Iranian Journal of
Rainwater Catchment Systems

مجله علمی سامانه‌های سطوح آبگیر باران

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۲-۱۵۳۱   شاپا چاپی: ۲۴۲۳-۵۹۷۰

واسنجی و ارزیابی مدل‌های نفوذ آب در بافت‌های مختلف خاک

یاسر سبزواری[1]، جهانگیر عابدی کوپایی[2،1*]

۱. دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

۲. استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰

صفحات: ۷۷- ۶۷

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

چکیده

برآورد دقیق نفوذ آب در خاک برای طراحی سیستم‌های آبیاری حائز اهمیت است. از این‌رو واسنجی مدل‌های مختلف برآورد نفوذپذیری در مناطق مختلف ضروری است. هدف از پژوهش حاضر واسنجی و ارزیابی مدل‌های کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاحی، فیلیپ، SCS، ناول و هورتون در بافت‌های مختلف خاک است. برای ارزیابی دقت مدل‌ها شاخص‌های خطاسنجی شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، نسبت میانگین (MR)، درصد خطای تخمین (PE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شدند. واسنجی مدل‌ها با استفاده از Solver نرم‌افزار اکسل انجام شد. نتایج شاخص‌های ارزیابی نشان داد که عملکرد مدل نفوذ ناول با مقادیر متوسط RMSE، MAE، MR، PE و R^2 به‌ترتیب برابر ۰/۰۲۱، ۰/۰۱۶۸، ۰/۹۹۹، ۰/۱۲۶ و ۰/۹۸ نسبت به پنج مدل دیگر در تمام محدوده مطالعاتی بهتر بوده و تحلیل واریانس مدل‌های مختلف عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر محاسباتی و اندازه-گیری شده را نشان داد. بررسی عملکرد مدل‌ها در بافت‌های مختلف بیان‌گر حساسیت کم‌تر مدل‌های هورتون، ناول، کاستیاکوف و کاستیاکوف اصلاح شده نسبت به تغییرات بافت خاک بود.

کلمات کلیدی: مدل فیلیپ، مدل کاستیاکوف، مدل ناول، مدل هورتون، نفوذپذیری.

مقدمه

لازمه طراحی و برنامه‌ریزی دقیق آبیاری تخمین دقیق نفوذ آب در خاک است (جوادی و همکاران، ۱۳۹۶). نفوذ آب در خاک یکی از پارامترهای حساس هیدرولیکی مؤثر بر آبیاری سطحی و از مشکل‌ترین پارامترهایی است که باید برآورد شود (Corradini, 2014). اهمیت این فرآیند سبب شده است که مدل‌های فیزیکی و تجربی گوناگونی به‌منظور کمی کردن این فرآیند ارائه شود (Argyrokastritis & Kerkides, 2003). در مدل‌های تخمینی با مبنای فیزیکی مانند مدل‌های گرین-آمپت (Green & Ampt, 1911) و فیلیپ (Philips, 1957) با تکیه بر مبانی فیزیکی سعی در ساده‌سازی شرایط اولیه و شرایط مرزی در معادله جریان در محیط غیراشباع شده است. این فرضیات باعث شده است که داده‌های مورد نیاز این مدل‌ها کاهش یابد. مدل‌های تخمینی تجربی به‌دلیل فرضیاتی که به سطح خاک و نیم‌رخ خاک مربوط می‌شود دارای محدودیت کم‌تری هستند و در عوض به شرایطی که برای آن واسنجی شده‌اند محدود می‌گردند (Richards, 1931). از این مدل‌ها می‌توان به مدل کاستیاکوف (Kostiakov, 1932)، هورتون (Horton, 1941)، کاستیاکوف–لوئیز (Singh & Yu, 1990) و مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS[2]) (US Department of Agriculture, 1974) اشاره نمود. به‌دلیل این‌که فرضیات و پارامترهای به کار رفته در مدل‌های نفوذ با هم متفاوت هستند، انتظار می‌رود در یک شرایط معین، مدل خاصی دارای عملکرد بهتری در مقایسه با بقیه باشد. از این‌رو پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های نفوذ صورت گرفته است.

[1] Email: koupai@cc.iut.ac.ir نویسنده مسئول: جهانگیر عابدی کوپایی

[2] Soil Conservation Service

جوادی و همکاران (۱۳۹۳) عملکرد مدل‌های مختلف نفوذ (کاستیاکوف اصلاح‌شده، فیلیپ و هورتون) در آبیاری سطحی با استفاده از مدل HYDRUS را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل‌های تجربی (کاستیاکوف اصلاح‌شده و هورتون) عملکرد بهتری نسبت به مدل فیزیکی (فیلیپ) داشته است. Yongyong و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه چهار مدل نفوذ (کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح‌شده، فیلیپ و هورتون) در توصیف نفوذ در جویچه‌های آبیاری پرداختند. نتایج نشان داد که مدل کاستیاکوف اصلاح‌شده، رابطه بین نفوذ تجمعی و زمان را بهتر از سایر مدل‌ها نشان می‌دهد. جوادی و همکاران (۱۳۹۶) معادلات نفوذ آب در خاک (کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح‌شده، فیلیپ، حفاظت خاک آمریکا و هورتون) در شرایط تلفیق کیفیت آب آبیاری، رطوبت اولیه خاک و بار آبی ثابت را ارزیابی نمودند. در این مطالعه مدل هورتون مناسب‌ترین و مدل کاستیاکوف نامناسب‌ترین مدل شناخته شدند. Mirzaee و همکاران (۲۰۱۴) عملکرد هشت مدل نفوذ (کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح‌شده، کاستیاکوف لوئیز اصلاح‌شده، فیلیپ، هورتون، Swartzendruber، گرین و آمپت و SCS) با روش حداقل مربعات را مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مدل کاستیاکوف لوئیز اصلاح‌شده برای بافت‌های لوم‌رسی، شنی‌رسی‌لومی، لومی و مدل کاستیاکوف اصلاح‌شده برای بافت‌های سیلتی‌لومی مناسب‌ترین مدل‌ها هستند. Zolfaghari و همکاران (۲۰۱۲) عملکرد هفت مدل نفوذ (کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح شده، کاستیاکوف لوئیز اصلاح شده، فیلیپ، هورتون، SCS و Swartzendruber) در برآورد نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با استوانه‌های مضاعف در چهار کلاس بافت خاک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل کاستیاکوف لوئیز اصلاح شده و مدل SCS در تمام خاک‌های مورد مطالعه به‌ترتیب مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین مدل‌ها هستند.

ثامنی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی کارآیی چند رابطه نفوذ (کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح شده، فیلیپ، حفاظت خاک آمریکا و هورتون) با کاربرد آب‌های شور و سدیمی مختلف در دو خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی پرداختند. نتایج نشان از عملکرد مناسب مدل کاستیاکوف اصلاح شده و عملکرد نامناسب مدل حفاظت خاک آمریکا داشت. واعظی و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی مدل‌های مختلف نفوذ آب در خاک‌های با بافت مختلف تحت مقادیر متفاوت محتوای رطوبت اولیه پرداختند. نتایج نشان داد که مدل هورتون مناسب‌ترین مدل و مدل گرین-آمپت نامناسب‌ترین مدل در تخمین نفوذ هستند. Sihag و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی چهار مدل مختلف نفوذ (کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح شده، Novel و SCS) پرداختند. نتایج نشان داد که مدل Novel بهترین عملکرد را نسبت به سه مدل دیگر داشته است. Vand و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی عملکرد و مدل‌سازی چهار مدل نفوذ (کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح شده، Novel و فیلیپ) پرداختند. نتایج ارزیابی نشان از عملکرد مناسب مدل Novel نسبت به سه مدل دیگر داشت. فرآیند اندازه‌گیری نفوذ، فرآیندی پرهزینه و وقت‌گیر است که تغییرپذیری این مشخصه خاک با تغییر پارامترهای مؤثر در آن، واسنجی مدل‌های تخمین نفوذ را ضروری می‌سازد تا بتوان نفوذپذیری در خاک‌های مختلف را با دقت زیاد تخمین زده و محاسبه نمود. شاهد این امر را می‌توان در پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه یافت. بنابراین هدف از پژوهش حاضر واسنجی و ارزیابی مدل‌های مختلف تجربی و فیزیکی نفوذ در مناطقی از استان لرستان است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش برای ارزیابی دقت مدل‌های نفوذ آب در خاک اطلاعات آزمایشی با استفاده از روش حلقه‌های مضاعف حاصل شد. مطالعات صحرائی در مناطقی از سطح استان لرستان انجام شد. استان لرستان با وسعت ۲۸۳۰۸ کیلومتر مربع در موقعیت جغرافیائی ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۳ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۱ دقیقه طول شرقی در مسیر شمالی-جنوبی زاگرس و قسمت میانی این سلسله جبال قرار دارد و ۱/۷ درصد مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده است. متوسط بارندگی سالانه ۵۱۶ میلی‌متر است. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه به‌ترتیب Thermic و Xeric است.

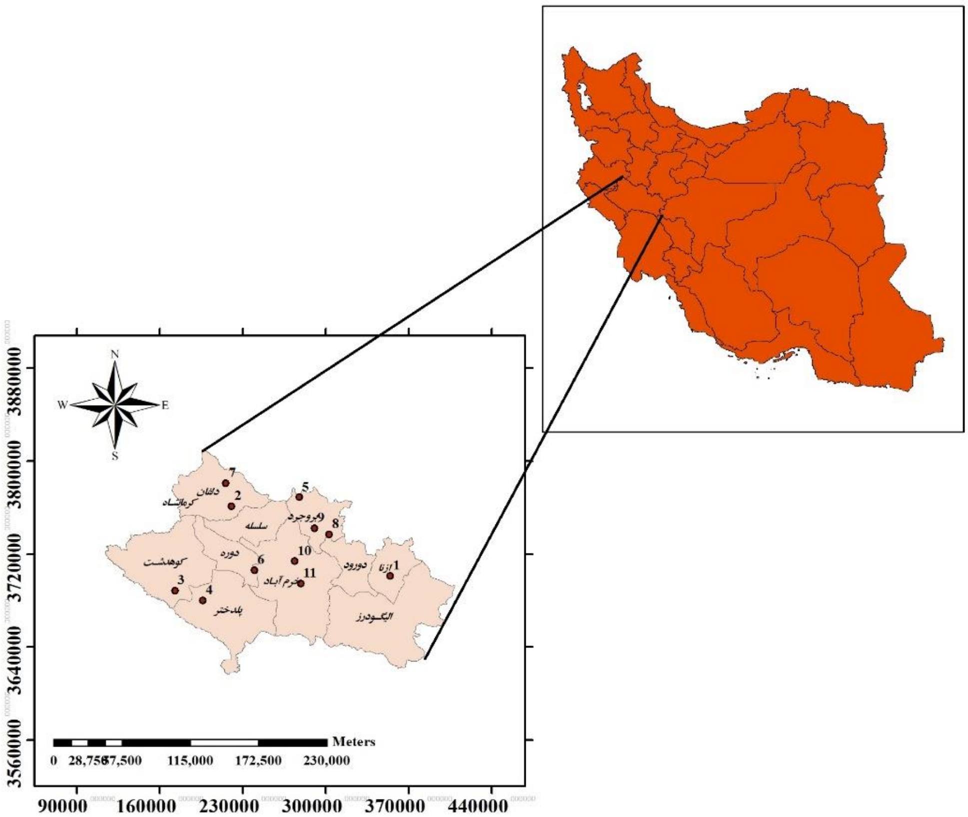
[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.6.1]

محل نقاط اندازه‌گیری

در این مطالعه ۱۱ نقطه در مناطق مختلف استان لرستان انتخاب و اندازه‌گیری نفوذ تجمعی با استفاده از حلقه دوگانه در این نقاط انجام شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در مناطق مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است. هم‌چنین، نقشه پراکندگی نقاط که در اراضی کشاورزی عمده استان واقع شده‌اند، در شکل (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مشخصات خاک منطقه مورد مطالعه

شماره ایستگاه	نفوذ اولیه در t=۲/۵ (سانتی‌متر بر دقیقه)	نفوذ پایه (سانتی‌متر بر دقیقه)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	چگالی خاک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)	رطوبت خاک (درصد)
۱	۰/۳۲	۰/۱۵	۱۲	۵۰	۳۸	۱/۴۲۳	۲/۷۳
۲	۰/۳۲	۰/۱۱	۱۲	۵۸	۳۰	۱/۴۲	۳/۰۸
۳	۰/۳۶	۰/۱۴	۱۲	۵۰	۳۸	۱/۷۹	۲/۵۸
۴	۰/۳۶	۰/۱۳	۱۴	۵۰	۳۶	۱/۶۳	۲/۴۹
۵	۰/۶۴	۰/۲۸	۲۶	۴۴	۳۰	۱/۴۴	۲/۳۷
۶	۰/۵۶	۰/۲۰	۲۵	۴۹	۲۶	۱/۴۴۸	۲/۳۷
۷	۰/۶۰	۰/۲۰	۱۶	۵۱	۳۳	۱/۴	۲/۴۸
۸	۰/۱۲	۰/۰۸	۱۸	۶۲	۲۰	۱/۰۸	۳/۸۴
۹	۰/۸	۰/۲۴	۲۸	۵۵	۱۷	۱/۳	۲/۲۴
۱۰	۰/۴۴	۰/۱	۱۶	۶۵	۱۹	۱/۲۷	۱/۶۶
۱۱	۰/۴۴	۰/۱۴	۱۸	۵۳	۲۹	۱/۴	۲/۱۸



شکل (۱): محل نقاط اندازه‌گیری در سطح استان لرستان

روش تحقیق

برای محاسبه نفوذ از روش حلقه‌های مضاعف[1] برای همه ایستگاه‌ها استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، حلقه‌های مضاعف دارای دو حلقه داخلی و خارجی است که ابعاد آن‌ها به قطرهای ۳۰ سانتی‌متر و ۶۰ سانتی‌متر با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر است. هر دو حلقه با استفاده از چکش و بدون آسیب زدن به سطح زیر خاک تا عمق حدود ۱۰ سانتی‌متر در خاک کار گذاشته شدند. عمق آب در حلقه داخلی، تا وقتی که سرعت نفوذ ثابت شد، در گام‌های زمانی منظم یادداشت شد.

شکل (۲): حلقه‌های مضاعف آزمایش

مدل‌های مورد استفاده

- مدل کاستیاکوف (KM)

Kostiakov (۱۹۳۲) یک مدل تجربی برای محاسبه سرعت نفوذ به‌صورت زیر ارائه کرد:

$$f(t) = mt^{-n} \quad (۱)$$

که در آن f(t) نرخ نفوذ (سانتی‌متر بر دقیقه) به‌صورت تابعی از زمان، m و n پارامترهای مدل و t نیز زمان (دقیقه) است.

- مدل کاستیاکوف اصلاح شده (MKM)

مدل کاستیاکوف اصلاح شده برای زمان‌های طولانی به‌صورت رابطه (۲) است:

$$f(t) = mt^{-n} + i_c \quad (۲)$$

که در آن f(t) نرخ نفوذ (سانتی‌متر بر دقیقه) به‌صورت تابعی از زمان، t زمان (دقیقه)، m و n پارامترهای مدل و i_c سرعت نفوذ نهایی یا پایه (سانتی‌متر بر دقیقه) است.

- مدل فیلیپ (PM)

Philips (۱۹۵۷) رابطه‌ای برای محاسبه نفوذ بر اساس خصوصیات فیزیکی خاک و آب در دسترس در خاک، به‌صورت رابطه (۳) ارائه کرد:

$$f(t) = \frac{1}{2} St^{-0.5} + A \quad (۳)$$

که در آن f(t) نرخ نفوذ (سانتی‌متر) به‌صورت تابعی از زمان، t زمان (دقیقه)، S ضریب جذبی خاک (سانتی‌متر بر دقیقه به‌توان ۲) و A پارامتر مربوط به خاک و بیان‌گر نیروی گرانروی خاک است.

- مدل حفاظت خاک آمریکا (SCS)

US Department of Agriculture (۱۹۷۴) بر اساس مدل کاستیاکوف و آزمایشات متعدد رابطه‌ای به‌صورت زیر ارائه کرد:

$$f(t) = mt^{n} + 0.6985 \quad (۴)$$

[1] Double ring

که در آن f(t) نرخ نفوذ (سانتی‌متر بر دقیقه) به‌صورت تابعی از زمان، t زمان (دقیقه)، m و n پارامترهای مدل هستند.

- مدل هورتون (HM)

Horton (۱۹۴۱) پس از بررسی‌های زیاد به این نتیجه رسید که ظرفیت نفوذ آب در خاک با افزایش زمان به شدت و به‌صورت توانی نسبت به زمان کاهش می‌یابد. به نحوی که در ابتدای بارندگی ظرفیت آن حداکثر f_{ini} و در نهایت به مقدار f_0 می‌رسد.

$$f(t) = f_0 + (f_{ini} - f_0)e^{-kt} \quad (۵)$$

که در آن f_{ini} سرعت نفوذ اولیه (سانتی‌متر بر دقیقه)، f_0 سرعت نفوذ پایه (سانتی‌متر بر دقیقه)، t زمان (دقیقه)، f(t) نرخ نفوذ (سانتی‌متر بر دقیقه) و k ثابت هورتون است که به کاربری اراضی و جنبش خاک بستگی دارد.

- مدل ناول [1] (NM)

Sihag و همکاران (۲۰۱۷) برای تخمین نفوذ آب در خاک رابطه تجربی به‌صورت زیر ارائه نمودند:

$$f(t) = mt^{-n} + pi_c \quad (۶)$$

که در آن f(t) نرخ نفوذ (سانتی‌متر بر دقیقه) به‌صورت تابعی از زمان، t زمان (دقیقه)، m، n و p پارامترهای مدل و i_c سرعت نفوذ نهایی (سانتی‌متر بر دقیقه) است.

تعیین ضرایب مدل‌های مختلف نفوذ

با توجه به اینکه مدل‌های نفوذ دارای ضرایب ثابت و تجربی هستند، لذا استخراج این ضرایب برای تخمین نفوذ توسط مدل، ضروری است. برای ارزیابی و مقایسه مدل‌های مختلف نفوذ، ضرایب بهینه مدل‌های به‌کار گرفته شده با استفاده از ابزار Solver اکسل استخراج شد. برای این منظور مقادیر عمق آب نفوذ یافته نسبت به زمان با معادلات مذکور برازش داده شد، این کار به نحوی انجام شد که شاخص ریشه میانگین مربعات خطا حداقل مقدار را داشته باشد.

شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های نفوذ، تعیین معیارهای ارزیابی عملکرد ضروری است. برای دستیابی به مدل مناسب نفوذ، مدل‌های مختلف با شاخص‌های خطاسنجی مبتنی بر پارامترهای آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، درصد خطای تخمین (PE)، نسبت میانگین (MR) و ضریب تبیین (R^2) که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند، مورد استفاده قرار گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n}(x_i - \bar{y_i})^2}{n}} \quad (۷)$$

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^{n}|xi - \bar{yi}|}{n} \quad (۸)$$

$$PE = \frac{|x_{avg} - y_{avg}|}{y_{avg}} *100 \quad (۹)$$

$$MR = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{x_i}{y_i} \quad (۱۰)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \quad (۱۱)$$

که در این روابط x_i و y_i به‌ترتیب مقدار اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از مدل‌ها نیز x_{avg} و y_{avg} به‌ترتیب میانگین مقدار اندازه‌گیری شده و میانگین نتایج حاصل از مدل‌هاست. مقادیر آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین

[1] Novel

[DOR: 20.1001.1.24235970.1401.10.4.6.1]

خطای مطلق همواره مثبت بوده و بهترین حالت عملکرد زمانی است که مقدار به صفر نزدیک شود. مقدار مثبت آماره درصد خطای تخمین بیان‌گر آن است که مدل مورد بررسی نفوذ تجمعی را بیش‌تر برآورد کرده و مقدار منفی آن بیان‌گر آن است که مدل مقدار نفوذ را کم‌تر برآورد می‌کند. شاخص نسبت میانگین به منظور بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی مدل‌ها نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده، مورد استفاده قرار گرفت.

تجزیه واریانس یک‌طرفه (ANOVA)

از تحلیل واریانس یک طرفه برای تعیین این‌که آیا بین میانگین دو یا چند گروه مستقل تفاوت معنی‌داری وجود دارد یا خیر، استفاده می‌شود. فرض صفر (H_0) در این آزمون، یکسان بودن میانگین همه نمونه‌هاست:

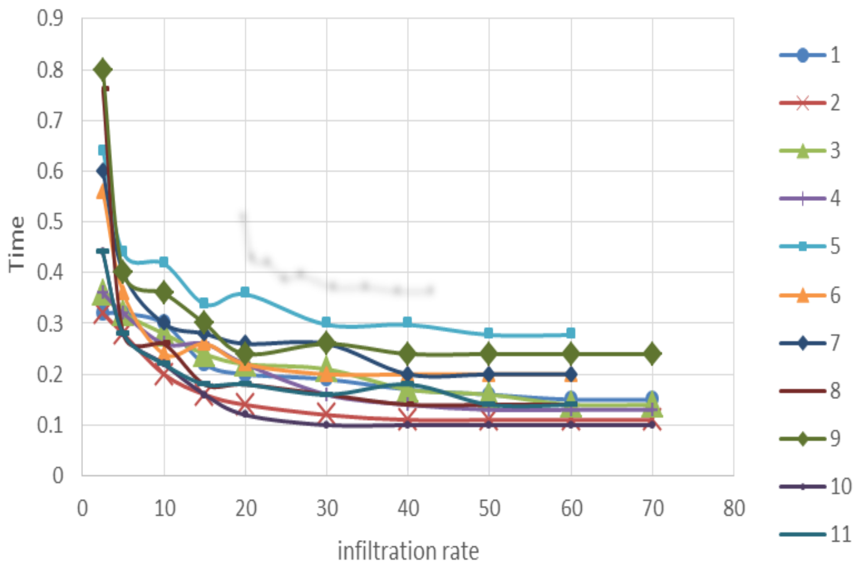
$$H_0:\ \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 \ldots = \mu_k \qquad (۱۲)$$

که در آن μ میانگین گروه و k تعداد گروه است. برای تحلیل واریانس از آماره‌های F و P استفاده می‌شود. آماره F با F بحرانی و مقدار P با سطح معنی‌داری α (۰/۰۵=) مقایسه می‌شود. چنان‌چه مقدار F بیش‌تر یا مساوی مقدار بحرانی باشد (F≤ F بحرانی)، فرض صفر رد و چنان‌چه کم‌تر از حد بحرانی باشد (F>F بحرانی)، فرض صفر تأیید می‌شود.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل‌های مورد استفاده

در این مطالعه آزمایش‌های نفوذ به‌منظور داشتن تنوع مکانی، در ۱۱ مکان مختلف اجرا شد. در شکل (۳) نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داده شده است. میزان نفوذ اولیه از ۰/۸ تا ۰/۱۲ سانتی‌متر بر دقیقه متغیر بوده و میزان نفوذ نهایی از ۰/۲۸ تا ۰/۰۸ سانتی‌متر بر دقیقه متغیر است. میزان رطوبت نمونه‌های خاک گرفته شده در ایستگاه‌های مختلف در بازه ۱/۶۶ تا ۳/۸۴ درصد قرار دارد. در این پژوهش مدل‌های نفوذ کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاح شده، فیلیپ، SCS، ناول و هورتون برای تخمین میزان نفوذ آب در منطقه مطالعاتی انتخاب شدند. برای بررسی کردن این مدل‌ها از اطلاعات نفوذ میدانی استفاده شد. تلاش بر این بود تا این مدل‌ها با مشاهدات آزمایشی ارزیابی شده و مقادیر عددی مناسبی برای پارامترهای معادلات نفوذ ارائه شود. مقدار ضرایب مدل‌های نفوذ مورد بررسی بعد از عملیات واسنجی در جدول (۲) ارائه شده است.

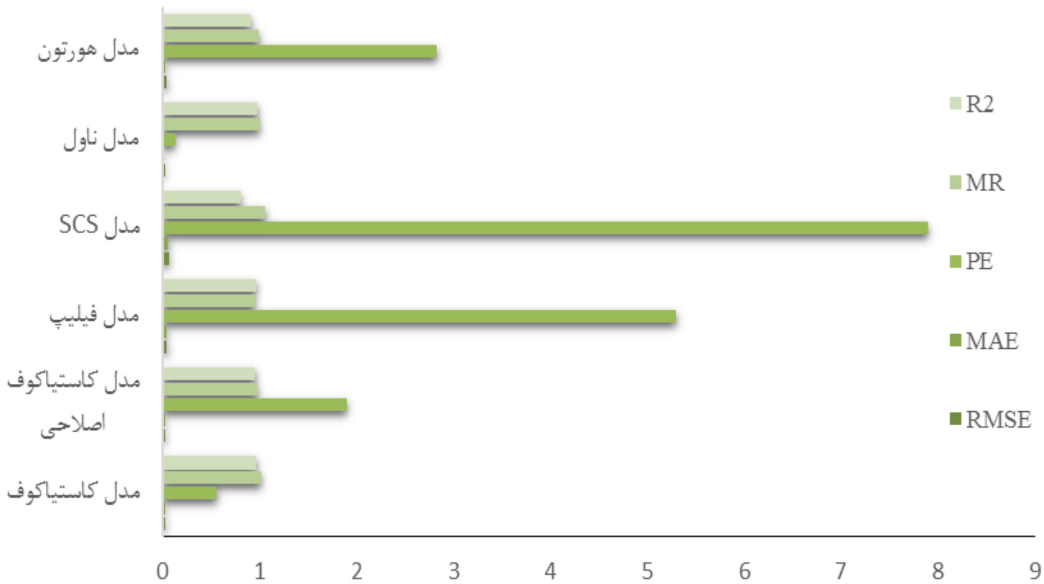


شکل (۳): مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ

جدول (۲): ضرایب مدل‌های نفوذ بعد از واسنجی

نام ایستگاه	مدل کاستیاکوف		مدل کاستیاکوف اصلاحی		مدل فیلیپ		مدل SCS		مدل ناول			مدل هورتون
	m	N	m	n	S	A	m	n	p	n	m	k
۱	۰/۸۲۸	-۰/۳۷	۰/۸۲۶	۰/۴۲۶	۱/۶۵	۰/۰۵	-۰/۰۹۲	-۰/۴۶۴	-۴۷/۲۷	-۰/۰۰۸۲	۷/۵	۰/۰۴۱۵
۲	۱/۱۸	-۰/۵۳	۰/۳۹۱	۱/۱	۲/۴۱	-۰/۰۲۷	-۰/۰۴۳	۰/۶۴۵	۰/۱۴۲	-۰/۴۰۵۸	۰/۴۶	۰/۰۲۲۷
۳	۰/۸۵	-۰/۴۴	۰/۸۰۵	۰/۵	۱/۶۵	۰/۰۵۲	-۰/۱۴۶	۰/۳۳۲	-۱۲۰/۸۵	-۰/۰۰۴	۱۸/۷۱	۰/۰۴۷
۴	۰/۹۳۶	-۰/۵۳۶	۰/۸۴۲	۰/۷۰۳	۱/۸۶۱	-۰/۰۱۱	-۰/۱۴۵	۰/۳۶۱	-۹۸/۲۳	-۰/۰۰۶	۱۳/۰۸	۰/۰۵۱۳
۵	۰/۹۹	-۰/۶۶	۰/۹۳	۰/۹۰۹	۱/۹۹	-۰/۰۷۲	-۰/۱۸۵	۰/۳۰۶	۰/۷۸	-۰/۶۴	۰/۷۴	۰/۱۰۰۵
۶	۰/۲۴۸	-۰/۵۸	۰/۶۳	۱/۳۳	۰/۴۵۳	-۰/۰۰۶۴	۰/۵۷۱	۰/۰۴۲	۰/۹۰۱	-۱/۱۱۲	۱/۰۵۵	۰/۱۸۸
۷	۰/۵۶	-۰/۳۲	۰/۴۹۵	۰/۴۰۵	۰/۹۹	۰/۰۸۹	-۰/۲۱۴	۰/۲۳۷	۰/۷۸	-۰/۷۶۳	۰/۸۴۶	۰/۱۴۸
۸	۰/۶۷۵	-۰/۲	۰/۲۸	-۰/۸۹	۰/۹۱۷	۰/۲۵۶	-۰/۱۱۸	۰/۳۱	۰/۶۶	-۰/۳۸	۰/۰۹۹۱	۰/۰۹۱۳
۹	۰/۷۴۴	-۰/۵۶	۰/۷۰۸	۰/۶۰۸	۱/۶۶	-۰/۰۶۴	-۰/۱۸۴	۰/۳۵۵	۰/۹۹	-۱/۴۸	۲/۱۷۱	۰/۱۴۹
۱۰	۰/۶۵۶	-۰/۳۴۴	۰/۳۸۲	-۰/۸۱۴	۱/۲	۰/۰۸۵	-۰/۱۵۶	۰/۳۲۶	۰/۲	-۰/۶۳	۰/۷۴۵	۰/۱۰۹
۱۱	۰/۳۹۴	۰/۲۰۸	۰/۶۱۴	۰/۱۱۵	-۰/۵۶	۰/۳۵۵	-۰/۰۹۷	۰/۲۸۹	۰/۹	-۰/۹۴	۰/۷۳۵۱	۰/۱۱۳

شکل (۴) در بردارنده مقادیر متوسط شاخص‌های مدل‌های مورد بررسی است. مقدار متوسط شاخص RMSE برای مدل‌های کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاحی، فیلیپ، SCS، ناول و هورتون به‌ترتیب برابر ۰/۰۳۱، ۰/۰۲۹، ۰/۰۴۵، ۰/۰۶، ۰/۰۲۱ و ۰/۰۴۴ سانتی‌متر بر دقیقه، مقادیر MAE برابر ۰/۰۲۵۱، ۰/۰۲۵۵، ۰/۰۴۲، ۰/۰۵۸۱، ۰/۰۱۶۸ و ۰/۰۳۱ سانتی‌متر بر دقیقه، مقادیر MR برابر ۱/۰۱۵، ۰/۹۷۷، ۰/۹۴۷، ۱/۰۶، ۰/۹۹۹ و ۰/۹۹۳ درصد، مقادیر PE برابر ۰/۵۶، ۱/۹، ۵/۳، ۷/۹، ۰/۱۲۶ و ۲/۸۳ درصد و مقادیر R^2 به‌ترتیب برابر ۰/۹۶۶۵، ۰/۹۵۷، ۰/۹۶۶۲، ۰/۸۰۳۴، ۰/۹۸ و ۰/۹۱ است. بر این اساس مدل ناول دارای کم‌ترین خطا (RMSE، MAE و PE) و بیش‌ترین دقت (R^2) نسبت به سایر مدل‌هاست. با توجه به شاخص MR نیز مدل ناول با مقدار ۰/۰۰۱ درصد کم‌برآوردی بیش‌ترین دقت را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای داشته است. این در حالی است که مدل فیلیپ ۰/۰۵۳ درصد، مدل کاستیاکوف اصلاح شده ۰/۰۲۳ و مدل هورتون ۰/۰۰۷ درصد کم‌برآوردی و مدل‌های کاستیاکوف و SCS به‌ترتیب ۰/۰۱۵ و ۰/۰۶ درصد بیش‌برآوردی را نسبت به مقادیر مشاهده‌ای داشته‌اند.



شکل (۴): نمودار متوسط شاخص‌های خطاسنجی مدل‌های مورد بررسی

جدول (۳) نشان‌دهنده تحلیل واریانس یکطرفه مدل‌های نفوذ مورد ارزیابی است. بر اساس نتایج این آزمون، بین مقادیر میدانی نفوذ و مقادیر تخمینی توسط مدل‌های کاستیاکوف، کاستیاکوف اصلاحی، فیلیپ، SCS، ناول و هورتون از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

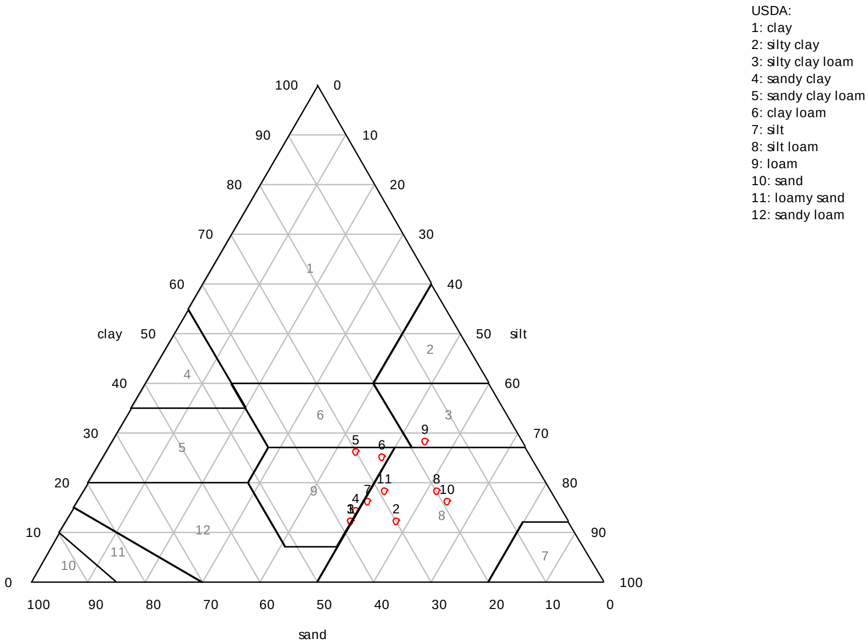
جدول (۳): نتیجه تحلیل واریانس مدل‌های مورد بررسی

مدل	P-value	F	F بحرانی
کاستیاکوف	۰/۵۷۸۷۴۸۶۷	۰/۳۷۲۸۰۵۶۶	۳/۳۲۴۷۲۸۲۴
کاستیاکوف اصلاحی	۰/۶۵۵۴۱۷۲۵	۰/۲۳۲۱۴۷۳۳	
فیلیپ	۰/۳۶۲۲۰۷۴۳	۰/۹۷۰۶۳۵۸۸	
SCS	۰/۵۹۷۵۳۸	۰/۳۰۲۷۶۶۸۱۲	
ناول	۰/۹۹۹۶۹۷	−۰۸E۰/۵۷	
هورتون	۰/۹۰۱۳۹۲۲۳	۰/۰۱۸۳۷۴۴۵	

مقایسه شاخص‌های ارزیابی مدل‌های نفوذ نشان از عملکرد بهتر مدل ناول نسبت به مدل‌های دیگر دارد و این مدل می‌تواند در مناطقی با خصوصیات مشابه محدوده مطالعاتی مورد استفاده قرار گیرد. Sihag و همکاران (۲۰۱۷) و Vandو همکاران (۲۰۱۸) نیز در پژوهش خود به نتیجه مشابه دست یافتند. در طرف مقابل، مدل SCS دارای کم‌ترین دقت برازش نفوذ در محدوده مطالعاتی است. Zolfaghari و همکاران (۲۰۱۲) و ثامنی و همکاران (۱۳۹۳) نیز در پژوهش خود مدل SCS را نامناسب‌ترین مدل معرفی کردند. بعد از مدل ناول، مدل هورتون در همه ایستگاه‌ها دارای دقت مناسبی بوده است.

کارآیی مدل‌های نفوذ در بافت‌های متفاوت

تغییرپذیر بودن فرآیند نفوذ آب به خاک در شرایط مختلف، باعث تغییر رفتار نفوذ در خاک‌های با شرایط فیزیکی مشابه می‌شود. از این‌رو انتظار می‌رود تغییرپذیری الگوی نفوذ آب در خاک‌های مشابه متفاوت باشد، به نحوی‌که تغییرپذیری فرآیند نفوذ موجب می‌شود تا یک مدل نفوذ در خاک‌های مختلف، عملکرد متفاوتی داشته باشد (Sy, 2006). طبق جدول مثلث بافت خاک حفاظت خاک آمریکا (شکل ۵)، بافت خاک ایستگاه‌های مختلف به‌صورت جدول (۴) به‌دست آمد.



شکل (۵): مثلث بافت خاک ایستگاه‌های نمونه‌برداری

جدول (۴): بافت خاک ایستگاه‌های مختلف بر اساس مثلث بافت خاک

سایت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
بافت	لوم/لوم سیلت	لوم سیلت	لوم/لوم سیلت	لوم/لوم سیلت	لوم	لومی	لوم سیلت	لوم سیلت	لومی شنی سیلت	لوم سیلت	لوم سیلت

جدول (۵) نشان‌دهنده مقادیر شاخص MAE مدل‌های مورد بررسی در بافت‌های مختلف است. بررسی عملکرد مدل‌ها در بافت‌های مختلف بر اساس شاخص MAE نشان‌دهنده حساسیت کم‌تر مدل‌های هورتون، ناول، کاستیاکوف و کاستیاکوف اصلاح شده نسبت به تغییرات بافت خاک است. واعظی و همکاران (۱۳۹۸) نیز در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که مدل‌های هورتون، کاستیاکوف و کاستیاکوف اصلاح شده حساسیت کم‌تری به تغییرات بافت خاک دارند. به‌طور کلی عملکرد مدل SCS در بافت‌های سنگین و عملکرد مدل فیلیپ در بافت‌های سبک‌تر دارای دقت بیش‌تری در برآورد نفوذ آب در خاک هستند.

جدول (۵): ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف در بافت‌های گوناگون خاک

ردیف	شاخص	KM	MNM	MK	PM	SCS	HM
۱	MAE	۰/۱۵۲۱	۰/۲۴۴۳	۰/۱۳۸۹	۰/۱۹۱۹	۰/۰۱۷	۰/۰۱۶۷
۲	MAE	۰/۰۱۰۳	۰/۰۱۷۹	۰/۰۱۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲۳	۰/۰۳۰۳
۳	MAE	۰/۰۱۲۳	۰/۰۲۲۳	۱/۲۲۱	۰/۰۱۹	۰/۰۱۰۱	۰/۰۰۹/
۴	MAE	۰/۰۱۸	۰/۰۳۰۴	۰/۰۱۱۹	۰/۰۲۳۳	۰/۰۱۵۲	۰/۰۱۵۰
۵	MAE	۰/۰۱۹۸	۰/۰۲۰۹	۰/۰۱۷۷	۰/۰۱۷۷	۰/۰۳۳	۰/۰۲۵۱
۶	MAE	۰/۰۲۳۱	۰/۰۱۲۹	۰/۰۰۸	۰/۰۲۰۴	۰/۰۴۱۱	۰/۰۲۴۹
۷	MAE	۰/۰۱۷۵	۰/۰۱۵۶	۰/۰۱۴	۰/۰۱۶	۰/۰۳۶۷	۰/۰۳۰۴
۸	MAE	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۷	۰/۰۰۵۶	۰/۰۰۵۶	۰/۰۱۱۳	۰/۰۰۶۴
۹	MAE	۰/۰۴۱۵	۰/۰۱۷۹	۰/۰۱۷۴	۰/۰۳۷۷	۰/۰۷۵۵	۰/۰۳۳۴
۱۰	MAE	۰/۰۱۰۷	۰/۰۱۹۸	۰/۰۰۹۹	۰/۰۵۰۵	۰/۰۳۳۷	۰/۰۱۷۸
۱۱	MAE	۰/۰۱۵	۰/۰۰۹۴	۰/۰۰۹۲	۰/۰۱۳	۰/۰۲۹	۰/۰۲۰۷

نتیجه‌گیری

مدل‌های نفوذ از جمله ابزارهای مهم مدیریت سیستم‌های منابع آب به‌شمار می‌روند. از این‌رو ارزیابی و انتخاب مدل-های مناسب برای هر منطقه، نقش مؤثری در مدیریت منابع ایفا می‌کند. در این مطالعه با استفاده از داده‌های میدانی نفوذ، به ارزیابی شش روش نفوذ آب در خاک که در بردارنده مدل‌های تجربی و فیزیکی بود، در نقاطی از سطح استان لرستان پرداخته شد. بر اساس نتایج و مقایسه مدل‌ها در ایستگاه‌های مختلف، مدل ناول دارای مناسب‌ترین عملکرد نسبت به پنج مدل دیگر بود. مقایسه کارآیی مدل‌ها در بافت‌های مختلف نیز نشان‌دهنده عدم حساسیت مدل ناول نسبت به تغییر بافت خاک بود. در طرف مقابل مدل SCS در بافت‌ها و ایستگاه‌های مختلف کم‌ترین دقت را در تخمین نفوذ داشت. با توجه به این‌که استان لرستان یکی از قطب‌های زراعت کشور است پیشنهاد می‌شود ضمن نتایج حاصل از این تحقیق مورد توجه تصمیم‌گیران امر و کشاورزان قرار گرفته، تحقیقات گسترده‌تر در نقاط بیش‌تری در دشت‌های استان انجام شود تا ضمن استفاده بهینه از آب مورد استفاده و افزایش بهره‌وری به حفظ خاک منطقه کمک شود.

منابع

۱. ثامني، ع.، م. پاکجو، س. موسوی و ع. ا. کامکار حقیقی (۱۳۹۳) ارزیابی چند رابطه آب به خاک با کاربرد آب‌های شور و سدیمی. پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸ (۲)، ۳۹۵–۴۰۸.

۲. جوادی، ع.، م. مشعل و ح. ابراهیمیان (۱۳۹۳) تحلیل حساسیت معادلات نفوذ آب به خاک و ضرایب آن‌ها نسبت به رطوبت اولیه و بار آبی. آب و خاک مشهد (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸ (۵)، ۹۰۷–۸۹۹.

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

۴. واعظی، ع.ر.، م. بهتری و م. فرومدی (۱۳۹۸) ارزیابی مدل‌های نفوذ آب در خاک‌های با بافت مختلف تحت مقادیر متفاوت محتوای رطوبت اولیه. اکوهیدرولوژی، ۶ (۳)، ۷۰۷-۷۱۷.

5. Argyrokastritis I. and Kerkides P. (2003) *A note to the variable sorptivity infiltration equation.* Water Resources Management, *17: 133-145.*
6. Corradini C. (2014) *Soil moisture in the development of hydrological processes and its determination at different spatial scales*. Journal of Hydrology, *516:1-5.*
7. Green W. H. and Ampt G. (1911) *Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils.* The Journal of Agricultural Science, *4: 1-24*, DOI: 10.1017/S0021859600001441.
8. Horton R. E. (1941) *An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity*. Soil Science Society of America Journal, *5: 399-417*, DOI: 10.2136/sssaj1941.036159950005000c0075x.
9. 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*. Trans, *6: 17-21*, https://ci.nii.ac.jp/naid/10011005232/en/.
10. 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*, DOI: 10.1080/03650340.2013.823477.
11. Philips J. R. (1957) *The theory of infiltration: The infiltration equation and its solution*. Soil Sci, *83(5): 345-358*, DOI: 10.1097/00010694-195705000-00002.
12. Richards L. A. (1931) *Capillary conduction of liquids through porous mediums*. Journal of Applied Physics, *1(5): 318-333*, DOI: 10.1063/1.1745010.
13. Sihag P., Tiwari N. K. and Ranjan S. (2017) *Estimation and intercomparison of infiltration models.* Water Science, *31(1): 34-43*, DOI: 10.1016/j.wsj.2017.03.001.
14. Singh V. P. and Yu F. X. (1990) *Derivation of infiltration equation using systems approach*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, *116(6): 837-858.*
15. Sy N.L. (2006) *Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network.* Hydrological Sciences Journal. *51(1):3-20.*
16. 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.
17. 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.*
18. Yongyong Z., Pute W., Xining Z. and Ping L. (2012) *Evaluation and modeling of furrow infiltration for uncropped ridge–furrow tillage in Loess Plateau soils*. Soil Research, *50: 360–370.*
19. Zolfaghari A. Mirzaee S. and Gorji M. (2012) *Comparison of different models for estimating cumulative infiltration.* International Soil Science, *7:108–115.*

Calibration and evaluation of water infiltration models in different soil textures

Y. Sabzevari[1], J. Abedi Koupai[*2]

1. PhD Student in Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Professor, Department of Water Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Received: 2022/08
Accepted: 2023/01

Abstract

Accurate estimation of water infiltration into the soil is important for the design of irrigation systems. Therefore, calibration of different models is necessary to estimate the permeability in different regions. The aim of the present study was to calibrate and evaluate the models of Kastiakov, Kastiakov modified, Philip, SCS, Novell, and Horton in different soil textures. To evaluate the accuracy of the models, error indicators including RMSE, MAE, MR, PE, and R^2 were used. The models were calibrated using an Excel software solver. Evaluation of evaluation indicators showed that the Novell penetration model with average RMSE, MAE, MR, PE, and R^2 equal to 0.021, 0.068, 0.999, 0.126, and 0.98, respectively, has better performance than the five models. The other is in the whole range of studies. In contrast, the analysis of the variance of different models showed no significant difference between the calculated and measured values. The performance of the models in different textures showed that Horton, Novell, Kastiakov, and Kastiakov models were less sensitive to changes in soil texture.

Keywords: Permeability, Novell model, Philip model, Kastiakov model.

[*] Corresponding author: koupai@cc.iut.ac.ir