ارزیابی معادلات مختلف نفوذ تحت برخی از بافت‌های خاک ارائه شده در مدل HYDRUS

علی جوادی [۱*]

۱) دکتری علوم و مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

[*] نویسنده مسئول: ali.javadirri@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۶ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۲۳**

چکیده

نفوذ آب به خاک یکی از پارامترهای مهم در مدیریت و طراحی سامانه‌های آبیاری و زهکشی می‌باشد. مشکلات اندازه‌گیری نفوذ، تخمین نفوذ را با استفاده از مدلهای شبیه‌سازی نفوذ منطقی می‌سازد. هدف اصلی این تحقیق بررسی عملکرد معادلات مختلف نفوذ (کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ و هورتون) در آبیاری سطحی با استفاده از مدل HYDRUS بود. بدین منظور نفوذ تجمعی یک بعدی و دو بعدی‌با تغییر در رطوبت اولیه خاک (قبل از آبیاری) وبار آبی سطح خاک (هنگام آبیاری)با استفاده از حل معادله ریچاردز (مدل HYDRUS) شبیه‌سازی گردید. پنج بافت خاک براساس پایگاه داده مدل HYDRUS برای شبیه‌سازی نفوذ در نظر گرفته شد. مدل هیدرولیکی خاک استفاده شده برای شبیه‌سازی، مدل ون گنختن (۱۹۸۰) بود. خروجی مدل HYDRUS (نفوذ تجمعی نسبت به زمان) با استفاده از ابزار Solver نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۶ برای تعیین ضرایب معادلات نفوذ مورد استفاده قرار گرفت. بررسی عملکرد معادلات مختلف نفوذ در شبیه‌سازی‌های مختلف آبیاری سطحی نشان داد که به ترتیب معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوئیس و فیلیپ با خطای مطلق کل ۱/۵ و ۳/۵ درصد به ترتیب دارای بهترین و بدترین عملکرد را در برآورد مقدار آب نفوذ یافته به خاک داشتند. با توجه به نتایج بدست آمده پیشنهاد می‌شود در سامانه‌های آبیاری سطحی از معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس که دارای بهترین عملکرد در برآورد مقدار نفوذ است، استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: بار آبی، رطوبت اولیه خاک، کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ و هورتون

مقدمه

نفوذ آب به خاک از اجزا اصلی چرخه هیدرولوژی است، بنابراین کمی کردن آن در مدیریت منابع آبی حوضه‌های آبخیز و به‌منظور تعیین میزان آب قابل دسترس برای رشد گیاه و تخمین مقدار آب اضافی مورد نیاز که باید از طریق آبیاری تامین شود و نیز در طراحی سامانه‌های آبیاری، از اهمیت زیادی برخوردار است (Chari et al., 2021; Javadi et al., 2021). مشکلات اندازه‌گیری نفوذ از یک‌سو و تغییرپذیری نفوذ با تغییر رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک از سوی دیگر، تخمین نفوذ را با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نفوذ منطقی می‌سازد. از مدل‌های توانمند در مدل‌سازی حرکت آب در خاک، مدل HYDRUS می‌باشد. تحقیقات انجام یافته در مورد شبیه‌سازی حرکت آب در خاک با استفاده از مدل HYDRUS نشان دهنده توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک می‌باشد (Chari et al., 2020). پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۸۹) به ارزیابی عملکرد معادله‌های نفوذ گرین و آمپت، فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، سازمان حفاظت خاک امریکا (SCS) و هورتون در برآورد نفوذ تجمعی و وابستگی آنها به کلاس‌های مختلف بافت و کاربری مختلف اراضی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس در بافت و کاربری مختلف اراضی از روند پایدارتری در برآورد نفوذ تجمعی برخوردار بود. زارع ابیانه و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی معادلات: کوستیاکوف، کوستیاکوف لوئیس، فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا، اورتون و هورتون براساس آزمایش استوانه‌های دوگانه در دو مزرعه گندم و لوبیا با هدف تعیین بهترین معادله نفوذ در اراضی جهاد نصر خوزستان واقع در کیلومتر ۱۰ جاده شوشتر- اهواز پرداختند. رتبه‌بندی دقت معادلات در مزارع گندم و لوبیا نشان داد معادلات کوستیاکوف-لوئیس و هورتون در برآورد سرعت نفوذ و کوستیاکوف-لوئیس و فیلیپ در برآورد نفوذ تجمعی بیشترین دقت را داشتند. Duan و همکاران (۲۰۱۱) با مقایسه کارایی معادله‌های کوستیاکوف، کوستیاکوف- لوئیس، فیلیپ، SCS و هورتون در برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ، معادلات کوستیاکوف-لوئیس و هورتون را دقیق‌تر یافتند. در پژوهشی دیگر، Zhang و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه چهار معادله مختلف نفوذ (فیلیپ، کوستیاکوف-لوئیس، کوستیاکوف و هورتون) در توصیف پدیده نفوذ در جویچه‌های آبیاری پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس، رابطه بین نفوذ تجمعی و زمان را بهتر از سایر معادلات نفوذ بیان کرد. ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۲) عملکرد هفت معادله نفوذ را در برآورد نفوذ اندازه‌گیری شده با استوانه‌های مضاعف در چهار کلاس بافت خاک لوم‌رسی، لوم‌سیلتی، لوم‌رسی‌سیلتی و لوم مربوط به خاک‌های مختلف واقع در پنج استان را بررسی و گزارش کردند که معادله کوستیاکوف- لوئیس و سازمان حفاظت خاک آمریکا در تمامی خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین معادله‌ها می‌باشند. میرزایی و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی عملکرد هشت معادله نفوذ (گرین-امپت، فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، کوستیاکوف-لوئیس اصلاح شده، هورتون، سارتن دروبر) درخاک‌های با کلاس بافتی متفاوت واقع در مناطق مختلف با کاربرد معیارهای ارزیابی مختلف، گزارش کردند معادله کوستیاکوف-لوئیس اصلاح شده

برای برآورد نفوذ در بیش از ۵۰ درصد خاک‌ها، مناسب‌ترین معادله برآورد نفوذ بود. بررسی پژوهش‌های انجام شده نشان دهنده آن است که محققان در بررسی عملکرد معادلات مختلف نفوذ به نتایج مختلف و گاهی ضد و نقیض دست یافته‌اند. دلایل این امر طبیعت تغییرپذیر فرآیند نفوذ، روش اندازه‌گیری نفوذ، شرایط اولیه و شرایط مرزی جریان آب در خاک بود که بخشی از تفاوت در نتایج بدست آمده را به این دلایل می توان نسبت داد. از آنجا که معادله‌های یاد شده هر کدام بر اساس اطلاعات مربوط به تعداد محدودی از خاک‌ها بدست آمده‌اند، دامنه‌ای کاربردی آنها مشخص نیست. همچنین بررسی تحقیقات انجام یافته در زمینه نفوذ نشان داد که متأسفانه در بسیاری از موارد، تابع نفوذ در طول فصل زراعی ثابت فرض می‌شود در حالی رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک در طول فصل زراعی متغیر هستند. در نتیجه استفاده از تابع نفوذ ثابت در طول فصل زراعی باعث کاهش راندمان آب آبیاری می‌گردد. بنابراین هدف انجام این تحقیق، ارزیابی کارایی معادلات مختلف نفوذ در شرایط مختلف اولیه و مرزی برای شناسایی بهترین معادله نفوذ در شرایط مختلف رطوبت اولیه خاک، بار آبی و بافت خاک خواهد بود.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از نتایج دو پژوهش جوادی و همکاران (۱۳۹۲ و ۱۳۹۳) برای شناسایی بهترین معادله نفوذ در آبیاری سطحی استفاده شده است. در پژوهش جوادی و همکاران (۱۳۹۲) به ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ در حالت یک و دو بعدی نفوذ در آبیاری کرتی یا نواری پرداخته شده است و در پژوهش جوادی و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ در حالت دو بعدی نفوذ برای آبیاری جویچه‌ای پرداخته شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود در هر کدام از پژوهش‌های اخیر، معادلات نفوذ در یکی از انواع روش‌های آبیاری سطحی مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین، در این پژوهش به ارزیابی همزمان معادلات نفوذ در دو روش آبیاری کرتی (نواری) و جویچه‌ای پرداخته شده است. در ادامه، خلاصه‌ای از مواد و روش‌های دو پژوهش ذکر شده، آورده می‌شود. نهایتا در قسمت ارزیابی به انجام رتبه‌بندی جدید برای ارزیابی همزمان معادلات نفوذ در دو روش آبیاری سطحی پرداخته می‌شود. در دو تحقیق ذکر شده به ارزیابی عملکرد معادلات کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ و هورتون در شرایط اولیه (رطوبت اولیه خاک) و مرزی (بار آبی سطح خاک) مختلف پرداخته شده است (جدول ۱). بدین منظور نفوذ تجمعی یک بعدی (آبیاری کرتی یا نواری) و دو بعدی (آبیاری کرتی، نواری و جویچه‌ای) با تغییر در رطوبت اولیه خاک (قبل از آبیاری) و بار آبی سطح خاک (هنگام آبیاری) با استفاده از حل معادله ریچاردز (مدل HYDRUS) شبیه‌سازی گردید.

مدل‌سازی نفوذ با استفاده از مدل HYDRUS

مدل HYDRUS به طور قابل توجهی برای مدل‌سازی جریان آب، در مناطق اشباع و غیراشباع مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مدل سازی یک بعدی فرآیند نفوذ از مدل HYDRUS-1D نسخه ۴/۱۵ و برای مدل سازی دو بعدی فرآیند نفوذ مدل

HYDRUS (2D/3D) نسخه ۱/۱۱ استفاده گردید (Simunek et al., 2006; Simunek et al., 2012). معادله اساسی مورد استفاده در مدل HYDRUS به منظور بررسی و شبیه‌سازی حرکت آب در خاک، معادله ریچاردز می‌باشد.

پارامترهای هیدرولیکی خاک‌ها

مطابق جدول (۲) پنج بافت خاک (براساس پایگاه داده مدل HYDRUS) برای شبیه‌سازی نفوذ در نظر گرفته شد. مدل هیدرولیکی استفاده شده برای شبیه‌سازی، مدل ون گنختن (۱۹۸۰) بود.

جدول ۱: معادلات نفوذ به کار رفته در این تحقیق (مصطفی‌زاده‌فرد و موسوی، ۱۳۹۳)

نام معادله نفوذ	پارامترها	معادله
کوستیاکف-لوئیس	Z نفوذ تجمعی (cm)، t زمان (min)، f_0 نفوذ نهایی (cm/min) و a (cm/min^b) و b ضرایب تجربی (-)	$Z = at^b+f_0t$
فیلیپ	Z نفوذ تجمعی (cm)، t زمان (min)، S ضریب جذبی خاک (cm/min$^{0.5}$) و K_s ضریب هدایت هیدرولیکی منطقه انتقال (cm/min)	$Z = St^{0.5}+K_st$
هورتون	Z نفوذ تجمعی (cm)، t زمان (min)، f_i سرعت اولیه نفوذ (cm/min)، f_f سرعت نهایی نفوذ (cm/min) و k ثابت تناسب (-)	$Z=f_ft+\frac{f_i-f_f}{k}(1-e^{-kt})$

شرایط اولیه

برای تعریف شرایط اولیه از گزینه رطوبت حجمی اولیه استفاده شد. پنج مقدار اولیه رطوبت خاک در محدوده رطوبت نقطه پژمردگی (PWP) تا ظرفیت زراعی (FC) مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شد (بای‌بوردی، ۱۳۸۸).

نفوذ تجمعی یک بعدی در آبیاری کرتی یا نواری

برای شبیه‌سازی فرآیند نفوذ تجمعی یک بعدی توسط مدل HYDRUS-1D، ستون خاک همگن (تک‌لایه) به عمق ۱۰۰ سانتی‌متر، شرایط مرز بالایی خاک بار آبی ثابت، مرز پایینی زهکشی آزاد و مدت مدل‌سازی ۷۲۰ دقیقه (۱۲ ساعت) در نظر گرفته شد. چهار بار آبی ثابت روی سطح خاکها (۲/۵، ۵/۰، ۱۰/۰ و ۲۰/۰ سانتی‌متر) در طول مدت مدل‌سازی در نظر گرفته شد.

نفوذ تجمعی دو بعدی در آبیاری کرتی یا نواری

برای شبیه‌سازی نفوذ تجمعی دو بعدی توسط مدل HYDRUS-2/3D، ستون خاک همگن (تک لایه) به عمق و عرض ۱۰۰ سانتی‌متر، شرایط مرز بالایی خاک‌ها بار آبی ثابت، مرز پایینی زهکشی آزاد، شرط مرزی بدون شدت جریان در طرفین

کرت یا نوار و مدت مدل‌سازی ۷۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد (شکل ۱). چهار بار آبی ثابت روی سطح خاکها (۲/۵، ۵/۰، ۱۰/۰ و ۲۰/۰ سانتی‌متر) در طول مدت مدل‌سازی در نظر گرفته شد.

جدول ۲: پارامترهای هیدرولیکی بافتهای مختلف خاک

بافت خاک	پارامترهای هیدرولیکی مدل ون گنختن-معلم*					
	l (-)	k_s (min.cm^{-1})	n (-)	α (cm^{-1})	θ_s (-)	θ_r (-)
رس	۰/۵	۰/۰۰۳۳	۱/۰۹	۰/۰۰۸	۰/۳۸	۰/۰۶۸
لوم‌رسی	۰/۵	۰/۰۰۴۳	۱/۳۱	۰/۰۱۹	۰/۴۱	۰/۰۹۵
لوم	۰/۵	۰/۰۱۷۳	۱/۵۶	۰/۰۳۶	۰/۴۳	۰/۰۷۸
لوم‌شنی	۰/۵	۰/۰۷۳۶	۱/۸۹	۰/۰۷۵	۰/۴۱	۰/۰۶۵
شن	۰/۵	۰/۴۹۵۰	۲/۶۸	۰/۱۴۵	۰/۴۳	۰/۰۴۵

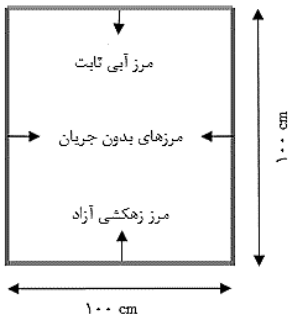
* θ_s رطوبت اشباع، θ_r رطوبت باقیمانده، k_s هدایت هیدرولیکی اشباع، α، n و l پارامترهای شکلی، α ضریب ثابتی مربوط به خصوصیات جذب سطحی خاک و n پارامتر بی‌بعدی مربوط به منحنی مشخصه رطوبتی خاک.

جدول ۳: شرایط اولیه رطوبتی حجمی خاکها در محدوده PWP تا FC

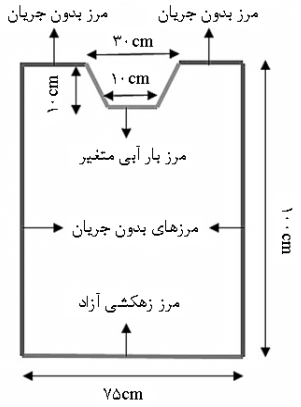
بافت خاک	رطوبت حجمی اولیه (درصد)				
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
رس	۲۲/۰	۲۵/۰	۲۸/۰	۳۱/۰	۳۴/۰
لوم‌رسی	۱۹/۷	۲۲/۷	۲۵/۷	۲۸/۷	۳۱/۸
لوم	۱۱/۷	۱۵/۵	۱۹/۳	۲۳/۱	۲۷/۰
لوم‌شنی	۹/۵	۱۲/۳	۱۵/۱	۱۷/۹	۲۰/۷
شن	۵/۰	۷/۵	۱۰/۰	۱۲/۵	۱۵/۰

نفوذ تجمعی دو بعدی در آبیاری جویچه‌ای

برای شبیه‌سازی نفوذ تجمعی دو بعدی توسط مدل HYDRUS-2/3D، ستون خاک همگن (تک لایه)، مدت شبیه‌سازی ۷۲۰ دقیقه و شرایط مرزی مطابق شکل (۲) بود. چهار بار آبی ثابت روی سطح خاک‌ها (۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ سانتی‌متر) در مدت ۷۲۰ دقیقه مدل‌سازی در نظر گرفته شد.



شکل۱: شرایط مرزی کرت یا نوار برای شبیه‌سازی نفوذ دو بعدی با HYDRUS-2/3D



شکل۲: شرایط مرزی جویچه برای شبیه‌سازی نفوذ دو بعدی با HYDRUS-2/3D

تعیین ضرایب معادلات نفوذ مختلف

پس از اینکه مدل‌سازی در شرایط مختلف رطوبتی و بار آبی ثابت انجام گرفت، داده‌های خروجی مدل (عمق آب نفوذ یافته نسبت به زمان) با استفاده از قسمت Solver نرم افزار اکسل ۲۰۱۳ با معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ و هورتون برازش داده شد؛ این کار طوری انجام شد که شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) حداقل مقدار را داشت. لازم به ذکر است که خروجی مدل HYDRUS-2/3D بر ۱۰۰ تقسیم شد تا نفوذ در واحد عرض بدست آید.

شاخص های ارزیابی

از شاخص‌های ارزیابی آماری، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف معیار ریشه میانگین مربعات خطا (SDRMSE)، درصد خطای مطلق (AE) و درصد خطای نسبی (RE) استفاده گردید (جوادی و همکاران، ۱۳۹۳):

رابطه ۱: $$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2\right)}$$

رابطه ۲: $$AE=\frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|O_i-P_i|}{O_i}$$

رابطه ۳: $$RE=\frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{O_i-P_i}{O_i}$$

رابطه ۴: $$R^2=\frac{[\sum_{i=1}^{n}(P_i-P_{ave})(O_i-O_{ave})]^2}{\sum_{i=1}^{n}(P_i-P_{ave})^2.\sum_{i=1}^{n}(O_i-O_{ave})^2}$$

رابطه ۵: $$EF=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i-P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i-O_{ave})^2}$$

در روابط (۱) تا (۵)، P_i مقدار برازش داده شده، O_i مقدار مدل سازی شده، O_{ave} میانگین مقادیر مدل‌سازی شده، P_{ave} میانگین مقادیر برازش داده شده و n تعداد داده‌های مدل‌سازی شده می‌باشد. مقدار آماره ریشه میانگین مربعات خطا همواره مثبت بوده و بهترین حالت عملکرد زمانی است که مقدار آن به صفر نزدیک شود. همچنین از آنجا که انحراف معیار یک آماره، بیانگر دقت و منظم بودن یک آماره بوده و پراکندگی داده‌ها را حول میانگین نشان می‌دهد از انحراف معیار آماره انحراف معیار

ریشه میانگین مربعات خطا (SDRMSE) نیز برای ارزیابی عملکرد معادلات استفاده می‌شود. آماره ضریب تبیین شاخصی است که میزان خطی بودن رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده را نشان می‌دهد که هر چه مقدار آن به یک نزدیکتر باشد رابطه خطی مورد نظر مشهودتر است. مقدار مثبت آماره RE بیانگر آن است که معادله مورد بررسی نفوذ تجمعی را بیشتر برآورد کرده و مقادیر منفی آن بیانگر این است که معادله مورد بررسی نفوذ تجمعی را کم برآورد می‌نماید. برای برآورد مطمئن از نفوذ تجمعی باید از مقدار قدر مطلق این آماره یعنی آماره خطای مطلق (AE) استفاده نمود. هر چه این آماره کوچکتر باشد نشان دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد. اختلاف مقدار قدر مطلق RE و AE نشان‌دهنده سیستماتیک بودن روند کم‌برآوردگر یا بیش‌برآوردگر بودن معادله نفوذ می‌باشد که اگر اختلاف برابر صفر باشد نشان می‌دهد که تغییرات معادله کاملاً سیستماتیک است. هر چه ضریب کارایی معادله به یک نزدیک باشد برازش معادله از دقت بالاتری برخوردار است (جوادی و همکاران، ۱۳۹۳). برای ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ بر اساس معیارهای خطای ذکر شده، از روش رتبه‌بندی استفاده شد. برای سادگی کار ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ از مقدار میانگین آماره‌های ارزیابی (MRMSE، SDMRMSE، MRE، MAE، MEF و MR^2) در کلیه شرایط اولیه و مرزی استفاده شد. شیوه رتبه‌بندی بدین صورت بود که آماره ارزیابی MRE در رتبه‌بندی در نظر گرفته نشد و هر معادله‌ای که کمترین مقدار آماره‌های ارزیابی MRMSE، SDMRMSE و MAE و بیشترین مقدار آماره‌های ارزیابی MEF و MR^2 را داشت بهترین رتبه (کمترین) به آن تعلق گرفت. این کار برای هر بافت خاک جداگانه انجام گرفت. در مرحله بعد هر معادله‌ای که مجموع رتبه‌های کسب شده کمتری در کلیه کلاس‌های بافتی داشت، بهترین (کمترین) رتبه نهایی را کسب نموده و به عنوان بهترین معادله نفوذ در آن نوع روش آبیاری سطحی معرفی می‌شد. در نهایت در این پژوهش، رتبه‌بندی دیگری برای ازریابی همزمان معادلات نفوذ در دو نوع روش آبیاری سطحی انجام گرفت. در این رتبه‌بندی هر معادله‌ای که مجموع رتبه‌های کسب شده کمتری را در تمامی حالت‌های شبیه‌سازی را داشت به عنوان بهترین معادله نفوذ در انواع روش‌های آبیاری سطحی انتخاب می‌شد.

نتایج و بحث

پس از شبیه‌سازی فرآیند نفوذ و برازش هر یک از معادلات مختلف نفوذ با خروجی مدل HYDRUS، مقادیر هر یک از شاخص‌های ارزیابی برای هر حالت شبیه‌سازی محاسبه و رتبه‌بندی هر یک از معادلات نفوذ برای آن حالت انجام شد؛ در نهایت رتبه‌بندی کلی عملکرد معادلات نفوذ بر اساس آماره‌های ارزیابی، در جدول (۴) نشان داده شده است. جدول (۴) خلاصه نتایج دو پژوهش ذکر شده، می‌باشد. در این پژوهش برای شناسایی بهترین معادله نفوذ، رتبه‌های نهایی کسب شده هر معادله نفوذ در سه حالت شبیه‌سازی شده جدول (۴) در جدول (۵) آورده شد و دوباره رتبه‌بندی انجام گردید.

جدول ۴: میانگین آماره‌های ارزیابی معادلات نفوذ

بافت خاک	آماره ارزیابی	معادله (نفوذ یک بعدی)			معادله (نفوذ دو بعدی کرتی یا نواری)			معادله (نفوذ دو بعدی جویچه‌ای)		
		کوستیاکوف-لوئیس	فیلیپ	هورتون	کوستیاکوف-لوئیس	فیلیپ	هورتون	کوستیاکوف-لوئیس	فیلیپ	هورتون
رس	MRMSE(cm)	۰/۰۰۱	۰/۰۲۴	۰/۰۴۵	۰/۰۰۱	۰/۰۹۴	۰/۰۱۶	۰/۳۰۰	۰/۶۷۹	۰/۲۱۶
	SDMRMSE(cm)	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۲۶	۰/۰۰۳	۰/۰۹۸	۰/۰۱۴	۰/۰۲۰	۰/۶۹۰	۰/۱۱۶
	MAE (%)	۰/۵۳	۲/۴۳	۴/۹۰	۰/۱۲	۱/۴۷	۰/۲۱	۰/۲۰	۳/۰۶	۱/۱۷
	MRE (%)	۰/۱۶	-۱/۶۷	-۲/۶۶	۰/۰۰	-۰/۷۳	-۰/۰۱	-۰/۰۱	-۱/۶۱	-۰/۱۷
	رتبه	۱	۲	۳	۱	۳	۲	۱	۳	۲
لوم-رسی	MRMSE(cm)	۰/۰۰۳	۰/۰۲۱	۰/۰۸۹	۰/۰۰۹	۰/۰۶۱	۰/۰۸۹	۰/۰۸۴	۰/۴۶۳	۰/۷۷۴
	SDMRMSE(cm)	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	۰/۰۳۱	۰/۰۰۵	۰/۰۳۷	۰/۰۲۴	۰/۰۴۷	۰/۵۶۰	۰/۳۴۱
	MAE (%)	۰/۵۰	۳/۱۳	۱۴/۳۰	۰/۵۴	۴/۱۸	۵/۶۰	۱/۱۹	۵/۱۸	۹/۵۰
	MRE (%)	۰/۱۸	-۲/۷۴	-۱۱/۱۲	-۰/۲۲	-۳/۲۰	-۲/۲۴	-۰/۷۱	-۴/۳۱	-۶/۴۰
	رتبه	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۲
لوم	MRMSE (cm)	۰/۰۱۷	۰/۰۵۹	۰/۱۹۱	۰/۰۲۰	۰/۱۰۳	۰/۲۰۱	۰/۱۱۷	۰/۸۷۱	۱/۳۹۱
	SDMRMSE(cm)	۰/۰۰۸	۰/۰۱۴	۰/۰۶۲	۰/۰۱۱	۰/۰۴۱	۰/۰۶۳	۰/۰۵۶	۰/۷۵۷	۰/۵۹
	MAE (%)	۱/۰۰	۲/۹۰	۱۱/۳۵	۰/۶۲	۳/۴۷	۶/۵۶	۰/۹۰	۵/۰۰	۹/۷۰
	MRE (%)	۰/۶۸	-۲/۴۹	-۹/۰۵	-۰/۲۰	-۲/۸۳	-۴/۲۳	-۰/۴۳	-۴/۲۹	-۷/۱۳
	رتبه	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
لوم-شنی	MRMSE (cm)	۰/۰۹۹	۰/۱۲۸	۰/۳۹۱	۰/۱۴۵	۰/۱۷۴	۰/۰۸۹	۰/۴۱۲	۱/۶۱۱	۰/۹۴۲
	SDMRMSE(cm)	۰/۰۹۹	۰/۰۳۷	۰/۱۵۹	۰/۰۵۵	۰/۰۸۱	۰/۱۲۹	۰/۱۰۹	۰/۷۳۰	۰/۳۵۰
	MAE (%)	۱/۸۲	۲/۶۷	۱۲/۱۸	۱/۳۹	۱/۸۸	۵/۶۰	۱/۵۴	۴/۸۷	۴/۵۶
	MRE (%)	۰/۱۰	-۱/۹۰	-۶/۷۸	-۰/۶۷	-۰/۲۳	-۲/۲۴	۱	-۴/۳۵	-۳/۲۹
	رتبه	۱	۲	۳	۱	۲	۲	۱	۳	۲
شن	MRMSE (cm)	۰/۵۰۲	۰/۸۵۹	۰/۵۲۷	۰/۷۰۱	۱/۰۹۷	۰/۴۵۴	۰/۵۷۹	۲/۲۴۲	۰/۴۶۳
	SDMRMSE(cm)	۰/۲۶۳	۰/۲۹۴	۰/۱۷۹	۰/۳۰۶	۰/۴۴۱	۰/۱۱۷	۰/۳۵۱	۰/۹۵۶	۰/۴۵۵
	MAE (%)	۵/۷۵	۵/۵۷	۹/۴۹	۴/۸۹	۳/۳۷	۵/۱۰	۱/۰۱	۲/۶۴	۰/۹۲
	MRE (%)	۴/۵۲	-۵/۲۷	-۷/۵۴	۳/۲۳	-۲/۷۷	-۳/۷۷	۰/۷۰	-۲/۵۱	-۰/۵۹
	رتبه	۱	۳	۲	۲	۳	۱	۲	۳	۱
	رتبه نهایی	۱	۲	۳	۱	۳	۲	۱	۳	۲

جدول ۵: رتبه‌بندی کلی عملکرد معادلات نفوذ بر اساس آماره‌های ارزیابی

نوع شبیه‌سازی نفوذ	نام معادله نفوذ		
	کوستیاکوف-لوئیس	فیلیپ	هورتون
یک بعدی (کرت یا نوار)	۱	۲	۳
دو بعدی (کرت یا نوار)	۱	۳	۲
دو بعدی (جویچه)	۱	۳	۲
رتبه نهایی	۱	۳	۲

مطابق جدول (۵)، معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس با خطای مطلق کل ۱/۵ درصد و کسب بهترین رتبه نهایی، مشابه نتایج پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۸۹) در برآورد نفوذ تجمعی از روند پایدارتری برخوردار بود به گونه‌ای که این معادله در تمامی حالات شبیه‌سازی مورد بررسی، حائز رتبه نخست بود حال آنکه این روند در سایر معادلات نفوذ، مشاهده نگردید. معادله نفوذ فیلیپ نیز با خطای مطلق کل ۳/۵ درصد و کسب بدترین رتبه نهایی، بدترین عملکرد را در بین معادلات نفوذ داشت.

Klemens معادلات نفوذ مختلفی را به منظور استفاده در آبیاری سطحی، مورد مطالعه قرار داد و نتیجه گرفت که نتایج معادلات تجربی (کوستیاکوف -لوئیس و هورتون) بهتر از معادلات فیزیکی (فیلیپ) با داده‌های صحرایی مطابقت می‌کند (محمودیان شوشتری، ۱۳۷۹) که با نتایج این تحقیق تطابق دارد. یکی از دلایل برتری معادله‌های تجربی نفوذ (کوستیاکوف-لوئیس و هورتون) بیشتر بودن تعداد ضرایب آنها نسبت به معادله فیزیکی نفوذ (فیلیپ) بودند. این ویژگی باعث انعطاف‌پذیری بیشتر این معادلات به هنگام تعیین ضرایب بودند. همچنین علت قرار گرفتن معادله فیزیکی فیلیپ در انتهای رتبه‌بندی عملکرد نفوذ، این بود که در پی‌ریزی معادله‌های فیزیکی برخی محدودیت‌ها شامل ایجاد شرایط مرزی و اولیه برای حل معادله ریچاردز و همگن فرض کردن خاک اعمال شده که با شرایط طبیعی سازگاری کافی ندارد. در پی‌ریزی معادله‌های تجربی این گونه محدودیت‌ها اعمال نمی‌شود و هدف از استخراج معادله‌های تجربی آن است که به بهترین شکل بر داده‌های نفوذپذیری برازش یابند (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۸۹).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به انجام رتبه‌بندی جدید، ارزیابی و نتیجه‌گیری کلی نتایج دو پژوهش جوادی و همکاران (۱۳۹۲ و ۱۳۹۳) برای شناسایی بهترین معادله نفوذ در آبیاری سطحی پرداخته شد. ارزیابی همزمان سه معادله نفوذ در دو روش آبیاری کرتی (نواری) و جویچه‌ای نشان داد که به ترتیب معادلات کوستیاکوف-لوئیس و فیلیپ به عنوان بهترین و بدترین معادله از نظر کارایی و دقت در بیان نفوذپذیری خاک انتخاب شدند. یکی از دلایل برتری معادله کوستیاکوف- لوئیس داشتن انعطاف‌پذیری بیشتر به هنگام تعیین ضرایب بود. همچنین از عوامل ضعف معادله فیلیپ نیز وجود محدودیت در پی‌ریزی این معادله بود. در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، پیشنهاد می‌گردد که از معادله کوستیاکوف-لوئیس برای طراحی و مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی، استفاده شود.

مراجع

بای‌بوردی، م. (۱۳۸۸). فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه تهران، چاپ نهم، ۶۷۴ ص.

پرچمی عراقی، ف.، میر لطیفی، س. م.، قربانی دشتکی، ش. و مهدیان، م. ح. (۱۳۸۹). ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی و کاربری‌های اراضی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، دوره ۲، شماره ۴، ص ۱۹۳-۲۰۳.

جوادی، ع.، مشعل، م. و ابراهیمیان، ح. (۱۳۹۲). مقایسه کارایی برخی از معادلات نفوذ در شرایط مختلف اولیه و مرزی. مجله علمی تحقیقات آب، دوره یک، شماره یک، ص ۴۰-۲۹.

جوادی، ع.، مشعل، م. و ابراهیمیان، ح. (۱۳۹۳). ارزیابی عملکرد و حساسیت معادلات نفوذ نسبت به شرایط اولیه و مرزی مختلف در آبیاری جویچه‌ای. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ب، دوره ۲۸، شماره ۴، ص ۷۹۹-۷۸۷.

زارع ابیانه، ح.، خسرایی، ح.، ابراهیمی پاک، ن.ع.، تافته، آ. و جوزی، م. (۱۳۹۸). انتخاب مدل بهینه نفوذ آب در خاک (مطالعه موردی: اراضی جهاد نصر استان خوزستان). مجله مدیریت آب و آبیاری، دوره ۹، شماره ۲، ص. ۳۰۴-۲۹۱.

محمودیان شوشتری، م. (۱۳۷۶). پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس معادل با پارامترهای معادل نفوذ SCS. مجله خاک و آب، جلد ۱۱، شماره ۱.

مصطفی‌زاده‌فرد، ب. و موسوی، ف. (۱۳۹۳). آبیاری سطحی: تئوری و عمل (ترجمه). نوشته دبلیو. آر. واکر و گ. وی. اسکوگربو، چاپ پنجم، انتشارات کنکاش. ۵۸۲ ص.

Chari, M.M., Poozan, M.T. and Afrasiab, P. (2021). Modeling infiltration in surface irrigation with minimum measurement (study of USDA–NRCS intake families). Modeling Earth Systems and Environment, 7(1), pp: 433-441.

Duan, R., Fedler, C. B. and Borrelli, J. (2011). Field evaluation of infiltration models in lawn soils. Irrigation Science, 29(5), pp: 379-389.

Glass, J., Simunek, J. and Stefan, C. (2020). Scaling factors in HYDRUS to simulate a reduction in hydraulic conductivity during infiltration from recharge wells and infiltration basins. Vadose Zone Journal, pp: 1-19.

Javadi, A., Shayannejad, M., Ebrahimian, H. and Ghorbani-Dashtaki, S. (2021) Simulation modeling of border irrigation performance under different soil texture classes and land uses. Modeling Earth Systems and Environment latest issue.

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), pp: 681-693.

Simunek, J., Van Genuchten, M. T. and Sejna, M. (2006). The HYDRUS software package for simulating two and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, 1.

Simunek, J., Sejna, M. and Van Genuchten, M. T. (2012). The HYDRUS-1D software package for simulating the one–dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 4.15, Department of Environment Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA.

Zhang, Y., Wu, P., Zhao, X. and Li, P. (2012). Evaluation and modelling of furrow infiltration for uncropped ridge–furrow tillage in Loess Plateau soils. Soil Research, 50(5), pp: 360-370.

Zolfaghari, A. A., Mirzaee, S. and Gorji, M. (2012). Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. International Journal of Soil Science, 7(3), pp: 108-115.

Evaluation of different infiltration equations under some soil textures presented in HYDRUS model

Ali Javadi [*1]

1) PhD in Water Science and Engineering, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Iran.

*** Corresponding Author:** ali.javadirri@gmail.com

Received Date: 2021. 05. 06 **Accepted Date: 2021. 09. 14**

Abstract

Infiltration is one of the important parameters in the management and design of irrigation and drainage systems. Infiltration measurement problems make it reasonable to estimate it using simulation models. The main purpose of this study was to investigate the performance of different infiltration equations (Kostiakov-Lewis, Philip and Horton) in surface irrigation using the HYDRUS model. For this purpose, one-dimensional and two-dimensional cumulative infiltration was simulated by changing the initial soil water (before irrigation) and water head (during irrigation) using the Richards equation (HYDRUS model). Five soil textures based on the HYDRUS model database were considered for infiltration simulation. The cumulative infiltration depth, with respect to time, was used to develop different infiltration equations using the Microsoft Excel 2016 (Solver tool). Investigation of the performance of different infiltration equations in different simulations of surface irrigation showed that The Kostiakov-Lewis and Philip equations penetration with absolute total error of 1.5% and 3.5%, respectively, had the best and worst performance in estimating the amount of penetration. According to the obtained results, it is suggested to use Kostiakov-Lewis infiltration equation in surface irrigation systems, which has the best performance in estimating the amount of infiltration.

Keywords: Horton, Initial soil water, Kostiakov-Lewis, Philip, Water head