

## ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های اراضی

فرزین پرچی عراقی<sup>۱</sup>، سید مجید میرلطیفی<sup>۲\*</sup>، شجاع قربانی دشتکی<sup>۳</sup> و محمد حسین مهدیان<sup>۴</sup>

### چکیده

فرآیند نفوذ آب به خاک نقش مهمی در چرخه‌ی آبی طبیعت ایفا می‌کند. اهمیت پدیده‌ی نفوذ پژوهشگران را بر آن داشته تا همواره در پی ارائه‌ی مدلی مناسب برای بیان کمی آن باشند. در پژوهش حاضر، عملکرد مدل‌های نفوذ گرین و امپت، فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و هورتون در برآورد نفوذ تجمعی و نیز وابستگی عملکرد آن‌ها به کلاس‌های مختلف بافت خاک و کاربری‌های مختلف اراضی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، داده‌های حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری به روش استوانه‌های مضاعف در ۲۱۰ نقطه از مناطق مختلف کشور جمع‌آوری گردید. پارامترهای مدل‌های یادشده به روش حداقل مجموع مربعات خطا تعیین گردید. به منظور بررسی صحت عملکرد مدل‌های مورد بررسی در برآورد نفوذ تجمعی، از آماره‌های میانگین خطا (ME)، میانگین قدرمطلق میانگین خطاهای (MAME)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف معیار آماره‌ی RMSE و ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده شد. نتایج نشان داد که در مقایسه با دیگر مدل‌ها، عملکرد مدل کوستیاکوف-لوییز در برآورد نفوذ تجمعی از روند پایدارتری برخوردار بود. به گونه‌ای که این مدل در اکثر کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های اراضی مورد بررسی حایز رتبه‌ی نخست ارزیابی گردید. حال آن‌که این روند در دیگر مدل‌ها مشاهده نشد. به طور کلی، مدل‌های هورتون، کوستیاکوف و فیلیپ مدل‌هایی کم‌برآوردگر و مدل کوستیاکوف-لوییز، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و گرین و امپت مدل‌هایی بیش‌برآوردگر بودند. مدل‌های کوستیاکوف-لوییز و هورتون در اکثر کلاس‌های بافت خاک و کاربری‌های اراضی مورد مطالعه به ترتیب، به‌طور سیستماتیک بیش برآوردگر و کم‌برآوردگر بودند. نتایج این پژوهش نشان داد که در مقایسه با دیگر مدل‌های نفوذ مورد بررسی، مدل کوستیاکوف-لوییز بهترین مدل برای بیان کمی فرآیند نفوذ آب به خاک است.

واژه‌های کلیدی: مدل حفاظت خاک آمریکا (SCS)، مدل فیلیپ، مدل کوستیاکوف، مدل کوستیاکوف-لوییز، مدل گرین و امپت، مدل هورتون

### مقدمه

گردیده است، مدل‌های فیزیکی و تجربی گوناگونی به منظور کمی نمودن این فرآیند ارائه گردید (Kostiakov, 1932; Lewis, 1937; Philip, 1957; Argyrokastritis and Kerkides, 2003). به‌طور کلی، مدل‌های نفوذ آب به خاک، شامل مدل‌های تخمینی با اساس فیزیکی و مدل‌های تخمینی تجربی می‌باشد (Rawls et al., 1993). در مدل‌های تخمینی با اساس فیزیکی مانند مدل گرین و امپت (Green and Ampt, 1911) و فیلیپ (Philip, 1957) با تکیه بر مبانی فیزیکی، سعی در ساده‌سازی شرایط اولیه و شرایط مرزی در معادله‌ی جریان در محیط غیراشباع شده است. این فرضیات، داده‌های فیزیکی مورد نیاز این مدل‌ها را کاهش می‌دهد. اما از کارایی آن‌ها به لحاظ تغییر شرایط اولیه و مرزی می‌کاهد (Haverkamp et al., 1987). مدل‌های تخمینی تجربی به لحاظ فرضیاتی که به شرایط سطح خاک و نیم‌رخ خاک مربوط می‌شود، دارای محدودیت کمتری هستند و در عوض به شرایطی که برای آن واسنجی شده‌اند، محدود می‌گردند. مدل‌های تخمینی تجربی بر اساس پارامترهایی هستند که

نفوذ آب به خاک به عنوان فرآیند اولیه‌ی ورود آب از سطح خاک به داخل ناحیه‌ی غیراشباع خاک می‌باشد. این فرآیند یکی از اجزای اصلی چرخه‌ی هیدرولوژی است. کمی کردن پدیده‌ی نفوذ آب به خاک در مدیریت حوزه‌های آبخیز از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است (Mukheibir, 2008). همچنین، کمی کردن این پدیده به منظور تعیین مقدار آب قابل دسترس برای رشد گیاه و تخمین مقدار آب اضافی مورد نیاز که باید از طریق آبیاری تامین شود و نیز طراحی سیستم‌های آبیاری، دارای اهمیت می‌باشد. اهمیت این فرآیند سبب

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- دانشیار، گروه آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(\*) - نویسنده مسئول: (E-Mail: mirlat\_m@modares.ac.ir)

۳- استادیار، گروه خاکشناسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۴- دانشیار، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران

مدل‌های گرین و امپت، هولتان، فیلیپ، کوستیاکوف و هورتون به- ترتیب، در رتبه‌های اول تا پنجم ارزیابی قرار گرفتند. Neshat and Porehkar (2007) عملکرد مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، گرین و امپت، فیلیپ، هورتون و سازمان حفاظت خاک آمریکا در برآورد نفوذ جمعی و سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده به‌روش استوانه‌های مضاعف را مورد مقایسه و ارزیابی قرار دادند. به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های نفوذ از آماره‌ی ضریب تبیین ( $r^2$ ) استفاده شد. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که مدل کوستیاکوف مناسب‌ترین مدل برای برآورد نفوذ جمعی و سرعت نفوذ می‌باشد. بررسی پژوهش‌های صورت گرفته حاکی از آن است که پژوهشگران مختلف در مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های نفوذ به نتایج متفاوت و بعضاً ضد و نقیضی دست یافته‌اند. یکی از دلایل این امر طبیعت تغییرپذیر فرآیند نفوذ آب به خاک است. به‌گونه‌ای که این عامل باعث می‌گردد تا حتی یک مدل نفوذ در دو خاک که به‌لحاظ ویژگی‌های فیزیکی بسیار مشابه با یکدیگر هستند، دارای عملکردی متفاوت باشد (Sy, 2006). همچنین، بسته به شیوه‌ی اندازه‌گیری نفوذ، شرایط اولیه و شرایط مرزی جریان آب در خاک متفاوت خواهد بود. لذا، یکی از دلایل تفاوت در نتایج به‌دست آمده را می‌توان به این امر نسبت داد (Bhardwaj and Singh, 1992). پژوهش‌های صورت گرفته استفاده از آماره‌های متفاوت به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های نفوذ می‌باشد. از آنجا که هر یک از آماره‌های ارزیابی یک مدل بیانگر جنبه‌ی خاصی از عملکرد آن می‌باشند، لذا استفاده‌ی صرف از یک آماره‌ی ارزیابی ممکن است به-تهدایی برای ارزیابی عملکرد یک مدل مناسب نباشد (Bellocchi, et al. 2002). در برخی دیگر از پژوهش‌های انجام شده مانند Sadeh (2007) در برآورد نفوذ بر داده‌های اندازه-گیری شده، به دامنه‌ی معقول فیزیکی مقادیر پارامترهای مدل‌های نفوذ توجهی نشده است. به‌عنوان مثال، در این پژوهش، مقدار پارامتر A در مدل فیلیپ مقداری منفی به‌دست آمده است که فاقد توجیه فیزیکی می‌باشد. بنابراین، از آنجا که هرکدام از مدل‌های نفوذ بر اساس اطلاعات مربوط به تعداد نمونه‌های محدودی از خاک‌ها یا با در نظر گرفتن فرضیاتی خاص به‌دست آمده‌اند، لذا دامنه‌ی استفاده از آنها در خاک‌های مختلف چندان مشخص نیست. به همین دلیل، ارزیابی کارایی این مدل‌ها در خاک‌های ایران که عمدتاً آهکی می‌باشند، ضروری به‌نظر می‌رسد. همین‌طور، از آنجا که نفوذ جمعی دارای مفهوم فیزیکی روشنی بوده و به‌راحتی قابل اندازه‌گیری می‌باشد، کمی کردن فرآیند نفوذ با استفاده از مفهوم نفوذ جمعی، بیان واقعی‌تری از پدیده‌ی نفوذ آب به خاک بوده و مفاهیمی از قبیل سرعت نفوذ متوسط، سرعت نفوذ لحظه‌ای و سرعت نفوذ پایه از طریق این مفهوم قابل اشتقاق می‌باشند. از این‌رو، هدف از این پژوهش ارزیابی و مقایسه‌ی کارایی مدل‌های نفوذ گرین و امپت،

از طریق برآزش منحنی تعیین می‌گردد و یا از روش‌های دیگر تخمین زده می‌شوند. از مدل‌های تخمینی تجربی می‌توان به مدل‌های کوستیاکوف (Kostiakov, 1932)، هورتون (Horton, 1940)، کوستیاکوف-لوویز (Mezencev, 1948) و مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا<sup>۱</sup> (SCS) (USDA-NRCS, 1974) اشاره نمود. شرح مختصری از مدل‌های فوق در جدول (۱) ارائه گردیده است.

جدول ۱- شرح مدل‌های نفوذ مورد بررسی و پارامترهای برازشی آنها<sup>(\*)</sup>

نام مدل	پارامترها	معادله
گرین و امپت	$G$ و $K_{fs}$	$I = K_{fs}t + G \ln\left(1 + \frac{I}{G}\right)$
فیلیپ	$A$ و $S$	$I = St^{1/2} + At$
کوستیاکوف	$b$ و $k$	$I = kt^b$
کوستیاکوف-لوویز <sup>۱</sup>	$A'$ و $b'$ ، $k'$	$I = k't^{b'} + A't$
هورتون	$a$ و $m$ ، $C$	$I = Ct + m(1 - e^{-at})$
SCS	$a''$ و $b''$	$I = a''t^{b''} + 0.6985$

<sup>(\*)</sup> در این جدول، I: نفوذ جمعی (سانتی‌متر) و t: زمان (دقیقه) می‌باشد.

از آنجا که فرضیاتی و پارامترهای به‌کار رفته در مدل‌های نفوذ باهم متفاوت است، انتظار می‌رود در یک شرایط معین، مدلی خاص دارای عملکرد بهتری در مقایسه با بقیه باشد. از این‌رو پژوهش‌های متعددی در زمینه‌ی ارزیابی و مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های نفوذ صورت گرفته است (Mishra et al., 2003; Rashidi and Seyfi, 2009; Ghorbani Dashtaki et al., 2007). طی پژوهشی، Shukla et al. (2003) با اندازه‌گیری نفوذ به‌روش استوانه‌های مضاعف در منطقه‌ی اوهایو، واقع در کشور آمریکا، عملکرد ۱۰ مدل نفوذ آب به خاک شامل مدل‌های تخمینی تجربی و فیزیکی را در کاربری‌های مختلف اراضی مورد بررسی قرار دادند. به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های مورد بررسی از آماره‌های مجموع مربعات خطا، ضریب کارایی مدل و شاخص توافق ویلموت استفاده شد. نتایج نشان داد که در مقایسه با سایر مدل‌های مورد بررسی، مدل هورتون دارای بهترین عملکرد در بیان کمی فرآیند نفوذ می‌باشد. همچنین، نوع کاربری اراضی اثر معنی‌داری بر مقادیر پارامترهای مدل‌های مورد بررسی داشت. (Turner 2006) عملکرد مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، هورتون، هولتان (Holtan, 1961)، فیلیپ و گرین و امپت را به‌لحاظ توانایی آن‌ها در برآورد سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده به‌روش باران مصنوعی در مناطق مالبرو و ماربلند واقع در کشور آمریکا، مورد مقایسه قرار داد. به‌منظور مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های نفوذ از آماره‌ی ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. در این پژوهش،

فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوویز، هورتون و سازمان حفاظت خاک آمریکا در تبیین فرآیند نفوذ آب به خاک در برخی از کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های اراضی بود.

## مواد و روش‌ها

داده‌های مورد نیاز این پژوهش از طریق جمع آوری، داده‌های مورد استفاده در پژوهش‌های پیشین به‌دست آمد (Ghorbani, 2008; Moravvej, 2008; Dashtaki, 2008). این داده‌ها حاصل از مطالعات خاکشناسی صورت گرفته در مناطق مختلف کشور بود. بدین ترتیب، داده‌های حاصل از اندازه‌گیری نفوذ به‌روش استوانه‌های مضاعف در ۲۱۰ نقطه از مناطق مختلف کشور به‌دست آمد. در آزمایش‌های فوق، اندازه‌گیری نفوذ تا زمانی که سرعت نفوذ به مقدار ثابتی برسد، ادامه یافت. شکل (۱) پراکنش مناطق مطالعاتی در سطح کشور را نشان می‌دهد. مناطق مورد مطالعه دارای تنوع آب و هوایی گرم و خشک تا سرد و مرطوب و در نتیجه رژیم‌های رطوبتی و حرارتی متفاوت بودند. برخی از ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های مناطق مورد مطالعه در جدول (۲) ارائه گردیده است. با توجه به این جدول، اکثر خاک‌های مورد مطالعه دارای مقادیر زیادی آهک بوده و در شمار خاک‌های آهکی قرار می‌گیرند.

خاک‌های مناطق مورد مطالعه در رده‌های خاکی مالی‌سول، اینسپتی‌سول<sup>۱</sup>، انتی‌سول<sup>۲</sup> و اریدی‌سول<sup>۳</sup> قرار دارند. مطابق با شکل (۲)، بافت خاک افق سطحی مناطق مورد مطالعه شامل بافت‌های لوم شنی، لوم، لوم‌سیلتی، لوم رسی-سیلتی، لوم رسی، رس سیلتی و رسی می‌باشد. رطوبت خاک در زمان شروع آزمایش نفوذپذیری از ۰/۰۷ تا ۰/۴۷ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب متغیر بود. دامنه‌ی تغییرات کربن آلی در خاک‌های مورد مطالعه بین ۰/۰۷ تا ۳/۰۵ درصد و دارای میانگین و انحراف معیاری به‌ترتیب، برابر با ۰/۷۴ و ۰/۵۱ درصد بود. بر اساس قرارداد علمی، هنگامی که آهنگ تغییرات سرعت نفوذ در مدت یک ساعت به اندازه‌ی ۱۰ درصد باشد، سرعت نفوذ به حد نهایی خود رسیده است (USDA-NRCS, 2005). بر این اساس، میزان متوسط نفوذ تجمعی در زمان نفوذ پایه، بین ۱۰/۵۰ سانتی‌متر در دشت کلل تا ۵۴/۴۷ سانتی‌متر در دشت لوئین، متغیر بود. کاربری اراضی که در آن‌ها آزمایش نفوذپذیری انجام شد، متفاوت و شامل کشت گندم، برنج، یونجه، مرتع، آیش و اراضی بایر بود. از آنجا که آزمایش‌های نفوذپذیری خاک در هر نقطه در سه تکرار انجام شده بود، به‌منظور بررسی اعتبار نتایج هر آزمایش و نیز تعیین بهترین تکرار از روش تحلیل اعتباریابی<sup>۵</sup> به‌روش پایایی داخلی<sup>۶</sup> استفاده گردید (Ho, 2006).

که در آن:  $k$ : تعداد تکرارها،  $s_i^2$ : واریانس تکرار  $i$  ام،  $s_T^2$ : واریانس مجموع تکرارها می‌باشد. در صورتی که تکرارها کاملاً از هم مستقل باشند، مجموع واریانس‌های تکرارها با واریانس مجموع تکرارها برابر بوده و مقدار آلفا برابر با صفر می‌گردد. همچنین، اگر تکرارها کاملاً مشابه با یکدیگر باشند، در این صورت، مقدار آلفا برابر با یک خواهد بود (Bland and Altman, 1997). به‌عنوان یک قاعده‌ی کلی، اگر مقدار این آماره بیش از ۰/۸ باشد، همه‌ی تکرارها قابل اعتماد بوده و کل آزمایش پایدار داخلی محسوب می‌گردد. اگر آلفا کمتر از ۰/۸ باشد، حداقل یکی از تکرارها معتبر نیست (Ho, 2006). به‌منظور تعیین بهترین تکرار آزمایش نفوذپذیری با این روش، مقدار آماره‌ی آلفای کرونیخ در صورت حذف هر یک از تکرارها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. بدین ترتیب، تکراری که با حذف آن، مقدار این آماره کاهش بیشتری یافت، به‌عنوان بهترین تکرار انتخاب شد. همچنین، در صورتی که مقدار این آماره برای هر سه تکرار کمتر از ۰/۸ بود و با حذف هیچ یک از تکرارها مقدار این آماره از ۰/۸ بیشتر نشد، از نتایج آن آزمایش صرف‌نظر شده و وارد دیگر مراحل تجزیه و تحلیل نگردید. پس از تعیین بهترین تکرار آزمایش نفوذپذیری، پارامترهای برازشی هر یک از مدل‌های نفوذ مورد بررسی به‌روش حداقل مربعات خطا تعیین گردید. به‌منظور تعیین پارامترهای مدل‌های مورد نظر، تابع هدف به‌گونه‌ی زیر تعریف شد (Ghorbani et al., 2009):

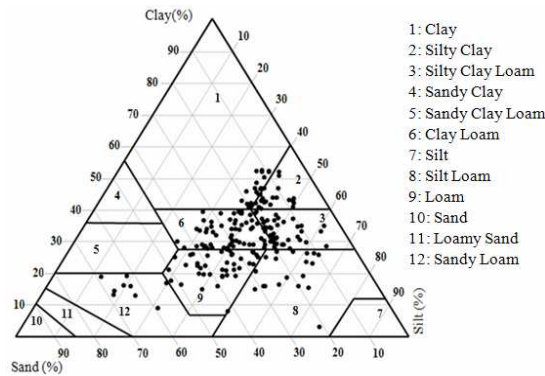
$$SSE = \sum_{j=1}^n (I(m)_j - I(p)_j)^2 \quad (2)$$

که در آن:  $SSE$ : مجموع مربعات خطا ( $cm^2$ )،  $I(m)_j$ : مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در زمان  $j$  ام ( $cm$ )،  $I(p)_j$ : مقدار نفوذ تجمعی برآورد شده برای زمان  $j$  ام ( $cm$ )،  $n$ : تعداد مقایسه‌ها می‌باشد. صحت عملکرد مدل‌های مورد بررسی در برآورد نفوذ تجمعی برای هر خاک با محاسبه‌ی آماره‌های میانگین خطا<sup>۴</sup> ( $ME$ )، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۵</sup> ( $RMSE$ ) ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ ) تعیین گردید. آماره‌های مورد نظر از طریق مقایسه‌ی مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده‌ی نفوذ تجمعی محاسبه شد. آماره‌های فوق به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد (Ghorbani et al., 2009):

- 6-Internal Consistency
- 7-Cronbach's Alpha
- 8-Mean Error
- 9-Root Mean Square Error

- 1-Mollisols
- 2-Inceptisols
- 3-Entisols
- 4-Aridisols
- 5-Reliability Analysis





شکل ۲- توزیع بافتی خاک افق سطحی در مناطق مورد مطالعه

عملکرد بهتری در برآورد نفوذ تجمعی خواهد بود. همچنین، از آنجا که انحراف معیار یک آماره بیانگر دقت و منظم بودن یک آماره بوده و پراکنش داده‌ها را حول میانگین نشان می‌دهد، از انحراف معیار آماره‌ی RMSE (SDRMSE) نیز برای ارزیابی مدل‌ها استفاده گردید. آماره‌های فوق برای رتبه‌بندی نهایی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به هریک از آماره‌ها رتبه‌ای به مدل‌های مورد بررسی داده شد که میانگین این رتبه‌ها، به‌عنوان رتبه‌ی نهایی هریک از مدل‌ها در نظر گرفته شد.

### نتایج و بحث

دامنه‌ی تغییرات پارامترها و نیز آماره‌ی مجموع مربعات خطای برازش (SSE) مدل‌های نفوذ مورد بررسی در جدول (۳) ارائه شده است. بر اساس این جدول، مقادیر میانگین آماره‌ی SSE بیانگر آن است که مدل کوستیاکوف-لوییز در مقایسه با سایر مدل‌های نفوذ مورد بررسی، با خطای کمتری بر داده‌ها آزمایش نفوذپذیری برازش یافته است. مقایسه‌ی مقادیر آماره‌ی SSE و نیز پارامترهای مدل کوستیاکوف با مدل کوستیاکوف-لوییز، حاکی از تفاوت ذاتی این دو مدل می‌باشد. در اکثر مقالات نوع نگارش مدل‌های کوستیاکوف و کوستیاکوف-لوییز به گونه‌ای است که نشان می‌دهد، مدل کوستیاکوف-لوییز معادل با مدل کوستیاکوف با عبارت اضافی  $A't$  می‌باشد (Sepaskhah and Afshar-Chamnabad, 2002; Holzapfel et al., 2004). اما مقایسه‌ی پارامترها و مقادیر آماره‌ی SSE مدل‌های فوق حاکی از آن است که این دو مدل کاملاً متفاوت از هم می‌باشند. بدین معنی که اگر به‌هنگام کاربرد مدل کوستیاکوف-لوییز، از مقادیر پارامترهای  $k$  و  $b$  در مدل کوستیاکوف استفاده شود، استفاده از مدل کوستیاکوف-لوییز مزیتی بر مدل کوستیاکوف نخواهد داشت. همان‌گونه که در جدول (۳) نیز مشاهده می‌گردد، محدوده‌ی پارامترهای این دو مدل نیز با هم متفاوت است. لذا، پیشنهاد می‌شود در نگارش و کاربرد این دو مدل از پارامترهای مشابه استفاده نگردد.

$$ME = \frac{\sum_{j=1}^n I(p)_j - I(m)_j}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - I(m)_j)^2}{n}} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - \bar{I}(p)_j)(I(m)_j - \bar{I}(m)_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - \bar{I}(p)_j)^2 \times \sum_{j=1}^n (I(m)_j - \bar{I}(m)_j)^2}} \quad (5)$$

مقدار آماره‌ی میانگین خطا بیانگر آن است که مدل مورد بررسی نفوذ تجمعی را بیش‌برآورد<sup>۱</sup> (مقادیر مثبت) یا کم‌برآورد<sup>۲</sup> (مقادیر منفی) می‌نماید. برای برآوردی مطمئن از نفوذ تجمعی باید مقدار قدرمطلق این آماره تا حد امکان کوچک باشد. مقدار آماره‌ی ریشه میانگین مربعات خطا همواره مثبت بوده و با نزدیک شدن آن به صفر، عملکرد مدل مورد بررسی بهبود می‌یابد. آماره‌ی ضریب همبستگی پیرسون شاخصی برای اندازه‌گیری خطای بودن رابطه‌ی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورده شده است. هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، رابطه‌ی خطای مورد نظر مشهودتر خواهد بود. یکی دیگر از آماره‌هایی که برای ارزیابی مدل‌های نفوذ مورد بررسی در برآورد نفوذ تجمعی به کار گرفته شد، آماره‌ی میانگین قدرمطلق میانگین خطاهای (MAME) برآورد نفوذ تجمعی در خاک‌های مختلف بود. تفاوت این آماره با آماره‌ی میانگین MEها (MME) آن است که خطای ناشی از سرشکن شدن خطاهای برآورد در خاک‌های مختلف، وارد فرآیند ارزیابی مدل‌ها نمی‌شود و مقدار آن متاثر از مقادیر مثبت و منفی خطای برآورد در تک‌تک خاک‌ها نخواهد بود. با توجه به آنچه گفته شد، مدلی که از میانگین قدرمطلق ME (MAME) و میانگین RMSE (MRMSE) کمتر و میانگین ضریب همبستگی پیرسون (MPearson) بیشتری برخوردار باشد، نسبت به دیگر مدل‌ها، دارای

- 1-Overestimate
- 2-Underestimate

چراکه حاصل آن افزایش مقدار خطا در برازش به‌هنگام استفاده از مدل کوستیاکوف-لوییز خواهد بود.

جدول ۳ - بررسی دامنه‌ی تغییرات مدل‌های نفوذ مورد بررسی

نام مدل	پارامترهای مدل	حداقل	حداکثر	میانگین ضریب تغییرات
کوستیاکوف	$k$	۰/۰۳۰	۷/۲۵۵	۰/۸۶۲
	$b$	۰/۳۲۲	۰/۹۹۰	۰/۶۶۷
	SSE	۰/۰۰۷	۲۶۴/۳۹۰	۶/۸۹۲
کوستیاکوف-لوییز	$k'$	۰/۰۱۰	۷/۲۵۵	۱/۱۴۶
	$b'$	۰/۰۰۰	۰/۹۹۲	۰/۴۶۳
	$A'$	۰/۰۰۰	۰/۲۵۷	۰/۰۵۵
هورتون	SSE	۰/۰۰۵	۲۶۴/۳۸۸	۴/۵۳۴
	$C$	۰/۰۰۰	۰/۴۱۸	۰/۱۰۵
	$m$	۰/۱۲۲	۳۲/۸۶۸	۶/۲۳۳
SCS	$a$	۰/۰۰۰	۲/۳۳۶	۰/۱۱۳
	SSE	۰/۰۰۹	۲۳۶/۵۴۵	۵/۷۱۶
	$a''$	۰/۰۰۰	۷/۰۲۸	۰/۶۹۱
فیلیپ	$b''$	۰/۳۶۴	۰/۹۹۸	۰/۷۳۵
	SSE	۰/۶۴۰	۲۸۷/۰۲۸	۶/۹۱۰
	$S$	۰/۰۱۰	۸/۳۴۱	۱/۰۱۱
گرین و امپت	$A$	۰/۰۰۰	۰/۳۴۸	۰/۰۶۶
	SSE	۰/۰۰۸	۳۵۷/۴۶۸	۹/۳۷۳
	$K_{fs}$	۰/۰۰۰	۰/۳۶۹	۰/۰۷۴
G	$G$	۰/۲۸۱	۱۹۵۴/۶۲۵	۹۱/۴۸۸
	SSE	۰/۰۰۶	۳۶۵/۲۹۹	۱۲/۱۳۱

#### مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های نفوذ در کلاس‌های بافتی خاک:

مقادیر آماره‌های ارزیابی و رتبه‌ی عملکرد هر یک از مدل‌های نفوذ مورد بررسی به‌تفکیک کلاس‌های بافت خاک در جدول (۴) ارایه گردیده است. در این جدول، اعداد داخل پرانتز، بیانگر رتبه‌ی هر مدل بر اساس آماره‌ی مربوطه می‌باشد. با توجه به این جدول، مقایسه‌ی مقادیر آماره‌ی MME بیانگر آن است که مدل‌های کوستیاکوف-لوییز و هورتون در همه‌ی کلاس‌های بافت خاک نفوذ تجمعی را به‌ترتیب، بیش‌برآورد و کم‌برآورد نموده‌اند. همچنین، مدل SCS در همه‌ی کلاس‌های بافت خاک به‌جز بافت لوم شنی (سبک‌ترین بافت مورد بررسی) مقدار نفوذ را بیش‌برآورد نموده است. مدل کوستیاکوف نیز در تمامی کلاس‌های بافت خاک مورد بررسی، مقدار نفوذ تجمعی را کم-برآورد نموده است. مدل فیلیپ نیز در همه‌ی کلاس‌های بافت خاک مورد بررسی به‌جز بافت رسی و لوم رسی، لوم رسی، کم‌برآوردگر بوده است. مدل گرین و امپت نیز در تمام کلاس‌های بافتی مورد بررسی به‌جز بافت لوم رسی و سیلتی ولوم رسی، نفوذ تجمعی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد نموده است. همچنین، از آنجا که مقادیر آماره‌های MME و MAME برای مدل هورتون، در همه‌ی بافت‌ها به‌جز بافت‌های لوم رسی و لوم سیلتی برابر می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که مدل

هورتون در همه‌ی بافت‌های مورد بررسی به‌جز بافت‌های لوم رسی و لوم سیلتی به‌طور سیستماتیک کم‌برآوردگر بوده است. همین‌طور، مقادیر آماره‌ی MRMSE بیانگر آن است که در مقایسه با سایر مدل‌ها، مدل کوستیاکوف-لوییز در تمامی کلاس‌های بافتی مورد بررسی، مقدار نفوذ تجمعی را با خطای کمتری برآورد نموده است. مقدار این آماره، برای مدل‌های کوستیاکوف-لوییز، فیلیپ و گرین و امپت در بافت رسی (سنگین‌ترین بافت مورد بررسی) و برای مدل‌های هورتون، کوستیاکوف و SCS نیز در خاک لوم شنی (سبک‌ترین بافت مورد بررسی) به حداکثر مقدار خود رسیده است. همچنین، مقدار این آماره برای مدل‌های کوستیاکوف-لوییز، کوستیاکوف، SCS، در بافت لوم رسی-سیلتی و برای مدل‌های هورتون، گرین و امپت و فیلیپ در بافت لوم سیلتی دارای حداقل مقدار خود بوده است. مقادیر آماره‌ی انحراف معیار RMSEها بیانگر آن است که نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی، مدل‌های SCS، کوستیاکوف-لوییز و هورتون نفوذ تجمعی را با دقت یکسان‌تری در هر یک از کلاس‌های بافتی خاک برآورد نموده‌اند و از این لحاظ مدل‌های کوستیاکوف، فیلیپ و گرین و امپت در رده‌های بعدی ارزیابی قرار می‌گیرند. همچنین، بررسی مقادیر آماره‌ی میانگین ضریب همبستگی پیرسون نیز حاکی از آن است که در سایر کلاس‌های بافتی خاک، مدل‌های کوستیاکوف-لوییز و هورتون، برازش بهتری بر داده‌های آزمایش نفوذپذیری داشته‌اند. در جدول (۴) عددی که در داخل پرانتز و در کنار مقادیر انحراف از معیار رتبه‌ی نهایی مدل‌ها ذکر شده است، بیانگر رتبه‌ی هر مدل به‌لحاظ پایداری رتبه‌ی عملکرد آن در کلاس‌های بافتی مختلف می‌باشد. مقایسه‌ی انحراف معیار رتبه‌ی عملکرد هر یک از مدل‌ها حاکی از آن است که عملکرد مدل کوستیاکوف در مقایسه با دیگر مدل‌ها، بیشترین وابستگی را به نوع بافت خاک داشته و در بافت‌های مختلف عملکرد متفاوت‌تری از خود نشان داده است. در حالی که مدل‌های کوستیاکوف-لوییز و هورتون در بافت‌های مختلف، عملکرد پایداری داشته‌اند.

#### مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های نفوذ در کاربره‌های مختلف اراضی:

مقادیر آماره‌های ارزیابی و رتبه‌ی عملکرد هر یک از مدل‌های نفوذ مورد بررسی به‌تفکیک کاربری‌های اراضی در جدول (۵) ارایه گردیده است. در این جدول، اعداد داخل پرانتز، بیانگر رتبه‌ی هر مدل بر اساس آماره‌ی مربوطه می‌باشد.

با توجه به این جدول و مقادیر آماره‌ی MRMSE، مشاهده می‌گردد که مدل کوستیاکوف-لوییز در همه‌ی کاربری‌های مورد بررسی به‌جز کاربری برنج دارای کمترین خطا در برآورد نفوذ تجمعی بوده است. در کاربری برنج، مدل هورتون دارای حداقل مقدار آماره‌ی MRMSE می‌باشد.



جدول ۴- مقادیر آماره‌های ارزیابی و رتبه‌ی عملکرد هر یک از مدل‌های مورد بررسی در کلاس‌های بافتی خاک

بافت خاک	آماره‌ی ارزیابی	نام مدل					
		کوستیاکوف-لوییز	هورتون	کوستیاکوف	SCS	فیلیپ	گرین و امپت
رسی	MPearson	۰/۹۹۸۵ (۲)	۰/۹۹۹۰ (۱)	۰/۹۹۸۰ (۳)	۰/۹۹۷۷ (۴)	۰/۹۹۵۹ (۶)	۰/۹۹۷۵ (۵)
	MME (cm)	۰/۰۶۹۳	-۰/۱۲۱۲	-۰/۰۲۱۶	۰/۰۸۸۹	۰/۰۰۳۶	۰/۲۵۴۱
	MAME (cm)	۰/۰۷۱۶ (۱)	۰/۱۲۱۲ (۳)	۰/۱۰۴۹ (۲)	۰/۱۳۵۷ (۴)	۰/۱۷۶۸ (۵)	۰/۴۶۲۰ (۶)
	MRMSE (cm)	۰/۴۸۲۵ (۱)	۰/۵۵۴۰ (۲)	۰/۶۲۶۶ (۳)	۰/۶۸۳۳ (۴)	۰/۷۲۰۸ (۵)	۰/۸۳۶۷ (۶)
	SDRMSE (cm)	۰/۳۶۴۹ (۲)	۰/۴۳۳۹ (۴)	۰/۳۹۹۸ (۳)	۰/۳۱۵۵ (۱)	۰/۴۵۲۲ (۵)	۰/۶۶۶۶ (۶)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
رس سیلتی	MPearson	۰/۹۹۹۴ (۱)	۰/۹۹۹۰ (۲)	۰/۹۹۹۶ (۳)	۰/۹۹۶۵ (۶)	۰/۹۹۷۷ (۵)	۰/۹۹۸۵ (۴)
	MME (cm)	۰/۰۳۲۹	-۰/۰۹۲۳	-۰/۰۱۹۸	۰/۰۱۰۶	-۰/۰۱۶۵	۰/۰۹۷۶
	MAME (cm)	۰/۰۳۵۳ (۱)	۰/۰۹۲۳ (۳)	۰/۰۶۴۳ (۲)	۰/۱۱۹۶ (۴)	۰/۱۶۰۳ (۵)	۰/۳۶۰۷ (۶)
	MRMSE (cm)	۰/۳۹۶۰ (۱)	۰/۴۸۰۱ (۲)	۰/۴۸۲۰ (۳)	۰/۵۶۲۲ (۴)	۰/۶۰۶۹ (۵)	۰/۶۹۷۹ (۶)
	SDRMSE (cm)	۰/۳۵۸۲ (۳)	۰/۲۹۸۹ (۱)	۰/۴۰۳۶ (۴)	۰/۳۱۴۰ (۲)	۰/۶۲۸۸ (۵)	۰/۶۶۸۳ (۶)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
لوم رس-سیلتی	MPearson	۰/۹۹۹۱ (۱)	۰/۹۹۸۸ (۲)	۰/۹۹۷۰ (۳)	۰/۹۹۶۷ (۴)	۰/۹۹۶۴ (۵)	۰/۹۹۶۲ (۶)
	MME (cm)	۰/۰۱۰۹	-۰/۰۴۷۲	-۰/۰۲۷۹	۰/۰۷۹۵	۰/۰۵۷۱	-۰/۰۹۶۳
	MAME (cm)	۰/۰۱۳۳ (۱)	۰/۰۴۷۲ (۳)	۰/۰۳۹۳ (۲)	۰/۰۸۲۵ (۴)	۰/۰۹۶۳ (۵)	۰/۱۹۵۹ (۶)
	MRMSE (cm)	۰/۱۳۹۵ (۱)	۰/۲۲۱۲ (۳)	۰/۲۱۹۹ (۲)	۰/۲۹۱۷ (۴)	۰/۳۰۱۹ (۵)	۰/۳۵۷۱ (۶)
	SDRMSE (cm)	۰/۱۳۸۵ (۲)	۰/۱۵۸۷ (۳)	۰/۱۷۷۸ (۴)	۰/۱۰۶۵ (۱)	۰/۳۳۷۸ (۵)	۰/۴۴۷۸ (۶)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
لوم رسی	MPearson	۰/۹۹۹۵ (۱)	۰/۹۹۸۴ (۳)	۰/۹۹۸۰ (۴)	۰/۹۹۷۵ (۶)	۰/۹۹۷۷ (۵)	۰/۹۹۸۷ (۲)
	MME (cm)	۰/۰۳۰۵	-۰/۰۷۸۲	-۰/۰۶۸۸	۰/۰۴۶۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۵۷۲
	MAME (cm)	۰/۰۳۳۹ (۱)	۰/۰۸۴۱ (۲)	۰/۱۲۰۱ (۵)	۰/۱۰۷۷ (۴)	۰/۱۰۷۰ (۳)	۰/۱۹۱۱ (۶)
	MRMSE (cm)	۰/۳۲۰۶ (۱)	۰/۴۵۰۱ (۲)	۰/۵۳۴۴ (۶)	۰/۵۳۳۵ (۵)	۰/۴۶۳۳ (۳)	۰/۴۹۲۶ (۴)
	SDRMSE (cm)	۰/۵۳۵۴ (۱)	۰/۵۹۶۵ (۳)	۰/۶۳۲۲ (۴)	۰/۵۵۲۱ (۲)	۰/۷۱۹۹ (۵)	۰/۸۰۸۴ (۶)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
لوم سیلتی	MPearson	۰/۹۹۹۷ (۱)	۰/۹۹۹۳ (۲)	۰/۹۹۸۵ (۵)	۰/۹۹۷۶ (۶)	۰/۹۹۹۲ (۳)	۰/۹۹۹۰ (۴)
	MME (cm)	۰/۰۰۱۲	-۰/۰۳۰۰	-۰/۰۵۴۲	۰/۰۶۷۴	-۰/۰۲۱۷	۰/۰۱۰۰
	MAME (cm)	۰/۰۱۴۹ (۱)	۰/۰۳۵۱ (۲)	۰/۰۶۰۵ (۴)	۰/۰۹۱۲ (۵)	۰/۰۵۸۴ (۳)	۰/۱۰۳۰ (۶)
	MRMSE (cm)	۰/۱۵۶۴ (۱)	۰/۲۰۱۱ (۲)	۰/۲۶۹۲ (۴)	۰/۳۳۹۰ (۶)	۰/۲۵۵۴ (۳)	۰/۲۷۳۳ (۵)
	SDRMSE (cm)	۰/۱۷۸۵ (۳)	۰/۱۲۵۴ (۱)	۰/۲۶۵۷ (۶)	۰/۱۴۷۲ (۲)	۰/۲۰۴۵ (۴)	۰/۲۳۳۵ (۵)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
لومی	MPearson	۰/۹۹۸۳ (۲)	۰/۹۹۸۷ (۱)	۰/۹۹۷۶ (۳)	۰/۹۹۵۳ (۶)	۰/۹۹۶۷ (۵)	۰/۹۹۷۲ (۴)
	MME (cm)	۰/۰۱۷۴	-۰/۰۶۶۶	-۰/۰۶۸۸	۰/۰۴۹۹	-۰/۰۴۶۵	۰/۰۵۱۹
	MAME (cm)	۰/۰۱۹۵ (۱)	۰/۰۶۶۶ (۳)	۰/۰۹۰۰ (۵)	۰/۰۸۵۸ (۳)	۰/۰۹۰۰ (۴)	۰/۱۹۱۷ (۶)
	MRMSE (cm)	۰/۲۶۴۲ (۱)	۰/۳۵۵۷ (۲)	۰/۴۴۲۰ (۴)	۰/۴۴۹۸ (۵)	۰/۴۰۸۷ (۳)	۰/۴۵۰۳ (۶)
	SDRMSE (cm)	۰/۳۲۳۶ (۲)	۰/۳۳۵۴ (۳)	۰/۳۸۳۵ (۴)	۰/۳۰۵۳ (۱)	۰/۵۷۹۵ (۵)	۰/۶۳۷۷ (۶)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
لوم شنی	MPearson	۰/۹۹۸۷ (۲)	۰/۹۹۹۱ (۱)	۰/۹۹۷۲ (۶)	۰/۹۹۷۵ (۵)	۰/۹۹۸۰ (۴)	۰/۹۹۸۴ (۳)
	MME (cm)	۰/۰۹۰۸	-۰/۱۶۲۶	-۰/۲۰۳۹	۰/۰۸۲۵	-۰/۰۴۶۶	۰/۰۴۵۸
	MAME (cm)	۰/۰۱۱۷ (۱)	۰/۱۶۲۶ (۴)	۰/۲۱۶۹ (۶)	۰/۱۲۶۴ (۲)	۰/۱۲۹۸ (۳)	۰/۱۹۷۸ (۵)
	MRMSE (cm)	۰/۴۲۶۰ (۱)	۰/۶۷۴۳ (۴)	۰/۸۲۵۳ (۶)	۰/۶۹۵۹ (۵)	۰/۶۱۶۵ (۲)	۰/۶۳۰۳ (۳)
	SDRMSE (cm)	۰/۳۳۱۹ (۲)	۰/۴۳۷۱ (۳)	۰/۴۸۲۹ (۴)	۰/۳۰۵۵ (۱)	۰/۵۱۸۴ (۵)	۰/۶۱۰۲ (۶)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
انحراف معیار رتبه‌های نهایی		۰/۰۰ (۱)	۰/۰۰ (۱)	۱/۵۳ (۴)	۰/۵۳ (۲)	۰/۹۰ (۳)	۰/۵۳ (۲)
رتبه							

جدول ۵- مقادیر آماره‌های ارزیابی و رتبه‌ی عملکرد هر یک از مدل‌های مورد بررسی در کاربری‌های مختلف اراضی

نوع کاربری	آماره‌ی ارزیابی	نام مدل					
		گوستیاکوف-لوییز	هورتون	گوستیاکوف	SCS	فیلیپ	گرین و امیت
گندم	MPearson	۰/۹۹۹۵(۱)	۰/۹۹۹۰(۲)	۰/۹۹۸۵(۳)	۰/۹۹۸۰(۴)	۰/۹۹۷۶(۵)	۰/۹۹۷۲(۶)
	MME (cm)	۰/۰۲۸۶	-۰/۰۶۸۵	-۰/۰۶۱۵	۰/۰۵۰۶	-۰/۰۰۴۶	۰/۰۱۶۵
	MAME (cm)	۰/۰۲۹۸(۱)	۰/۰۶۹۱(۲)	۰/۱۰۶۴(۵)	۰/۰۹۴۴(۴)	۰/۰۹۳۱(۳)	۰/۱۷۶۴(۶)
	MRMSE (cm)	۰/۲۹۴۲(۱)	۰/۳۱۸۳(۲)	۰/۴۸۶۸(۶)	۰/۴۸۰۴(۵)	۰/۴۰۵۴(۳)	۰/۴۴۷۹(۴)
	SDRMSE (cm)	۰/۵۰۰۵(۳)	۰/۳۹۸۲(۱)	۰/۵۷۵۸(۴)	۰/۵۴۶۴(۲)	۰/۶۸۸۳(۵)	۰/۷۳۴۳(۶)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۵	۳	۴	۶
مرتع	MPearson	۰/۹۹۹۷(۱)	۰/۹۹۹۱(۲)	۰/۹۹۷۵(۵)	۰/۹۹۷۱(۶)	۰/۹۹۶۶(۳)	۰/۹۹۸۱(۴)
	MME (cm)	۰/۰۱۹۸	-۰/۰۷۳۸	-۰/۰۶۷۰	۰/۰۴۸۸	-۰/۰۰۵۱	-۰/۰۱۶۸
	MAME (cm)	۰/۰۲۰۵(۱)	۰/۰۷۶۵(۲)	۰/۰۸۸۴(۴)	۰/۰۸۵۱(۳)	۰/۰۹۰۹(۵)	۰/۲۰۷۸(۶)
	MRMSE (cm)	۰/۲۳۳۸(۱)	۰/۲۶۰۹(۲)	۰/۴۰۲۲(۴)	۰/۴۲۲۰(۵)	۰/۳۸۱۸(۳)	۰/۴۳۴۴(۶)
	SDRMSE (cm)	۰/۱۳۰۰(۱)	۰/۲۱۳۸(۳)	۰/۲۸۲۱(۵)	۰/۱۶۰۷(۲)	۰/۲۳۵۸(۴)	۰/۳۳۳۹(۶)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۵	۴	۳	۶
آیش	MPearson	۰/۹۹۷۵(۳)	۰/۹۹۸۲(۱)	۰/۹۹۶۹(۳)	۰/۹۹۵۴(۶)	۰/۹۹۶۰(۵)	۰/۹۹۶۵(۴)
	MME (cm)	۰/۰۹۳۹	-۰/۰۵۱۲	-۰/۰۵۰۸	۰/۰۵۸۶	-۰/۰۰۳۳	۰/۰۲۵۲
	MAME (cm)	۰/۰۱۱۴(۱)	۰/۰۵۱۳(۲)	۰/۰۶۰۲(۴)	۰/۰۸۴۲(۵)	۰/۰۵۶۷(۳)	۰/۱۰۱۸(۶)
	MRMSE (cm)	۰/۱۴۱۶(۱)	۰/۲۵۰۱(۳)	۰/۲۵۶۶(۴)	۰/۳۲۶۳(۶)	۰/۲۳۹۹(۲)	۰/۲۶۸۰(۵)
	SDRMSE (cm)	۰/۱۲۱۸(۱)	۰/۲۱۵۶(۵)	۰/۳۳۲۸(۶)	۰/۱۴۱۸(۲)	۰/۱۸۸۸(۴)	۰/۱۶۶۳(۳)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۴	۶	۳	۵
برنج	MPearson	۰/۹۹۸۴(۱)	۰/۹۹۸۱(۲)	۰/۹۹۳۸(۴)	۰/۹۹۲۴(۵)	۰/۹۹۱۳(۶)	۰/۹۹۴۵(۳)
	MME (cm)	۰/۰۶۵۰	-۰/۰۴۹۴	۰/۰۴۵۷	۰/۰۲۰۹	۰/۰۶۱۵	۰/۲۱۲۸
	MAME (cm)	۰/۰۶۵۰(۲)	۰/۰۴۹۴(۱)	۰/۰۷۰۲(۳)	۰/۲۰۰۹(۵)	۰/۱۳۰۹(۴)	۰/۲۶۰۲(۶)
	MRMSE (cm)	۰/۲۸۴۷(۲)	۰/۳۱۰۵(۱)	۰/۳۱۴۸(۳)	۰/۵۰۱۳(۶)	۰/۴۲۸۸(۴)	۰/۴۶۶۰(۵)
	SDRMSE (cm)	۰/۴۷۹۷(۴)	۰/۳۴۰۷(۱)	۰/۴۵۹۸(۳)	۰/۵۴۴۷(۲)	۰/۵۹۰۳(۵)	۰/۷۳۲۹(۶)
	رتبه‌ی نهایی	۲	۱	۳	۵	۴	۶
اراضی بایر	MPearson	۰/۹۹۹۹(۱)	۰/۹۹۹۵(۲)	۰/۹۹۷۹(۶)	۰/۹۹۸۴(۵)	۰/۹۹۹۱(۳)	۰/۹۹۸۷(۴)
	MME (cm)	۰/۰۰۳۷	-۰/۰۹۶۰	-۰/۱۷۹۸	-۰/۰۶۹۷	-۰/۰۴۸۸	-۰/۰۳۰۶
	MAME (cm)	۰/۰۰۵۶(۱)	۰/۰۹۶۰(۳)	۰/۱۷۹۸(۶)	۰/۱۰۰۱(۴)	۰/۰۷۸۴(۲)	۰/۱۱۸۷(۵)
	MRMSE (cm)	۰/۲۰۴۰(۱)	۰/۳۳۸۳(۲)	۰/۳۵۹۳(۴)	۰/۴۹۱۰(۵)	۰/۳۴۴۲(۳)	۰/۵۰۲۸(۶)
	SDRMSE (cm)	۰/۰۸۷۶(۱)	۰/۱۵۱۲(۲)	۰/۳۰۰۹(۶)	۰/۲۰۰۹(۴)	۰/۱۸۵۶(۳)	۰/۲۴۳۵(۵)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۶	۵	۳	۴
یونجه	MPearson	۰/۹۹۸۲(۲)	۰/۹۹۹۹(۱)	۰/۹۹۷۶(۳)	۰/۹۹۱۲(۶)	۰/۹۹۲۸(۵)	۰/۹۹۴۱(۴)
	MME (cm)	۰/۰۲۱۷	-۰/۰۵۶۵	-۰/۰۲۴۳	۰/۰۰۶۰	۰/۰۶۲۴	۰/۰۵۵۴
	MAME (cm)	۰/۰۲۴۳(۱)	۰/۰۵۶۵(۳)	۰/۰۵۳۱(۲)	۰/۱۱۳۶(۵)	۰/۱۰۸۱(۴)	۰/۲۱۷۰(۶)
	MRMSE (cm)	۰/۲۲۱۱(۱)	۰/۲۵۳۱(۲)	۰/۲۹۸۵(۳)	۰/۴۰۲۷(۵)	۰/۳۸۶۵(۴)	۰/۴۹۷۶(۶)
	SDRMSE (cm)	۰/۱۶۳۸(۲)	۰/۲۵۵۴(۴)	۰/۲۰۰۹(۳)	۰/۱۲۶۹(۱)	۰/۳۵۸۵(۵)	۰/۳۸۷۳(۶)
	رتبه‌ی نهایی	۱	۲	۳	۴	۵	۶
انحراف معیار رتبه‌های نهایی	۰/۴۱(۱)	۰/۴۱(۱)	۱/۲۱(۴)	۰/۹۸(۳)	۰/۹۸(۳)	۰/۹۸(۳)	۰/۵۲(۲)

کاربری‌های مورد بررسی به ترتیب، کم‌برآوردگر و بیش‌برآوردگر بوده‌اند. همین‌طور، مدل‌های گوستیاکوف (به‌جز در کاربری برنج) و مدل فیلیپ (به‌جز در کاربری برنج و یونجه)، مدل‌هایی کم‌برآوردگر بوده‌اند. از سوی دیگر، با توجه به برابر بودن مقادیر قدرمطلق آماره‌ی MME و آماره‌ی MAME برای مدل هورتون، در کاربری‌های آیش، برنج، یونجه و اراضی بایر، می‌توان نتیجه گرفت که مدل هورتون در کاربری‌های یاد شده به‌طور سیستماتیک کم‌برآوردگر بوده است. بر این

مقایسه‌ی مقادیر آماره‌ی انحراف معیار RMSEها حاکی از آن است که در کاربری‌های مرتع، آیش و اراضی بایر، مدل گوستیاکوف-لوییز به لحاظ دقت در برآورد نفوذ تجمعی از عملکرد پایدارتری برخوردار بوده است. با توجه به مقادیر این آماره، در کاربری‌های گندم و برنج، مدل هورتون و در کاربری یونجه، مدل SCS از عملکرد بهتری برخوردار بوده است. همچنین، بررسی مقادیر آماره‌ی MME حاکی از آن است که مدل‌های هورتون و گوستیاکوف-لوییز در تمامی



مدل کوستیاکوف-لوییز و مدل گرین و امپت به ترتیب کمترین و بیشترین خطای برآورد را داشته‌اند. همین‌طور، با توجه به این که مقدار انحراف معیار RMSEها بیانگر پراکنش خطای برآورد حول میانگین RMSEها می‌باشد، لذا مقدار این آماره نشان می‌دهد که دقت هر مدل در برآورد نفوذ تجمعی در خاک‌های مختلف دارای چه پراکنشی است. مقادیر این آماره در جدول (۶) بیانگر آن است که مدل SCS نفوذ تجمعی در خاک‌های مختلف را با دقت یکسان‌تری نسبت به دیگر مدل‌ها برآورد کرده است. از این نظر، مدل‌های کوستیاکوف-لوییز، هورتون، کوستیاکوف، فیلیپ و گرین و امپت در رتبه‌های بعدی ارزیابی قرار گرفتند.

با توجه به جدول (۶)، نزدیک بودن مقدار آماره‌های MME و MAME در مدل هورتون موید این نکته است که این مدل از نظر کم‌برآوردگری، عملکردی یکسان در تمامی مناطق مورد مطالعه داشته است. در نتیجه، می‌توان گفت که این مدل به‌طور سیستماتیک کم‌برآوردگر بوده و انحرافی جزئی در کم‌برآورد کردن نفوذ تجمعی در خاک‌های مختلف از خود نشان داده است. این نکته از شکل (۳) نیز به‌خوبی قابل استنباط می‌باشد. این شکل حاکی از آن است که خطای برآورد نفوذ تجمعی در مدل هورتون در اکثر خاک‌ها از یک نوع (کم‌برآوردگری) بوده است. در این شکل، مقادیر آماره‌ی میانگین خطای (ME) برآورد نفوذ تجمعی، توسط مدل‌های مورد بررسی برای تمامی داده‌های حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری صورت گرفته، ترسیم گردیده است. این شکل بیانگر آن است که مدل کوستیاکوف-لوییز مدلی بیش‌برآوردگر و مدل هورتون مدلی کم‌برآوردگر بوده و در این بیش‌برآوردگری و کم‌برآوردگری در اکثر خاک‌های مورد مطالعه عملکردی پایدار داشته‌اند. با توجه به شکل (۳)، مدل‌های فیلیپ و گرین و امپت به‌لحاظ بیش‌برآوردگری یا کم‌برآوردگری عملکرد پایداری نداشته و این دو مدل در برخی خاک‌ها بیش‌برآوردگر و در برخی دیگر کم‌برآوردگر بوده‌اند. همچنین، مدل SCS در اکثر خاک‌ها بیش‌برآوردگر و مدل کوستیاکوف نیز در اکثر خاک‌ها کم‌برآوردگر بوده است.

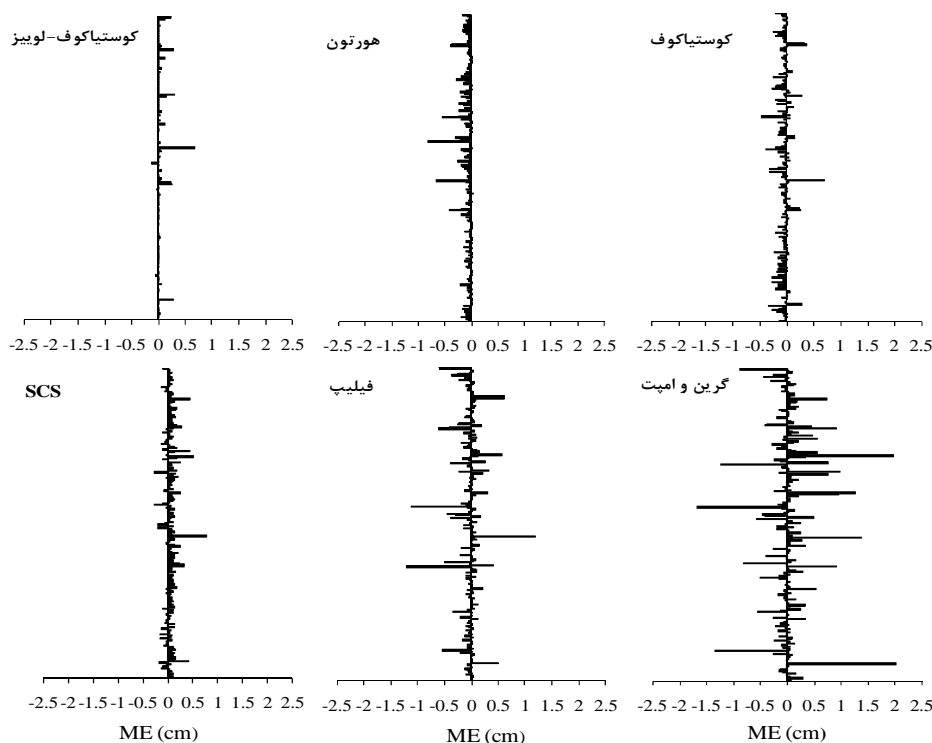
اساس، مدل‌های کوستیاکوف-لوییز و SCS در کاربری برنج به‌طور سیستماتیک بیش‌برآوردگر و مدل کوستیاکوف در اراضی بایر به‌طور سیستماتیک کم‌برآوردگر بوده است. مقایسه‌ی مقادیر میانگین ضریب همبستگی پیرسون حاکی از آن است که مدل کوستیاکوف-لوییز به‌جز در کاربری‌های آیش و یونجه نسبت به سایر مدل‌های مورد بررسی برآزش بهتری بر داده‌های آزمایش‌های نفوذ داشته است.

همان‌گونه که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، مدل کوستیاکوف-لوییز به‌جز کاربری برنج، در تمامی کاربری‌های مورد بررسی، حایز رتبه‌ی نخست ارزیابی گردیده است. عددی که در این جدول در داخل پرانتز و در کنار مقادیر انحراف از معیار رتبه‌ی نهایی ذکر شده است، بیانگر رتبه‌ی هر مدل به‌لحاظ پایداری رتبه‌ی عملکرد آن در کاربری‌های مختلف اراضی می‌باشد. مقایسه‌ی انحراف معیار رتبه‌ی عملکرد هر یک از مدل‌ها حاکی از آن است که عملکرد مدل کوستیاکوف در مقایسه با دیگر مدل‌ها، بیشترین وابستگی را به نوع کاربری اراضی داشته است.

**ارزیابی مدل‌های نفوذ به‌ازای تمامی داده‌های حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری:** به‌منظور بررسی رتبه‌ی کلی عملکرد هر یک از مدل‌های مورد بررسی به‌ازای تمامی آزمایش‌های نفوذپذیری صورت گرفته، مقادیر آماره‌های ارزیابی مدل‌های فوق برای تمامی داده‌های حاصل از انجام آزمایش‌های نفوذپذیری نیز محاسبه گردید. مقادیر این آماره‌ها در جدول (۶) ارائه گردیده است. در این جدول، اعداد داخل پرانتز، بیانگر رتبه‌ی هر مدل بر اساس آماره‌ی مربوطه می‌باشد. با توجه به جدول (۶)، مقادیر آماره‌ی متوسط ضریب همبستگی پیرسون که به‌نوعی درجه‌ی یکسان بودن مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده را نشان می‌دهد، حاکی از آن است که به‌لحاظ برآزش مدل‌های مورد بررسی بر داده‌های نفوذ تجمعی، مدل کوستیاکوف-لوییز در رتبه‌ی اول و مدل SCS در رتبه‌ی آخر قرار دارد. همچنین، با توجه به این جدول، مقایسه‌ی مقادیر آماره‌ی MME بیانگر آن است که در مجموع، مدل‌های هورتون، کوستیاکوف و فیلیپ مدلی کم‌برآوردگر و مدل‌های کوستیاکوف-لوییز، SCS و گرین و امپت مدلی بیش‌برآوردگر بوده‌اند. مقایسه‌ی مقادیر آماره‌ی MRMSE نشان می‌دهد که از نظر خطای کل برآورد نفوذ تجمعی،

جدول ۶- مقادیر آماره‌های ارزیابی مدل‌های نفوذ و رتبه‌ی مدل به‌ازای تمامی داده‌های آزمایش‌های نفوذپذیری

آماره	نام مدل					
	کوشتیاکوف-لوییز	هورتون	کوشتیاکوف	SCS	فیلیپ	گرین و امپت
MPearson	۰/۹۹۹۱(۱)	۰/۹۹۸۷(۲)	۰/۹۹۸۴(۳)	۰/۹۹۷۰(۴)	۰/۹۹۷۸(۵)	۰/۹۹۸۰(۴)
MME (cm)	۰/۰۲۲۶	-۰/۰۷۷۶	-۰/۰۵۷۲	۰/۰۵۹۹	-۰/۰۲۰۶	۰/۰۲۹۰
MAME (cm)	۰/۰۲۶۴(۱)	۰/۰۷۹۸(۲)	۰/۰۹۰۹(۳)	۰/۱۰۰۸(۴)	۰/۱۰۵۳(۵)	۰/۲۱۹۲(۶)
MRMSE (cm)	۰/۲۸۰۴(۱)	۰/۳۸۵۷(۲)	۰/۴۴۱۲(۴)	۰/۴۶۷۷(۵)	۰/۴۳۷۳(۳)	۰/۴۸۶۶(۶)
SDRMSE (cm)	۰/۴۰۰۷(۲)	۰/۴۰۵۰(۳)	۰/۴۲۴۹(۴)	۰/۳۹۴۷(۱)	۰/۵۶۶۰(۵)	۰/۶۵۸۷(۶)
رتبه‌ی نهایی	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)	(۵)	(۶)



شکل ۳- پراکنش میانگین خطای (ME) برآورد نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) به‌وسیله مدل‌های نفوذ برای تمامی داده‌های حاصل از آزمایش‌های نفوذپذیری

### نتیجه‌گیری

کوستیاکوف، فیلیپ و گرین و امپت می‌باشد. این ویژگی باعث انعطاف‌پذیری بیشتر این مدل به هنگام تعیین پارامترها گردید. همچنین، مدل‌های نظری فیلیپ و گرین و امپت در رتبه‌های انتهایی ارزیابی قرار گرفتند. علت این امر آن است که این مدل‌ها جزء مدل‌های نظری بوده و در پی‌ریزی این مدل‌ها برخی محدودیت‌ها شامل ایجاد شرایط مرزی و اولیه برای حل معادله‌ی ریچاردز و همگن فرض کردن خاک اعمال شده که با شرایط طبیعی سازگاری کافی ندارد. لیکن، در پی‌ریزی مدل‌های تجربی این‌گونه محدودیت‌ها اعمال نمی‌شود و هدف از استخراج مدل‌های تجربی آن بوده است که این مدل‌ها به بهترین شکل بر داده‌های آزمایش نفوذپذیری برازش یابند. از آنجا که در این پژوهش، مقادیر پارامترهای مدل‌های نظری فیلیپ و گرین و امپت، مشابه با مدل‌های تجربی از طریق برازش بر داده‌های آزمایش‌های نفوذپذیری تعیین گردید، لذا این پارامترها مفهوم فیزیکی نخستین خود را از دست داده‌اند. از سوی دیگر، از آنجا که مقادیر پارامترهای فوق به‌گونه‌ای تعیین گردید که این مدل‌ها به بهترین شکل بر داده‌های آزمایش‌های نفوذ برازش یابند، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی پارامترهای مدل‌های فوق، عملکرد آنها در برآورد نفوذ تجمعی، در مقایسه با آنچه که در نتایج این تحقیق آرایه گردید، به مراتب با خطای بیشتری همراه خواهد بود. هرچند در صورت تعیین پارامترهای فوق

نتایج به‌دست آمده از ارزیابی عملکرد مدل‌های نفوذ گرین و امپت، فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوییز، هورتون و SCS نشان داد مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش در کلاس‌های مختلف بافت خاک و کاربری‌های اراضی عملکردی متفاوت داشتند. با این وجود، در مقایسه با سایر مدل‌ها، نحوه‌ی برآورد نفوذ تجمعی در مدل کوستیاکوف-لوییز از روند پایدارتری برخوردار بوده و در اکثر مناطق، کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های مورد بررسی حایز رتبه‌ی نخست ارزیابی گردید. حال آن‌که این روند در دیگر مدل‌ها مشاهده نشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از ارزیابی کلی برآورد نفوذ تجمعی توسط مدل‌های نفوذ مورد بررسی در این پژوهش، مدل‌های کوستیاکوف-لوییز، هورتون، کوستیاکوف، SCS، فیلیپ و گرین و امپت به‌ترتیب، در رده‌های نخست تا ششم ارزیابی قرار گرفتند. بنابراین، می‌توان گفت از بین مدل‌های نفوذ مورد بررسی، مدل کوستیاکوف-لوییز بهترین مدل برای بیان کمی فرآیند نفوذ آب به خاک است. این نتیجه با نتایج پژوهش Parlange and Ghorbani Dashtaki *et al.* (2009) و Haverkamp (1989) مطابقت دارد. از آنجا که روش تعیین پارامترهای مدل‌های یاد شده روشی برازشی بود، یکی از دلایل برتری مدل کوستیاکوف-لوییز بیشتر بودن تعداد پارامترهای آن نسبت به مدل‌های SCS،

32.

- Horton, R.E. (1940). An Approach Towards a Physical Interpretation of Infiltration Capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5: 399-417.
- Kostiakov, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transactions Congress International Society for Soil Science*, 6th, Moscow, Part A: 17-21.
- Lewis, M.R. (1937). The rate of infiltration of water in irrigation practice. *Eos Trans AGU* 18:361-368.
- Mezencev, V.J. (1948). Theory of formation of the surface runoff. *Meteorologiae Hidrologia*, 3: 33-40.
- Mishra, S.K., Tyagi, J.V. and Singh, V.P. (2003) Comparison of infiltration models. *Hydrol. Processes*, 17: 2629-2652.
- Moravvej, A. (2008). Infiltration Model Using Neural Networks. MSc. thesis, Islamis Azad University, Shoushtar Unit. Iran. 80 pp.
- Mukheibir, P. (2008). Water resources management strategies for adaptation to climate-induced impacts in South Africa. *Water Resour Manage* 22:1259-1276.
- Neshat, A. and Pehkar, M. (2007). The comparison of methods for determining the vertical infiltration rate. *J. Agric. Sci. Natur. Resour.*, 14(3): 186-195.
- Parlange, J.Y. and Haverkamp, R. (1989). Infiltration and Ponding Time. In: Morel-Seytoux HJ (ed) *Unsaturated flow in hydrologic modeling, theory and practice*. Kluwer Academic, Boston, pp 95-126.
- Philip, J.R. (1957). The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83: 345-357.
- Rashidi, M. and Seyfi, K. (2007). Field comparison of different infiltration models to determine the soil infiltration for border irrigation method. *J. Agric. & Environ. Sci.*, 2(6): 628-632.
- Rawls, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L. and Shirmohammadi, A. (1993). Infiltration and soil water movement. In: *Handbook of Hydrology*, Maidment, D.R. (Ed.), McGraw-Hill, New York.
- Sadegh Zadeh, K., Shirmohammadi, A., Montas, H.J. and Felton, G. (2007). Evaluation of infiltration models in contaminated landscape. *Journal of Environmental Science and Health*, 42(7): 983-988.
- Sepaskhah, A.R. and Afshar-Chamanabad, H. (2002). Determination of infiltration rate for every-other furrow irrigation. *Biosystems Engineering*, 82(4): 479-484.
- Shukla, M.K., Lal, R., Owens, L.B. and Unkefer, P. (2003). Land Use and Management Impacts on Structure and Infiltration Characteristics of Soils in the North Appalachian Region of Ohio. *Soil Science*, 168 (3): 167-177.
- Sy, N.L. (2006). Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrol. Sci. J.*, 51(1): 3-20.
- نیازی به انجام آزمایش نفوذپذیری نیست، لیکن از جمله کاستی‌های استفاده از مدل‌های تخمینی با اساس فیزیکی، نیاز به اندازه‌گیری ویژگی‌هایی است که تعیین آن‌ها بسیار دشوارتر از اندازه‌گیری نفوذ می‌باشد. همچنین، در رتبه‌بندی عملکرد مدل‌های مورد بررسی در برآورد نفوذ تجمعی، مدل تجربی SCS نیز در رده‌های انتهایی رتبه‌بندی قرار گرفت. علت این امر وجود پارامتر ثابت (۰/۶۹۸۵) در این مدل است که مقدار آن در تمامی خاک‌ها ثابت می‌باشد. از آنجا که این امر موجب شده است تا مدل فوق در اکثر خاک‌های مناطق مورد مطالعه مدلی بیش‌برآوردگر باشد، می‌توان نتیجه گرفت که در اکثر خاک‌های مناطق مورد مطالعه، مقدار این پارامتر در مدل مذکور کمتر از مقداری است که برای آن پیشنهاد شده است.

## مراجع

- Argyrokastritis, I. and Kerkides, P. (2003). A note to the variable sorptivity infiltration equation. *Water Resour. Manage.*, 17:133-145.
- Bellocchi, G., Fila, G. and Donatelli, M. (2002). An Indicator of Solar Radiation Model Performance based on a Fuzzy Expert System. *Agron. J.*, 94: 1222-1233.
- Bhardwaj, A. and Singh, R. (1992). Development of a portable simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies. *Agricultural Water Management*, 22(4): 235-248.
- Bland, J.M. and Altman, D.G. (1997). *Statistics notes*. Cronba
- Ghorbani Dashtaki, S. (2008). Parametric Estimation of Infiltration Using Pedotransfer Functions, Artificial Neural Networks and Geostatistics. PHD. thesis, Tarbiat Modares University, Iran. 256 pp.
- Ghorbani Dashtaki, S., Homaei, M., Mahdian, M.H. and Kouchakzadeh, M. (2009). Site-Dependence Performance of Infiltration Models. *Water Resour Manage*, 23: 1573-1650.
- Green, W.H. and Ampt, G. (1911). Studies of Soil Physics, Part 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4: 1-24.
- Haverkamp, R., Rendon, L. and Vachaud, G. (1987). Infiltration equations and their applicability for predictive use. In: Yu- SI Fok (ed.) *Infiltration Development and Application*. Honolulu, Hawaii. pp. 142-152.
- Ho, R. (2006). *Handbook of univariate and multivariate data analysis and interpretation with SPSS*. Chapman & Hall/CRC. 403 pp.
- Holtan, H.N. (1961). A concept of infiltration estimates in watershed engineering. ARS41-51, U.S. Department of Agricultural Service, Washington, DC.
- Holzapfel, E.A., Jara, J., Zuniga, Marino, M.A., Paredes, J., Billib, M. (2004). Infiltration parameters for furrow irrigation. *Agric. Water Manag.*, 68: 19-

US Department of Agriculture Natural Resources and Conservation Service. (2005). National Engineering Handbook, Part 623, Surface Irrigation. National Technical Information Service, Washington, DC, Chapter 4.

Turner, E.R. (2006). Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. MSc. thesis, University of Maryland, USA. 202 pp.

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.

تاریخ دریافت: ۸۸/۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۱/۱۴

Archive of SID

## Evaluating Some Infiltration Models Under Different Soil Texture Classes and Land Uses

F. Parchami Araghi<sup>1</sup>, S.M. Mirlatifi<sup>2\*</sup>, S. Ghorbani Dashtaki<sup>3</sup>, M.H. Mahdian<sup>4</sup>

### Abstract

Infiltration process is one of the most important components of the hydrological cycle. The importance of the infiltration process has enforced the soil and water researchers to model this process for quantitative applications. In this study, the performance of Green and Ampt, Philip, Kostiakov, Kostiakov-Lewis, Soil Conservation Service (SCS) and Horton infiltration models under different soil texture classes and different land uses were evaluated. For this purpose, the infiltration data were obtained by double rings method from 210 point of different regions in Iran. The parameters of these models were then obtained, using least square optimization method. In order to evaluate the accuracy of the models, the mean error (ME), root mean square error (RMSE), mean absolute of mean error (MAME) and Pearson correlation coefficient (r) statistics were calculated. The results indicated that, compared to other models, the performance of Kostiakov-Lewis model had more consistent trend in estimating the cumulative infiltration under different study regions. This model provided first ranking of evaluation in different soil texture classes and land uses. The results indicated that Horton, Kostiakov and Philip models underestimated the infiltration process while Kostiakov-Lewis, Soil Conservation Service (SCS) and Green and Ampt models overestimated the soil water infiltration process. In the most soil texture classes and land uses, the Kostiakov-Lewis and Horton models were systematically over-estimator and under-estimator models, respectively. The results of this study indicated that compared to the other infiltration models, the Kostiakov-Lewis model is the best model for quantifying the infiltration process.

**Keywords:** Green and Ampt Model, Horton Model, Kostiakov Model, Kostiakov-Lewis Model, Philip Model, Soil Conservation Service (SCS) Model.

1-M.Sc. Student, Dept. of Irrigation and Drainage Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2-Associate Professor, Dept. of Irrigation and Drainage Eng., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

(\* - Corresponding Author EMail: mirlat\_m@modares.ac.ir)

3-Assistant Professor, Dept. of Soil Science, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

4- Associate Prof., Agricultural Research, Education and Extension Organization