

## مقایسه نکویی شاخص‌های آماری مختلف برای ارزیابی مدل‌های نفوذ آب به خاک

سلمان میرزائی<sup>۱</sup> - شجاع قربانی دشتکی<sup>۲\*</sup> - حبیب خداوردی لو<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۹/۰۸

### چکیده

قابلیت مدل‌ها در شبیه‌سازی فرایندهای خاک عموماً با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده سنجیده می‌شود. انتخاب و استفاده از شاخص‌های آماری مناسب و تفسیر نتایج برای ارزیابی مدل‌های نفوذ آب به خاک، چالشی اساسی است، زیرا هر کدام از شاخص‌ها بر نوع خاصی از خطاها تاکید دارد. هدف از این پژوهش، مقایسه نکویی شاخص‌های آماری مختلف برای ارزیابی مدل‌های نفوذ آب به خاک است. بدین منظور، مجموعه داده‌ای دربرگیرنده ۱۴۵ نقطه-داده اندازه‌گیری شده از نفوذ آب به خاک‌های مختلف ایران با روش استوانه‌های مضاعف استفاده شد. پارامترهای مدل‌ها به روش بهینه‌سازی حداقل مربعات خطا با استفاده از نرم‌افزار MatLab 7.7.0 (R2008b) تعیین شد. سپس، قابلیت مدل‌های نفوذ آب به خاک با شاخص‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کارایی ( $NSE_I$ ) و فرم‌های اصلاح شده آن (از جمله  $NSE_{II}$ ،  $NSE_{SQRT}$ ،  $NSE_{IN}$  و  $NSE_{II}$ ) تعیین و نکویی این شاخص‌ها در انتخاب مدل برتر مقایسه شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص RMSE همیشه نمی‌تواند شاخص مناسبی برای ارزیابی مدل‌های نفوذ آب به خاک باشد. شاخص  $NSE_I$ ،  $NSE_{SQRT}$ ،  $NSE_{II}$  و  $NSE_{IN}$  نیز به دلیل حساس بودن به مقادیر بزرگ داده‌ها نتوانستند تمایز بین مدل‌ها را در برآورد نفوذ تجمعی آشکار کنند. شاخص  $NSE_{II}$  با وزن دهی بیش‌تر به داده‌های نفوذ در زمان‌های کوتاه‌تر، به عنوان شاخص آماری مناسب برای مقایسه قابلیت مدل‌ها نفوذ انتخاب شد. به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که قابلیت شاخص‌های آماری مختلف برای ارزیابی مدل‌ها بستگی به میزان تاثیر آن‌ها از مقادیر داده‌های نفوذ در سری‌های متفاوت زمانی است.

واژه‌های کلیدی: خطا، قابلیت شاخص‌های آماری، نفوذ آب به خاک

### مقدمه

پژوهشگران به منظور مقایسه قابلیت مدل‌های نفوذ آب به خاک از شاخص‌های مختلفی استفاده کرده‌اند. ماچیوال و همکاران (۱۰) تنها با استفاده از ضریب تبیین ( $R^2$ ) مدل‌های نفوذ کوستیاکف، کوستیاکف-لوئیر، فیلیپ و گرین-امپت را در تعداد زیادی از خاک‌های هندوستان مقایسه کردند که مدل فیلیپ بالاترین  $R^2$  را داشت. تورنر (۲۲) قابلیت مدل‌های نفوذ کوستیاکف، هورتون، هولتان، فیلیپ و گرین-امپت را به لحاظ توانایی آن‌ها در برآورد سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده به روش باران مصنوعی در مناطق مالبرو و مریند واقع در کشور آمریکا، مقایسه کردند. ایشان برای مقایسه قابلیت مدل‌ها از معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده کردند. در این پژوهش، مدل‌های گرین-امپت، هولتان، فیلیپ، کوستیاکف و هورتون به ترتیب در رتبه‌های اول تا پنجم ارزیابی قرار گرفت. نشاط و پاره‌کار (۱۵) ضریب تبیین و کم‌ترین واریانس ( $S^2$ ) را برای مقایسه مدل‌های نفوذ آب به خاک به کار بردند. نتایج این پژوهش حاکی از آن است که مدل کوستیاکف با کسب بالاترین ضریب تبیین و کمترین واریانس، بهترین مدل برای برآورد نفوذ آب به خاک است. قربانی و همکاران (۴) و پرچمی و همکاران (۱۷)

آگاهی از نفوذ آب به خاک اهمیت زیادی در طراحی و اجرای راهکارهای حفاظت آب، کنترل سیل و رواناب و مدیریت فرسایش خاک دارد. همچنین، سنجش دقیق مقادیر نفوذ آب به خاک با توجه به زمان برای برآورد آب ذخیره شده در ناحیه ریشه گیاه، اهمیت زیادی در طراحی و برنامه‌ریزی‌های آبیاری دارد (۲۱). بنابراین، تعیین یک مدل نفوذ آب به خاک که بتواند توصیف دقیقی از روابط بین زمان و میزان آب نفوذ یافته به خاک داشته باشد، حائز اهمیت است. تاکنون شاخص‌های آماری زیادی برای ارزیابی دقت مدل‌ها ارائه شده است (ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا، شاخص‌های کارایی (۱۴) و ...). بررسی توانایی شاخص‌های آماری مختلف در بیان دقت مدل‌ها در مطالعات خاک و آب بسیار ضروری است.

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه

شهرکرد

\*- نویسنده مسئول: (Email: shoja2002@yahoo.com)

۳- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

خیلی بزرگ این شاخص‌ها باشد. افزون بر این، تفسیر این آماره‌ها گاهی اوقات بحث برانگیز است. به دلیل این که مفهوم ارائه شده از قابلیت مدل‌ها به وسیله هر کدام از شاخص‌ها متفاوت است. به عنوان مثال، ضریب تعیین ( $R^2$ ) درجه هم‌خطی بودن بین داده‌های اندازه‌گیری و برآورد شده را نشان می‌دهد، حال آن که، میانگین خطا (ME) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به ترتیب درجه اریب بودن و درجه دقت برآورد را نشان می‌دهند (۲۰). همچنین، تاکنون هیچ دامنه استاندارد برای مقادیر شاخص‌های ضریب تعیین، میانگین خطا و ریشه میانگین مربعات خطا برای پذیرش و یا عدم پذیرش توانایی مدل‌ها ارائه نشده است. از سوی دیگر، پژوهشگران برای مقادیر شاخص‌های کارایی (NSE) مرزهایی را تعریف کرده و با توجه به این مرزها، قابلیت مدل‌ها را پذیرفته و یا غیر قابل قبول (دارای خطا زیاد) دانسته‌اند (۱۳ و ۲۰). لذا، هدف از این پژوهش، مقایسه نکویی شاخص‌های آماری مختلف برای ارزیابی مدل‌های کوستیاکف (۶)، کوستیاکف-لوئیز (۱۱)، SCS (۲۳)، فیلیپ (۱۸)، هورتون (۵) و گرین-امپت (۳) است.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش بر روی ۱۴۵ سری خاک واقع در استان‌های اردبیل، زنجان، فارس، اصفهان و بوشهر انجام شد. خاک‌های مورد مطالعه در رده‌های اریدی سول، اینسپتی سول، انتی سول و مالی سول قرار داشته و نوع کاربری اراضی نیز شامل گندمزار، آیش و مرتع بود. داده‌های مربوط به نفوذپذیری خاک با استفاده از استوانه‌های مضاعف و با سه تکرار در ۱۴۵ نقطه به دست آمد. بافت خاک به روش هیدرومتر تعیین شد (۲). خاک‌های مورد استفاده در این بررسی دامنه وسیعی از کلاس‌های بافتی خاک را شامل می‌شد که توزیع آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

پارامترهای برازشی هر یک از مدل‌های نفوذ تجمعی (کوستیاکف (۶)، کوستیاکف-لوئیز (۱۱)، SCS (۲۳)، فیلیپ (۱۸)، هورتون (۷) و گرین-امپت (۳) (جدول ۱)) با استفاده از بهینه‌سازی غیرخطی نرم افزار MatLab 7.7.0 (R2008b)، به روش حداقل مربعات تعیین شد. تابع هدف مطابق رابطه ۱ است (۴):

$$SSE = \sum_{i=1}^N [I_{m_i} - I_{p_i}]^2 \quad (1)$$

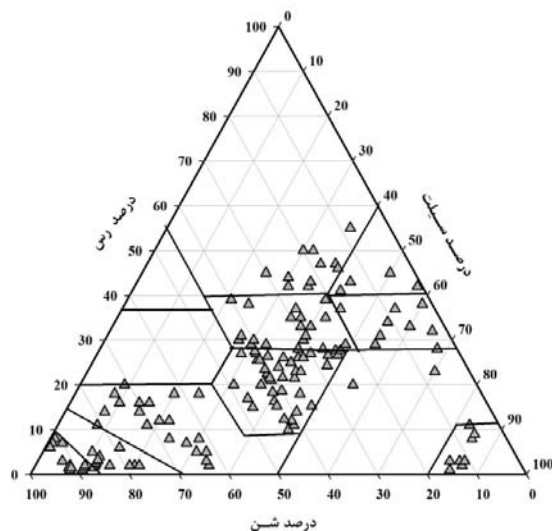
که در آن  $i = 1, 2, \dots, N$ ; تعداد نقاط اندازه‌گیری شده، SSE: مجموع مربعات خطا،  $I_{m_i}$ : مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و  $I_{p_i}$ : مقدار نفوذ تجمعی برآوردی به وسیله مدل است.

میانگین آماره‌های ضریب همبستگی (f)، میانگین خطا (ME) و RMSE را برای مقایسه مدل‌های نفوذ آب به خاک به کار گرفتند. این پژوهشگران دریافتند که بالاترین میانگین ضریب همبستگی و پایین‌ترین میانگین ریشه میانگین مربعات خطا در کل خاک‌ها برای مدل کوستیاکف-لوئیز بدست آمد. بنابراین مدل کوستیاکف-لوئیز به عنوان دقیق‌ترین مدل در برآورد نفوذ آب به خاک در سری‌های متفاوت خاک معرفی شد.

فکوری و همکاران (۱) کارایی مدل‌های نفوذ آب به خاک را با استفاده از میانگین آماره‌های ضریب تعیین و ریشه دوم میانگین مربعات خطا در کاربری‌های کشاورزی، مرتع و باغ در شهرستان نیشابور بررسی کردند. در این بررسی، در کاربری کشاورزی مدل‌های هورتون، کوستیاکف و کوستیاکف-لوئیز به ترتیب از دقت بالایی در برآورد نفوذ تجمعی برخوردار بودند. در کاربری‌های مرتع و باغ، مدل‌های کوستیاکف و فیلیپ به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین دقت در برآورد نفوذ آب در خاک بودند. میرزائی و همکاران (۱۲) برای بررسی دقت مدل‌های نفوذ آب به خاک، مقادیر چندین شاخص‌های آماری مدل‌های مختلف را نسبت به مقادیر شاخص‌های آماری مدل مرجع در هر خاک به صورت جداگانه سنجیدند. اما انتخاب مدل مرجع با مشکلاتی همراه بود به این صورت که از چه معیارهایی در انتخاب مدل مرجع استفاده شود.

در اکثر مطالعاتی که به مقایسه مدل‌ها پرداخته‌اند، به طور گسترده‌ای از شاخص‌های آماری مطلق و با بعد مانند شاخص RMSE (سانتی متر) در مقایسه با شاخص‌های نسبی و بی‌بعد مانند شاخص‌های کارایی (NSE) استفاده شده است (۱، ۴، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۷ و ۲۲). لی موین (۷)، لیگیت و مکابه (۸ و ۹) و ویلمت و ماتسورا (۲۴) با استفاده از شاخص‌های کارایی (NSE) (۱۴) به مقایسه مدل‌های هیدرولوژیکی پرداختند. این پژوهشگران گزارش کردند که بعضی شاخص‌های کارایی به علت حساسیت به مقادیر داده‌ها در سری‌های مختلف زمانی نمی‌توانند تمایز بین مدل‌های هیدرولوژیکی را در برآورد مقادیر جریان‌های سطحی در رودخانه‌های فصلی آشکار کنند.

به هر حال، بررسی منابع نشان می‌دهد برای مقایسه مدل‌ها از شاخص‌های گوناگون و میانگین آن‌ها برای کل نمونه‌ها استفاده شده است (۱، ۴، ۱۰، ۱۲، ۱۵، ۱۷ و ۲۲). بالا بودن میانگین شاخص‌های ضریب تعیین و پایین بودن ریشه میانگین مربعات خطا در کل خاک‌های مورد مطالعه برای یک مدل همیشه نمی‌تواند معیاری برای خوب بودن مدل باشند. به علت این که، این میانگین‌ها می‌تواند ناشی از متوازن شدن تعدادی از مقادیر خیلی کوچک با تعدادی از مقادیر



شکل ۱- توزیع کلاس بافتی خاک‌های مورد مطالعه

Figure 1- Soil texture class distribution in studied soils

جدول ۱- مدل‌های نفوذ آب به خاک مورد بررسی در این پژوهش

Table 1- Soil water infiltration models used in this study

| توضیحات<br>(Explanations)  | معادله<br>(Equation)   | علامت اختصاری<br>(Abbreviation sign) | مدل<br>(Model)   |
|--|--|--------------------------------------|--|
| I نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) و t زمان (دقیقه) می‌باشد. G, k, m, c, A, S, b, a پارامتر حاصل از برازش مدل‌ها به داده‌های نفوذ تجمعی می‌باشد. | $I = at^b$<br>$I = at^b + kt$<br>$I = at^b + 0.698$<br>$I = St^{0.5} + At$<br>$I = ct + m(1 - e^{-at})$<br>$I = kt + G \ln(1 + I/G)$ | Ko<br>KL<br>SCS<br>Ph<br>Ho<br>GA    | کوستیاکوف (Kostiakov)<br>کوستیاکوف-لوئیز (Kostiakov-Lewis)<br>SCS<br>فیلیپ (Philip)<br>هورتون (Horton)<br>گرین-امپت (Green-Ampt) |

می‌رود که به صورت شاخص  $NSE_{SQRT}$  گزارش می‌شود (۱۶). در نهایت، کارایی شاخص‌های  $NSE_1$  (۱۴)،  $NSE_{il}$  (۸)،  $NSE_{SQRT}$ ،  $NSE_{il}$  (۱۶) و  $NSE_{im}$  (۷) (جدول ۲)، با توجه به تبدیل الگوهای آماری که بر روی داده‌های اندازه‌گیری و برآورد شده نفوذ آب به خاک در طول زمان‌های مختلف انجام می‌گیرد مورد ارزیابی قرار گرفتند.

### نتایج و بحث

جدول ۳ میانگین آماره‌های  $R^2$  و RMSE کل خاک‌های مورد مطالعه را برای مدل‌های مورد مطالعه نفوذ آب به خاک نشان می‌دهد. بر اساس جدول ۳ حداقل میانگین آماره RMSE در کل نمونه‌ها برای مدل کوستیاکوف-لوئیز (۰/۲۳۲) و مقدار بیشینه آن برای مدل گرین-امپت (۱/۱۵۷) به دست آمد.

لگیت و مک کابه (۱۰) شاخص  $NSE_1$  (۱۴) را برای مقایسه مدل‌ها به کار گرفتند. این پژوهشگران معادله ۸ را برای مقایسه کارایی مدل‌ها ارائه دادند و مقدار z را برابر یک در نظر گرفتند (جدول ۲). برخی از پژوهشگران به جای پارامتر z شاخص  $NSE$  به بررسی توان مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده پرداختند (۷ و ۱۶). به عبارتی، پارامتر  $\lambda$  معادله ۲ را بررسی کرده و صورت‌های اصلاح شده شاخص  $NSE$  را ارائه کردند (معادلات ۵، ۶، ۷ و (جدول ۲)).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (I_{m_i}^\lambda - I_{p_i}^\lambda)^j}{\sum_{i=1}^N (I_{m_i}^\lambda + \overline{I_{p_i}^\lambda})^j} \quad (2)$$

$\lambda$  نزدیک به صفر تبدیل لگاریتمی است که با نماد  $NSE_{im}$  بیان می‌شود (۱۶). در  $\lambda = -1$  معکوس داده‌ها به کار می‌رود که به شاخص  $NSE_{il}$  معروف است (۷). در  $\lambda = 0.5$  جذر داده‌ها به کار

جدول ۲- شاخص‌های آماری استفاده شده برای ارزیابی مدل‌ها  
Table 2- Statistical indices used for evaluation of models

| دامنه اعداد<br>(Value range) | معادله<br>(Equation)  | شماره معادله<br>(Equation No.) | آماره<br>(Index)     |
|------------------------------|---|--------------------------------|----------------------|
| $[\geq 1]$                   | $\left[ \sum_{i=1}^N (I_{m_i} - I_{p_i})^2 / N \right]^{0.5}$   | [3]                            | RMSE                 |
| $[-\infty, 1]$               | $1 - \frac{\sum_{i=1}^N (I_{m_i} - I_{p_i})^2}{\sum_{i=1}^N (I_{m_i} - \bar{I}_{m_i})^2}$   | [4]                            | NSE <sub>I</sub>     |
| $[-\infty, 1]$               | $1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\sqrt{I_{m_i}} - \sqrt{I_{p_i}})^2}{\sum_{i=1}^N (\sqrt{I_{m_i}} - \sqrt{\bar{I}_{m_i}})^2}$   | [5]                            | NSE <sub>SQRTI</sub> |
| $[-\infty, 1]$               | $1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln(I_{m_i} + e) - \ln(I_{p_i} + e))^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(I_{m_i} + e) - \ln(\bar{I}_{m_i} - e))^2}$   | [6]                            | NSE <sub>lnI</sub>   |
| $[-\infty, 1]$               | $1 - \frac{\sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{I_{m_i} + e} - \frac{1}{I_{p_i} + e} \right)^2}{\sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{I_{m_i} + e} - \frac{1}{\bar{I}_{m_i} + e} \right)^2}$ | [7]                            | NSE <sub>1/I</sub>   |
| $[-\infty, 1]$               | $1 - \frac{\sum_{i=1}^N  I_{m_i} - I_{p_i} ^j}{\sum_{i=1}^N  I_{m_i} - \bar{I}_{m_i} ^j} \quad j=1$   | [8]                            | NSE <sub>jI</sub>    |

\*ε: مقدار عددی بسیار کوچک

ε: A smallest number

آماري برای کل خاک‌های مورد مطالعه است. همان طور که شکل ۲ نشان می‌دهد، میانگین شاخص RMSE برای مدل‌های کوستیاکف حاصل از میانگین‌گیری بین مقادیر خیلی کوچک و مقادیر خیلی بزرگ این شاخص است. اما، در مدل کوستیاکف-لوئیز توزیع خطاها یکسان نیست، به طوری که تعداد زیادی از خطاها مقادیر کوچک و تعداد اندکی از آن‌ها مقادیر خیلی بزرگ دارند. برای بیان این امر در تمامی مدل‌ها، از انحراف معیار شاخص RMSE (SDR) برای کل خاک‌ها در مدل‌های مختلف استفاده شد (جدول ۳). کم‌تر بودن مقدار انحراف معیار شاخص (SDR) RMSE بیان‌گر این است که توزیع خطا در خاک‌های مختلف نزدیک به

همچنین، حداکثر میانگین R<sup>2</sup> برای مدل کوستیاکف-لوئیز (۰/۹۹۷) و حداقل میانگین R<sup>2</sup> برای مدل SCS (۰/۹۰۹) حاصل شد. بر پایه مقادیر میانگین آماره‌های R<sup>2</sup> و RMSE مدل کوستیاکف-لوئیز بیش‌ترین دقت را در برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک داشت. نتایج این پژوهش با نتایج قربانی و همکاران (۴) و پرچمی و همکاران (۱۷) مطابقت دارد. در مقابل، ماچیوال و همکاران (۱۰)، تورنر (۲۲)، نشاط و پاره‌کار (۱۵) و فکوری و همکاران (۱) مدل‌های دیگری را بر اساس میانگین این شاخص‌ها به عنوان بهترین مدل در برآورد نفوذ آب به خاک معرفی کردند. علت این اختلاف در نتایج مقایسه مدل‌های نفوذ، ناشی از به کارگیری میانگین شاخص‌های

از خاک‌ها دارای چه مقدار از شاخص بکارگرفته شده هستند، از فراوانی نسبی تجمعی شاخص‌ها استفاده شد. مقایسه مدل‌ها با استفاده از شاخص  $NSE_1$  (۱۴) نشان داد که ۱۰۰ درصد خاک‌ها مقادیر شاخص  $NSE_1$  برای مدل‌های کوستیاکف و کوستیاکف-لوئیژ بالاتر از ۰/۹ شد. مدل‌های SCS، فیلیپ، هورتون و گرین-امپت به ترتیب در ۹۳/۷۹، ۹۵/۸۶، ۹۳/۷۹ و ۹۰/۳۴ درصد خاک‌ها دارای شاخص  $NSE_1$  بیش‌تر از ۰/۹ شد (شکل ۳).

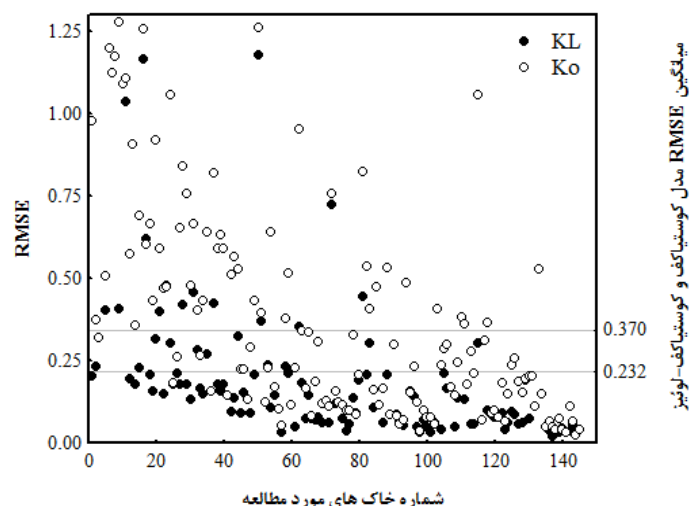
موریاسی و همکاران (۱۳) گزارش کردند که در شاخص  $NSE_1$  کمتر از ۰/۶۵ ( $NSE_{threshold}=0/65$ ) قابلیت مدل‌ها غیر قابل قبول بوده و مدل دقت پایینی در برآورد یا تخمین مولفه مورد نظر دارد. ریتز و مونوز-کارپنا (۲۰) مقادیر شاخص  $NSE_1$  را برای مقایسه قابلیت مدل‌های هیدرولوژیکی طبقه‌بندی کردند. این پژوهشگران گزارش کردند که اگر مقدار شاخص  $NSE_1$  کمتر از ۰/۶۵ شود، نتایج مدل غیر قابل قبول بوده و اگر مقدار این شاخص بیش‌تر از ۰/۶۵ و کم‌تر از ۰/۸ شد، برآوردهای مدل قابل قبول است. همچنین، اگر مقادیر شاخص  $NSE_1$  بین ۰/۸ و ۰/۹ شد نتایج مدل خوب بوده و در شاخص  $NSE_1$  بالاتر از ۰/۹ مدل برآورد خیلی خوبی از متغیر مورد نظر داشته و دقت بالایی در برآورد دارد. بر اساس طبقه‌بندی شاخص  $NSE_1$  (۲۰)، تمامی مدل‌های نفوذ به کار گرفته شده در این پژوهش در ۹۰ درصد خاک‌ها پیش‌بینی خیلی خوبی از نفوذ آب به خاک داشتند. به عبارت دیگر، قابلیت مدل‌های نفوذ آب به خاک استفاده شده در این پژوهش یکسان بوده و این مدل‌ها هیچ اختلافی در برآورد نفوذ آب به خاک ندارند (شکل ۳). شاخص  $NSE_1$  به علت حساسیت به مقادیر بزرگ‌تر داده‌ها (۷، ۸، ۹ و ۲۴) در این مطالعه نتوانست تمایز بین مدل‌ها را در برآورد نفوذ تجمعی آشکار کند.

میانگین خطاها است. با افزایش مقدار SDR واریانس یا پراکندگی خطاها بیش‌تر و توزیع خطاها در خاک‌های مختلف شباهت کم‌تری به میانگین خطاها دارد. در این پژوهش، کمترین مقدار SDR (۰/۲۸۰) برای مدل کوستیاکف-لوئیژ و بیش‌ترین مقدار آن (۱/۲۲۰) برای مدل هورتون به‌دست آمد. با توجه به مقادیر SDR (جدول ۳) مشخص می‌شود که اعتماد به میانگین شاخص RMSE برای بررسی قابلیت مدل‌ها در مدل کوستیاکف-لوئیژ نسبت به مدل هورتون بیش‌تر است. اما، مقایسه قابلیت مدل‌ها با استفاده از میانگین شاخص RMSE برای مدل‌های کوستیاکف، SCS و فیلیپ بدون در نظر گرفتن چگونگی توزیع خطاها درست نیست. به این صورت که، بر اساس میانگین شاخص RMSE سه مدل فوق دارای قابلیت یکسانی در برآورد نفوذ آب به خاک دارد، ولی با توجه به واریانس یا پراکندگی خطاها مدل SCS در مقایسه با مدل‌های کوستیاکف و فیلیپ دارای توزیع خطا نزدیک به میانگین شاخص RMSE دارد. به عبارت دیگر، ارزیابی مدل‌های کوستیاکف و فیلیپ با میانگین شاخص RMSE درست نیست به دلیل این‌که، این میانگین حاصل توازن مقادیر کوچک‌تر و بزرگ‌تر خطاها است. بنابراین، میانگین شاخص RMSE به دلیل عدم در نظرگیری پراکندگی خطاها برای کل خاک‌ها نمی‌تواند معیاری مناسب برای ارزیابی مدل‌ها باشد. تاکنون، این عدم توازن در توزیع خطاها برای خاک‌های مختلف در قضاوت با میانگین شاخص RMSE در مطالعات انجام شده مدنظر قرار نگرفته است و ارزیابی مدل‌ها تنها بر اساس میانگین شاخص RMSE برای کل خاک‌ها صورت گرفته است (۱، ۴، ۱۵، ۱۷ و ۲۲).

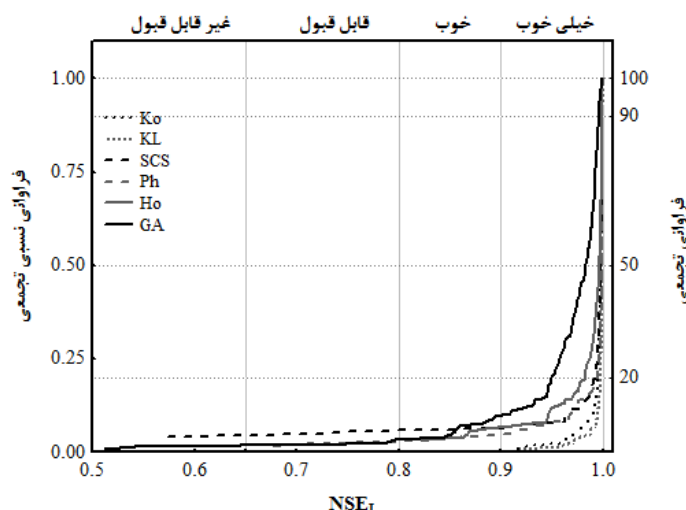
در پژوهش حاضر برای بررسی دقت مدل‌های نفوذ تجمعی آب به خاک از فراوانی مقادیر شاخص‌های آماری نسبی و بدون بعد ( $NSE$ ) استفاده شد. به عبارت دیگر، برای درک این‌که مدل‌ها در چند درصد

جدول ۳- میانگین آماره‌های  $R^2$  و RMSE مدل‌هاTable 3- The mean of models  $R^2$  and RMSE indices

| Model                            | RMSE         |              |             | $R^2$        |              |             |
|----------------------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
|                                  | متوسط (Mean) | حداکثر (Max) | حداقل (Min) | متوسط (Mean) | حداکثر (Max) | حداقل (Min) |
| کوستیاکف (Kostiakov)             | 0.333        | 0.37         | 1.67        | 0.02         | 0.99         | 0.99        |
| کوستیاکف-لوئیژ (Kostiakov-Lewis) | 0.280        | 0.23         | 1.67        | 0.02         | 0.99         | 1.00        |
| SCS                              | 0.289        | 0.38         | 1.79        | 0.09         | 0.91         | 0.99        |
| فیلیپ (Philip)                   | 0.459        | 0.37         | 3.29        | 0.02         | 0.97         | 0.99        |
| هورتون (Horton)                  | 1.220        | 0.98         | 0.99        | 0.79         | 0.98         | 0.99        |
| گرین-امپت (Green-Ampt)           | 1.093        | 1.15         | 0.39        | 0.03         | 0.96         | 0.99        |



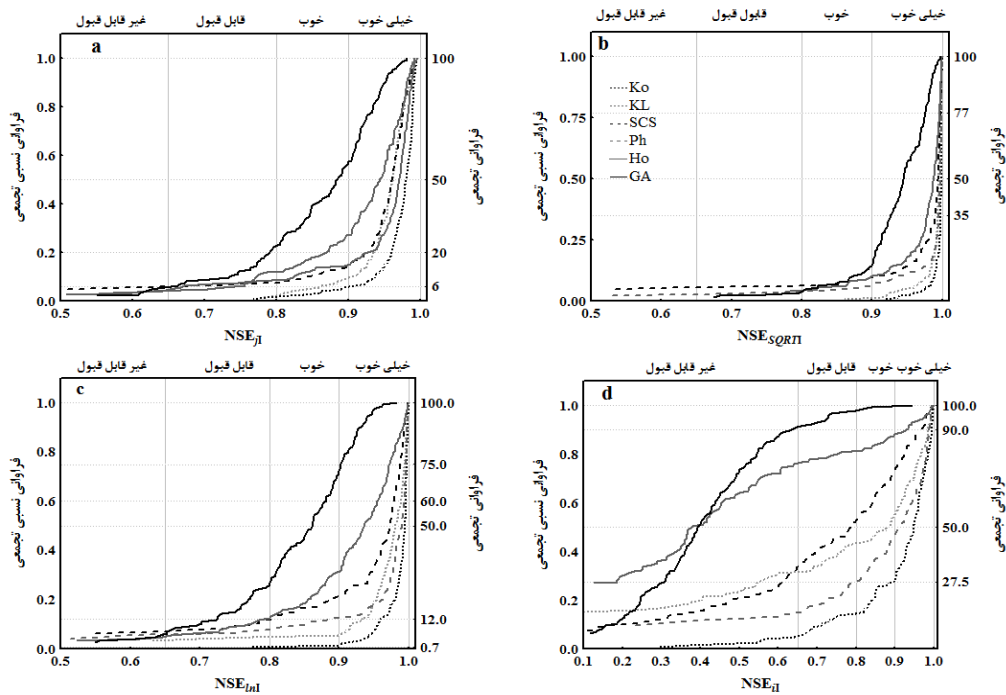
شکل ۲- مقادیر شاخص RMSE برای کلیه خاک‌ها در مدل کوستیاکف و کوستیاکف-لوئیز  
 Figure 2- The value of RMSE index for all soils in Kostiakov and Kostiakov-Lewis



شکل ۳- توزیع تجمعی آماره  $NSE_1$  برای مدل‌های نفوذ آب به خاک  
 Figure 3- cumulative distribution of  $NSE_1$  index for Soil Water Infiltration Models

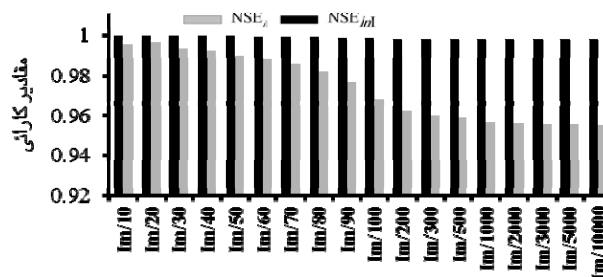
اضافه کردن یک مقدار عددی بسیار کوچک به کلیه داده‌ها می‌شود. به هر حال، انتخاب این مقدار بسیار کوچک ( $\epsilon$ ) به دلیل تاثیر در قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها بسیار مهم است. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، مقدار  $\epsilon$  از یک دهم تا یک ده هزارم میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده در شاخص‌های کارایی  $NSE_{il}$  و  $NSE_{lml}$  برای یک خاک قرار داده شد. مقادیر این شاخص‌ها در یک هزارم میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده ثابت ماند. بنابراین، یک هزارم میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده برای  $\epsilon$  انتخاب شد.

مطابق شاخص  $NSE_{il}$ ، مدل‌های کوستیاکف-لوئیز، کوستیاکف، SCS، فیلیپ، هورتون و گرین-امپت به ترتیب در ۹۴، ۹۱/۰۴، ۸۵/۵۲، ۷۳/۱۱ و ۴۴/۱۴ درصد خاک‌ها دارای شاخص  $NSE_{il}$  بالاتر از ۰/۹ شدند (شکل ۴a). همچنین، مقادیر شاخص  $NSE_{sqr1}$  برای مدل‌های کوستیاکف-لوئیز، کوستیاکف، SCS، فیلیپ، هورتون و گرین-امپت به ترتیب ۱۰۰، ۹۹/۳۱، ۹۰/۳۵، ۹۳/۷۹، ۹۰/۳۵ و ۸۵/۵۲ درصد خاک‌ها بالاتر از ۰/۹ شد (شکل ۴b). در به‌کارگیری شاخص‌های  $NSE_{il}$  و  $NSE_{lml}$  باید از عدم وجود مقادیر داده‌های نفوذ آب به خاک اندازه‌گیری و یا برآورد شده برابر صفر اطمینان حاصل نمود. در صورت وجود داده‌های صفر اقدام به



شکل ۴- توزیع تجمعی آماره‌های (a)  $NSE_I$ ، (b)  $NSE_{SQRTI}$ ، (c)  $NSE_{Iml}$ ، (d)  $NSE_{II}$  برای مدل‌های نفوذ آب به خاک

Figure 4- Cumulative distribution of indices a)  $NSE_I$ , b)  $NSE_{SQRTI}$ , c)  $NSE_{Iml}$ , d)  $NSE_{II}$ , for Soil Water Infiltration Models



شکل ۵- تغییرات مقادیر میانگین  $NSE_{II}$  و  $NSE_{Iml}$  برای مدل کوستیاکف در یک خاک برای مقادیر مختلف  $\epsilon$  (Im میانگین نفوذ تجمعی (سانتی‌متر))

Figure 5- The variations of  $NSE_{II}$  and  $NSE_{Iml}$  mean value for Kostiaikov model in one soil for different value of  $\epsilon$  (Im is mean cumulative infiltration (cm))

برای آماره‌ها در مدل‌های مختلف شد (شکل ۴). همان‌طور که از شکل ۶ پیداست، شاخص‌های  $NSE_I$ ،  $NSE_{SQRTI}$  و  $NSE_{Iml}$  همانند آماره  $NSE_I$  حساسیت زیادی به خطا مدل‌های مختلف نفوذ آب به خاک نشان ندادند. این شکل نشان می‌دهد شاخص‌های یاد شده به‌ویژه برای مدل‌های کوستیاکف-لوئیژ، کوستیاکف و فیلیپ دارای بالاترین مقدار کارایی (نزدیک به یک) بودند. از دیگر سو، نفوذ آب به خاک به عواملی مانند بافت، ساختمان خاک، پوشش گیاهی و غیره بستگی دارد. به طوری که گزارش شده است خاک‌های با بافت‌های مختلف ظرفیت نفوذپذیری متفاوتی از خود نشان می‌دهند و مدل‌های

مطابق شاخص  $NSE_{Iml}$ ، مدل‌های کوستیاکف-لوئیژ، کوستیاکف، SCS، فیلیپ، هورتون و گرین-امپت به ترتیب در ۹۴/۵۰، ۸۷/۶۳، ۷۸/۶۳، ۸۷/۶۰، ۶۸/۲۸ و ۲۸/۹۶ درصد خاک‌ها دارای شاخص  $NSE_{Iml}$  بالاتر از ۰/۹ شد (شکل ۴c). هم‌چنین، مدل‌های کوستیاکف-لوئیژ، کوستیاکف، SCS، فیلیپ، هورتون و گرین-امپت به ترتیب در ۷۲/۴۲، ۴۴/۸۳، ۲۶/۹۰، ۵۳/۱۱، ۱۱/۷۳ و ۱/۰۰ درصد خاک‌ها دارای شاخص  $NSE_{II}$  بالاتر از ۰/۹ شد (شکل ۴d). برای آگاهی از مناسب‌ترین فرم اصلاح شده شاخص کارایی (NSE) برای بیان قابلیت مدل‌ها اقدام به ترسیم نمودارهای جعبه‌ای

و  $NSE_{mi}$  با توجه به گستردگی بافت‌ها (شکل ۱) و کاربری‌های خاک‌های مورد مطالعه نمی‌توانند درست باشند. علت این امر آن است که شاخص‌های فوق اثر بیشتری به داده‌های نفوذ با افزایش زمان می‌دهند یعنی با افزایش زمان وزن داده‌های نفوذ در بررسی قابلیت مدل‌ها بیش‌تر می‌شود.

نفوذ آب به خاک با توجه به بافت خاک کارایی‌های متفاوتی داشتند (۴، ۱۲ و ۱۷). همچنین، مدل‌های نفوذ آب به خاک با تغییر نوع کاربری اراضی دچار خطا می‌شود. به صورتی که هر یک از مدل‌های نفوذ آب به خاک در کاربری‌های مختلف، قابلیت‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند (۱). بنابراین، مقادیر شاخص‌های  $NSE_{j1}$ ،  $NSE_{SQRT1}$

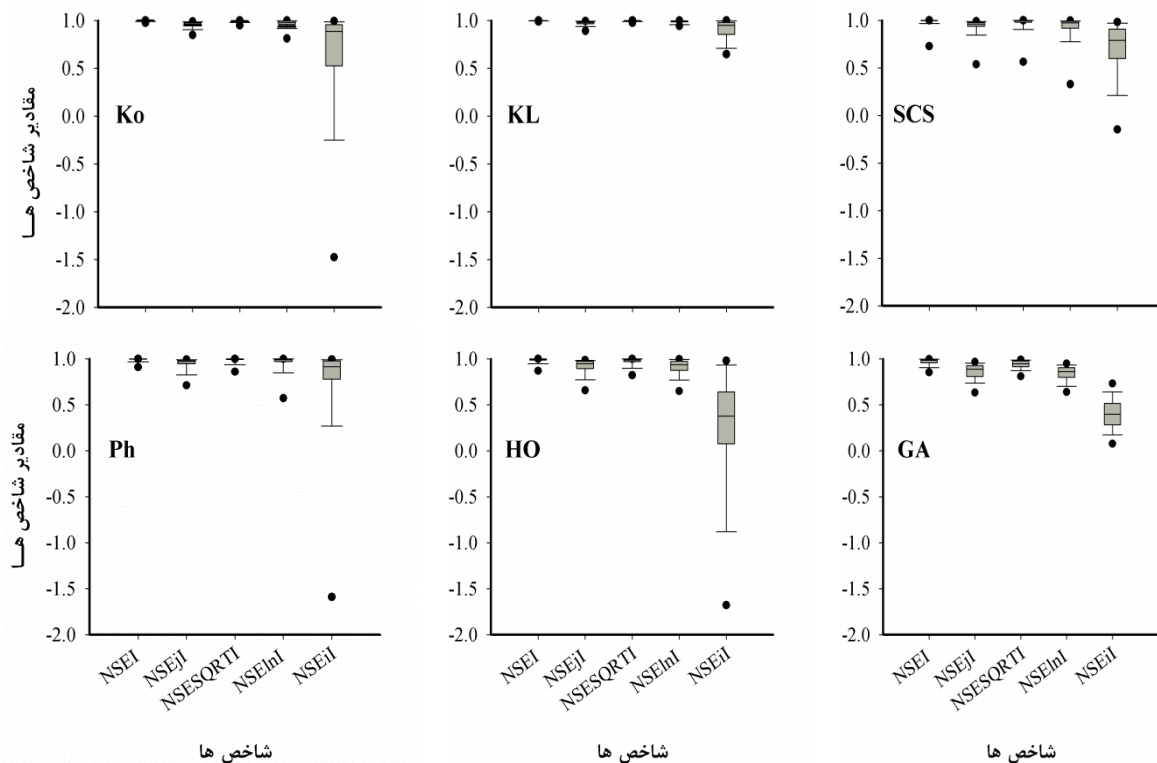
جدول ۴- مقادیر اجزای فرم‌های اصلاح شده NSE

Table 4- The value of NSE modified forms parameters

| $I_{mi}^{-1}$ | $\ln(I_{mi})$ | $(I_{mi})^{0.5}$ | $I_{mi}$ | زمان<br>(cm) | Time(Min) | $I_{mi}^{-1}$ | $\ln(I_{mi})$ | $(I_{mi})^{0.5}$ | $I_{mi}$ | زمان<br>(cm) | Time(Min) |
|---------------|---------------|------------------|----------|--------------|-----------|---------------|---------------|------------------|----------|--------------|-----------|
| 0.055         | 2.896         | 4.25             | 18.1     | 60           | 60        | 0.645         | 0.438         | 1.24             | 1.55     | 1            | 1         |
| 0.042         | 3.159         | 4.85             | 23.55    | 90           | 90        | 0.338         | 1.115         | 1.75             | 3.05     | 2            | 2         |
| 0.035         | 3.357         | 5.36             | 28.70    | 120          | 120       | 0.211         | 1.558         | 2.18             | 4.75     | 5            | 5         |
| 0.030         | 3.503         | 5.76             | 33.20    | 150          | 150       | 0.150         | 1.895         | 2.58             | 6.65     | 10           | 10        |
| 0.027         | 3.624         | 6.12             | 37.50    | 180          | 180       | 0.123         | 2.092         | 2.85             | 8.10     | 15           | 15        |
| 0.024         | 3.728         | 6.45             | 41.60    | 210          | 210       | 0.106         | 2.246         | 3.07             | 9.45     | 20           | 20        |
| 0.022         | 3.822         | 6.76             | 45.70    | 240          | 240       | 0.084         | 2.481         | 3.46             | 11.95    | 30           | 30        |
| 0.020         | 3.908         | 7.06             | 49.80    | 270          | 270       | 0.066         | 2.721         | 3.90             | 15.20    | 45           | 45        |

$I_{mi}$  مقادیر نفوذ آب به خاک اندازه‌گیری شده برای یک خاک می‌باشد.

$I_{mi}$  is the measured values of Infiltration water into soil for a soil.



شکل ۶- قابلیت شاخص‌های آماری در مدل‌ها مختلف نفوذ آب به خاک

Figure 6- The ability of statistical indices in different models of soil water infiltration

حساس بوده و پراگندگی یا واریانس بیش‌تری دارد. علت این موضوع کاهش اثر داده‌های بزرگ‌تر در بررسی قابلیت مدل‌ها می‌باشد (جدول

به هر حال، شاخص  $NSE_{il}$  با توجه به شکل ۶ در مقایسه با دیگر صورت‌های اصلاح شده شاخص‌های کارایی به خطا مدل‌ها



نشان می‌دهد که قابلیت این مدل‌ها در برآورد نفوذ آب به خاک دارای اختلافات زیادی هستند و مدل فیلپ در مقایسه با مدل‌های کوستیاکف و SCS دقت بالایی در برآورد نفوذ تجمعی دارد. پوشالاتا و همکاران (۱۹) و لی موین (۷) صورت‌های اصلاح شده شاخص‌های کارایی (NSE) را برای مقایسه مدل‌های هیدرولوژیکی به کار گرفتند. این پژوهشگران نیز گزارش کردند که شاخص‌های  $NSE_{SQRT}$  و  $NSE_{fil}$  نتوانستند اختلاف بین مدل‌ها را نشان دهند. اما شاخص  $NSE_{fil}$  شاخص خوبی برای مقایسه قابلیت مدل‌های هیدرولوژیکی در برآورد دبی جریان‌های رودخانه در طول سال است.

۴) در واقع، با معکوس شدن داده‌ها، تاثیر نفوذ در زمان‌های کوتاه‌تر در بررسی قابلیت مدل‌ها بیش‌تر می‌شود. به علت این‌که، در برنامه‌ریزی‌های آبیاری و کنترل سیل و رواناب بیش‌تر سروکار با زمان‌های کوتاه‌تر است. لذا، در مطالعات آب و خاک شاخص  $NSE_{fil}$  می‌تواند در تمییز قابلیت مدل‌ها بسیار موثر و بهتر عمل کند.

همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد میانگین RMSE در کل خاک‌های مورد مطالعه برای مدل‌های کوستیاکف، SCS و فیلپ یکسان است. به عبارت دیگر، کارایی مدل‌های یاد شده بر اساس میانگین شاخص RMSE هیچ اختلافی باهم ندارند و توانایی مدل‌ها در برآورد نفوذ آب به خاک یکسان است. ولی، نتایج شاخص  $NSE_{fil}$

## منابع

1. Facoori T., Emami H., and Ghahraman B. 2011. Effect of different landuse on water infiltration in soil. Journal of water research in agriculture, 25(2): 195-206. (in Persian with English abstract)
2. Gee G.H., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. In: A. Klute, (ed), Methods of Soil Analysis. Physical Properties. SSSA, Madison, WI.
3. Green W.H., and Ampt C.A. 1911. Studies on soil physics, I. Flow of air and water through soils. Journal of Agriculture Science, 4: 1-24.
4. Ghorbani Dashtaki S., Homae M., Mahdian M., and Kouchakzadeh M. 2009. Site-dependence performance of infiltration models. Water Resource Management, 23: 2777-2790.
5. Horton R.E. 1940. Approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society American Journal, 5: 339-417.
6. Kostiakov A.V. 1932. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamics point of view for purposes of amelioration. Transactions of the sixth commission of international society of soil science, part A, 15-21.
7. Le Moine N. 2008. Le bassin versant de surface vu par le souterrain: une voied'amélioration des performance et du réalisme des modèles pluie-débit? PhD Thesis, Université Pierre et Marie Curie, Antony, 324.
8. Legates D.R., and McCabe G.J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, 35(1): 233-241.
9. Legates R.A., and McCabe J.G. 2012. Short communication: A refined index of model performance: a rejoinder. International Journal of Climatology, 33(4): 1053-1056.
10. Machiwal D., Madan Kumar J.H.A., and Mal B.C. 2006. Modeling infiltration and quantifying spatial soil variability in a watershed of Kharagpur, India. Biosystems Eng, 95: 569-582.
11. Mezencev V.J. 1948. Theory of formation of the surface runoff. Meteorologiae Hidrologia, 3: 33-40.
12. Mirzaee S., Zolfaghari A.A., Gorji M., Dyck 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.
13. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., and Veith T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. ASABE, 50(3): 885-900.
14. Nash J.E., and Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part I - a discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282-290.
15. Neshat A., and Pehkar M. 2007. The comparison of methods for determining the vertical infiltration rate. Journal of Agriculture Science Natural Resource, 14(3): 186-195. (in Persian with English abstract)
16. Oudin L., Andréassian V., Mathevet T., and Perrin C. 2006. Dynamic averaging of rainfall-runoff model simulations from complementary model parameterizations. Water Resource Research, 42 (7): W07410.
17. Parchami Araghi F., Mirlatif S.M., Ghorbani Dashtaki S., and Mahdian M.H. 2010. Evaluating some infiltration models under different soil texture classes and land uses. Iranian journal of irrigation and drainage, 2(4): 193-205. (in Persian with English abstract)
18. Philip J.R. 1957. The theory of infiltration: 2. The profile at infinity. Soil Science, 83:435-448.
19. Pushpalatha R., Perrin C., Le Moine N., and Andréassian V. 2012. A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. Journal of Hydrology, 420-421: 171-182.
20. Ritter A., and Muñoz-Carpena R. 2013. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for

- reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480: 33–45.
21. Shukla K., Lal R., and Unkefer P. 2003. Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems. *Soil Science*, 168(3): 178-191.
  22. Turner E.R. 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. MSc. thesis, University of Maryland, USA, 202 pp.
  23. US Department of Agriculture, Natural Resources and Conservation Service. 1974. National Engineering Handbook. Section 15. Border Irrigation. National Technical Information Service, Washington, DC, Chapter 4.
  24. Willmott C.J., and Matsuura K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30: 79–82.

## Comparing the Goodness of Different Statistical Criteria for Evaluating the Soil Water Infiltration Models

S. Mirzaee<sup>1</sup> - S. Ghorbani Dashtaki<sup>2\*</sup> - H. Khodaverdiloo<sup>3</sup>

Received: 06-11-2013

Accepted: 29-11-2014

**Introduction:** The infiltration process is one of the most important components of the hydrologic cycle. Quantifying the infiltration water into soil is of great importance in watershed management. Prediction of flooding, erosion and pollutant transport all depends on the rate of runoff which is directly affected by the rate of infiltration. Quantification of infiltration water into soil is also necessary to determine the availability of water for crop growth and to estimate the amount of additional water needed for irrigation. Thus, an accurate model is required to estimate infiltration of water into soil. The ability of physical and empirical models in simulation of soil processes is commonly measured through comparisons of simulated and observed values. For these reasons, a large variety of indices have been proposed and used over the years in comparison of infiltration water into soil models. Among the proposed indices, some are absolute criteria such as the widely used root mean square error (RMSE), while others are relative criteria (i.e. normalized) such as the Nash and Sutcliffe (1970) efficiency criterion (NSE). Selecting and using appropriate statistical criteria to evaluate and interpretation of the results for infiltration water into soil models is essential because each of the used criteria focus on specific types of errors. Also, descriptions of various goodness of fit indices or indicators including their advantages and shortcomings, and rigorous discussions on the suitability of each index are very important. The objective of this study is to compare the goodness of different statistical criteria to evaluate infiltration of water into soil models. Comparison techniques were considered to define the best models: coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), efficiency criteria ( $NSE_i$ ) and modified forms (such as  $NSE_{jl}$ ,  $NSE_{SQRTI}$ ,  $NSE_{lml}$  and  $NSE_{il}$ ). Comparatively little work has been carried out on the meaning and interpretation of efficiency criteria ( $NSE_i$ ) and its modified forms used to evaluate the models.

**Materials and Methods:** The collection data of 145 point-data of measured infiltration of water into soil were used. The infiltration data were obtained by the Double Rings method in different soils of Iran having a wide range of soil characteristics. The study areas were located in Zanjan, Fars, Ardebil, Bushehr and Isfahan provinces. The soils of these regions are classified as Mollisols, Aridisols, Inceptisols and Entisols soil taxonomy orders. The land use of the study area consisted of wheat, barley, pasture and fallow land. The parameters of the models (i.e. Philip (18), Green and Ampt (3), SCS (23), Kostiakov (6), Horton (5), and Kostiakov and Lewis (11) models) were determined, using the least square optimization method. All models were fitted to experimental infiltration data using an iterative nonlinear regression procedure, which finds the values of the fitting parameters that give the best fit between the model and the data. The fitting process was performed using the MatLab 7.7.0 (R2008b) Software Package. Then, the ability of infiltration of water into soil models with the mean of coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), efficiency criteria ( $NSE_i$ ) and modified forms (such as  $NSE_{jl}$ ,  $NSE_{SQRTI}$ ,  $NSE_{lml}$  and  $NSE_{il}$ ) were determined and goodness of criteria was compared for the selection of the best model.

**Results and Discussion:** The results showed the mean of RMSE for all soils cannot always be a suitable index for the evaluation of infiltration of water into soil models. A more valid comparison with  $NSE_i$ ,  $NSE_{jl}$ ,  $NSE_{SQRTI}$ ,  $NSE_{lml}$  indices indicated that these indices also cannot apparently distinguish among the infiltration models for the estimation of cumulative infiltration. These indices are sensitive to the large amount of data. The  $NSE_{il}$  index with giving more weight to infiltration data in shorter times was selected as the most appropriate index for comparing models. According to the  $NSE_{il}$  index, Kostiakov and Lewis, Kostiakov, SCS, Philip, Horton, and Green and Ampt models were the best models in approximately 72.42, 44.83, 26.9, 53.11, 11.73 and 1.0 percent of soils, respectively.

**Conclusion:** The results of this study indicated that the ability of modified forms of NSE indices in

1, 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

(\*-Corresponding Author Email: shoja2002@yahoo.com)

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

evaluation of infiltration of water into soil models depend on the influence of models from infiltration data values in different time series. This encourages us to be cautious on the application and interpretation of statistical criteria when evaluating the models.

**Keywords:** Error, Statistical criteria, Infiltration water into soil