله در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به



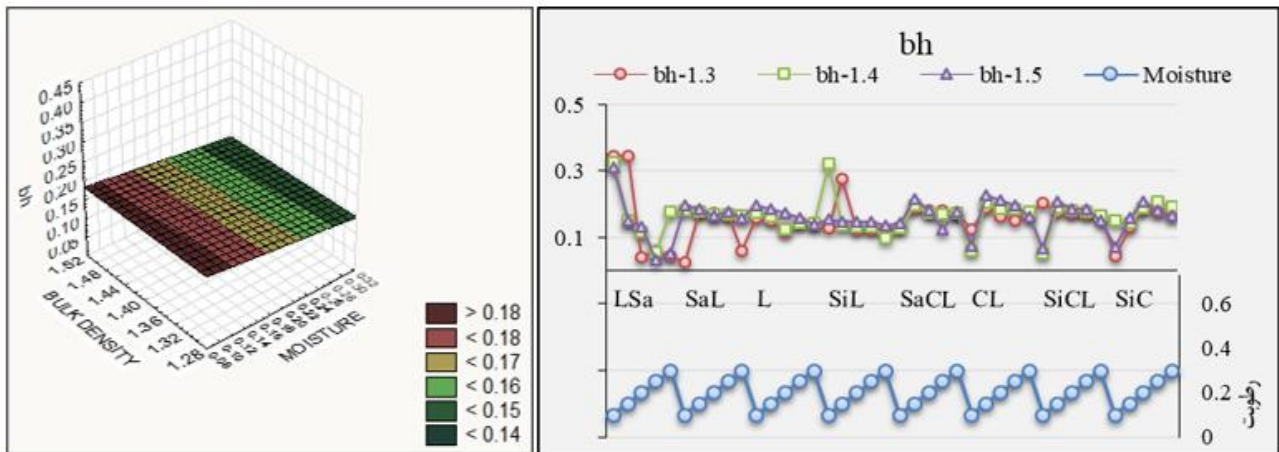
شکل ۲- تغییرات ضرایب معادله کاستیاکف در رطوبت‌ها، چگالی‌ها و خاک‌های مختلف، روند تغییرات ak (الف و ب)، روند تغییرات bk (ج و د)، (پسوند ضرایب معادلات نفوذ نشان‌دهنده چگالی ظاهری خاک است)

جدول ۲- ماتریس همبستگی ضرایب معادلات نفوذ نسبت به رطوبت و چگالی ظاهری

bh	bkl	akl	bk	ak	$\rho_b$	$\theta_v$	
				۱	-۰/۴۹	-۰/۷۶	ak
			۱	-۰/۰۶	-۰/۱۱	-۰/۲۸	bk
		۱	۰/۱۶	۰/۷۷	-۰/۴۷	-۰/۵۷	akl
	۱	-۰/۴۸	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۴	-۰/۰۲	bkl
۱	-۰/۰۹	۰/۲۱	-۰/۱۱	۰/۲۵	-۰/۰۲	-۰/۲۲	bh



شکل ۳- تغییرات ضرایب معادله کاستیاکف-لوئیس در رطوبت‌ها، چگالی‌ها و خاک‌های مختلف، روند تغییرات akL (الف و ب)، روند تغییرات bkL (ج و د)، (پسوند ضرایب معادلات نفوذ نشان‌دهنده چگالی ظاهری خاک است)



شکل ۴- تغییرات ضریب معادله هورتن در رطوبت‌ها، چگالی‌ها و خاک‌های مختلف (پسوند ضرایب معادلات نفوذ نشان‌دهنده چگالی ظاهری خاک است)



جدول ۳- دقت معادلات نفوذ در خاک‌های مختلف در مرحله برازش به داده‌های نفوذ تجمعی

SiC	CL	SiCL	SiL	SaCL	L	SaL	LSa	
۵/۶۳	۶/۱۲	۵/۴۸	۴/۸۲	۷/۵۶	۶/۹۹	۷/۸۱	۸/۵۶	K-nRMSE (%)
۱/۳۴	۴/۲۶	۰/۷۵	۰/۱۷	۰/۴	۴/۷	۰/۱۸	۰/۱۹	KL-nRMSE (%)
۱۱/۸۹	۱۲/۵۹	۱۶/۶	۱۵/۷۱	۹/۸۴	۱۴/۲۸	۴/۶۳	۹/۵۶	H-nRMSE (%)
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	K-R <sup>2</sup> (-)
۱	۰/۹۹	۱	۱	۱	۰/۸۹	۱	۱	KL-R <sup>2</sup> (-)
۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۸۳	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۹۵	H-R <sup>2</sup> (-)

توضیحات: K نماد معادله کاستیاکف، KL نماد معادله کاستیاکف-لوئیس و H نماد معادله هورتن است.

جدول ۴- دقت معادلات نفوذ در خاک‌های مختلف در مرحله ارزیابی

SiL	SiCL	SiC	SaL	SaCL	LSa	L	CL	
۱/۴۳	۰/۸۱	۰/۷۴	۱/۱۷	۰/۹۶	۱/۵۸	۰/۹۹	۰/۷۷	K-RMSE (cm)
۱/۴۱	۰/۸	۰/۷۳	۱/۱	۰/۹۲	۱/۴۱	۰/۹۷	۰/۷۶	KL-RMSE (cm)
۱/۸۹	۱/۶۵	۱/۰۶	۱/۱۸	۱/۴۶	۱/۶۶	۱/۱۷	۰/۸۳	H-RMSE (cm)
۴۱/۰۶	۳۲/۸۶	۳۴/۹۹	۳۵/۲۹	۳۱/۰۱	۲۹/۶۲	۳۹/۴۳	۳۴/۸۹	K-nRMse (%)
۴۰/۸۶	۳۲/۷۶	۳۴/۷۱	۳۴/۴۲	۳۰/۲۵	۳۱/۷۵	۳۸/۹۹	۳۴/۶۶	KL-nRMSE (%)
۴۹/۶۸	۴۹/۷۸	۴۲/۸۲	۳۵/۳۲	۲۸	۳۰/۰۶	۴۴/۳۱	۳۶/۸	H-nRMSE (%)

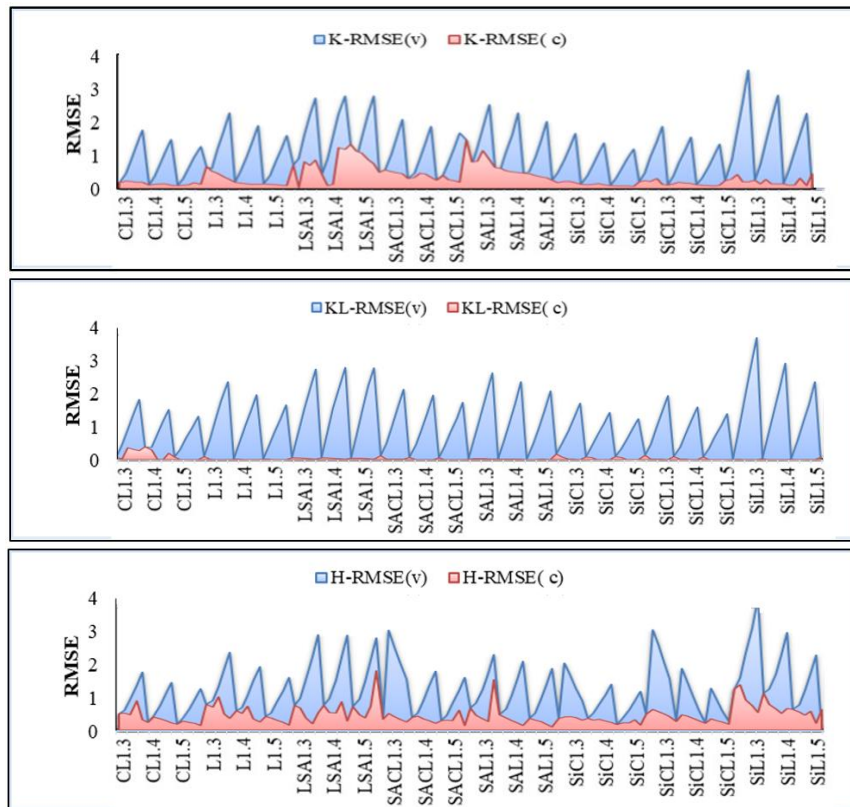
توضیحات: K نماد معادله کاستیاکف، KL نماد معادله کاستیاکف-لوئیس و H نماد معادله هورتن است.

کم به ترتیب ak, akL, bk, bh و bkl به دست آمد. به‌منظور بیان تأثیر حساسیت ضرایب معادلات نفوذ بر کارایی آن معادلات در رطوبت‌ها و چگالی‌های مختلف، ابتدا ضرایب معادلات برای همه داده‌های نفوذ محاسبه (مرحله برازش) و در مرحله بعد سرعت نفوذ اولیه و نهایی و ضرایب معادلات به‌دست‌آمده در یک رطوبت، چگالی و خاک مشخص برای رطوبت‌ها و چگالی‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفت (مرحله ارزیابی). میانگین RMSE معادله کاستیاکف در مرحله برازش و ارزیابی با ۳/۲۵ برابر افزایش به ترتیب برابر ۰/۳۴ و ۱/۱ سانتیمتر، در معادله کاستیاکف-لوئیس با ۳۴ برابر افزایش به ترتیب برابر ۰/۰۳ و ۱/۰۳ سانتیمتر و در معادله هورتن با ۲/۸ برابر به ترتیب برابر ۰/۴۵ و ۱/۲۶ سانتیمتر به دست آمد؛ بنابراین کمترین حساسیت در عملکرد معادله هورتن و بیشترین حساسیت در معادله کاستیاکف-لوئیس رخ داده است؛ اما با وجود افزایش ۳۴ برابری خطا در معادله کاستیاکف-لوئیس مقدار میانگین خطای آن کمتر از دو معادله دیگر به دست آمد. در نهایت بر اساس میانگین مقادیر nRMSE دقت عملکرد معادلات به ترتیب کاستیاکف-لوئیس، کاستیاکف و هورتن به دست آمد.

در شکل ۵ مقادیر RMSE در حالت اول و دوم نشان داده شده است. میانگین RMSE معادله کاستیاکف در مرحله برازش و ارزیابی با ۳/۲۵ برابر افزایش به ترتیب برابر ۰/۳۴ و ۱/۱ سانتیمتر، در معادله کاستیاکف-لوئیس با ۳۴ برابر افزایش به ترتیب برابر ۰/۰۳ و ۱/۰۳ سانتیمتر و در معادله هورتن با ۲/۸ برابر به ترتیب برابر ۰/۴۵ و ۱/۲۶ سانتیمتر به دست آمد؛ بنابراین کمترین حساسیت در عملکرد معادله هورتن و بیشترین حساسیت در معادله کاستیاکف-لوئیس رخ داده است. اما با وجود افزایش ۳۴ برابری خطا در معادله کاستیاکف-لوئیس مقدار میانگین خطای آن کمتر از دو معادله دیگر به دست آمد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی حساسیت ضرایب معادلات نفوذ کاستیاکف، کاستیاکف-لوئیس و هورتن نسبت به تغییر هم‌زمان رطوبت اولیه و چگالی ظاهری خاک و تأثیر آن بر عملکرد معادلات نفوذ در خاک‌های مختلف پرداخته شد. ضریب ak با همبستگی ۰/۷۷- و ۰/۴۹- بیشترین واکنش را نسبت به تغییرات رطوبت و چگالی ظاهری داشت. به‌طور کلی بر اساس نتایج حساسیت ضرایب معادلات نفوذ نسبت به تغییرات رطوبت و چگالی ظاهری از زیاد به



شکل ۵- تغییرات خطای معادلات نفوذ به تغییرات رطوبت و چگالی ظاهری خاک در مرحله برازش (با نماد c) و ارزیابی (با نماد v)

## منابع

- سپهوند، ع.، طایی سمیرمی، م.، میرنیا، س.ا. و مرادی، ح. ر. ۱۳۸۹. ارزیابی حساسیت مدل‌های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۵ (۲): ۳۸-۳۳.
- طالبی، ی.، محمدی، م. و کریمی، س. ۱۳۹۵. تأثیر کاربری اراضی بر خصوصیات نفوذ آب در برخی خاک‌های استان اردبیل و زنجان. مدیریت خاک و تولید پایدار. ۶ (۱۱): ۱۰۹-۱۲۶.
- محمد زاده هایبلی، ج. و حیدر پور، م. ۱۳۹۸. اصلاح معادله نفوذ کاستیاکف برای اعمال تأثیر رطوبت اولیه خاک. مجله پژوهش آب ایران. ۱۳-۱.
- محمدی، ا. و دلبری، م. ۱۳۹۴. حرکت آب و نمک در خاک با استفاده از HYDRUS-1D. مجله دانش آب و خاک. ۲۵ (۱).
- محمدی، م. و رفاهی، ح. ۱۳۸۴. تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳۶ (۶): ۱۳۹۸-۱۳۹۱.
- نیشابوری، م.، فاخری فرد، ا.، قرسادی‌زاده، د.، صادقیان، ن. و خیری، ج. ۱۳۸۸. ضرایب مدل‌های نفوذ فیلپ، کاستیاکف و کاستیاکف اصلاح شده بر مبنای جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اولیه خاک. مجله دانش آب و خاک. ۱-۱۹.
- ایبانه، م.، خسرابی، ا.، ابراهیمی پاک، ن.، تافته، ا. و جوزی، م. ۱۳۹۸. انتخاب مدل بهینه نفوذ آب در خاک. نشریه مدیریت آب و آبیاری. ۹ (۲): ۲۹۱-۳۰۴.
- باریده، ر. و بشارت، س. ۱۳۹۶. اندازه‌گیری و شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و جذب آب توسط ریشه در آبیاری جویچه‌ای یک‌درمیان. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱ (۲).
- جوادی، ع.، مشعل، م. و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۳. تحلیل حساسیت معادلات نفوذ آب به خاک و ضرایب آن‌ها نسبت به رطوبت اولیه و بار آبی. نشریه آب و خاک. ۲۸-۵.
- جوادی، ع.، مصطفی‌زاده، ب.، شایان‌نژاد، م. و مصدقی، م. ۱۳۹۶. ارزیابی معادلات نفوذ آب به خاک در شرایط تلفیق کیفیت آب آبیاری، رطوبت اولیه خاک و بار آبی ثابت. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۱-۳.
- دربندی، ص.، آیرملو، ن. و جلیل زاده، م. ۱۳۸۴. ارزیابی حساسیت ضرایب مدل‌های نفوذ به رطوبت اولیه خاک و تعیین مدل‌های ریاضی مربوطه. دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک. کرمان، سوم و چهارم اسفندماه. ۱۶۲۵-۱۶۱۸.



- 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.
- Mirzaee, S., Zolfaghari, A. A., Gorji, M., Dyc, M. and Ghorbani-Dashtaki, S. 2014. Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. Archives of Agronomy and Soil Science. 60(5): 681-693.
- Patle, G. T., Sikar, T. T., Rawat, K. S. and Singh, S. K. 2019. Estimation of infiltration rate from soil properties using regression model for cultivated land. Geology, Ecology, and Landscapes. 3(1): 1-13.
- 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.
- Rahman, G. A., Talaat, A. M. and Zawe, C. 2016. Assessment of infiltration rate for sustainability of reclaimed area in Harare region Zimbabwe. Middle East Journal of Agriculture. 5(1): 1–5.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of fluid through porous mediums. Physics. 1:318-333.
- SCS (Soil Conservation Service). 1972. National engineering handbook, section 4: hydrology. Washington, DC: Department of Agriculture. 762.
- Sihag, P., Tiwari, N. K. and Ranjan, S. 2017. Estimation and inter-comparison of infiltration models. Water Science. 31(1): 34-43.
- Van-Genuchten, M. 1980. A close-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America. 44: 892–898.
- Yiang, M., Shaoyuan, F., Dongyuan, S., Guangyuo, G. and Zailin, H. 2010. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green–Ampt model and HYDRUS-1D. Computers and Electronics in Agriculture. 71: 40–47.
- واعظی، ع. و صالحی، ی. ۱۳۹۸. کارایی مدل‌های نفوذ آب به خاک در کاربری‌های مختلف زمین در حوزه آبخیز تهم‌چای. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۱ (۵).
- Alagna, V., Iovino, M., Bagarello, V., Mataix-Solera, J. and Lichner, L. 2018. Alternative analysis of transient infiltration experiment to estimate soil water repellency. Hydrological Processes. 33: 661–674.
- Basha, H. A. 2011. Infiltration models for semi-infinite soil profiles. Water Resource Res. 47: 192–198.
- Dontsova, K. M., Pennington, J. C., Hayes, C., Simunek, J. and Williford, C. W. 2009. Dissolution and transport of 2,4-DNT and 2,6-DNT from M1 propellant in soil. Chemosphere. 77(4): 29-41.
- Ebrahimian, H., Liaghat, A. M., Parsinejad, M., Abbasi, F. and Navabian, M. 2012. Comparison of one-and two dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 138(10): 929-938.
- Farid, H., Mahmoodkhan, Z., Ahmad, I. and Shakoore, A. 2019. Estimation of infiltration models parameters and their comparison to simulate the onsite soil infiltration characteristics. Agricultural and Biological Engineering. 3-12.
- Green, W. H. and Ampt, G. A. 1911. Studies on soil physics. Agricultural Science. 4(1): 1–24. doi:10.1017/S0021859600001441.
- Horton, R. E. 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society of America. 5: 399-417.
- Jacques, D., Simunek, J., Mallants, D. and Van Genuchten, M. 2008. Modelling coupled water flow, salt transport and geochemical reactions affecting heavy metal migration in a podzol soil. Geoderma. 145: 449-461.
- Kostiakov, A. N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the

## Investigating the Changes of Coefficients of Infiltration Equations and Their Functional Evaluation under Various Soil Moisture and Bulk Densities

R. Barideh<sup>1</sup>, F. Nasimi<sup>2\*</sup>

Received: Dec.14, 2020

Accepted: Mar.18, 2021

### Abstract

Infiltration is a key process which can be considered for scheduling, design, management and optimization of irrigation systems. Therefore, it is necessary to choose an appropriate infiltration model to optimize water consumption in agriculture and to study the water cycle on a small and large scale. The purpose of this study was to investigate the sensitivity of the coefficients of Kostiakov, Kostiakov-Lewis and Horton infiltration equations to the simultaneous changes of initial moisture and soil bulk density and its effect on the performance of infiltration equations in different soils. For this purpose, cumulative infiltration data in eight soil textures, three bulk densities including 1.3, 1.4 and 1.5 g / cm<sup>3</sup> and five volumetric moisture levels including 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 and 0.3 was prepared using HYDRUS-1D. In order to represent the effect of the sensitivity of the coefficients of infiltration equations on the efficiency of those equations at different moisture and bulk densities, first the coefficients of the equations are calculated for all infiltration data (fitting step) and then at a specific moisture and bulk density for each soil, the coefficients are calculated and for other moistures and densities were used (evaluation step). Based on the results, sensitivity of the coefficients of infiltration equations with changes of moisture and bulk density from high to low was obtained the coefficient of the Kostiakov equation (ak), the coefficient of the Kostiakov-Lewis equation (akl), the power of the Kostiakov equation (bk), the coefficient of the Horton equation (bh) And the power of the Kostiakov-Lewis equation (bkl), respectively. The mean increase of RMSE of the Kostiakov, Kostiakov-Lewis and Horton equations in the evaluation stage was respectively 3.25, 34 and 2.8 times the fitting stage. Therefore, the lowest and the highest sensitivity occurred in the Horton and the Kostiakov-Lewis equations respectively.

**Keywords:** Cumulative infiltration, HYDRUS-1D, Infiltration equations, Simulation,

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

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

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