

ارزیابی و مقایسه مدل‌های نفوذ آب به خاک در حوضه آبریز زاینده‌رود اصفهان (تحلیل منطقه‌ای واحد هیدرولوژیک نجف‌آباد)

حمید فاضل^۱، حسین بابازاده^{۲*}، فریبرز عباسی^۳ و رقیه کنانی^۴

(۱) دانشجوی دکتری رشته آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۲) استاد گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. * رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: h_babazadeh@iaau.ac.ir

(۳) استاد پژوهش، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

(۴) استادیار گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۳

چکیده

به دلیل محدودیت منابع آب زیرزمینی، استفاده درست و بهینه از این منابع لازم و ضروری است. نفوذ آب به خاک در مطالعات هیدرولوژی، مدیریت آب، حفاظت و کنترل فرسایش خاک و اجرای پروژه‌های آبیاری حایز اهمیت است، بنابراین واسنجی و ارزیابی مدل‌های مختلف برآورد نفوذپذیری خاک در مناطق مختلف ضروری است. هدف از این پژوهش بررسی توانایی مدل‌های نفوذ متداول مانند فیلیپ، هورتون، کوستیاکوف-لوییز و ناول برای تخمین میزان نفوذ در کلاس‌های بافتی خاک در حوضه زاینده‌رود اصفهان می‌باشد. در این پژوهش ۳۶ نقطه مختلف در منطقه نجف‌آباد از حوضه زاینده‌رود انتخاب شد و اندازه‌گیری نفوذ با استفاده از نفوذسنج حلقه مضاعف انجام شد. برای ارزیابی دقت مدل‌ها، شاخص‌های خطاسنجی شامل ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین، خطای ارزیابی و معیار نش ساتکلیف استفاده شد. واسنجی مدل‌ها با استفاده از ابزار solver در نرم‌افزار اکسل انجام شد و جدول ضرایب همبستگی برای شناسایی روابط بین پارامترهای مختلف مدل‌ها ارائه گردید. یافته‌ها نشان داد برخی پارامترها مانند S (ضریب جذبی خاک در مدل فیلیپ) و f_0 (سرعت اولیه نفوذ) همبستگی مثبت قوی دارند، درحالی‌که پارامترهایی مانند f_c (سرعت نهایی نفوذ) ارتباط ضعیفی با سایر پارامترها نشان دادند. همچنین تجزیه واریانس یک‌طرفه و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی برای بررسی تفاوت‌های معنی‌دار بین مدل‌ها انجام شد که عدم معنی‌داری مدل فیلیپ در مقایسه با مدل‌های هورتون و کاستیاکوف-لوییز و معنی‌داری مدل فیلیپ در مقایسه با ناول، مدل هورتون در مقایسه با ناول و همچنین کاستیاکوف-لوییز در مقایسه با ناول حاصل شد. نتایج شاخص‌های ارزیابی نشان داد عملکرد مدل نفوذ فیلیپ با مقادیر میانگین (سانتی‌متر) $RMSE$ ، R^2 ، NSE و EE به ترتیب برابر با ۰/۸۳۸، ۰/۹۷۸، ۰/۸۷۶ و ۱۸/۴۹ درصد نسبت به مدل‌های در نظر گرفته شده دیگر در محدوده مورد بررسی بهتر بوده است.

واژه‌های کلیدی: مدل فیلیپ، مدل هورتون، مدل کاستیاکوف-لوییز، مدل ناول، نفوذپذیری آبی خاک.

نفوذ بیانگر فرآیند ورود آب به خاک از راه مرزهای بالایی بوده (Hillel & Baker, 1988) و یکی از اجزای مهم چرخه هیدرولوژیکی است. با توجه به اهمیت نفوذ آب به خاک در موارد گوناگون مانند جلوگیری از فرسایش خاک، کنترل سیلاب و همچنین در طراحی سیستم‌های آبیاری و تحلیل آبخوان‌های زیرزمینی، تعیین مناسب‌ترین مدل در شرایط مختلف، امری ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل تا کنون پژوهش‌های وسیعی در این زمینه انجام شده است. بسیاری از دانشمندان دقت مدل‌ها را با مقایسه میزان نفوذ محاسبه شده و میزان نفوذ مشاهده شده مقایسه کرده‌اند که می‌توان به پژوهش‌های Kojouri و Javadi (۲۰۲۳)، Saadat و Abdi (۲۰۲۲)، سبزواری و عابدی‌کوپایی (۱۴۰۱)، Batoukhteh و همکاران (۲۰۲۱)، پرچمی‌عراقی و همکاران (۱۳۹۸) و Haghighi و همکاران (۲۰۱۰) اشاره نمود.

روابط و معادلات مربوط به نفوذپذیری آبی خاک، معمولاً به دو صورت مدل‌های فیزیکی و تجربی در نظر گرفته شده‌اند. مدل‌های دارای اساس فیزیکی همچون Philips (۱۹۵۷) و Green و Ampt (۱۹۱۱) با استفاده از قوانین و روابط فیزیکی اثبات شده مانند بقای جرم و قانون بقای انرژی و تلفیق آنها به دست آمده‌اند (Batoukhteh et al., 2021).

در این مدل‌ها با تکیه بر مبانی فیزیکی، تلاش‌ها در جهت ساده‌سازی شرایط اولیه و مرزی معادله جریان در محیط غیراشباع انجام شده که در نتیجه داده‌های فیزیکی مورد نیاز این مدل‌ها، کاهش یافته اما از کارایی آنها به لحاظ تغییر شرایط اولیه و مرزی می‌کاهد. مهم‌ترین حسن این مدل‌ها آن است که بر پایه قوانین فیزیک وضع شده‌اند و با دانستن برخی خصوصیات فیزیکی خاک، معادله نفوذ قابل تعیین است (Batoukhteh et al., 2021).

شیوه دوم استفاده از روابط تجربی هم‌چون مدل هورتون و کاستیاکوف-لویز است که دقت زیاد به دلیل توجه به تمام شرایط مکانی و زمانی از مزیت‌های این مدل‌ها و نارسایی پارامترها در تبیین مفاهیم فیزیکی از نقایص آنها است (Batoukhteh et al., 2021).

به دلیل تفاوت فرضیات و پارامترهای به کار رفته در مدل‌های نفوذ در شرایط معین، مدل خاصی دارای عملکرد

بهتری نسبت به بقیه است (Fashi et al., 2014): به عنوان مثال Muneeraa و همکاران (۲۰۲۰) عملکرد مدل‌های هورتون، فیلیپ و کاستیاکوف را بررسی نمودند. نتایج بررسی ایشان عملکرد بهتر مدل‌های هورتون و فیلیپ در مقایسه با مدل کاستیاکوف در برازش بر داده‌های نفوذ مشاهده شده را نشان داد. Vand و همکاران (۲۰۱۸) مدل‌های کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح شده، فیلیپ و ناول را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج، عملکرد مناسب مدل ناول را نشان دادند. Mirzaee و همکاران (۲۰۱۴) هشت مدل نفوذ با روش حداقل مربعات را مقایسه کردند که از بین آنها، مدل کاستیاکوف-لویز اصلاح شده برای بافت‌های لومی، لوم‌شنی و مدل کاستیاکوف اصلاح شده برای بافت لوم‌سیلیت عملکرد بهتری را نشان دادند. پژوهش‌های جوادی و همکاران (۱۳۹۶) نشان دادند مدل هورتون در شرایط تلفیق کیفیت آب آبیاری، رطوبت اولیه خاک و بار آبی ثابت مناسب‌ترین مدل در بین مدل‌های کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح شده، فیلیپ، هورتون و حفاظت خاک آمریکا بود و در این بین مدل کاستیاکوف نامناسب‌ترین مدل گزارش شد. به واسطه پژوهش‌های Machiwal و همکاران (۲۰۰۶) نفوذ مشاهده شده به خوبی توسط مدل فیلیپ در زمین‌های بایر در خاراگپور، هند توصیف شد. Mohammed (۲۰۰۶) مدل‌های نفوذ کاستیاکوف، هورتون و فیلیپ را تحت خاک‌ورزی و تناوب‌های زراعی مختلف در یک منطقه با خاک لوم‌رسی در شمال غرب ایران ارزیابی کرد و گزارش داد که مدل هورتون بهترین پیش‌بینی نرخ نفوذ را در آن منطقه ارائه می‌کند. Návár و Synnott (۲۰۰۰) نرخ نفوذ آب به خاک را تحت چهار کاربری در شمال شرقی مکزیک ارزیابی کردند که در بین مدل‌های نفوذ هورتون، فیلیپ، کاستیاکوف اصلاح شده و گرین-آمپت، مدل کاستیاکوف اصلاح شده بهترین تناسب را ارائه داد.

مدل‌ها در شرایط و مکان‌های مختلف، عملکرد متفاوتی از خود نشان خواهند داد، بنابراین در شرایط خاص، یک مدل ممکن است پیش‌بینی بهتری نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان دهد. در ادامه با توجه به تغییرات و گستردگی ویژگی‌های خاک در استان اصفهان و حوضه آبریز زاینده‌رود،

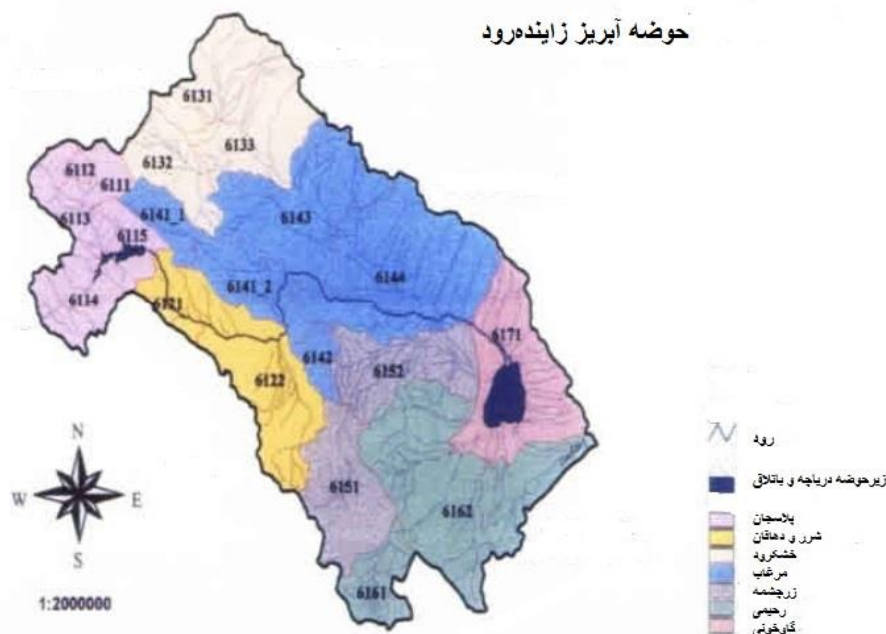
۹۰/۹ درصد حوضه آبریز در استان اصفهان، ۳/۴ درصد در استان فارس و ۲/۳ درصد در استان یزد، ۳/۴ استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است. این حوضه از نظر تقسیمات طبیعی شامل هفت زیرحوضه و ۲۰ واحد هیدرولوژیک است که در شکل (۱)، محدوده حوضه آبریز و همچنین تفکیک حوضه به زیرحوضه و واحد هیدرولوژیک نمایش داده شده است (حاجیان و حاجیان، ۱۳۹۴). منطقه مورد مطالعه واحد هیدرولوژیک نجف آباد با کد ۶۱۴۱-۲ (شکل ۱) از زیرحوضه مرغاب با مساحت ۱،۵۹۸ کیلومتر مربع است.

بهترین مدل برای خاک حوضه آبریز زاینده رود در منطقه نجف آباد با استفاده از نمونه برداری و تحلیل های آماری تبیین گردید.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز زاینده رود در مختصات جغرافیایی ۲۷°، ۵۰° تا ۲۴°، ۵۳° طول شرقی و ۳۱°، ۱۲° تا ۴۲°، ۳۳° عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت آن ۴۱،۳۴۷ کیلومتر مربع است. حدود



شکل ۱. حوضه زاینده رود

روش پژوهش

کمترین بهم خوردگی در خاک فرو برد. در حد فاصل دو حلقه آب ریخته شد و اندازه گیری نفوذ در زمان های ۱، ۲، ۵، ۱۵، ۱۰، ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ دقیقه و در صورت ثابت نشدن مقدار سرعت نفوذ، پس از آن به فاصله زمانی یک ساعته صورت پذیرفت تا زمانی که سرعت نفوذ به حد نسبتا ثابتی (زمان ۲۴۰ دقیقه) رسید و در این گام های زمانی منظم، عمق آب به کمک خطکش اندازه گیری شد. برای جلوگیری از بهم خوردگی سطح خاک به هنگام ریختن آب، از یک ورقه پلاستیکی استفاده شد. برای هر یک از محل های آزمایش نفوذ، نمونه برداری خاک از ۲۰ سانتی متری بالایی خاک

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، برای تعیین نفوذ از بین روش های میدانی اندازه گیری نفوذ پذیری خاک، حلقه مضاعف انتخاب شد که یکی از بهترین روش های اندازه گیری و تعیین میزان نفوذ پذیری آبی خاک است. حلقه های مضاعف دارای دو حلقه است که حلقه داخلی به قطر ۳۰ سانتی متر، حلقه خارجی به قطر ۶۰ سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر است. به صورت تصادفی ۳۶ نقطه برای اندازه گیری نفوذ در منطقه مورد نظر انتخاب شد و حلقه ها با استفاده از چکش تا عمق حدود ۱۰ سانتی متر در خاک کار گذاشته شدند. طوری که فاصله دو حلقه متحدالمرکز حدود ۱۵ سانتی متر باشد. لبه های این استوانه ها تیز بود تا به راحتی بتوان آنها را با

انجام شد. آماره‌های ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مناطق مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. در این پژوهش آزمایش‌های نفوذ به‌منظور داشتن تنوع مکانی در ۳۶ مکان مختلف انجام شد و مدل‌های نفوذ فیلپ، هورتون، کاستیاکوف-لوییز و ناول برای تخمین میزان نفوذ آب در منطقه

مطالعاتی انتخاب شدند. جهت بهینه‌سازی پارامترها ۶۶ درصد داده‌ها (۲۴ داده) برای تعیین پارامترها و ۳۳ درصد باقی‌مانده (۱۲ داده) برای اعتبارسنجی پارامترهای تخمین زده شده مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۲. حلقه‌های مضاعف برای اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک

جدول ۱. آماره‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

ویژگی خاک	کمینه	بیشینه	میانگین
درصد رس	۳	۶۴	۳۴/۰۷
درصد شن	۱۳	۵۴/۵	۳۳/۵۷
درصد سیلیت	۸	۵۷/۸	۳۲/۳۴
وزن مخصوص ظاهری (g/cm^3)	۱/۲۳	۱/۵۵	۱/۴۱
درصد رطوبت	۶	۱۸	۱۱
درصد ماده آلی	۰/۷	۱/۸	۱/۲
PH	۷/۵	۸/۵	۸/۱

جذبی خاک (سانتی‌متر بر جذر دقیقه) و K_s هدایت هیدرولیکی خاک برحسب سانتی‌متر بر دقیقه است.

مدل هورتون

معادله هورتون کاربردی‌ترین معادله نفوذ است که در سال ۱۹۴۱ معرفی شد. هورتون پس از مشاهدات فراوان به این نتیجه رسید که ظرفیت نفوذ آب در خاک با افزایش زمان به شدت و تقریباً به صورت توانی نسبت به زمان کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در آغاز بارندگی ظرفیت آن حداکثر f_c و در نهایت، نفوذ به مقدار ثابت f_0 می‌رسد (Horton, 1941). این معادله برای نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ به شرح زیر است:

مدل‌های نفوذ آب به خاک

مدل فیلپ

فیلپ در سال ۱۹۵۷ مدلی پیشنهاد داد که تا اندازه‌ای نسبت به مدل‌های دیگر پیچیده‌تر بود. در این مدل، مقدار نفوذ تجمعی از معادله (۱) و سرعت نفوذ از مشتق آن (رابطه (۲)) به صورت زیر محاسبه شد:

$$i(t) = St^{\frac{1}{2}} + K_s t \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$I(t) = \frac{1}{2} St^{\frac{3}{2}} + K_s t \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن $i(t)$ نفوذ تجمعی بر حسب سانتی‌متر، $I(t)$ نرخ نفوذ (سانتی‌متر بر دقیقه) به صورت تابعی از زمان، S ضریب

ضریب تبیین: این مقدار میزان همخوانی بین داده های مشاهده شده و پیش بینی شده را نشان می دهد. مقدار R^2 بین ۱- و ۱ است و هر چه مقدار R^2 به ۱ نزدیک تر باشد، انطباق بیشتر خواهد بود.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}$$

ریشه میانگین مربعات: این آماره میزان دقت پیش بینی ها را نشان می دهد. مقدار کمتر RMSE نشان دهنده دقت بیشتر مدل است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

خطای ارزیابی: خطای ارزیابی در واقع حالت استاندارد شده آماره ریشه میانگین مربعات می باشد، برعکس آماره RMSE بدون واحد است و امکان مقایسه دقت چندین روش یا پارامتر برآوردی با واحدهای مختلف را به وجود می آورد. مقدار این آماره بر حسب درصد بین مثبت بی نهایت (بیشترین خطا) و صفر (کمترین خطا) است.

$$EE = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100$$

معیار نش ساتکلیف: این آماره نشان دهنده عملکرد مدل نسبت به یک مدل پایه است. ضریب نش بین $-\infty$ تا ۱ است و مقدار NSE نزدیک به ۱ نشان دهنده دقت زیاد و همخوانی خوب مدل است.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

در روابط بالا x_i داده های مشاهده ای، y_i نتایج برآورد شده با استفاده از مدل، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ به ترتیب میانگین مقادیر اندازه گیری شده

$$i(t) = f_c t + \frac{f_0 - f_c}{k} (1 - e^{-kt}) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$I(t) = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در روابط بالا k ثابت هورتون است که به کاربری زمین و جنبش خاک وابسته است.

مدل کاستیاکوف-لوییز

برای اصلاح معایب مدل کاستیاکوف، لوییز (۱۹۸۴) مدل رابطه (۵) و (۶) را ارائه نمودند.

$$i(t) = at^b + f_c t \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$I(t) = abt^{b-1} + f_c \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن i نفوذ تجمعی بر حسب سانتی متر، I سرعت نفوذ بر حسب سانتی متر بر دقیقه، t زمان، a ، b پارامترهای معادله و f_c سرعت نفوذ نهایی است.

مدل ناول

Sihag و همکاران (۲۰۱۷) برای تخمین نفوذ آب در خاک رابطه تجربی را به صورت رابطه (۷) و (۸) ارائه نمودند.

$$i(t) = \frac{m}{1-n} t^{1-n} + pf_c t \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$(t) = mt^{-n} + pf_c \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن $i(t)$ نفوذ تجمعی (سانتی متر)، $I(t)$ نرخ نفوذ (سانتی متر بر دقیقه) به صورت تابعی از زمان، t زمان (دقیقه)، m ، n و p پارامترهای مدل و f_c سرعت نفوذ نهایی (سانتی متر بر دقیقه) است.

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل های نفوذ

پس از تخمین پارامترهای هر مدل با روش کمترین مربعات و با استفاده از ابزار solver در اکسل با به کارگیری آماره های ضریب تبیین^۱، ریشه میانگین مربعات^۲، خطای ارزیابی^۳ و معیار نش-ساتکلیف^۴ اعتبارسنجی پارامترهای تخمین زده شده، انجام پذیرفت. برای این منظور ۶۶ درصد نمونه ها (۲۴ داده) برای تخمین پارامترها و ۳۳ درصد باقی مانده (۱۲ داده) برای اعتبارسنجی به کار گرفته شد.

نتایج

با استفاده از داده‌های نفوذ میدانی، پارامترهای نفوذ با استفاده از روش کمترین مربعات برآورد شد که دامنه تغییرات پارامترهای مدل‌های نفوذ در جدول (۲) گزارش شده است.

و میانگین نتایج حاصل از مدل‌ها است. مقادیر آماره ضریب تبیین همواره مثبت بوده و نزدیکی آن به یک، نشان دهنده عملکرد بهتر مدل است. مقادیر آماره ریشه میانگین مربعات خطا نیز مثبت بوده و بهترین حالت عملکرد زمانی است که به صفر نزدیک شود. همچنین هر چه معیار نش-ساتکلیف به یک نزدیک‌تر باشد، مدل مورد نظر عملکرد بهتری خواهد داشت.

جدول ۲. دامنه تغییرات پارامترهای مدل‌های نفوذ

مدل	پارامترهای مدل	کمینه	بیشینه	میانگین	درصد ضریب تغییرات
فیلیپ	$S(cm/min^{1/2})$	۱/۸۰	۳/۸۴	۲/۷۸۵۸	۱۶/۶۰۴
	$K_s(cm/min)$	۰/۰۸۴۵	۰/۱۷۱	۰/۱۰۵۴۵	۳۳/۰۴۸
هورتون	$k(min^{-1})$	۰/۰۰۸۵۷	۰/۱۳۵۸۰۹	۰/۰۶۲۶۴۲	۴۲/۶۹۲
	$f_0(cm/min)$	۱	۱/۸	۱/۳۷۵	۱۴/۵۸۳
	$f_c(cm/min)$	۰/۰۳۳	۰/۲	۰/۱۱۱	۳۵/۸۰۰
کاستیاکوف-لوییز	$a(cm/min^b)$	۱/۸۷	۳/۹۱	۲/۶۲۵	۲۴/۳۴۶
	b (بدون واحد)	۰/۳۷۷۸۰۲	۰/۶۲۰۷۸۱	۰/۵۲۵۸۷۴	۱۲/۷۶۹
	$f_c(cm/min)$	۰/۰۳۳	۰/۲	۰/۱۱۱	۳۵/۸۰۰
ناول	$m(cm/min^{1-n})$	۱/۱۰	۱/۸۷	۱/۴۰۶۶	۱۳/۹۹۳
	n (بدون واحد)	۰/۲۸۹۸۶	۰/۵۷۱۳۲۴	۰/۳۹۷۸۲	۱۵/۳۴۱
	p (بدون واحد)	۰	۰/۷۴۳۲	۰/۱۱۶۱۳۱	۱۶۳/۱۳۳
	$f_c(cm/min)$	۰/۰۳۳	۰/۲	۰/۱۱۱	۳۵/۸۰۰

همبستگی مثبت و قوی این پارامترها با یکدیگر است و می‌تواند به معنی وابستگی فیزیکی میان پارامترهای مرتبط با نفوذ اولیه و ظرفیت نفوذ باشد. از سوی دیگر، همبستگی منفی بین K_s و a (۰/۷۳۲-) و همچنین K_s و n (۰/۸۰۵-) مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرات متفاوت این پارامترها بر رفتار نفوذ در مراحل مختلف باشد. همچنین، پارامتر k همبستگی مثبت و معنی‌داری با f_0 (۰/۵۲۶) دارد که این موضوع نشان‌دهنده ارتباط آن با نرخ نفوذ اولیه خاک است. در مقابل، برخی پارامترها مانند f_c با بیشتر پارامترها همبستگی ضعیفی دارند و به‌ویژه با پارامترهایی مثل m و a ارتباطی مشاهده نمی‌شود که نشان می‌دهد این پارامتر کمتر تحت تأثیر سایر ویژگی‌های نفوذ خاک قرار دارد.

در تحلیل فرآیند نفوذ آب در خاک، شناخت روابط بین پارامترهای مختلف مدل‌های نفوذ اهمیت دارد، چرا که این پارامترها ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک را نمایان می‌سازند. به‌منظور درک بهتر همبستگی میان پارامترهای مدل‌های فیلیپ، هورتون، کاستیاکوف-لوییز و مدل ناول، ماتریس ضرایب همبستگی (جدول ۳) محاسبه شد. این جدول می‌تواند به شناسایی شباهت‌ها و تفاوت‌ها میان این مدل‌ها کمک کند و درک عمیق‌تری از رفتار نفوذ آب در خاک مورد مطالعه فراهم آورد.

همان‌طور که از نتایج جدول (۳) مشخص است برخی پارامترها ارتباط معنی‌داری با یکدیگر دارند، به عنوان مثال ضرایب همبستگی معنی‌داری بین پارامترهای S و f_0 (۰/۹۴۸) و همچنین S و m (۰/۹۴۱) وجود دارد که نشان‌دهنده

جدول ۳. جدول ضرایب همبستگی پارامترهای مدل ها

p	n	m	b	a	f_c	f_0	k	K_S	S
۰/۰۵۹	۰/۶۴۹**	۰/۹۴۱**	۰/۴۳۷*	۰/۸۳۶**	-۰/۱۸۹	۰/۹۴۸**	۰/۳۳۸	-۰/۵۹۱**	۱
-۰/۰۵۶	-۰/۸۰۵**	-۰/۴۴۷*	۰/۶۹۴**	-۰/۷۳۲**	۰/۵۲۲**	-۰/۵۱۴*	-۰/۴۱۵*	۱	K_S
۰/۴۱۷*	۰/۷۳۲**	۰/۳۷۰	-۰/۸۸۵**	۰/۷۴۸**	۰/۳۷۶	۰/۵۲۶**	۱		k
۰/۱۸۱	۰/۶۷۹**	۰/۹۳۱**	-۰/۵۶۶**	۰/۸۹۱**	۰/۰۶۲	۱			f_0
۰/۲۰۶	-۰/۱۸۱	-۰/۰۰۰۵	-۰/۲۱۷	۰/۰۰۷	۱				f_c
۰/۲۷۵	۰/۸۷۷**	۰/۷۹۷**	-۰/۸۴۳**	۱					a
-۰/۳۷۴	-۰/۸۲۵**	-۰/۴۱۲**	۱						b
۰/۰۰۹	۰/۵۲۵**	۱							m
۰/۵۱۷**	۱								n
۱									p

(*) نشان دهنده سطح معنی داری ۰/۰۵ (۵ درصد) و (**) نشان دهنده سطح معنی داری ۰/۰۱ (۱ درصد) است.

همچنین، درجه آزادی مربوط به هر یک از اجزای بین گروهی و درون گروهی در این جدول ارایه شده است. از آنجایی که آماره F محاسبه شده از مقدار بحرانی F بزرگتر است، فرض صفر (هیچ تفاوت معنی داری بین مدل های نفوذ فیلپ، هورتون، کاستیاکوف-لوییز و ناول وجود ندارد) رد می شود و می توان نتیجه گرفت که تفاوت معنی داری بین مدل ها وجود دارد.

در ادامه به منظور بررسی دقیق تر تفاوت های آماری میان مدل های نفوذ آب در خاک، از آزمون توکی^۵ جهت مقایسه میانگین اختلافات بین مدل ها استفاده خواهیم نمود. این آزمون امکان بررسی اینکه آیا تفاوت های مشاهده شده بین مدل ها از نظر آماری معنی دار هستند یا خیر را می دهد. همچنین نتایج این مقایسه کمک می کند تا مدلهایی که عملکرد بهتری در پیش بینی نفوذ آب داشته اند، به دقت شناسایی شوند. در این راستا، جدول (۵) برای مقایسه میانگین ها ارایه شده و نشان می دهد که چگونه اختلاف میانگین های مدل های مختلف فیلپ، هورتون، کاستیاکوف-لوییز و ناول، از یکدیگر متمایز هستند.

در این مطالعه، برای ارزیابی دقت مدل های نفوذ آب در خاک و مقایسه عملکرد آنها، از روش تجزیه واریانس یک طرفه^۱ استفاده شد. این تحلیل آماری به منظور بررسی معنی داری تفاوت بین داده های پیش بینی شده توسط مدل های مختلف (فیلپ، هورتون، کاستیاکوف-لوییز و ناول) و داده های مشاهداتی صورت گرفت.

روش تجزیه واریانس یک طرفه، با تقسیم تغییرات کل به دو بخش اصلی (تغییرات بین گروهی و درون گروهی)، امکان بررسی وجود تفاوت های معنی دار بین مدل ها را فراهم می کند. اگر آماره F محاسبه شده در این تحلیل از مقدار بحرانی F بیشتر باشد، نشان دهنده این است که حداقل یکی از مدل های مورد بررسی دارای تفاوت معنی دار با دیگر مدل ها است. بدین ترتیب، تجزیه واریانس به عنوان یک ابزار آماری قدرتمند این امکان را می دهد که عملکرد و دقت مدل ها را با یکدیگر مقایسه کرده و بهترین مدل برای پیش بینی نفوذ آب در خاک در منطقه مورد مطالعه انتخاب شود.

جدول (۴)، نتایج تجزیه واریانس را که شامل مجموع مربعات بین گروهی^۲، مجموع مربعات درون گروهی^۳، میانگین مربعات^۴، آماره F و مقدار بحرانی F است، نشان می دهد.

4. MSB, MSE
5. Tukey

1. ANOVA
2. SSB
3. SSE

جدول ۴. تجزیه واریانس

منبع تغییرات	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (MS)	F	مقدار بحرانی F
بین گروه‌ها (B)	۰/۳۷۸۱۷۰۶۲	۳	۰/۱۲۶۰۵۷	۱۰/۳۵۶۲۱	۲/۸۶۶۲۶۵
درون گروه‌ها (E)	۰/۴۳۸۱۹۵۵۸	۳۶	۰/۰۱۲۱۷۲	-	-

جدول ۵. مقایسه میانگین در آزمون توکی

مدل ۱	مدل ۲	اختلاف میانگین (Mean Difference)	HSD $q \sqrt{\frac{MSE}{n}}$	تفاوت معنی‌دار
فیلیپ	هورتون	-۰/۰۳۱۵۵۰۷	۰/۱۲۱۶۶۲۱۵	ندارد
فیلیپ	کاستیاکوف-لوییز	-۰/۰۶۶۷۵۹۰۵	۰/۱۲۱۶۶۲۱۵	ندارد
فیلیپ	ناول	۰/۱۶۹۵۱۹۵۵۲	۰/۱۲۱۶۶۲۱۵	دارد
هورتون	کاستیاکوف-لوییز	-۰/۰۶۳۶۰۳۹۸	۰/۱۲۱۶۶۲۱۵	ندارد
هورتون	ناول	۰/۱۷۲۶۷۴۶۲۱	۰/۱۲۱۶۶۲۱۵	دارد
کاستیاکوف-لوییز	ناول	۰/۲۳۶۲۷۸۶۰۴	۰/۱۲۱۶۶۲۱۵	دارد

نتایج این جدول که با معیار q محاسبه شده، نشان می‌دهد مدل فیلیپ در مقایسه با هورتون و کاستیاکوف-لوییز تفاوت معنی‌داری ندارد. اما فیلیپ در مقایسه با ناول، هورتون در مقایسه با ناول و همچنین کاستیاکوف-لوییز در مقایسه با ناول تفاوت‌های معنی‌داری دارند.

در نهایت، نتایج اعتبارسنجی پارامترها با چهار معیار ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا، خطای ارزیابی و معیار نش-ساتکلیف در جدول (۶) گزارش شده است. همان طور که از نتایج جدول مشهود است، همه مدل‌ها R^2 بالایی دارند که نشان‌دهنده توانایی خوب آنها در برازش داده‌ها است. بالاترین مقدار R^2 برای مدل کاستیاکوف-لوییز است که نشان می‌دهد این مدل کمی بهتر از سایرین عمل کرده است. بر اساس آماره RMSE مدل فیلیپ کمترین خطا و سپس در رده‌های بعدی به ترتیب مدل‌های هورتون، کاستیاکوف-لوییز و ناول قرار دارند. مقایسه نتایج چهار مدل استفاده شده در این پژوهش با استفاده از آماره میانگین درصد خطای انطباق نیز نشان داد به

ترتیب مدل‌های فیلیپ، هورتون، کاستیاکوف-لوییز و ناول با مقادیر EE برابر با ۱۸/۴۹، ۲۳/۵۱، ۲۴/۶۸ و ۵۰/۶۱ درصد به داده‌های اندازه‌گیری شده انطباق پیدا کردند. به این ترتیب بر اساس این آماره نیز مدل فیلیپ در رده اول و مدل هورتون در رده دوم قرار دارند. همچنین مدل ناول به‌عنوان نامناسب‌ترین مدل در برآورد مقادیر نفوذ شناخته شده است. بررسی ضریب کارآیی NSE برای این مدل‌ها نیز نشان می‌دهد مدل فیلیپ با ۰/۸۷۶ از کارآیی بیشتری نسبت به سایر مدل‌های مورد نظر برخوردار است، درحالی‌که مدل ناول از کارآیی کمتری برخوردار است.

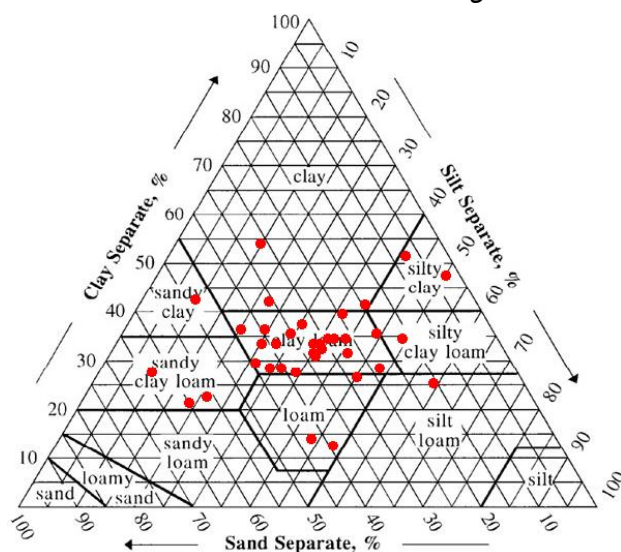
به‌طورکلی از نظر دقت پیش‌بینی، مدل فیلیپ با کمترین RMSE و EE و همچنین مقادیر قابل قبول R^2 و NSE، بهترین مدل برای پیش‌بینی نفوذ آب در مقایسه با دیگر مدل‌ها است. همچنین مدل هورتون نیز عملکرد خوبی دارد، اما مدل ناول به وضوح کمترین دقت و کارآیی را داشته و تفاوت‌های آماری معنی‌داری با سایر مدل‌ها دارد.

جدول ۶. اعتبارسنجی پارامترهای بهینه شده با معیارهای سنجش

میانگین				بیشینه				کمینه				مدل
Navel	K.L.	Horton	Philips	Navel	K.L.	Horton	Philips	Navel	K.L.	Horton	Philips	
۰/۹۷۹	۰/۹۸۰	۰/۹۶۷	۰/۹۷۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۸۶	۰/۹۹۹	۰/۹۳۶	۰/۹۴۲	۰/۹۳۳	۰/۹۳۶	R^2
۰/۲۳۱	۰/۱۷۴	۰/۱۰۷	۰/۰۸۳۸	۰/۲۸۶	۰/۸۵۱	۰/۱۷۸	۰/۱۳۳	۰/۱۸۰	۰/۰۶۸	۰/۰۵۲	۰/۰۲۷	RMSE(cm)
۵۰/۶۱	۲۴/۶۸	۲۳/۵۱	۱۸/۴۹	۵۷/۰۷	۳۷/۲۱	۳۸/۵۳۵	۳۵/۱۷	۳۸/۱۷	۷/۷۱۲	۱۰/۶۵	۵/۷۷۶	EE
۰/۳۳۷	۰/۸۰۲	۰/۸۵۲	۰/۸۷۶	۰/۶۲۰	۰/۹۵۶	۰/۹۶۳	۰/۹۹۱	۰/۰۹۲	۰/۹۲۷	۰/۶۷۷	۰/۴۹۲	NSE

بافت خاک را در نقاط اندازه گیری نشان می دهد، با توجه به این شکل مشاهده می شود که خاک غالب منطقه مورد مطالعه لوم رسی است.

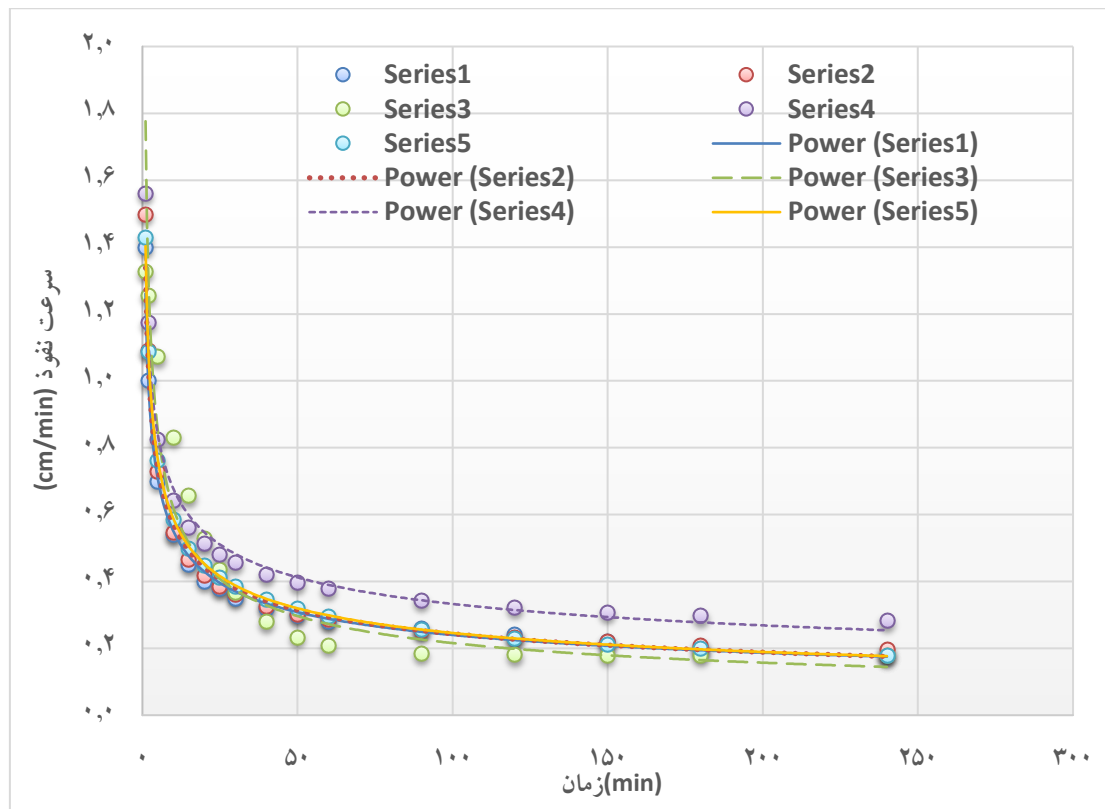
مقایسه نتایج چهار مدل استفاده شده در این پژوهش با استفاده از آماره های ذکر شده نشان می دهد به ترتیب مدل های فیلیپ، هورتون، کاستیاکوف-لوییز و ناول در رتبه های اول تا چهارم از نظر برتری و کارایی قرار دارند. شکل (۳) مثلث



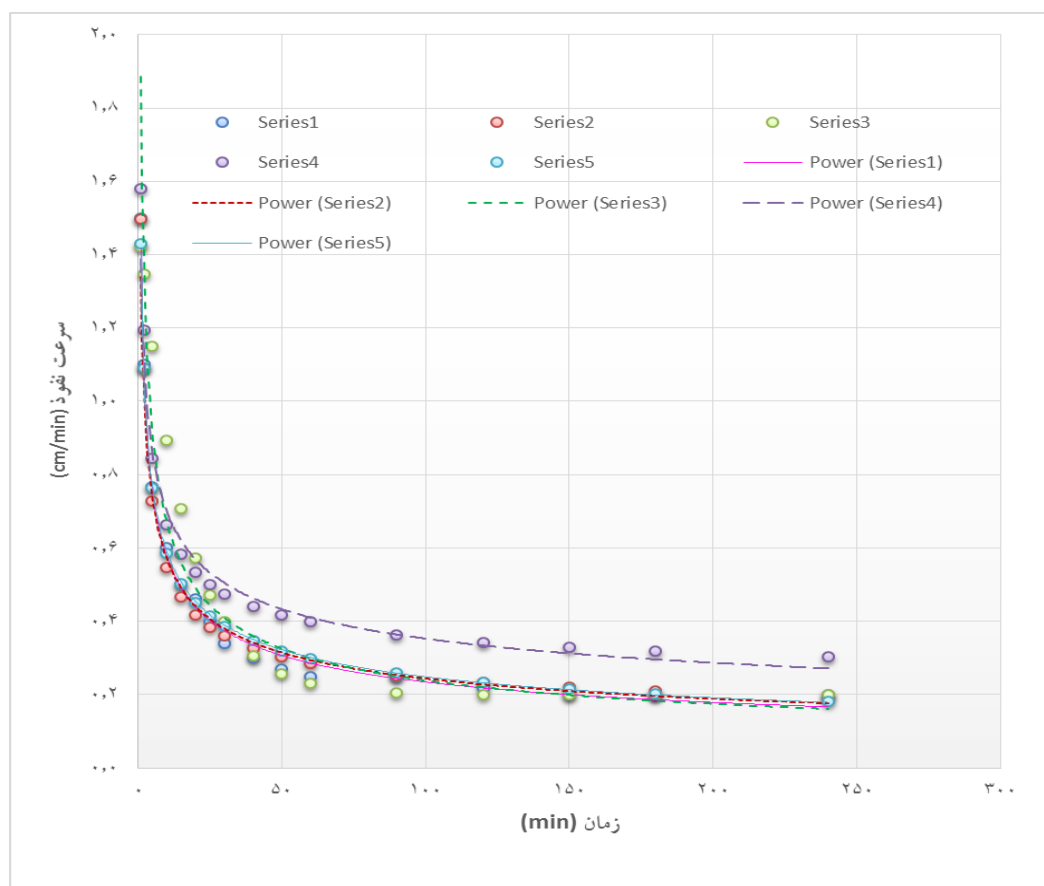
شکل ۳. مثلث بافت خاک نقاط اندازه گیری نفوذ آب در خاک

از مشاهدات مورد استفاده در اعتبارسنجی با بافت لوم رسی نشان می دهند.

در پایان شکل های (۴) و (۵) منحنی سرعت نفوذ اندازه گیری شده، برازش یافته و محاسبه شده توسط مدل های مختلف بر اساس بهترین ضرایب به دست آمده را برای دو نمونه



شکل ۴. سرعت نفوذ اندازه‌گیری، محاسبه و برازش شده توسط مدل‌های مختلف برای نمونه ۲۹ بافت لومرسی



شکل ۵. سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده و محاسبه شده توسط مدل‌های مختلف برای نمونه ۳۳ بافت لومرسی

بحث و نتیجه گیری

مدل های نفوذ از ابزارهای مهم مدیریت منابع آب به شمار می روند، به همین دلیل ارزیابی و انتخاب مدل مناسب برای هر منطقه، نقش حایز اهمیتی در مدیریت منابع آب خواهد داشت. در این پژوهش با استفاده از داده های میدانی حاصل از آزمایش نفوذپذیری در منطقه مورد نظر با استفاده از حلقه مضاعف، به ارزیابی چهار مدل نفوذ فیلیپ، هورتون، کاستیاکوف-لویز و ناول که شامل مدل های تجربی و فیزیکی بود، پرداخته شد. بر اساس نتایج و مقایسه مدل ها، مدل فیلیپ با کمترین خطا برابر 0.0838 و ضریب تبیین بالای 0.9782 ، دارای عملکرد مناسب تری نسبت به سایر مدل ها بود. در ضمن تفاوت معنی داری از نظر آماری با مدل های هورتون و کاستیاکوف-لویز نداشت و این امر نشان داد که مدل فیلیپ بهترین تطابق را با منطقه مورد نظر دارد و می تواند به عنوان یکی از بهترین گزینه ها برای پیش بینی نفوذ آب در این منطقه در نظر گرفته شود. همچنین این مدل می تواند در پژوهش های مربوط به آب و خاک و طراحی و ارزیابی آبیاری مورد استفاده قرار گیرد. البته مدل هورتون نیز با توجه به جدول مقایسه میانگین ها تفاوت معنی داری با مدل ناول دارد و در جدول اعتبارسنجی با داشتن R^2 بالا و NSE قوی، عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده است، اما مدل ناول در هر دو جدول عملکرد ضعیفی نشان داده و قابل توصیه برای پیش بینی نفوذ آب در خاک برای منطقه مورد نظر نمی باشد. با توجه به مثلث بافت خاک (شکل ۳)، از آنجایی که خاک غالب منطقه مورد مطالعه لومرسی است، نتایج به دست آمده در این پژوهش، مشابه نتیجه به دست آمده توسط رحیمی و کشکولی (۱۳۸۵) است. البته مدل هورتون نیز همخوانی خوبی با نتایج مشاهده شده دارد که از این نظر مشابه نتایج به دست آمده توسط Shukla و همکاران (۲۰۰۳) و Dashtaki و همکاران (۲۰۰۹) است. در کل با بررسی پژوهش های صورت گرفته، نتیجه گیری می شود که پژوهشگران مختلف در مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل های نفوذ به نتایج متفاوتی دست یافته اند که یکی از دلایل این امر طبیعت تغییرپذیر فرآیند نفوذ آب به خاک است.

در پژوهش های آینده، استفاده از توابع انتقالی^۱ می تواند برای تخمین پارامترهای مدل های نفوذ بر اساس ویژگی های زود یافت خاک به کار رود. این رویکرد، نه تنها نیاز به آزمایش های میدانی زمان بر و پرهزینه را کاهش می دهد، بلکه به محققان امکان می دهد تا به شکل غیرمستقیم و دقیق، پارامترهای کلیدی را به دست آورند. با توسعه PTF های محلی و بهینه سازی آنها برای شرایط خاص منطقه مورد مطالعه، می توان به بهبود پیش بینی نفوذ آب و مدیریت منابع آب دست یافت.

منابع

پرچمی عراقی، ف.، میرلطیفی، س.م.، قربانی دشتکی، ش. و مهدیان، م.ح. (۱۳۹۸) ارزیابی برخی مدل های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس های بافتی خاک و کاربری های اراضی. نشریه آبیاری و زهکشی، ۲(۴): ۱۹۳-۲۰۵.

جوادی، ع.، مصطفی زاده فرد، ب.، شایان نژاد، م. و مصدقی، م.ر. (۱۳۹۶) ارزیابی معادلات نفوذ آب به خاک در شرایط تلفیق کیفیت آب آبیاری، رطوبت اولیه خاک و بار آبی ثابت. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۱(۳): ۴۸۲-۴۶۹.

حاجیان، ن. و حاجیان، پ. (۱۳۹۴) پایگاه های داده های زاینده رود همراه با تحلیل گرافیکی اطلاعات، انتشارات علم آفرین و پارس ضیاء، صفحات ۲۷-۲۹.

رحیمی، ع. و کشکولی، ح.ع. (۱۳۸۵) ارزیابی و تعیین مدل های مختلف نفوذ در اراضی دانشکده کشاورزی دازشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج. اولین همایش ملی شبکه های آبیاری و زهکشی، دانشگاه چمران، اهواز. شناسه ملی مقاله: IDNC01_158.

سبزواری، ی. و عابدی کوپایی، ج. (۱۴۰۱) واسنجی و ارزیابی مدل های نفوذ آب در بافت های مختلف خاک. نشریه سامانه های سطوح آبیگر باران، ۱۰(۴): ۶۷-۷۷.

Abdi, S. and Saadat, S. (2022) Study the water infiltration in soil using double ring in different regions of Lorestan province. Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment, 1(1): 125-135.

- variability in a wasteland of Kharagpur. *Biosystems Engineering*, 95(4): 569–582.
- Mirzaee, S., Zolfaghari, A.A., Gorji, M., Dyck, M. and Ghorbani Dashtaki, S. (2014) Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(5): 681-693.
- Mohammed, A.H. (2006) Evaluation of Kostiakov, Horton and Philip's infiltration equations as affected by tillage and rotation systems in a clay-loam soil of Northwest Iran. In: *The 18th World Congress of Soil Science*, July, 1357b.
- Muneeraa, A.S., Naba Sayelba, K. and Hatem Kamalca, A. (2020) A comparative study to assess the suitable models for predicting the infiltration rate in an arid region. *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 22: 014–001.
- Návar, J. and Synnott, T.J. (2000) Soil infiltration and land use in Linares, NL, Mexico. *Terra Journal*, 18(3): 255–262.
- Philips, J.R. (1957) The theory of infiltration: the infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83(5): 345–357.
- Shukla, M.K., Lal, R. and Unkefer, P. (2003) Experimental evaluation of infiltration models for different land use and soil management systems. *Soil Science*, 168(3): 178-91.
- Sihag, P., Tiwari, N.K. and Ranjan, S. (2017) Estimation and inter comparison of infiltration models. *Water Science*, 31(1): 34-43.
- Vand, A.S., Sihag, P., Singh, B. and Zand, M. (2018) Comparative evaluation of infiltration models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(10): 4173-4184.
- Batoukhteh, F., Khoshravesh, M. and Dehghanisani, H. (2021) Evaluating some infiltration models under different soil texture classes and land uses. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35(1): 73-87.
- Dashtaki, S.G., Homaee, M., Mahdian, M.H. and Kouchakzadeh M. (2009) Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resources Management*, 23(13): 2777-2790.
- Fashi, F.H., Sharifi, F. and Kamali, K. (2014) Modelling infiltration and geostatistical analysis of spatial variability of sorptivity and transmissivity in a flood spreading area. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(1): 277–288.
- 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): 1-24.
- Haghighi, F., Gorji, M., Shorafa, M., Sarmadian, F. and Mohammadi, M.H. (2010) Evaluation of some infiltration models and hydraulic parameters. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(1): 210–217.
- Hillel, D. and Baker, R.S. (1988) A descriptive theory of fingering during infiltration into layered soils. *Soil Science*, 146(1): 51–56.
- Horton, R.E. (1941) An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America Journal*, 5(4): 399-417.
- Kojouri, R. and Javadi, M. (2023) Comparison of the efficiency of some soil infiltration models based on the data obtained from double rings in different land uses, case study: Mikhsaz Watershed. *Journal of Natural Ecosystems of Iran*, 14(1): 83-103.
- Machiwal, D., Jha, M.K. and Mal, B.C. (2006) Modelling infiltration and quantifying spatial soil

Evaluation and comparison of water infiltration models in the Zayanderud catchment of Isfahan (Regional analysis of the Najafabad hydrological unit)

Hamid Fazel¹, Hossein Babazadeh^{2*}, Fariborz Abbasi³ and Roghayeh Katani⁴

- 1) PhD student in Irrigation and Drainage, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 2) Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. *Corresponding Author's Email Address: h_babazadeh@iau.ac.ir
- 3) Research Professor, Agricultural Engineering and Technical Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran.
- 4) Assistant Professor, Department of Mathematics, Faculty of Sciences, Yasouj University, Yasouj-Iran.

Date of Submission: 2024/08/03

Date of Acceptance: 2024/12/17

Abstract

Due to the limitation of underground water resources, proper and optimal use of these resources is necessary. Water infiltration in the soil is important in hydrology studies, water management, protection and control of soil erosion and implementation of irrigation projects. Therefore, it is necessary to calibration and evaluation different permeability estimation models in different areas. The purpose of this research is to investigate the ability of common infiltration models such as Phillip, Horton, Kostiakov Lewis and Novel to estimate the amount of infiltration in soil textural classes in Zayanderud basin of Isfahan. In this study, 36 different points in Najafabad region from the Zayanderud basin were selected and infiltration was measured using a double loop. To evaluate the accuracy of the models, error metrics including root mean square error (RMSE), explanation coefficient (R), evaluation error (EE) and Nash Sutcliffe criterion (NSE) have been used. The calibration of the models has been done using solver of the Excel software and the table of correlation coefficients was presented to identify the relationships between different parameters of the models. The findings show that some parameters such as S (soil absorption coefficient in Philips model) and f_0 (initial infiltration speed) have a strong positive correlation, while parameters such as f_c (final infiltration speed) have a weak relationship with other parameters. Also, one-way analysis of variance (ANOVA) and comparison of means were performed using Tukey's test to check the significant differences between the models which the non-significance of Philip's model compared to Horton and Kostiakov-Lewis models and the significance of Philip's model compared to Novel, Horton's model in Comparison with Novell and also Kastyakov-Lewis compared with Novell were obtained. The results of the evaluation indices showed that the performance of Philip's infiltration model with the average values of RMSE (cm/min), R, NSE and EE equal to 0.0838, 0.978, 0.876 and 18.49%, respectively, was better than other considered models in the studied area.

Keywords: Horton's model, Kostiakov Lewis's model, Novel's model, Philip's model, Soil infiltrability.