



دانشگاه گوارن کشاورزی و منابع طبیعی گوان

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و دوم، شماره ششم، ۱۳۹۴

<http://jwsc.gau.ac.ir>

ارزیابی و بهینه‌سازی پارامترهای معادلات نفوذ برای حوضه آبخیز ليقوان (شمال غرب ایران)

* مهدی رحمتی^۱، محمدرضا نیشابوری^۲، مجید محمدی اسکوئی^۳، احمد فاخری فرد^۴

عباس احمدی^۵ و سیدبهن موسوی^۶

^۱ استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه مراغه، ^۲ استاد گروه علوم خاک، دانشگاه تبریز، ^۳ استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند،

^۴ استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، ^۵ استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه تبریز، ^۶ دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه مراغه

تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۱

چکیده

سابقه و هدف: مدل‌های تجربی زیادی برای توصیف فرآیند نفوذ آب به داخل خاک ارائه شده است. برای استفاده این معادلات در مناطق مختلف نیاز است که پارامترهای آن‌ها مورد واسنجی و بهینه‌سازی قرار گیرد. بنابراین در این پژوهش تلاش شد تا پارامترهای معادلات فوق با استفاده از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای برای حوضه آبخیز ليقوان از توابع استان آذربایجان شرقی بهینه‌سازی گردد.

مواد و روش‌ها: پژوهش حاضر در حوضه آبخیز ليقوان واقع در استان آذربایجان شرقی، شمال غرب ایران، واقع در طول‌های شرقی $33^{\circ} 22' 46''$ تا $46^{\circ} 28' 05''$ و عرض‌های شمالی $37^{\circ} 43' 07''$ تا $37^{\circ} 50' 08''$ انجام شد. از مدل‌های نفوذ استفاده شده در این پژوهش می‌توان به مدل گرین و امپ، کوستیاکف و کوستیاکف اصلاح شده، فیلپ، هورتون و کوتلیک و کرجا اشاره کرد. به منظور انجام این پژوهش، نمونه‌برداری‌های خاک و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در اواخر بهار سال ۱۳۹۱ صورت گرفت. در همین راستا، نفوذ تجمعی خاک در ۱۳۵ مکان از منطقه مورد مطالعه به وسیله نفوذسنج دیسکی اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج پژوهش حاضر نشان داد که به ترتیب مدل‌های سه جزئی فیلپ، کوستیاکف، کوستیاکف اصلاح شده، هورتون، گرین و امپ و فیلپ با مقادیر خطای برازش برابر با ۴، ۸، ۱۰، ۱۳، ۳۶ و ۳۷ درصد به ترتیب کم‌ترین خطا را در پیش‌بینی نفوذ تجمعی یا سرعت نفوذ برخوردار بودند. در بین چهار کلاس بافت خاک موجود در پژوهش نیز (لوم رسی، لوم، لوم رسی شنی و لوم شنی)، تمامی مدل‌های نفوذ استفاده شده در این پژوهش به استثنای مدل هورتون بهترین انطباق را در کلاس بافت لوم رسی نشان دادند.

نتیجه‌گیری: نتایج پژوهش حاضر نشان داد که مدل‌های تجربی کوستیاکف و کوستیاکف اصلاح شده عملکرد بهتری در برازش به داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ داشتند. توصیه می‌شود که از این مدل‌ها در پژوهش‌های آتی برای پیش‌بینی مقدار نفوذ خاک به آب در شرایطی مشابه با شرایط حوضه آبخیز ليقوان استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبخیز ليقوان، مدل فیلپ، مدل گرین و امپ، نفوذسنج دیسکی، نفوذپذیری خاک

مقدمه

سرعت نفوذ آب از سطح به داخل خاک را نفوذپذیری خاک می‌گویند. سرعت نفوذ با زمان به صورت غیرخطی کاهش یافته و به مقدار ثابتی سیر می‌کند. کل آب نفوذ کرده در خاک در هر زمان عبارت از انتگرال منحنی سرعت نفوذ تا آن زمان است و شیب آن به تدریج کم می‌شود. روش‌های مختلفی مانند روش‌های مستقیم^۱ و روش‌های حوضه‌ای^۲ برای اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک استفاده شده است (18). روش‌های مستقیم معمولاً در نواحی کوچک جایی که منحنی نفوذ مستقیماً قابل تعیین شدن است، استفاده می‌شود. در مقابل، روش‌های حوضه‌ای همان‌طور که از نام آن نیز مشخص است برای کل حوضه به کار برده می‌شود. در روش‌های حوضه‌ای شدت بارندگی و رواناب کل در طول یک رویداد بارندگی برای برآورد سرعت نفوذ یا نفوذ تجمعی اندازه‌گیری می‌شود (18).

توصیف پدیده نفوذ با حل معادله ریچاردز، در صورتی که روابط بین آب خاک، پتانسیل ماتریک و هدایت هیدرولیکی تعریف شده و معین باشد، امکان‌پذیر است (9). در حل معادله کلی نفوذ عمودی آب به خاک (معادله ریچاردز)، عوامل فیزیکی خاک از قبیل نفوذپذیری، تخلخل، میزان رطوبت، جرم مخصوص ظاهری خاک و غیره غالباً ثابت فرض می‌شود. در صورتی که این ویژگی‌ها تحت تأثیر عوامل گوناگون نظیر شخم و کیفیت آن، نوع گیاه و مرحله رشد آن، فعالیت موجودات زنده خاک، بارندگی و تعداد دفعات آبیاری از یک فصل تا فصل بعد و حتی از یک آبیاری تا آبیاری بعدی تغییر می‌کنند (3). مشخص کردن این تغییرات و دخالت دادن آن‌ها در حل معادله ریچاردز اگر غیرممکن هم نباشد بسیار

مشکل خواهد بود. در نتیجه کاربرد تئوری نفوذ در مزرعه عملاً با محدودیت مواجه شده است. بنابراین غالباً ترجیح داده می‌شود که از معادلات یا مدل‌های ریاضی که به صورت تجربی و با اتکا به داده‌های آزمایش به دست آمده‌اند در توصیف و ارزیابی کم و کیف نفوذ آب به خاک استفاده شود (3). اما به دلیل پیچیده بودن پدیده نفوذ، یک معادله تجربی نفوذ به تنهایی قادر به پیش‌بینی نفوذ برای همه نوع خاک و شرایط متنوع نیست. در نتیجه، معادلات تجربی مختلف ابداع و ارائه شدند که می‌توان به معادلات زیر اشاره نمود:

معادله گرین و امپ (1911): این مدل برای تعیین سرعت نفوذ در خاک بر اساس رفتار لوله‌های موئین ارائه شده است. معادله گرین و امپ قدیمی‌ترین معادله ارائه شده برای پیش‌بینی میزان و سرعت نفوذ آب به خاک می‌باشد. شکل کلی معادله به صورت زیر است:

$$i(t) = K_a + \frac{b}{I} \quad (1)$$

که در آن، $i(t)$ و I به ترتیب سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی و K_a و b ضرایب ثابت معادله می‌باشند. مقدار ic بیانگر سرعت نفوذی است که در زمان بی‌نهایت به آن می‌رسد. کاوسی و همکاران (2011) در حوضه آبخیز کجور اقدام به ارزیابی چندین مدل نفوذ آب به خاک کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل کوستیاکوف بهترین برازش و مدل‌های گرین و امپ و مدل هورتون بدترین برازش را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند. ما و همکاران (2010) در شرایط آزمایشگاهی مدل گرین و امپ را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل گرین و امپ در پیش‌بینی سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی دچار بیش‌برآوردی می‌شود.

- 1- Direct methods
- 2- Watershed methods

معادله کوستیاکوف (1932): این معادله یکی از اولین معادله‌هایی است که برای توصیف نفوذ آب به داخل خاک ارائه شده است. معادله تجربی کوستیاکوف به صورت زیر ارائه شده است:

$$I(t) = at^b \quad (2)$$

که در آن، $I(t)$ بیانگر عمق نفوذ یافته به داخل خاک (L)، t زمان پیمایش جریان (T) و a و b ضرایب تجربی معادله می‌باشند. ضرایب a و b برای خاک‌های مختلف متفاوت بوده و مقدار a بزرگ‌تر از صفر و مقدار b بین صفر و یک می‌باشد (3). این ضرایب دارای ماهیت فیزیکی نیستند ولی بعضی پژوهشگران ارتباط این ضرایب را با خصوصیات خاک بررسی کرده و وابستگی این ضرایب به خصوصیات خاک را گزارش کرده‌اند. فیلیپ (1957) نشان داد که ضریب a برابر با ضریب جذبی خاک می‌باشد. رحیمی و کشکولی (2006) و جلینی (1996) نیز نتایج مشابهی گزارش کردند. هارتلی (1992) گزارش کرد که مقادیر a و b به زمان، درصد رطوبت اولیه، هدایت موئینگی و هیدرولیکی خاک بستگی دارد. مقادیر a و b با برآزش معادله به داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی به دست می‌آید.

ایراد معادله کوستیاکوف این است که اگر زمان به سمت بی‌نهایت میل کند، سرعت نفوذ نهایی به سمت صفر میل خواهد کرد. این در صورتی است که در یک خاک همگن سرعت نفوذ نهایی تقریباً برابر هدایت هیدرولیکی خاک بوده و برابر صفر نخواهد شد. بنابراین معادله فوق تا زمانی کاربرد دارد که سرعت نفوذ از هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بیش‌تر باشد و از آن به بعد معادله قادر به توصیف سرعت نفوذ در خاک نیست. نتایج آزمایش‌های مختلف نشان داد که معادله کوستیاکوف برای تخمین سرعت نفوذ در کوتاه‌مدت (حدود ۲ تا ۶ ساعت) از کارایی مناسبی برخوردار می‌باشد و بنابراین معادله

کاربرد زیادی در طراحی سیستم‌های آبیاری که عموماً دامنه زمانی در این محدوده در نظر گرفته می‌شود، دارد (1). رشیدی و سیفی (2007) پنج مدل کوستیاکوف، کوستیاکف-لوئیز، مدل حفاظت خاک آمریکا، مدل اصلاح شده حفاظت خاک آمریکا و والکر را در خاک لوم رسی سیلتی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط استوانه‌های مضاعف مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت پنج مدل مذکور به ترتیب کوستیاکوف < کوستیاکوف-لوئیز < مدل اصلاح شده حفاظت خاک آمریکا < مدل حفاظت خاک آمریکا < مدل والکر می‌باشد. جلینی (1996) در پژوهشی در اراضی کرکج از توابع آذربایجان شرقی به ارزیابی دقت پنج مدل کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ، هورتون و مدل حفاظت خاک آمریکا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده استوانه‌های مضاعف بر روی ۳۰ نمونه خاک پرداخت. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل کوستیاکوف بالاترین دقت را در تخمین مقدار و سرعت نفوذ در بین مدل‌های استفاده شده داشت. کلمنس (1983) و هارتلی (1992) نیز کاربرد مدل کوستیاکوف در آبیاری سطحی را پیشنهاد کرده‌اند. نشاط و پاره‌کار (2007) با ارزیابی چند مدل نفوذ نشان دادند که مدل کوستیاکوف دارای بالاترین ضریب تبیین و کم‌ترین واریانس در برآورد مقدار نفوذ تجمعی در کوتاه‌مدت (چند ساعت) می‌باشد ولی با افزایش زمان پیمایش، مدل‌های فیلیپ و مدل حفاظت خاک آمریکا عملکرد بهتری داشتند.

معادله هورتون (1940): این معادله از جمله مدل‌هایی با سه ضریب تجربی می‌باشد. شکل کلی معادله به صورت زیر می‌باشد:

$$i(t) = i_c + (i_0 - i_c)e^{-kt} \quad (3)$$

که در آن، i_c بیانگر سرعت نفوذ نهایی، i_0 بیانگر سرعت نفوذ اولیه و k ضریب ثابت معادله که هر سه

جایاواردن (1992) مدل فیلیپ را برای خاک‌های لایه‌ای و سنگریزه‌ای مناسب نمی‌دانند. آن‌ها دلیل این امر را فرضیات این مدل که در چنین خاک‌هایی صادق نمی‌باشند، عنوان کردند. حقیقی و همکاران (2010) در ارزیابی چند مدل نفوذ برای به‌دست آوردن سرعت نفوذ نهایی در آبخیز طالقان در استان تهران نشان دادند که مدل‌های هورتون و فیلیپ بهترین تطابق را با داده‌های واقعی دارند. رحیمی و کشکولی (2006) نشان دادند که مدل فیلیپ در یک خاک لومی رسی و همگن کارایی بهتری در برآورد مقدار نفوذ تجمعی و لحظه‌ای نسبت به دیگر مدل‌های به‌کار رفته دارا می‌باشد.

معادله هولتان (1961): شکل کلی معادله هولتان به صورت زیر می‌باشد که M ، a ، i_c و n ضرایب معادله می‌باشند. هولتان M را به‌طور خیلی خاص به ظرفیت ذخیره آب خاک در بالای لایه بازدارنده نسبت داده است ولی مفهوم M در خاک‌های بدون لایه بازدارنده روشن نیست (21).

$$i = i_c + a(M - I)^n \quad (5)$$

مدل سه جزئی فیلیپ (1987): این مدل به صورت روابط زیر بیان می‌شود:

$$I(t) = St^{\frac{1}{2}} + c_1 t + c_2 t^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

$$i(t) = \frac{1}{2} St^{-\frac{1}{2}} + c_1 + \frac{3}{2} c_2 t^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

که در آن، S ضریب جذبی و c_1 و c_2 ضرایب تجربی هستند. در حل سری توابع توانی، می‌توان در مدل فیلیپ از جمله دوم به بعد صرف‌نظر کرد که این موضوع باعث می‌شود که در برخی موارد ضریب A (رابطه ۴) منفی به‌دست آید که توجیح فیزیکی ندارد. بنابراین کوتیلیک و کرجا پیشنهاد کردند که به معادله فیلیپ، جزء سوم هم اضافه شود.

پارامتر فوق به صورت تجربی به‌دست می‌آیند. از مزایای معادله هورتون این است که برخلاف معادله کوستیاکوف که در زمان t برابر بی‌نهایت، سرعت نفوذ صفر نمی‌شود. از معایب معادله هورتون می‌توان به کم‌برآوردی سرعت نفوذ در زمان‌های ابتدای نفوذ اشاره کرد (2). نتایج پژوهش کاوسی و همکاران (2011) نشان داد که در بین چندین مدل نفوذ استفاده شده در پژوهش آن‌ها مدل هورتون بدترین برازش را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشت.

مدل فیلیپ (1957): این مدل که در واقع یک راه‌حل خاص از معادله ریچاردز (1931) برای جریان غیراشباع می‌باشد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I(t) = St^{\frac{1}{2}} + At \quad (4)$$

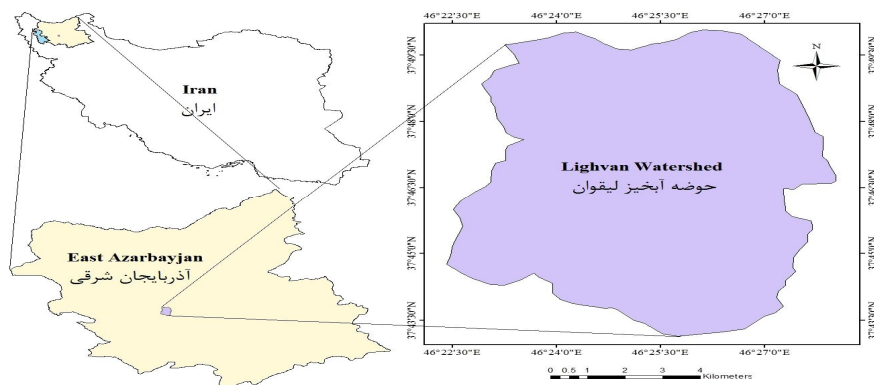
که در آن، S ضریب جذبی خاک ($L/T^{-1/2}$) و A ضریب ثابت که در عمل معادل هدایت هیدرولیکی ناحیه انتقال خاک در نظر گرفته می‌شود (L/T). ضرایب مذکور از طریق برازش مدل به داده‌های تجربی به‌دست می‌آیند. از معایب مدل فیلیپ می‌توان فرضیات آن مثل فرض یکنواخت بودن خاک و رطوبت اولیه در نیمرخ خاک را نام برد که این فرضیات به ندرت در شرایط مزرعه صدق می‌کنند و باعث خطا در تخمین می‌شوند (20). با این وجود تجربه نشان داده است که معادله فیلیپ برای دوره‌های طولانی مدت (بیشتر از چند ساعت) کارایی بهتری دارد (1). فهد و همکاران (1982) با مقایسه چند مدل نفوذ نشان دادند که مدل‌های فیلیپ و کوستیاکوف مطابقت بهتری با داده‌های تجربی دارند. جلینی (1996) در آزمایش‌های خود نشان داد که با افزایش زمان پیمایش به بیش از ۲۸۵ دقیقه، مدل‌های تجربی تغییرات بیش‌تری نسبت به مدل فیلیپ نشان می‌دهند و مدل فیلیپ بهترین مدل برای زمان‌های طولانی می‌باشد. این در صورتی است که مهشواری و

اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای و آزمایشگاهی: در این پژوهش بافت خاک با روش هیدرومتر و به‌صورت چهار قرائت (5)، نفوذپذیری خاک با استفاده از نفوذسنج دیسکی (18) و رطوبت خاک به روش وزنی (27) در عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد. شکل ۲ تصویر شماتیک دستگاه نفوذسنج دیسکی استفاده شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک با استفاده از دستگاه نفوذسنج دیسکی ابتدا سطح خاک از هر گونه گیاه، سنگ، کاه و کلش تمیز و به سطح همواری تبدیل شد. سپس دیسک دستگاه بر روی خاک قرار گرفت. پس از قرارگیری دستگاه بر روی خاک، مکش مورد نظر از طریق برج حباب تنظیم و اجازه نفوذ آب به داخل خاک داده شد. برای اعمال مکش صفر برای اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک در حالت اشباع باید فاصله سطح آب تا انتهای لوله ماریوت را بر روی عدد ۱/۵ تنظیم می‌شد. بعد از شروع نفوذ آب در خاک، ارتفاع آب در مخزن دستگاه با گذشت زمان قرائت شده و منحنی نفوذ رسم گردید. اتمام زمان اندازه‌گیری معمولاً زمانی بود که اختلاف دو تا سه قرائت یکسان به دست می‌آمد که به‌طور معمول ۳۰ تا ۴۵ دقیقه زمان برای هر اندازه‌گیری نیاز بود.

برای استفاده معادلات فوق در مناطق مختلف نیاز است که پارامترهای معادلات فوق مورد واسنجی و بهینه‌سازی قرار گیرد. بنابراین در این پژوهش تلاش شد تا پارامترهای معادلات فوق با استفاده از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای برای حوضه آبخیز لیقوان از توابع استان آذربایجان شرقی بهینه‌سازی گردد تا برای کارهای تحقیقاتی آتی و همچنین برای مناطق مشابه اطراف حوضه فوق مورد استفاده قرار گیرد.

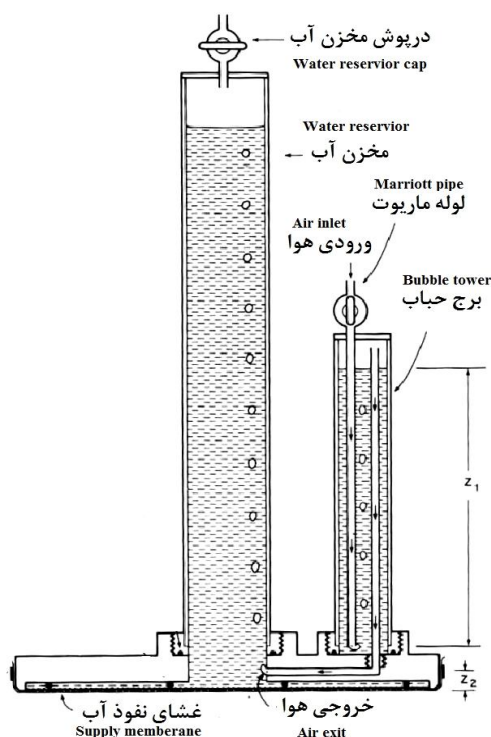
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: پژوهش جاری در حوضه آبخیز لیقوان صورت گرفت. حوضه لیقوان با مساحت حدود ۷۶ کیلومترمربع از ارتفاعات سه‌سهند شروع و به ایستگاه هروی خاتمه می‌یابد. این محدوده جزو زیرحوضه‌های آجی‌چای بوده که بین طول‌های شرقی $37^{\circ} 22' 23''$ تا $37^{\circ} 21' 05''$ و عرض‌های شمالی $46^{\circ} 43' 07''$ تا $46^{\circ} 50' 08''$ قرار گرفته است (13). از سال ۱۳۵۰ حوضه لیقوان به‌عنوان حوضه معرف انتخاب شده و مجهز به ادوات هیدروکلیماتولوژی شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان آذربایجان شرقی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در ایران و استان آذربایجان شرقی.

Figure 1. Geographical location of the study area in Iran and East Azerbaijan province.



شکل ۲- تصویر شماتیک از دستگاه نفوذسنج دیسکی استفاده شده برای اندازه‌گیری نفوذپذیری خاک.

Figure 2. Schematic picture of disc infiltrometer applied to determine soil infiltration.

می‌باشد. آماره RMSE که بسته به پارامتر مورد ارزیابی دارای واحدی موافق با واحد پارامتر فوق خواهد بود، بین مقادیر صفر و مثبت بی‌نهایت قرار می‌گیرد که مقادیر کم‌تر آن بیانگر عملکرد بهتر می‌باشند. خطای ارزیابی که در واقع حالت استاندارد شده آماره RMSE می‌باشد و برعکس آماره فوق یک آماره بدون واحد بوده و امکان مقایسه دقت چندین روش یا چندین پارامتر برآوردی با واحدهای مختلف را به وجود می‌آورد. در واقع این پارامتر میزان خطای محاسبه شده از آماره RMSE را بدون واحد و بر حسب درصد بین مثبت بی‌نهایت (بیش‌ترین خطا) و صفر (کم‌ترین خطا) بیان می‌کند.

نتایج

جدول ۱ پارامترهای آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲ نقشه بافت خاک منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که با استفاده

تجزیه‌های آماری: ارزیابی مدل‌های استفاده شده در پژوهش با استفاده از معیارهای آماری جذر میانگین مربع خطاها^۱ (RMSE)، خطای ارزیابی^۲ (EE) و ضریب تبیین^۳ (R²) مورد ارزیابی قرار گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (X_{t,Obs} - X_{t,Sim})^2}{N}} \quad (8)$$

$$EE = \frac{RMSE}{X_{Obs}} \times 100 \quad (9)$$

که در آن، X بیانگر پارامتر مورد ارزیابی، زیرنویس‌های O_{bs} و S_{im} به ترتیب بیانگر مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده در زمان یا مکان N، t، بیانگر تعداد مشاهدات و علامت بار () بر روی پارامتر فوق بیانگر مقدار میانگین پارامتر مربوطه

- 1- Root mean square error
- 2- Evaluation error
- 3- Determination coefficient

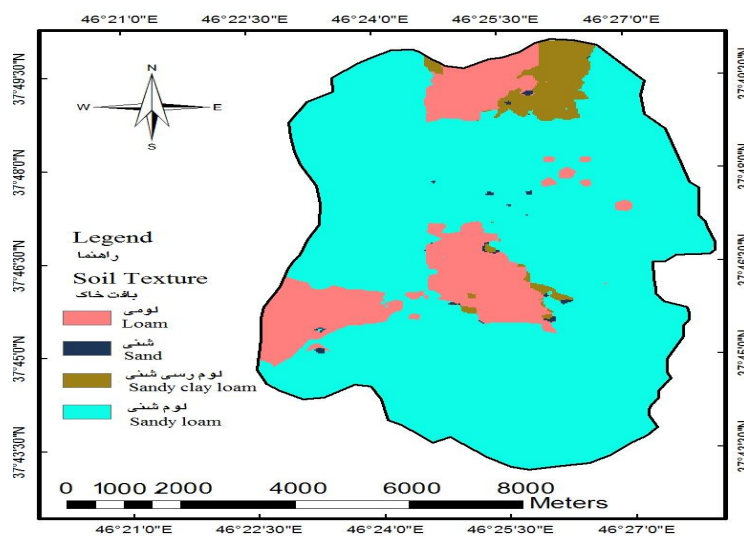
می‌شود. کلاس‌های بافت لومی، لوم رسی شنی و شنی به‌ترتیب ۱۴/۳، ۳/۹ و ۰/۳ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شدند که بسته به وسعت بافت‌های فوق به‌ترتیب ۸۷، ۲۷، ۱۷ و ۴ مورد از ۱۳۵ اندازه‌گیری نفوذ در کلاس‌های بافت لوم شنی، لوم، لوم رسی شنی و شنی صورت گرفت.

از نقشه‌های درصد رس، سیلت و شن خاک تهیه شده با استفاده از داده‌های نقاط اندازه‌گیری شده و روش زمین‌آماري کريجينگ معمولي و مدل كروي به‌دست آمده است. با توجه به شکل ۳، منطقه مورد مطالعه دارای چهار کلاس بافت خاک می‌باشد. بخش بزرگ منطقه مورد مطالعه دارای بافت لوم شنی است که ۸۱/۵ درصد از سطح منطقه مورد مطالعه را شامل

جدول ۱- پارامترهای آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر.

Table 1. Statistical stats of measured properties in this research.

متغیر Variable	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	انحراف استاندارد Standard deviation
رس (درصد) Clay (%)	5.35	38.83	17.36	5.67
سیلت (درصد) Silt (%)	6.21	48.01	26.56	7.08
شن (درصد) Sand (%)	33.59	84.68	56.08	9.46
سرعت نفوذ اولیه (cm hr ⁻¹) Initial infiltration rate (cm hr ⁻¹)	2.23	33.48	13.15	6.67
سرعت نفوذ نهایی (cm hr ⁻¹) Final infiltration rate (cm hr ⁻¹)	0.391	7.65	2.59	1.58
رطوبت اولیه (cm ³ cm ⁻³) Antecedent soil moisture (cm ³ cm ⁻³)	0.04	0.29	0.14	0.06
رطوبت اشباع مزرعای (cm ³ cm ⁻³) Field saturated moisture (cm ³ cm ⁻³)	0.33	0.54	0.44	0.05



شکل ۳- نقشه بافت خاک منطقه مورد مطالعه به‌دست آمده از روش زمین‌آماري کريجينگ.

Figure 3. Soil texture map of the study area generated from geostatistical method of Kriging.

با توجه به رابطه فوق، مقادیر لگاریتم طبیعی نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده ($\ln I$) بر حسب سانتی‌متر در مقابل لگاریتم طبیعی زمان اندازه‌گیری ($\ln t$) بر حسب ساعت رسم و معادله خطی آن‌ها به دست آمد که شیب خط معادله فوق بیانگر پارامتر b و عرض از مبدأ آن بیانگر $\ln a$ می‌باشد. در نهایت پس از بهینه‌سازی پارامترهای a و b ، مقادیر نفوذ تجمعی با استفاده از رابطه ۲ پیش‌بینی و دقت مدل با استفاده از معیارهای R^2 ، RMSE و EE به دست آمده بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی مورد بررسی قرار گرفت. در جدول ۳ پارامترهای بهینه‌سازی شده مدل کوستیاکف و دقت پیش‌بینی مدل کوستیاکف با استفاده از پارامترهای فوق گزارش شده است.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که پارامترهای مدل کوستیاکف با دقت خیلی بالایی با میانگین R^2 برابر با ۰/۹۹۴ بهینه‌سازی شدند. مقایسه مقادیر حداقل و حداکثر ضرایب a و b به دست آمده برای نمونه‌های مختلف در محدوده کلاس بافت خاک مشابه نشان می‌دهد که تغییرپذیری نسبتاً اندکی بین خاک‌های مختلف یک کلاس بافتی وجود دارد (به استثنای پارامتر a برای بافت‌های لوم و لوم شنی). به نظر می‌رسد که تغییرپذیری بالای پارامتر a در محدوده بافت‌های لوم و لوم شنی می‌تواند به شرایط ساختمان و کیفیت خاک‌ها بستگی داشته باشد. همچنین جدول فوق نشان داد که رابطه کوستیاکف با استفاده از پارامترهای بهینه شده a و b با دقت بالایی ($EE=/.۸$) قادر به پیش‌بینی مقادیر نفوذ تجمعی می‌باشد. مهم‌ترین دلیل دقت بالای مدل کوستیاکف در انطباق بر داده‌های اندازه‌گیری شده پایه تجربی آن می‌باشد که مدل را از قدرت تطابق بالایی برخوردار کرده است.

با استفاده از منحنی‌های نفوذ اندازه‌گیری شده در منطقه مورد مطالعه، پارامترهای معادلات نفوذ گرین و امپ (1911)، کوستیاکف (1932)، هورتون (1940)، فیلیپ (1957) و کوتیلیک و کرجا (1987) پیش‌بینی گردید که در زیر به صورت جداگانه آورده شده است: **مدل گرین و امپ:** در این پژوهش پارامترهای معادله گرین و امپ به صورت تجربی تعیین شدند. برای این کار مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت نفوذ (i) با واحد سانتی‌متر در ساعت در مقابل عکس نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده (I/I) با واحد سانتی‌متر رسم شد تا شیب (b) و عرض از مبدأ (K_a) خط محاسبه گردد. در جدول ۲ مقادیر بهینه شده پارامترهای معادله گرین-امپ و همچنین نتایج ارزیابی مدل گزارش شده است. این جدول نشان می‌دهد که معادله گرین-امپ با دقت متوسطی ($R^2=۰/۶۳۸$ و $EE=/.۳۵/۹$) بر داده‌های اندازه‌گیری شده تطابق یافت. از دلایل عدم برخورداری از توانایی خیلی بالای معادله گرین-امپ در توصیف فرآیندهای نفوذ اندازه‌گیری شده، می‌توان به داشتن پایه تئوری آن اشاره کرد. به نظر می‌رسد که فرضیات استفاده شده در بسط این معادله مانند فرض یکنواخت بودن نیمرخ رطوبت خاک و همگن بودن خاک در خاک‌های بررسی شده در این پژوهش خیلی صادق نیست. در بین کلاس‌های بافت خاک، مدل گرین-امپ بهترین انطباق ($R^2=۰/۷۲۵$ و $EE=/.۲۴$) را در بافت لوم رسی نشان داد. خطای انطباق در سه کلاس بافت خاک دیگر به‌طور متوسط ۱۰ درصد بالاتر از بافت لوم رسی بود.

معادله کوستیاکف و کوستیاکف اصلاح‌شده: برای بهینه‌سازی پارامترهای a و b مدل کوستیاکف (1932) از شکل خطی رابطه فوق (رابطه ۱۰) استفاده شد. شکل خطی مدل کوستیاکف در زیر ارائه شده است که a و b ضرایب ثابت معادله می‌باشند.

$$\ln I = b \times \ln t + \ln a \quad (10)$$

جدول ۲ - مقادير بهينه شده پارامترهاي معادله گرین و امپ به همراه نتایج ارزیابی مدل در پیش‌بینی سرعت نفوذ خاک.

Table 2. Optimized parameters of Green and Ampt model along with its evaluation results for soil infiltration rate prediction.

متغیر Variable	میانگین Mean										حداکثر Max		حداقل Min		
	Standard deviation	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam	Loam
پارامترهای مدل Model parameters		2.227	1.790	1.460	1.117	1.432	1.602	1.432	1.602	1.432	1.602	1.432	1.602	1.432	1.602
	K_a (cm/hr)	0.176	0.144	0.030	0.162	0.142	0.020	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176
	b (cm ² /hr)	0.176	0.144	0.030	0.162	0.142	0.020	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176
	R^2	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118
	EE (%)	7.63	8.67	7.63	7.63	8.67	7.63	8.67	7.63	8.67	7.63	8.67	7.63	8.67	7.63
	RMSE (cm/hr)	0.162	0.142	0.030	0.162	0.142	0.020	0.144	0.162	0.142	0.162	0.144	0.162	0.142	0.162
		0.176	0.144	0.030	0.162	0.142	0.020	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176
		0.176	0.144	0.030	0.162	0.142	0.020	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176
		0.176	0.144	0.030	0.162	0.142	0.020	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176
		0.176	0.144	0.030	0.162	0.142	0.020	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176
	0.176	0.144	0.030	0.162	0.142	0.020	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	
	0.176	0.144	0.030	0.162	0.142	0.020	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	0.144	0.176	

بیانگر $\ln a$ و شیب خط بیانگر $(b-1)$ خواهد بود. نتایج بهینه‌سازی پارامترهای معادله کوستیاکف اصلاح شده و همچنین نتایج ارزیابی مدل با استفاده از پارامترهای بهینه شده در جدول ۴ گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای معادله کوستیاکف اصلاح شده با دقت بالایی ($R^2=0/988$) بهینه‌سازی شدند. همچنین مقایسه مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با مقادیر نفوذ تجمعی پیش‌بینی شده از رابطه ۱۱ با به‌کارگیری پارامترهای بهینه شده نشان داد که مدل کوستیاکف اصلاح شده با دقت خوبی ($EE=10\%$) قادر به توصیف فرآیند نفوذ در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

مدل هورتون: برای پیدا کردن پارامترهای معادله هورتون (1940)، نرم‌افزار کاربردی *data solver* برنامه اکسل با استفاده از روش آماری کم‌ترین مربعات خطا به‌کار گرفته شد. برای این کار از مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت نفوذ بر حسب سانتی‌متر بر ساعت و زمان بر حسب ساعت استفاده شد. در جدول ۵ نتایج بهینه‌سازی پارامترهای معادله فوق به همراه نتایج ارزیابی آن گزارش شده است. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که معادله هورتون با میانگین R^2 برابر با ۰/۹۵۵ و خطای ارزیابی (EE) ۱۲/۶ درصد از دقت قابل‌قبولی در پیش‌بینی سرعت نفوذ خاک برخوردار می‌باشد. مقایسه نتایج ارزیابی معادله هورتون در بین کلاس‌های بافت خاک مختلف نیز نشان داد که دقت مدل فوق در کلاس بافت خاک لوم رسی شنی با R^2 برابر با ۰/۹۶۱ و EE برابر با ۱۱/۶ درصد بالاتر از سه کلاس بافت دیگر می‌باشد (جدول ۵).

در این پژوهش همچنین معادله کوستیاکف اصلاح‌شده نیز بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده انطباق یافت. شکل کلی معادله کوستیاکف اصلاح‌شده به صورت زیر می‌باشد:

$$I = at^b + ct \quad (11)$$

برای بهینه‌سازی پارامترهای معادله کوستیاکف اصلاح‌شده که از جمله معادله‌های سه‌پارامتری می‌باشد، ابتدا تلاش شد تا با استفاده از برنامه کاربردی *Data Solver* در نرم‌افزار اکسل، هر سه پارامتر مدل با استفاده از روش کم‌ترین مربعات خطا بهینه‌سازی گردند. علی‌رغم این که به‌کار بردن روش فوق منجر به بهینه‌سازی پارامترهای مدل با دقت بالایی شد ($R^2=0/997$ و $EE=3/8\%$)، ولی در بیش از نیمی از داده‌های اندازه‌گیری شده، مقدار پارامتر c که تقریباً بیانگر سرعت نفوذ نهایی خاک می‌باشد، منفی به‌دست آمد که از نظر قوانین فیزیک مفهوم و معنای فیزیکی ندارد. بنابراین در مرحله بعد پارامترهای معادله کوستیاکف اصلاح‌شده با استفاده از روش معمول که در دیگر پژوهش‌ها هم استفاده شده است، بهینه‌سازی گردید. برای این کار ابتدا مقدار c از روی داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ محاسبه و در معادله جایگزین شد. بنابراین معادله سه‌پارامتری فوق به معادله دو پارامتری تبدیل و از طریق رابطه خطی زیر دو پارامتر دیگر آن بهینه‌سازی شدند.

$$\ln\left(\frac{I}{t} - c\right) = \ln a + (b-1) \ln t \quad (12)$$

با رسم کردن مقادیر عددی $\ln(I/t-c)$ در مقابل $\ln t$ بر حسب سانتی‌متر، t بر حسب ساعت و c بر حسب سانتی متر بر ساعت)، عرض از مبدأ خط

جدول ۴- پارامترهای بهینه شده معادله کوستیاکوف اصلاح شده به همراه نتایج ارزیابی مدل.

Table 4. Optimized parameters of modified Kostyakov model along with its evaluation results.

متغیر Variable	حداقل Min												حداکثر Max												میانگین Mean			انحراف استاندارد Standard deviation
	ارزیابی Evaluation				پارامترهای مدل Model parameters				ارزیابی Evaluation				پارامترهای مدل Model parameters				ارزیابی Evaluation											
	RMSE (cm/hr)	EE (%)	R ²	a	b	c (cm/hr)																						
کلی خاکها All soils	0.069	2.95	0.008	0.662	0.051	1.583	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036						
لوم رسی Sandy loam	0.052	2.75	0.008	0.492	0.044	1.318	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036						
لوم رسی Sandy clay loam	0.006	1.74	0.005	0.062	0.043	0.102	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036						
لوم رسی Loam	0.036	3.87	0.011	0.293	0.069	0.706	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006						
لوم رسی Clay loam	0.006	2.02	0.002	0.053	0.021	0.147	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036	0.006	0.036						
کلی خاکها All soils	0.118	10.20	0.988	1.160	0.407	2.586	0.118	0.006	0.118	0.006	0.118	0.006	0.118	0.006	0.118	0.006	0.118	0.006	0.118	0.006	0.118	0.006						
کلی خاکها Clay loam	0.155	10.43	0.988	1.531	0.411	3.403	0.155	0.006	0.155	0.006	0.155	0.006	0.155	0.006	0.155	0.006	0.155	0.006	0.155	0.006	0.155	0.006						
لوم رسی Sandy loam	0.026	10.10	0.990	0.278	0.432	0.555	0.026	0.006	0.026	0.006	0.026	0.006	0.026	0.006	0.026	0.006	0.026	0.006	0.026	0.006	0.026	0.006						
لوم رسی Sandy clay loam	0.068	10.09	0.986	0.667	0.382	1.502	0.068	0.006	0.068	0.006	0.068	0.006	0.068	0.006	0.068	0.006	0.068	0.006	0.068	0.006	0.068	0.006						
لوم رسی Loam	0.017	6.29	0.997	0.177	0.383	0.767	0.017	0.006	0.017	0.006	0.017	0.006	0.017	0.006	0.017	0.006	0.017	0.006	0.017	0.006	0.017	0.006						
کلی خاکها All soils	0.289	18.07	1.000	3.122	0.506	7.645	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006						
لوم رسی Sandy loam	0.289	15.78	1.000	3.122	0.499	7.645	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006	0.289	0.006						
لوم رسی Sandy clay loam	0.038	13.19	0.995	0.372	0.506	0.725	0.038	0.006	0.038	0.006	0.038	0.006	0.038	0.006	0.038	0.006	0.038	0.006	0.038	0.006	0.038	0.006						
لوم رسی Loam	0.179	18.07	0.999	1.558	0.474	3.013	0.179	0.006	0.179	0.006	0.179	0.006	0.179	0.006	0.179	0.006	0.179	0.006	0.179	0.006	0.179	0.006						
لوم رسی Clay loam	0.024	9.00	0.999	0.242	0.406	0.893	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006						
کلی خاکها All soils	0.011	3.00	0.954	0.113	0.246	0.391	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006						
لوم رسی Sandy loam	0.043	3.00	0.954	0.500	0.306	1.507	0.043	0.006	0.043	0.006	0.043	0.006	0.043	0.006	0.043	0.006	0.043	0.006	0.043	0.006	0.043	0.006						
لوم رسی Sandy clay loam	0.019	7.18	0.978	0.189	0.340	0.391	0.019	0.006	0.019	0.006	0.019	0.006	0.019	0.006	0.019	0.006	0.019	0.006	0.019	0.006	0.019	0.006						
لوم رسی Loam	0.024	3.35	0.957	0.297	0.246	0.446	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006	0.024	0.006						
لوم رسی Clay loam	0.011	4.17	0.993	0.113	0.359	0.614	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006	0.011	0.006						

جدول ۵- پارامترهای بهینه شده معادله هورتون به همراه نتایج ارزیابی مدل.
Table 5. Optimized parameters of Horton model along with its evaluation results.

Variable	میانگین												حداکثر												حداقل																																																			
	انحراف استاندارد				Mean				Max				Min				انحراف استاندارد				Mean				Max				Min																																															
ارزیابی	R ²				0.885				0.942				0.893				7.50				10.44				0.135																																																			
	EE (%)				3.79				8.36				3.79				0.262				0.114				0.308				0.135																																															
	RMSE (cm/hr)				1.412				25.51				17.12				0.205				0.114				0.262				0.114				0.308				0.135																																							
پارامترهای مدل	k				45.47				17.79				8.72				8.91				10.59				8.72				13.30																																															
	I ₀ (cm/hr)				14.04				3.33				2.19				10.86				2.31				4.82				2.19																																															
	I _c (cm/hr)				2.932				0.914				0.393				1.737				0.393				0.649				0.643																																															
متغیر	کلی خاکها				1.616				3.404				2.591				3.404				0.576				1.511				0.779				8.380				8.380				8.380				0.771				2.932				0.914				0.393				1.737				0.393				0.649				0.643			
	کلی خاکها				7.68				19.61				15.07				19.61				3.30				9.65				2.84				40.32				40.32				40.32				4.69				14.04				3.33				2.19				10.86				2.31				4.82				2.19			
	کلی خاکها				6.16				14.08				14.97				14.08				13.67				18.67				14.89				25.16				25.16				22.30				45.47				17.79				8.72				8.91				10.59				8.72				13.30							
	کلی خاکها				0.449				1.023				0.794				1.023				0.165				0.543				0.172				2.124				2.124				2.124				0.263				1.412				0.205				0.114				0.262				0.114				0.308				0.135			
	کلی خاکها				3.42				12.15				12.63				12.15				11.59				14.81				12.66				18.39				18.39				14.58				25.51				17.12				3.79				8.36				7.50				10.44											
	کلی خاکها				0.020				0.958				0.955				0.958				0.961				0.945				0.919				0.985				0.985				0.976				0.982				0.960				0.885				0.912				0.942				0.893				0.885							
	کلی خاکها				1.395				3.404				2.591				3.404				0.576				1.511				0.779				8.380				8.380				8.380				0.771				2.932				0.914				0.393				1.737				0.393				0.649				0.643			
	کلی خاکها				7.68				19.61				15.07				19.61				3.30				9.65				2.84				40.32				40.32				4.69				14.04				3.33				2.19				10.86				2.31				4.82				2.19							
	کلی خاکها				6.16				14.08				14.97				14.08				13.67				18.67				14.89				25.16				25.16				22.30				45.47				17.79				8.72				8.91				10.59				8.72				13.30							
	کلی خاکها				0.449				1.023				0.794				1.023				0.165				0.543				0.172				2.124				2.124				2.124				0.263				1.412				0.205				0.114				0.262				0.114				0.308				0.135			
	کلی خاکها				3.42				12.15				12.63				12.15				11.59				14.81				12.66				18.39				18.39				14.58				25.51				17.12				3.79				8.36				7.50				10.44											
	کلی خاکها				0.020				0.958				0.955				0.958				0.961				0.945				0.919				0.985				0.985				0.976				0.982				0.960				0.885				0.912				0.942				0.893				0.885							
کلی خاکها				1.395				3.404				2.591				3.404				0.576				1.511				0.779				8.380				8.380				8.380				0.771				2.932				0.914				0.393				1.737				0.393				0.649				0.643				
کلی خاکها				7.68				19.61				15.07				19.61				3.30				9.65				2.84				40.32				40.32				4.69				14.04				3.33				2.19				10.86				2.31				4.82				2.19								
کلی خاکها				6.16				14.08				14.97				14.08				13.67				18.67				14.89				25.16				25.16				22.30				45.47				17.79				8.72				8.91				10.59				8.72				13.30								
کلی خاکها				0.449				1.023				0.794				1.023				0.165				0.543				0.172				2.124				2.124				2.124				0.263				1.412				0.205				0.114				0.262				0.114				0.308				0.135				
کلی خاکها				3.42				12.15				12.63				12.15				11.59				14.81				12.66				18.39				18.39				14.58				25.51				17.12				3.79				8.36				7.50				10.44												
کلی خاکها				0.020				0.958				0.955				0.958				0.961				0.945				0.919				0.985				0.985				0.976				0.982				0.960				0.885				0.912				0.942				0.893				0.885								
کلی خاکها				1.395				3.404				2.591				3.404				0.576				1.511				0.779				8.380				8.380				8.380				0.771				2.932				0.914				0.393				1.737				0.393				0.649				0.643				
کلی خاکها				7.68				19.61				15.07				19.61				3.30				9.65				2.84				40.32				40.32				4.69				14.04				3.33				2.19				10.86				2.31				4.82				2.19								
کلی خاکها				6.16				14.08				14.97				14.08				13.67				18.67				14.89				25.16				25.16				22.30				45.47				17.79				8.72				8.91				10.59				8.72				13.30								
کلی خاکها				0.449				1.023				0.794				1.023				0.165				0.543				0.172				2.124				2.124				2.124				0.263				1.412				0.205				0.114				0.262				0.114				0.308				0.135				
کلی خاکها				3.42				12.15				12.63				12.15				11.59				14.81				12.66				18.39				18.39				14.58				25.51				17.12				3.79				8.36				7.50				10.44												
کلی خاکها				0.020				0.958				0.955				0.958				0.961				0.945				0.919				0.985				0.985				0.976				0.982				0.960				0.885				0.912				0.942				0.893				0.885								
کلی خاکها				1.395				3.404				2.591				3.404				0.576				1.511				0.779				8.380				8.380				8.380				0.771				2.932				0.914				0.393				1.737				0.393				0.649				0.643				
کلی خاکها				7.68				19.61				15.07				19.61				3.30				9.65				2.84				40.32				40.32				4.69				14.04				3.33				2.19				10.86				2.31				4.82				2.19								
کلی خاکها				6.16				14.08				14.97				14.08				13.67				18.67				14.89				25.16				25.16				22.30				45.47				17.79				8.72				8.91				10.59				8.72				13.30								
کلی خاکها				0.449				1.023				0.794				1.023				0.165				0.543				0.172				2.124				2.124				2.124				0.263				1.412				0.205				0.114				0.262				0.114				0.308				0.135				
کلی خاکها				3.42				12.15				12.63				12.15				11.59				14.81				12.66				18.39				18.39				14.58				25.51				17.12				3.79				8.36				7.50				10.44												
کلی خاکها				0.020				0.958				0.955				0.958				0.961				0.945				0.919				0.985				0.985				0.976				0.982				0.960				0.885				0.912				0.942				0.893				0.885								
کلی خاکها				1.395				3.404				2.591				3.404				0.576				1.511				0.779				8.380				8.380				8.380				0.771				2.932				0.914				0.393				1.737				0.393				0.649				0.643				
کلی خاکها				7.68				19.61				15.07				19.61				3.30				9.65				2.84				40.32				40.32				4.69				14.04				3.33				2.19				10.86				2.31				4.82				2.19								
کلی خاکها				6.16				14.08				14.97				14.08				13.67				18.67				14.89				25.16				25.16				22.30				45.47				17.79				8.72				8.91				10.59				8.72				13.30								
کلی خاکها				0.449				1.023				0.794				1.023				0.165				0.543				0.172				2.124				2.124				2.124				0.263				1.412				0.205				0.114				0.262				0.114				0.308				0.135				
کلی خاکها				3.42				12.15				12.63				12.15				11.59				14.81				12.66				18.39				18.39				14.58				25.51				17.12				3.79				8.36				7.50				10.44												
کلی خاکها				0.020				0.958				0.955				0.958				0.961				0.945				0.919				0.985				0.985				0.976				0.982				0.960				0.885				0.912				0.942				0.893				0.885								
کلی خاکها				1.395				3.404				2.591				3.404				0.576				1.511				0.779				8.380				8.380				8.380				0.771				2.932				0.914				0.393				1.737				0.393				0.649				0.643				
کلی خاکها				7.68				19.61				15.07				19.61				3.30				9.65				2.84				40.32				40.32				4.69				14.04				3.33				2.19				10.86				2.31				4.82				2.19								
کلی خاکها				6.16				14.08				14.97				14.08				13.67				18.67				14.89				25.16				25.16				22.30				45.47				17.79				8.72				8.91				10.59				8.72				13.30								
کلی خاکها				0.449				1.023				0.794				1.023				0.165				0.543				0.172				2.124				2.124				2.124				0.263				1.412				0.205				0.114				0.262				0.114				0.308				0.135				
کلی خاکها				3.42				12.15				12.63				12.15				11.59				14.81				12.66				18.39				18.39				14.58				25.51				17.12				3.79				8.36				7.50				10.44												
کلی خاکها				0.020				0.958				0.955				0.958				0.961				0.945				0.919				0.985				0.985				0.976				0.982				0.960				0.885				0.912				0.942				0.893				0.885								
کلی خاکها				1.395				3.404				2.591				3.404				0.576				1.511				0.779				8.380				8.380				8.380				0.771				2.932				0.914				0.393				1.737				0.393				0.649				0.643				
کلی خاکها				7.68				19.61				15.07				19.61				3.30				9.65				2.84				40.32				40.32				4.69				14.04				3.33				2.19				1																				

سانتی‌متر و زمان اندازه‌گیری بر حسب ساعت به‌کار گرفته شد. نتایج پارامترهای انطباق یافته و همچنین نتایج ارزیابی معادله فوق در جدول ۷ گزارش شده است. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که پارامترهای معادله با دقت بالایی ($R^2=0/996$) بهینه‌سازی شده و همچنین مدل از دقت بسیار بالایی ($EE=4\%$) در پیش‌بینی مقدار نفوذ تجمعی برخوردار می‌باشد. مقایسه نتایج ارزیابی معادله در بین چهار کلاس بافت خاک موجود در این پژوهش نشان داد که مدل تقریباً از دقت مشابهی در بین همه کلاس‌های بافت خاک برخوردار می‌باشد. در مدل سه جزئی فیلیپ از رابطه زیر برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع منطقه انتقال استفاده می‌شود (17).

$$K_g = \sqrt{3Sc_2} + c_1 \quad (14)$$

با توجه به رابطه فوق و نتایج جدول ۷، با وجود این که مدل کوتیلیک- کرجا از دقت بالایی در برآورد میزان نفوذ تجمعی برخوردار است ولی عملاً نمی‌توان از این مدل برای پیش‌بینی هدایت هیدرولیکی اشباع منطقه انتقال خاک استفاده کرد. زیرا در بیش‌تر موارد پارامتر c_2 مقادیر منفی به خود گرفته‌اند که از نظر مفاهیم فیزیکی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

مدل فیلیپ: در این پژوهش برای برآورد پارامترهای (S و A) معادله فیلیپ (1957) از شکل خطی معادله که در زیر ارائه شده است استفاده شد.

$$\frac{I}{t} = St^{-1/2} + A \quad (13)$$

با رسم مقادیر I/t در مقابل $t^{-1/2}$ بر حسب سانتی‌متر و t بر حسب ساعت) به صورت یک رابطه خطی، شیب خط بیانگر مقدار S و عرض از مبدأ خط بیانگر مقدار A خواهد بود. جدول ۶ مقادیر بهینه شده پارامترهای A و S و نتایج ارزیابی مدل فیلیپ با استفاده از پارامترهای بهینه شده را نشان می‌دهد. جدول ۶ نشان داد که با این‌که پارامترهای معادله فیلیپ با دقت بالایی ($R^2=0/991$) بهینه‌سازی شده‌اند ولی مقادیر نفوذ تجمعی پیش‌بینی شده از خطای نسبتاً بالایی ($EE=37\%$) برخوردار بوده و عملاً در مقایسه با دیگر مدل‌های استفاده شده به‌ویژه مدل کوستیاکف و کوستیاکف اصلاح‌شده نمی‌توان از این مدل برای توصیف فرآیند نفوذ در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد.

مدل سه جزئی فیلیپ: برای بهینه‌سازی پارامترهای معادله فوق (S, c_1 و c_2) از برنامه کاربردی Data Solver نرم‌افزار آگسل با استفاده از روش آماری کم‌ترین مربعات خطا استفاده شد. برای این کار داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی بر حسب

جدول ۶- پارامترهای بهینه‌شده معادله فیلیپ به همراه نتایج ارزیابی مدل.

Table 6. Optimized parameters of Philip model along with its evaluation results.

متغیر Variable	انحراف استاندارد																					
	میانگین					حداکثر Max					حداقل Min											
ارزیابی Evaluation	R^2	0.007	0.007	0.004	0.010	0.002	0.002	0.991	0.991	0.991	0.991	0.991	0.998	0.998	0.998	0.999	0.964	0.965	0.983	0.964	0.964	0.995
	EE (%)	11.56	10.37	7.19	15.70	9.52	36.90	38.19	37.02	34.92	21.76	63.54	59.03	50.06	63.54	35.60	10.47	10.63	25.26	10.47	10.47	13.90
	$RMSE (cm/hr)$	0.258	0.195	0.026	0.140	0.027	0.428	0.569	0.095	0.240	0.058	1.046	1.046	0.146	0.628	0.096	0.037	0.155	0.065	0.056	0.037	0.037
	$S (cm/hr^{1/2})$	0.617	0.420	0.057	0.153	0.054	1.195	1.558	0.265	0.759	0.216	2.997	2.997	0.402	1.098	0.256	0.140	0.664	0.195	0.423	0.140	0.140
پارامترهای مدل Model parameters	A	2.165	1.698	0.144	0.964	0.131	3.650	4.841	0.815	2.006	0.871	10.45	10.45	1.088	3.668	0.955	0.551	1.665	0.551	0.557	0.675	0.675
	Clay soils			Sandy loam			All soils		Sandy clay loam			All soils		Sandy clay loam			Sandy loam		Sandy clay loam		Loam	
	Clay Loam			Loam			Clay Loam		Loam			Clay Loam		Sandy clay loam			Loam		Sandy clay loam		Loam	
	Clay Loam			Loam			Clay Loam		Sandy clay loam			All soils		Sandy loam			Loam		Sandy clay loam		Loam	

جدول ۷- پارامترهای بهینه‌شده مدل سه‌جزئی فیلیپ به همراه نتایج ارزیابی مدل.

Table 7. Optimized parameters of Philip's triplex model along with its evaluation results.

متغیر Variable	حداکثر Max										حداقل Min											
	کلی خاکها	لوم شن	لوم رس	کلی خاکها	لوم شن	لوم رس	کلی خاکها	لوم شن	لوم رس	کلی خاکها	لوم شن	لوم رس	کلی خاکها	لوم شن	لوم رس	کلی خاکها	لوم شن	لوم رس				
Standard deviation	0.774	0.109	0.178	0.361	0.1108	0.2097	2.751	0.456	1.279	0.351	4.910	7.314	7.314	0.596	2.363	2.214	0.481	0.224	1.030	0.322	0.567	0.224
Mean	1.739	0.123	0.178	0.830	0.206	1.358	1.816	0.348	0.643	0.497	4.910	7.314	7.314	0.596	2.363	2.214	0.481	0.224	1.030	0.322	0.567	0.224
RMSE (cm/hr)	0.027	0.003	0.003	0.015	0.002	0.045	0.060	0.010	0.026	0.007	0.110	0.110	0.110	0.016	0.068	0.068	0.011	0.005	0.016	0.007	0.007	0.005
EE (%)	1.20	0.73	0.73	1.58	0.90	3.93	4.03	3.83	3.86	2.66	6.86	6.12	6.12	5.40	6.86	6.86	3.90	1.12	1.12	2.59	1.30	1.58
R ²	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.996	0.996	0.997	0.996	0.999	1.000	1.000	1.000	0.999	1.000	1.000	1.000	0.988	0.988	0.993	0.988	0.997
c ₁	1.572	0.178	0.178	0.830	0.206	1.358	1.816	0.348	0.643	0.497	4.910	7.314	7.314	0.596	2.363	2.214	0.481	0.224	1.030	0.322	0.567	0.224
c ₂	0.761	0.123	0.123	0.549	0.046	0.223	0.316	-0.09	-0.04	0.030	1.504	1.504	1.504	0.125	0.795	0.795	0.094	-2.59	-0.60	0.258	1.48	-0.01
S (cm/hr ²)	1.121	0.109	0.178	0.361	0.1108	2.097	2.751	0.456	1.279	0.351	4.910	7.314	7.314	0.596	2.363	2.214	0.481	0.224	1.030	0.322	0.567	0.224

بحث

مقایسه نتایج شش مدل استفاده شده در این پژوهش با استفاده از آماره متوسط درصد خطای انطباق (EE) نشان داد که به ترتیب مدل‌های کوتیلیک- کرجا، کوستیاکف، کوستیاکف اصلاح شده، هورتون، گرین- امپ و فیلیپ با مقادیر EE برابر با ۴، ۸، ۱۰، ۱۳، ۳۶ و ۳۷ درصد به داده‌های اندازه‌گیری شده انطباق پیدا کردند. با در نظر گرفتن آماره R^2 ترتیب دقت مدل‌ها مشابه با آماره EE می‌باشد با این تفاوت که مدل فیلیپ در رده سوم از نظر دقت همبستگی بین مقادیر نفوذ پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد که علت اصلی انطباق بهتر مدل کوتیلیک- کرجا به داده‌های اندازه‌گیری شده در مقایسه با دیگر مدل‌ها، سه‌پارامتری بودن مدل فوق باشد. همچنین دلیل اصلی کارکرد بهتر مدل‌های کوستیاکف، کوستیاکف اصلاح‌یافته و تا حدودی هورتون در مقایسه با مدل‌های دارای پایه تئوری فیزیکی گرین- امپ و فیلیپ می‌تواند برخوردار بودن از پایه تجربی باشد که به مدل‌های فوق امکان انطباق به داده‌های اندازه‌گیری شده بدون محدودیت خاصی را می‌دهد.

در بین چهار کلاس بافت خاک موجود در پژوهش حاضر (لوم رسی، لوم، لوم رسی شنی و لوم شنی)، تمامی مدل‌های نفوذ استفاده شده در این پژوهش به استثنای مدل هورتون بهترین انطباق را در کلاس بافت لوم رسی نشان دادند. بهترین انطباق مدل هورتون در بین چهار کلاس بافت خاک موجود، در بافت‌های لوم رسی شنی و لوم شنی اتفاق افتاد. مشابه با نتیجه به دست آمده در این پژوهش، رحیمی و کشکولی (2006) نیز نشان دادند که مدل فیلیپ در یک خاک لومی رسی و همگن از کارایی بالاتری در برآورد مقدار نفوذ تجمعی و لحظه‌ای برخوردار بود.

مقایسه نتایج به دست آمده برای معادله کوستیاکف با نتایج کوستیاکف اصلاح شده نیز نشان داد که مدل کوستیاکف از دقت بالاتری ($R^2=0/994$ و $EE=0/8$) در مقایسه با مدل کوستیاکف اصلاح شده برخوردار بود. به نظر می‌رسد که عمده‌ترین دلیل عملکرد نسبتاً ضعیف‌تر مدل کوستیاکف اصلاح شده در مقایسه با نسخه اصلی آن علی‌رغم سه‌پارامتری بودن آن، محدود کردن مقدار پارامتر c به مقدار اندازه‌گیری شده آن باشد. مقایسه نتایج دو مدل فوق در بین کلاس‌های مختلف بافت خاک نیز بیانگر عملکرد بهتر مدل کوستیاکف در مقایسه با مدل کوستیاکف اصلاح شده می‌باشد.

مشابه با نتایج به دست آمده در این پژوهش، نتایج پژوهش صورت گرفته توسط کریمی (2010) نیز نشان داد که در بین پنج مدل ارزیابی شده (سواتز ندربر، کوتیلیک- کرجا، کوستیاکف، معادله حفاظت خاک آمریکا و مدل فیلیپ) در پژوهش آن‌ها، مدل کوتیلیک- کرجا بهترین انطباق و مدل فیلیپ بدترین انطباق را نشان داد. نتایج پژوهش صورت گرفته در حوضه آبخیز کجور (15) نیز نشان داد که مدل کوستیاکف بهترین انطباق و مدل‌های گرین- امپ و مدل هورتون بدترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده داشتند. رشیدی و سیفی (2007) نیز نشان دادند که مدل‌های کوستیاکف و کوستیاکف اصلاح شده از دقت بالاتری در مقایسه با مدل‌های حفاظت خاک آمریکا، مدل اصلاح شده حفاظت خاک آمریکا و مدل والکر برخوردار می‌باشند. نتایج پژوهش صورت گرفته در اراضی کرکج (12) نیز نشان داد که مدل کوستیاکف بالاترین دقت را در تخمین مقدار و سرعت نفوذ در مقایسه با مدل‌های کوستیاکف اصلاح شده، فیلیپ، هورتون و مدل حفاظت خاک آمریکا داشت. آن‌ها همچنین نشان دادند که با افزایش زمان

دادند. همچنین حقیقی و همکاران (2010) نیز در پژوهش صورت گرفته در حوضه آبخیز طالقان در استان تهران نشان دادند که مدل‌های هورتون و فیلپ بهترین انطباق را با داده‌های واقعی در مقایسه با دیگر مدل‌ها داشتند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که مدل‌های تجربی کوستیاکف و کوستیاکف اصلاح شده عملکرد بهتری در برازش به داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ داشتند. توصیه می‌شود که از این مدل‌ها در پژوهش‌های آتی برای پیش‌بینی مقدار نفوذ خاک به آب در شرایطی مشابه با شرایط حوضه آبخیز ليقوان استفاده شود.

پیمایش، مدل‌های تجربی تغییرات بیش‌تری نسبت به مدل فیلپ نشان می‌دهند و در زمان‌های طولانی مدل فیلپ بهترین مدل می‌باشد. نتایج پژوهش صورت گرفته توسط نشاط و پاره‌کار (2007) نیز نشان دادند که مدل کوستیاکف دارای بالاترین ضریب تبیین و کم‌ترین واریانس در برآورد مقدار نفوذ تجمعی در کوتاه مدت (چند ساعت) می‌باشد. کاوسی و همکاران (1932) نیز نشان دادند که مدل هورتون بدترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده در بین مدل‌های نفوذ استفاده شده در پژوهش آن‌ها داشت. بر خلاف نتایج این پژوهش که مدل فیلپ بدترین انطباق را با داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داد، فهد و همکاران (1982) نشان دادند که مدل فیلپ به همراه مدل کوستیاکف بهترین مطابقت را با داده‌های تجربی نشان

منابع

1. Alizadeh, A. 1993. Irrigation System Design. Fifth edition. Imam Reza University Press. Mashhad. (In Persian)
2. Baybordi, M. 2003. Soil Physics. Tehran University Pre. Tehran. Iran. (In Persian)
3. Clemmens, A. 1983. Infiltration equations for border irrigation models. Conference on Advances in Infiltration, Chicago, USA.
4. Fahad, A., Mielke, L., Flowerday, A., and Swartzendruber, D. 1982. Soil physical properties as affected by soybean and other cropping sequences. Soil Sci. Soc. Amer. J. 46: 2. 377-381.
5. Gee, G.W., and Or, D. 2002. Particle-size analysis, P 255-295. In: Dane, J.H., and G.C. Topp (eds.), Methods of Soil Analysis: Physical Methods, Part 4. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI, USA.
6. Green, H.W., and Ampt, G.A. 1911. Studies on soil physics. J. Agric. Sci. 4: 1. 1-24.
7. Haghghi, F., Gorji, M., Shorafa, M., Sarmadian, F., and Mohammadi, M. 2010. Evaluation of some infiltration models and hydraulic parameters. Spanish J. Agric. Res. 8: 1. 210-217.
8. Hartley, D. 1992. Interpretation of Kostiaikov infiltration parameters for borders. J. Irrig. Drain. Engin. 118: 1. 156-165.
9. Hillel, D. 1982. Introduction to Soil Physics, Academic press New York.
10. Holtan, H.N. 1961. Concept for infiltration estimates in watershed engineering, United States. Agricultural Research Service. Soil Water Conservation Research Division.
11. Horton, R.E. 1940. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. Soil Science Society of America Proceedings. 5: 399-417.
12. Jelini, M. 1996. Evaluation and determination of different infiltration models in Karkach soils. M.Sc. thesis, Faculty of Agriculture. University of Tabriz, Tabriz. 99p. (In Persian)
13. Jamab (Consulting Engineers). 1999. The Water Master Plan. (In Persian)
14. Karimi, A. 2010. Determination of different soil infiltration models using physical and chemical properties of soil stressing the index of aggregate stability. M.Sc. thesis, University of Tabriz. Tabriz, Iran. (In Persian)

15. Kavousi, S.M., Vafakhah, M., and Mahdian, M.H. 2011. Evaluation of different soil infiltration models in Kajour Watershed in order to sustainable management of water resources. The second regional conference on sustainable development of natural resources in the Caspian sea. Pp: 1-15. (In Persian)
16. Kostyakov, A. 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 purpose of amelioration (en ruso): Gramingen, Holanda, International Society of Soil Science, 6th Commission. Transactions. Pp: 17-21.
17. Kutilek, M., and Krejca, M. 1987. Three-parameter infiltration equation of Philip type. *Vodohospodársky Casopis*. 35: 52-61.
18. Lili, M., Bralts, V.F., Yinghua, P., Han, L., and Tingwu, L. 2008. Methods for measuring soil infiltration: State of the art. *Inter. J. Agric. Biol. Engin.* 1: 1. 22-30.
19. Ma, Y., Feng, S., Zhan, H., Liu, X., Su, D., Kang, S., and Song, X. 2010. Water infiltration in layered soils with air entrapment: modified Green-Ampt model and experimental validation. *J. Hydrol. Engin.* 16: 8. 628-638.
20. Maheshwari, B., and Jayawardane, N. 1992. Infiltration characteristics of some clayey soils measured during border irrigation. *Agricultural Water Management*. 21: 4. 265-279.
21. Mirzajani, R. 2004. Introduction to Soil Physics. Tehran University Press, Tehran, Iran, 402p. (In Persian)
22. Neshat, A., and Parekar, M. 2007. Comparison of methods for determining the vertical infiltration rate of water in the soil. *J. Agric. Sci. Natur. Resour.* 14: 3. 1-10. (In Persian)
23. Phillip, J. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*. 83: 5. 345-358.
24. Rahimi, A., and Kashkouli, H.A. 2006. Evaluation and determination of different infiltration models in lands of Faculty of Agriculture, Islamic Azad University of Sanandaj. First National Conference on Irrigation and Drainage Networks. University of Chamran, Ahvaz. Pp: 1-8. (In Persian)
25. Rashidi, M., and Seyfi, K. 2007. Field comparison of different infiltration models to determine the soil infiltration for border irrigation method. *Amer. - Euras J. Agric. Environ. Sci.* 2: 6. 628-632.
26. Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1: 5. 318-333.
27. Topp, G.C., and Ferre, P.A. 2002. Water content, P 417-547. In: Dane, J.H., and G.C. Topp (eds.), *Methods of Soil Analysis: Physical Methods, Part 4*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI, USA.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(6), 2016
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Evaluating and optimizing the parameters of soil infiltration models in Lighvan watershed (Northwest of Iran)

***M. Rahmati¹, M.R. Neyshabouri², M. Mohammadi Oskoei³,
A. Fakhri Fard⁴, A. Ahmadi⁵ and S.B. Mousavi⁶**

¹Assistant Prof., Dept. of Soil Science, University of Maragheh, ²Professor, Dept. of Soil Science, University of Tabriz, ³Assistant Prof., Dept. of Mining Engineering, Sahand University of Technology,

⁴Professor, Dept. of Water Engineering, University of Tabriz, ⁵Assistant Prof., Dept. of Soil Science, University of Tabriz, ⁶Associate Prof., Dept. of Soil Science, University of Maragheh

Received: 04/22/2014; Accepted: 09/23/2014

Abstract

Background and Objectives: Several empirical models have been presented to describe water infiltration into soil. In order to make them applicable in different places, the mentioned models need to be calibrated in different conditions. Therefore, the current research was aimed to optimize parameters of different models using point measurements at Lighvan watershed located in east Azarbaijan.

Materials and Methods: Current research was carried out in Lighvan watershed, East Azarbaijan, northwest of Iran which is located in longitudes of 46° 22' 23" E to 46° 28' 05" E and latitudes of 37° 43' 07" N to 37° 50' 08" N. Selected infiltration models include Green and Ampt, Kostyakov and modified Kostyakov, Philip, Horton and Philip's triplex models. In order to fulfill this research, soil sampling and field measurements were conducted at late spring of 2012. In this regard, cumulative infiltration were measured in 135 different place of the study area using Disc infiltrometer.

Results: Based on evaluation error (EE) criteria Philip's triplex model (EE=4%), Kostyakov (EE=8%), modified Kostyakov (EE=10%), Horton (EE=13%), Green and Ampt (EE=36%) and Philip (EE=37%) models had the most to least accuracy for cumulative infiltration prediction, respectively. Among the different soil texture classes (clay loam, loam, sandy clay loam and sandy loam), all applied models in this research except Horton model showed the best conformity in clay loam soil texture class.

Conclusion: The results revealed that the Kostyakov and modified Kostyakov models are more suitable for cumulative infiltration and infiltration rates predictions. Therefore, we suggested the mentioned model to be applied in similar condition of the Lighvan watershed.

Keywords: Disc infiltrometer, Green and Ampt model, Lighvan watershed, Soil infiltration, Philip model

* Corresponding Author; Email: mehdirmti@gmail.com