

ارزیابی عملکرد و حساسیت معادلات نفوذ نسبت به شرایط اولیه و مرزی مختلف در آبیاری جویچه‌ای

علی جوادی^{۱*}، محمود مشعل و حامد ابراهیمیان

دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی دانشگاه صنعتی اصفهان.

ali.javadi@ag.iut.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

mmashal@ut.ac.ir

استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

ebrahimian@ut.ac.ir

چکیده

در مدیریت آبیاری سطحی، تابع نفوذ آب در خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. شناخت کمی این پدیده، برای جلوگیری از فرسایش خاک و تلفات آب ضروری است. هدف اصلی این پژوهش برآورد ضرایب معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوییز، فیلیپ و هورتون و ارزیابی حساسیت و عملکرد این معادلات در شرایط اولیه (رطوبت اولیه خاک) و مرزی (بار آبی سطح خاک) مختلف است. بدین منظور نفوذ دو بعدی آبیاری 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 شد. برای تعیین ضرایب معادلات نفوذ، خروجی مدل HYDRUS (نفوذ تجمعی نسبت به زمان) برازش داده شد. ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ با شاخص‌های ارزیابی آماری نشان داد که معادلات نفوذ تجربی (کوستیاکوف-لوییز و هورتون) نسبت به معادله فیزیکی (فیلیپ) عملکرد بهتری در برآورد نفوذ تجمعی در شرایط اولیه و مرزی مختلف داشتند. معادله کوستیاکوف-لوییز در تمامی حالات شبیه‌سازی در برآورد نفوذ حایز رتبه نخست بود و معادلات هورتون و فیلیپ در رده‌های بعدی ارزیابی قرار گرفتند. ارزیابی حساسیت ضرایب معادلات نشان داد که ضریب توانی (b) معادله کوستیاکوف-لوییز به عنوان حساس‌ترین و ضریب سرعت نفوذ نهایی (f) معادله هورتون به عنوان کم حساس‌ترین ضرایب شناسایی شدند. همچنین نتایج نشان داد که معادله هورتون به عنوان حساس‌ترین معادله در ارزیابی حساسیت معادلات نفوذ است.

واژه‌های کلیدی: مدل HYDRUS، معادله ریچاردز، معادله فیلیپ، معادله کوستیاکوف-لوییز، معادله هورتون.

۱- آدرس نویسنده مسئول: اصفهان، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

* - دریافت: مرداد ۱۳۹۳ و پذیرش: دی ۱۳۹۳

مقدمه

در مدیریت آبیاری سطحی، تابع نفوذ آب در خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. معادلات ریاضی که تاکنون برای نفوذ آب در خاک توسعه یافته‌اند، توابع تک متغیره‌ای از زمان فرصت نفوذ می‌باشند (نحوی‌نیا و همکاران، ۱۳۸۹). شناخت کمی این پدیده، برای جلوگیری از فرسایش اراضی و منابع خاک و آب ضروری است (قربانی دشتکی و همکاران، ۱۳۸۸).

توجه به مشکلات اندازه‌گیری نفوذ (پرهزینه و وقت‌گیر بودن آن) و تغییرپذیری آن با تغییر رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک، تخمین نفوذ با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی نفوذ برای تعیین معادله نفوذی مناسب که دارای کمترین خطا و حساسیت نسبت به تغییرات رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک را داشته باشد، ملزم می‌سازد. از مدل‌های توانمند در مدل‌سازی حرکت آب در خاک مدل HYDRUS است. پژوهش‌های انجام شده در مورد شبیه‌سازی حرکت آب در خاک با استفاده از مدل HYDRUS نشان‌دهنده توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک است (کندلوس و سیمونک، ۲۰۱۰ و ابراهیمیان و همکاران ۲۰۱۲).

شوکلا و همکاران (۲۰۰۳) با اندازه‌گیری نفوذ به روش استوانه‌های مضاعف در منطقه اوهایو واقع در کشور آمریکا، عملکرد ۱۰ معادله نفوذ آب به خاک شامل معادله‌های تخمینی تجربی و فیزیکی را در کاربری‌های مختلف اراضی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مقایسه با سایر معادله‌های مورد بررسی، معادله هورتون دارای عملکرد بهتری در بیان کمی فرآیند نفوذ است. پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۸۹) به ارزیابی عملکرد معادله‌های نفوذ گرین و آمپت، فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوویز، 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 پژوهش نشان داد که معادله نفوذ کوستیاکوف-لوویز در بافت و کاربری مختلف

اراضی از روند پایدارتری در برآورد نفوذ تجمعی برخوردار بود. دوآن و همکاران (۲۰۱۱) با مقایسه کارایی معادله‌های کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوویز، فیلیپ، سازمان حفاظت خاک امریکا (SCS) و هورتون در برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ، کوستیاکوف-لوویز و هورتون را دقیق‌تر یافتند.

یونگ و یونگ و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه چهار معادله مختلف نفوذ (فیلیپ، کوستیاکوف-لوویز، کوستیاکوف و هورتون) در توصیف پدیده نفوذ در جویچه‌های آبیاری پرداختند. نتایج نشان داد که معادله نفوذ کوستیاکوف-لوویز رابطه بین نفوذ تجمعی و زمان را بهتر از سایر معادلات نفوذ ارائه می‌کند. ملک پور و همکاران (۱۳۷۳) با انجام آزمون حساسیت روی پارامترهای مختلف نفوذ در آبیاری جویچه‌ای به این نتیجه رسیدند که وارد شدن ۲۰ درصد خطا در پارامترهای a ، b ، f_0 معادله نفوذ کوستیاکوف-لوویز در محاسبه زمان پیشروی به ترتیب $2/18$ ، $32/4$ و $8/4$ درصد خطا وارد محاسبات خواهد کرد. هولزافل و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی نفوذ در آبیاری جویچه‌ای پرداختند. نتایج آنها نشان داد که نفوذ آب در جویچه تحت عواملی چون شکل جویچه، اندازه جویچه و سطح تماس آب با خاک قرار می‌گیرد.

بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه نفوذ آب در خاک نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد تابع نفوذ آب در خاک در طول فصل زراعی ثابت فرض می‌شود در حالی که 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 می‌شود.

همچنین، پژوهش‌های انجام شده در مورد حساسیت نفوذ نسبت به رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک دارای کاستی‌هایی از جمله: تعداد کم حالت‌های بررسی حساسیت معادلات و ضرایب آنها (نسبت به بافت، رطوبت و بار آبی)، عدم بررسی همزمان حساسیت

اولیه خاک (قبل از آبیاری) و بار آبی سطح خاک (هنگام آبیاری) با استفاده از حل عددی معادله ریچاردز (مدل HYDRUS) شبیه‌سازی شد. فرض شد که خروجی مدل HYDRUS (نفوذ تجمعی نسبت به زمان) همان نفوذ تجمعی که در واقعیت اتفاق می‌افتد، است. بعد از مدل‌سازی نفوذ، برای تعیین ضرایب معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوویز، فیلیپ و هورتون خروجی مدل HYDRUS (نفوذ تجمعی نسبت به زمان) با استفاده از قسمت Solver نرم‌افزار Excel برآزش داده شد، سپس، به ارزیابی عملکرد و حساسیت معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوویز، فیلیپ و هورتون در شرایط اولیه و مرزی مختلف (رطوبت اولیه و بار آبی روی سطح خاک) پرداخته شد.

معادلات و ضرایب آنها نسبت به رطوبت و بار آبی آبیاری‌های مختلف بود. بنابراین هدف اصلی این پژوهش برآورد ضرایب معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوویز، فیلیپ و هورتون و ارزیابی عملکرد و حساسیت این معادلات در شرایط اولیه (رطوبت اولیه خاک) و مرزی (بار آبی سطح خاک) مختلف بود.

مواد و روش‌ها

معادلات نفوذ مورد مطالعه در این پژوهش معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوویز، فیلیپ و هورتون است. این معادلات به همراه ضرایب آنها در جدول (۱) ارائه شده است (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۸۹). نفوذ تجمعی دو بعدی آبیاری جویچه‌ای با تغییر در رطوبت

جدول ۱ - معادلات نفوذ مورد مطالعه

معادله	پارامترها	نام معادله نفوذ
$Z = at^b + f_0 t$	Z نفوذ تجمعی ($\text{cm}^3/\text{cm}^{-1}$)، t زمان (min)، f_0 نفوذ نهایی ($\text{cm}^3/(\text{cm} \cdot \text{min}^b)$) و a و b ضرایب تجربی (-)	کوستیاکوف-لوویز
$Z = St^{0.5} + k_s t$	Z نفوذ تجمعی ($\text{cm}^3/\text{cm}^{-1}$)، t زمان (min)، S ضریب جذبی خاک ($\text{cm}^3/(\text{cm} \cdot \text{min}^{0.5})$) و k_s ضریب هدایت هیدرولیکی منطقه انتقال ($\text{cm}^3/(\text{cm} \cdot \text{min})$)	فیلیپ
$Z = f_f t + \left(\frac{f_i - f_f}{k} \right) (1 - e^{-kt})$	Z نفوذ تجمعی ($\text{cm}^3/\text{cm}^{-1}$)، t زمان (min)، f_i سرعت اولیه نفوذ ($\text{cm}^3/(\text{cm} \cdot \text{min})$) و f_f سرعت نهایی نفوذ ($\text{cm}^3/(\text{cm} \cdot \text{min})$) و k ثابت تناسب (-)	هورتون

بافت خاک برای شبیه‌سازی نفوذ در نظر گرفته شد. پارامترهای هیدرولیکی هر بافت خاک براساس پایگاه داده مدل HYDRUS برای شبیه‌سازی نفوذ انتخاب گردید (جدول (۲)). مدل هیدرولیکی استفاده شده برای شبیه‌سازی، مدل ون گنوختن-معلم بدون در نظر گرفتن پدیده پسماند بود. پارامترهای مدل ون گنوختن-معلم خاکها در جدول (۲) آمده است که در این جدول θ_s رطوبت اشباع، θ_r رطوبت باقیمانده، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، α ، n و l پارامترهای شکلی بودند.

برای شبیه‌سازی فرآیند نفوذ با استفاده از مدل، ستون خاک همگن (تک لایه)، مدت شبیه‌سازی ۷۲۰

مدل HYDRUS (2D/3D)

مدل HYDRUS به طور قابل توجهی برای مدل‌سازی جریان آب، در مناطق اشباع و غیراشباع مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل دو بعدی و سه بعدی توسط سیمونک و همکاران (۲۰۰۶) در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا، در دانشگاه کالیفرنیا طراحی شد. مدل HYDRUS این توانایی را دارد که حرکت آب، املاح، گرما و دی اکسید کربن و جذب آب به‌وسیله ریشه را در دو منطقه اشباع و غیراشباع شبیه‌سازی نماید. در این پژوهش برای مدل‌سازی دو بعدی فرآیند نفوذ، مدل HYDRUS (2D/3D) نسخه ۱/۱۱ استفاده شد. پنج

مقدار رطوبت اولیه بین محدوده نقطه پژمردگی گیاهی تا ظرفیت زراعی بود که این رطوبت اولیه در شروع شبیه-سازی در کل ستون خاک یکسان در نظر گرفته شد (بای-بودی، ۱۳۸۸).

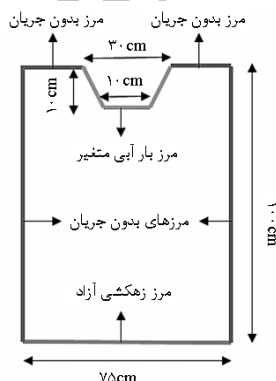
دقیقه و شرایط مرزی مطابق شکل (۱) بود. در این پژوهش، چهار بار آبی ثابت روی سطح خاکها (۲/۵، ۵/۰، ۷/۵ و ۱۰/۰ سانتی‌متر) در مدت ۷۲۰ دقیقه مدل‌سازی در نظر گرفته شد. مطابق جدول (۳) شرایط اولیه نیز پنج

جدول ۲- پارامترهای هیدرولیکی در بافتهای مختلف خاک

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

جدول ۳- مقادیر مختلف رطوبت اولیه در بافتهای مختلف خاک

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



شکل ۱- شرایط مرزی جویچه برای شبیه‌سازی نفوذ دو بعدی با HYDRUS-2/3D

کار طوری انجام شد که شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) حداقل مقدار را داشت.

شاخص حساسیت

حساسیت یک مدل نسبت به پارامترهای ورودی به صورت مقدار تغییر در پارامترهای خروجی تعریف می-

تعیین ضرایب معادلات نفوذ مختلف

پس از اینکه مدل سازی در شرایط مختلف رطوبتی و بار آبی ثابت انجام شد، داده‌های خروجی مدل (عمق آب نفوذ یافته نسبت به زمان) با استفاده از ابزار Solver نرم‌افزار Excel-2013 با معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوییز، فیلیپ و هورتون برآزش داده شد، این

معادله یا ضریب نفوذ در حالت‌های بار آبی ثابت که رطوبت در حال افزایش و یا رطوبت اولیه ثابت که بار آبی در حال افزایش است چه روندی دارد. اختلاف مقدار قدر مطلق MSI_r و MSI_a سیستماتیک بودن این تغییرات را نشان می‌دهد که اگر اختلاف برابر صفر باشد نشان می‌دهد که تغییرات کاملاً سیستماتیک می‌باشد. در این پژوهش برای آنالیز حساسیت معادلات یا ضرایب نفوذ از روش رتبه‌بندی استفاده شد. برای رتبه‌بندی از معیار MSI_a برای حالت‌های بار آبی ثابت که رطوبت در حال افزایش و رطوبت اولیه ثابت که بار آبی در حال افزایش است، استفاده شد.

رتبه‌بندی بدین صورت بود که هر ضریبی (و یا معادله‌ای) که بزرگترین مقدار MSI_a را داشت پایین‌ترین رتبه یعنی یک، و برای سایر ضرایب (و یا معادلات) برحسب میزان بزرگی معیار ارزیابی رتبه‌های دو الی آخر تعلق گرفت. ضریبی (و یا معادله‌ای) که در یک بافت خاک مجموع رتبه‌های کمتری در دو حالت ارزیابی را داشت به عنوان حساس‌ترین ضریب (و یا معادله) در آن بافت خاک شناسایی شد. در نهایت، هر ضریب (و یا معادله) که مجموع رتبه‌های کسب شده کمتری در کلیه بافت‌های خاک مورد بررسی در این تحقیق را داشت، کمترین رتبه نهایی به آن تعلق گرفت و به عنوان حساس‌ترین ضریب (و یا معادله) در کلیه بافت‌های خاک انتخاب شد.

شاخص‌های ارزیابی

در این پژوهش از شاخص‌های ارزیابی آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف معیار ریشه میانگین مربعات خطا (SDRMSE)، درصد خطای مطلق (AE)، درصد خطای نسبی (RE)، ضریب کارایی معادله (EF) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (3)$$

$$AE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \quad (4)$$

شود، در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته می‌شود. در این پژوهش حساسیت معادلات نفوذ و ضرایب آنها به وسیله دو رابطه شاخص حساسیت نسبی و مطلق و در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت، حالت اول، حالتی است که در آن بار آبی سطح خاک ثابت و رطوبت اولیه خاک افزایش می‌یابد و در حالت دوم برعکس این حالت بررسی می‌شود. شاخص حساسیت نسبی و مطلق از روابط زیر به دست می‌آیند (تقی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱):

$$SI_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\frac{X_i - X_{i-1}}{X_i + X_{i-1}} \cdot \frac{2}{\frac{P_i - P_{i-1}}{P_i + P_{i-1}}}}{2} \quad (1)$$

$$SI_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\frac{X_i - X_{i-1}}{X_i + X_{i-1}} \cdot \frac{2}{\frac{P_i - P_{i-1}}{P_i + P_{i-1}}}}{2} \right| \quad (2)$$

که در آنها:

n تعداد نقاط پارامترهای خروجی، X_i مقدار جدید پارامتر خروجی با تغییر مقدار پارامتر ورودی از P_{i-1} به P_i ، X_{i-1} مقدار قبلی پارامتر خروجی بدون تغییر در پارامتر ورودی (P_{i-1})، SI_r شاخص حساسیت نسبی (بی‌بعد) و SI_a شاخص حساسیت مطلق (بی‌بعد) است. هر معادله و یا ضریبی که مقدار شاخص حساسیت آن به صفر نزدیکتر باشد، حساسیت آن کمتر است.

در این تحقیق ابتدا شاخص حساسیت چهار بار آبی ثابت (در طول یک آبیاری) که در آن رطوبت اولیه از یک آبیاری به آبیاری دیگر در حال افزایش است ($\Theta \uparrow$ و $H = c$) با استفاده از روابط بالا محاسبه شد سپس میانگین این چهار حساسیت را با نماد و (MSI_r) نشان داده شد و از آن برای آنالیز حساسیت استفاده گردید. همین عمل در مورد پنج رطوبت اولیه که بار آبی آن از یک آبیاری به آبیاری دیگر در حال افزایش است ($\Theta = c$ و $H \uparrow$) انجام شد. این معیار نشان می‌دهد MSI_r

برابر صفر باشد نشان می‌دهد تغییرات معادله کاملاً سیستماتیک است. هر چه ضریب کارایی معادله به یک نزدیک باشد برازش معادله از دقت بالاتری برخوردار است (جوادی و همکاران، ۱۳۹۲؛ پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۸۹). برای ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ بر اساس معیارهای خطای ذکر شده، از روش رتبه‌بندی استفاده گردید. برای سادگی کار ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ از مقدار میانگین آماره‌های ارزیابی (MRMSE, SDMRMSE, MRE, MAE, MEF و ME²) در کلیه شرایط اولیه و مرزی استفاده شد.

شیوه رتبه‌بندی بدین صورت بود که آماره ارزیابی MRE در رتبه‌بندی در نظر گرفته نمی‌شد و هر معادله‌ای که کمترین مقدار آماره‌های ارزیابی MRMSE, SDMRMSE و MAE و بزرگترین مقدار آماره‌های ارزیابی MEF و ME² را داشت بهترین رتبه (کمترین) به آن تعلق می‌گرفت. این کار برای هر بافت جداگانه انجام گرفت در نهایت هر معادله که مجموع رتبه‌های کسب شده کمتری در کلیه کلاسهای بافتی داشت بهترین (کمترین) رتبه نهایی را کسب نموده و به عنوان بهترین معادله نفوذ شناسایی می‌شد.

نتایج و بحث

به عنوان نمونه در شکل (۲) منحنی نفوذ تجمعی شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل HYDRUS در مقادیر مختلف رطوبت اولیه خاک و بار آبی برای بافت لومی نشان داده شده است. بار آبی و رطوبت اولیه (شرایط مرزی و اولیه) تاثیر زیادی بر نفوذپذیری داشت. در تمامی حالات شبیه‌سازی با افزایش رطوبت اولیه خاک در بار آبی ثابت شکل (۲-۱) راست، میزان نفوذ تجمعی و زمان رسیدن به نفوذ پایه کاهش یافت، این به دلیل کم شدن نیروی ماتریک بود که پس از مدتی نیروی ماتریک خیلی کم شده و بیشتر نیروی ثقل موجب نفوذ شد (ساکار و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین با افزایش بار آبی در رطوبت اولیه ثابت شکل (۲-۲) چپ، میزان نفوذ تجمعی افزایش و زمان

$$RE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{O_i - P_i}{O_i} \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - P_{ave})(O_i - O_{ave}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{ave})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2} \quad (6)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2} \quad (7)$$

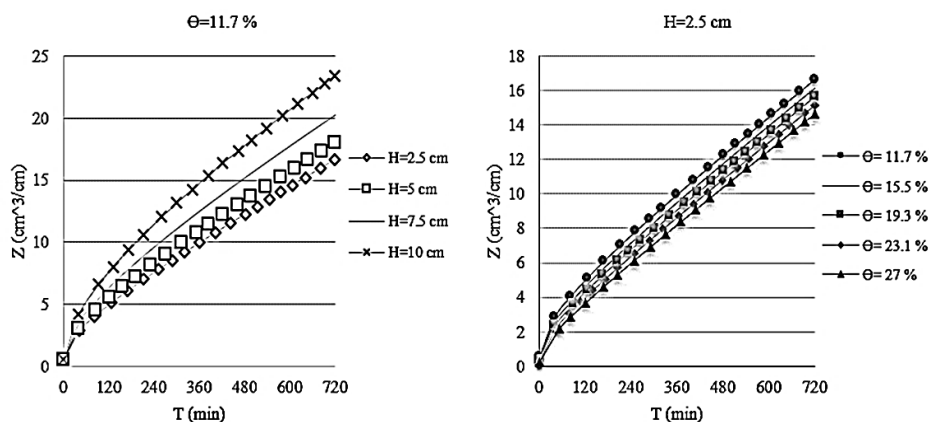
در آن‌ها:

(۳) تا (۷)، 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 (جوادی و همکاران، ۱۳۹۲؛ پناهی و همکاران، ۱۳۹۰). 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 شد.

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 کم‌برآورد می‌نماید. برای برآورد مطمئن از نفوذ تجمعی باید 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 نشان دهنده سیستماتیک بودن روند کم برآوردگر یا بیش-برآوردگر بودن معادله نفوذ را نشان می‌دهد که اگر اختلاف

یافت و هر چقدر خاک سبک‌تر باشد عکس این حالت روی داد.

رسیدن به نفوذ پایه کاهش یافت. با سنگین‌تر شدن بافت خاک، مقدار نفوذ تجمعی کمتر و زمان تثبیت نفوذ افزایش



شکل ۲- نفوذ تجمعی خاک لومی. شکل راست: در بار آبی ثابت ۲/۵ سانتی‌متر و رطوبت‌های مختلف، شکل چپ: در رطوبت اولیه ثابت ۱۱/۷ درصد و بار آبی‌های مختلف.

لوییز در مقایسه با سایر معادلات، نفوذ تجمعی را با دقت یکسان‌تری در هر یک از کلاسهای بافتی خاک برآورد نمود و از این لحاظ معادله هورتون و فیلیپ در رده‌های بعدی ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به مقادیر MRE، در اکثر کلاسهای بافتی خاکها معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییز کم‌برآوردگر و معادلات فیلیپ و هورتون در تمامی بافت خاکها کم‌برآوردگر بودند. مقایسه بین مقادیر MRE و MAE معادلات نفوذ نشان داد که هیچ کدام از معادلات نفوذ به طور سیستماتیک کم‌برآوردگر یا بیش‌برآوردگر نیستند. در اکثر موارد در حالتی که بار آبی در طی یک آبیاری ثابت در نظر گرفته شود و رطوبت اولیه خاک (در شروع آبیاری) افزایش یافت دقت معادلات نفوذ کاهش یافت. در نهایت با توجه به رتبه‌های نهایی، مشابه نتایج یونگ یونگ (۲۰۱۲) و دوآن (۲۰۱۱) معادله کوستیاکوف-لوییز با کسب کوچکترین رتبه نهایی دارای بهترین کارایی و معادله نفوذ فیلیپ با کسب بزرگترین رتبه نهایی دارای کمترین کارایی در بیان نفوذپذیری خاک بودند.

ارزیابی عملکرد معادلات مختلف نفوذ در آبیاری

جویچه‌ای

پس از آنکه شبیه‌سازی فرآیند نفوذ آبیاری جویچه‌ای توسط مدل HYDRUS انجام شد، خروجی مدل با معادلات نفوذ برازش داده شد. سپس آماره‌های آماری R^2 ، MRE، MAE، SDMRMSE، MRMSE و EF و رتبه عملکرد هر یک از معادلات نفوذ مورد بررسی در انواع شرایط اولیه و مرزی برای ارزیابی عملکرد معادلات مطابق جدول (۴) محاسبه شد.

بدلیل اینکه تمام معادلات نفوذ دارای عملکرد خوبی از نظر ضریب کارایی معادله و تبیین بودند (تقریباً در همه موارد ۰/۹۹-۱ بودند) از ارائه این مقادیر صرف-نظر شد و در ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ دخالت داده نشدند. با مقایسه مقادیر MRMSE و MAE کوستیاکوف-لوییز با سایر معادلات نفوذ مشخص شد که معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییز در تمامی کلاسهای بافتی مورد بررسی، مقدار نفوذ تجمعی را با خطای کمتری برآورد نمود. مقادیر آماره SDMRMSE کوستیاکوف-

جدول ۴- میانگین آماره‌های ارزیابی معادلات نفوذ در آبیاری جویچه‌ای

بافت خاک	آماره ارزیابی	نام معادله نفوذ	
		هورتون	فیلیپ
رس	MRMSE (cm)	۰/۲۱۶	۰/۶۶۹
	SDMRMSE (cm)	۰/۱۱۶	۰/۶۹۰
	MAE (%)	۱/۱۷	۳/۰۶
	MRE (%)	-۰/۱۷	-۱/۶۱
	رتبه	۲	۳
لومرسی	MRMSE (cm)	۰/۷۷۴	۰/۴۶۳
	SDMRMSE (cm)	۰/۳۴۱	۰/۵۶۰
	MAE (%)	۹/۵۰	۵/۱۸
	MRE (%)	-۶/۴۰	-۴/۳۱
	رتبه	۲	۲
لوم	MRMSE (cm)	۱/۳۹۱	۰/۸۷۱
	SDMRMSE (cm)	۰/۵۹	۰/۷۵۷
	MAE (%)	۹/۷۰	۵/۰۰
	MRE (%)	-۷/۱۳	-۴/۲۹
	رتبه	۳	۲
لوم‌شنی	MRMSE (cm)	۰/۹۴۲	۱/۶۱۱
	SDMRMSE (cm)	۰/۳۵۰	۰/۷۳۰
	MAE (%)	۴/۵۶	۴/۸۷
	MRE (%)	-۳/۲۹	-۴/۳۵
	رتبه	۲	۳
شن	MRMSE (cm)	۰/۴۶۳	۲/۲۴۲
	SDMRMSE (cm)	۰/۴۵۵	۰/۹۵۶
	MAE (%)	۰/۹۲	۲/۶۴
	MRE (%)	-۰/۵۹	-۲/۵۱
	رتبه	۱	۳
رتبه نهایی		۲	۳

آنالیز حساسیت آبیاری جویچه‌ای

آنالیز حساسیت ضرایب معادلات نفوذ در آبیاری جویچه‌ای

در جدول (۵) مقادیر حساسیت نسبی (MSI_r) و حساسیت مطلق (MSI_a) ضرایب معادلات مختلف نفوذ در کلاسهای مختلف بافتی ارائه شده است. با توجه به مقادیر MSI_r ضرایب b ، S ، f_i و f_f در تمامی بافتهای k_s دارای تغییرات افزایشی بودند. با توجه به عدم اختلاف مقادیر قدر مطلق MSI_r و MSI_a ضرایب b ، S و f_i در حالت $(H = c \text{ و } \Theta \uparrow)$ و ضرایب a ، f_0 ، f_i و f_f در حالت $(\Theta = c \text{ و } H \uparrow)$ دارای تغییرات سیستماتیک بودند. خاک در حالت $(\Theta \uparrow \text{ و } H = c)$ دارای تغییرات کاهش‌ی و در

حالت $(H \uparrow \text{ و } \Theta = c)$ تمام ضرایب به جز ضرایب a و b توجه به مقادیر MSI_a ، بیشترین حساسیت ضرایب معادلات نفوذ در بین بافت خاکها مربوط به خاک رس بود. در حالت $(H \uparrow \text{ و } \Theta = c)$ با سنگین‌تر شدن بافت خاک حساسیت دارای تغییرات اندک بود. رتبه‌بندی حساسیت ضرایب معادلات نفوذ در دو حالت $(\Theta \uparrow \text{ و } H = c)$ و $(H \uparrow \text{ و } \Theta = c)$ نشان داد که رتبه‌بندی حساسیت در دو حالت ارزیابی در اکثر موارد مشابه هم بودند. در نهایت با توجه به رتبه‌بندی انجام شده در شرایط اولیه و مرزی مختلف به ترتیب ضرایب b ، S و f_i با کسب کوچکترین رتبه نهایی به عنوان حساس‌ترین و ضرایب f_f ، a و f_0 با کسب بزرگترین رتبه نهایی کم-

دارند، کارایی متفاوتی داشته باشند. همچنین، بسته به روش اندازه‌گیری نفوذ، شرایط اولیه و شرایط مرزی جریان آب در خاک متفاوت خواهد بود که می‌توان دست کم بخشی از تفاوت در نتایج بدست آمده را به این امر نسبت داد.

حساس‌ترین ضرایب شناسایی شد. مقایسه نتایج این پژوهش با پژوهش‌های پیشین (دربندی و همکاران، ۱۳۸۴ و ترنر، ۲۰۰۶) نشان‌دهنده تناقضاتی بود. یکی از دلایل ضد و نقیض بودن نتایج، طبیعت تغییرپذیر فرایند نفوذ آب به خاک است که موجب می‌شود تا حتی یک معادله نفوذ در دو خاک که ویژگی‌های فیزیکی بسیار مشابهی

جدول ۵- آماره شاخص حساسیت ضرایب معادلات نفوذ نسبت به رطوبت اولیه و بار آبی

بافت خاک	آماره حساسیت*	ضرایب معادله نفوذ							
		کوستیاکوف-لوئیز			فیلیپ		هورتون		
		a	b	f ₀	S	k _s	K	f _i	f _f
رس	H = c و $\Theta \uparrow$	-۰/۲۰	-۳/۷۶	۰/۴۷	-۳/۱۴	۶/۲۲	۱/۱۳	-۲/۶۰	-۱/۴۱
	MSI _q (-)								
	$\Theta = c$ و H \uparrow	-۰/۶۵	۱/۴۰	۱/۲۲	۱/۶۲	-۰/۱۱	-۰/۸۶	۱/۳۵	۰/۶۴
	MSI _q (-)								
	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۹۱	۳/۷۶	۱/۹۴	۳/۱۴	۶/۲۲	۱/۴۳	۲/۶	۱/۴۱
لومرسی	$\Theta = c$ و H \uparrow	۰/۶۵	۱/۴۰	۱/۲۲	۱/۶۲	-۰/۸۶	-۰/۸۶	۱/۳۵	۰/۶۴
	MSI _q (-)								
	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۲۹	-۲/۳۵	-۰/۲۳	-۱/۶۶	۴/۰۶	-۰/۲۰	-۱/۸۸	-۰/۷۵
	MSI _q (-)								
	$\Theta = c$ و H \uparrow	-۰/۳۵	۱/۱۵	۰/۴۸	-۰/۹۵	-۱/۶	-۰/۴۹	-۰/۹۸	۰/۳۶
لوم	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۲۹	۲/۳۵	۰/۳۱	۱/۶۶	۴/۰۶	-۰/۷۰	۱/۸۸	۰/۷۵
	MSI _q (-)								
	$\Theta = c$ و H \uparrow	-۰/۳۵	۱/۱۵	۰/۴۸	۲/۴۰	۲/۶۹	-۰/۵۲	-۰/۹۸	۰/۳۶
	MSI _q (-)								
	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۰۷	-۱/۰۸	۰/۰۴	-۰/۹۸	-۰/۴۳	-۰/۲۰	-۰/۹۱	-۰/۱۶
لوم‌شنی	$\Theta = c$ و H \uparrow	-۰/۴۳	۱/۱۲	۰/۵۱	-۰/۵۷	-۰/۱۵	-۰/۷۶	۱/۰۲	۰/۳۹
	MSI _q (-)								
	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۰۸	۱/۲۱	۰/۰۷	-۰/۹۸	-۰/۴۳	-۰/۲۱	-۰/۹۱	۰/۱۶
	MSI _q (-)								
	$\Theta = c$ و H \uparrow	-۰/۴۳	۱/۱۲	۰/۵۱	-۰/۵۷	-۰/۲۲	-۰/۷۶	۱/۰۲	۰/۳۹
شن	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	-۰/۸۶	-۰/۰۹	-۰/۲۵	-۰/۴۰	-۰/۰۱
	MSI _q (-)								
	$\Theta = c$ و H \uparrow	-۰/۴۲	۰/۹۱	۰/۴۷	-۰/۴۷	-۰/۴۵	-۰/۶۰	-۰/۸۶	۰/۴۶
	MSI _q (-)								
	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۱۸	۰/۶۴	۰/۰۳	-۰/۸۶	-۰/۰۹	-۰/۲۶	-۰/۴	۰/۰۱
رتبه نهایی	$\Theta = c$ و H \uparrow	۰/۴۲	۰/۹۱	۰/۴۷	-۰/۴۷	-۰/۴۵	-۰/۶۲	-۰/۸۶	۰/۴۶
	MSI _q (-)								
	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۴۰	-۰/۴۰	-۰/۰۱	-۰/۵۶	-۰/۰۰	-۰/۲۸	-۰/۱۸	-۰/۰۱
	MSI _q (-)								
	$\Theta = c$ و H \uparrow	-۰/۲۴	۰/۶۱	۰/۳۳	-۰/۶۰	-۰/۳۳	-۰/۴۶	-۰/۷۱	۰/۳۳
رتبه نهایی	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۴۰	۰/۴۰	۰/۰۱	-۰/۵۶	-۰/۰۲	-۰/۳۹	-۰/۱۸	۰/۰۱
	MSI _q (-)								
	$\Theta = c$ و H \uparrow	۰/۲۷	۰/۶۱	۰/۳۳	-۰/۶۰	-۰/۳۳	-۰/۵۵	-۰/۷۱	۰/۳۳
	MSI _q (-)								
	H = c و $\Theta \uparrow$	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	-۰/۸۶	-۰/۰۹	-۰/۲۵	-۰/۴۰	-۰/۰۱

*رطوبت حجمی اولیه در حال افزایش و بارآبی ثابت ($\Theta \uparrow$ و $H = c$) و رطوبت حجمی اولیه ثابت و بار آبی در حال افزایش ($\Theta = c$ و $H \uparrow$)

آنالیز حساسیت معادلات نفوذ در آبیاری جویچه‌ای

برای بررسی حساسیت معادلات نفوذ مختلف در آبیاری جویچه‌ای جدولی مطابق جدول (۶) تهیه شد. با توجه به مقادیر MSI_r ، در تمام کلاسهای بافتی، تمام معادلات نفوذ در حالت $(\Theta \uparrow)$ و $(H = c)$ تغییرات کاهشی و در حالت $(\Theta = c)$ و $(H \uparrow)$ تغییرات افزایشی داشتند. با توجه به مقادیر MSI_a در هر دو حالت ارزیابی با سنگین‌تر شدن بافت خاک حساسیت معادلات نفوذ افزایش یافت. همچنین در تمامی کلاس‌های بافتی خاکها حساسیت معادلات نفوذ در حالت $(\Theta \uparrow)$ و $(H = c)$ نسبت به حالت $(\Theta = c)$ و $(H \uparrow)$ بیشتر بود.

رتبه‌بندی حساسیت معادلات نفوذ در دو حالت $(\Theta \uparrow)$ و $(H = c)$ و $(\Theta = c)$ نشان داد که رتبه‌بندی حساسیت در دو حالت ارزیابی در اکثر موارد مشابه هم بودند. همچنین معادلات نفوذ در یک حالت ارزیابی حساسیت‌های نزدیک به هم داشتند. در نهایت با توجه به رتبه‌بندی انجام شده معادله نفوذ هورتون با کسب کوچکترین رتبه نهایی به عنوان حساس‌ترین و معادله کوستیاکوف-لوییز و فیلیپ نیز با کسب بزرگترین رتبه نهایی به عنوان کم‌حساس‌ترین معادلات نفوذ شناسایی شدند.

نتیجه‌گیری

معادله کوستیاکوف-لوییز در برآورد نفوذ تجمعی از روند پایدارتری برخوردار بود به گونه‌ای که این معادله در تمامی حالات شبیه‌سازی مورد بررسی حایز رتبه نخست بود حال آنکه این روند در سایر معادلات مشاهده نشد، در نتیجه به ترتیب معادلات کوستیاکوف-

لوییز و فیلیپ با کسب کمترین و بیشترین رتبه نهایی از نظر کارایی و دقت در بیان نفوذپذیری خاک در ارزیابی کلی عملکرد معادلات نفوذ انتخاب شدند. نتایج معادلات تجربی (کوستیاکوف-لوییز و هورتون) بهتر از معادلات فیزیکی (فیلیپ) با داده‌های صحرائی مطابقت می‌کند. یکی از دلایل برتری معادله‌های تجربی (کوستیاکوف-لوییز 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 اما در پی-ریزی معادله‌های تجربی این گونه محدودیت‌ها اعمال نمی‌شود.

هدف از استخراج معادله‌های تجربی آن بود که به بهترین شکل بر داده‌های نفوذپذیری برازش یابند. در نهایت با توجه به نتایج ارزیابی عملکرد و حساسیت معادلات نفوذ، پیشنهاد می‌شود از معادله کوستیاکوف-لوییز که خطا و حساسیت کمتری در شرایط اولیه و مرزی مختلف داشت برای طراحی سیستم‌های آبیاری جویچه‌ای استفاده شود. حساس‌ترین ضرایب در هر یک از معادلات نفوذ عاملی مهمی در اندازه‌گیری و کالیبراسیون معادله دارد (ترنر، ۲۰۰۶)؛ در نتیجه پیشنهاد می‌شود که ضرایبی که حساسیت بالایی دارند قبل از ضرایبی که حساسیت کمتری دارند، باید کالیبره شوند.

جدول ۶- آماره شاخص حساسیت معادلات نفوذ نسبت به رطوبت اولیه و بار آبی در آبیاری جویچه‌ای

بافت خاک	آماره حساسیت*	معادله نفوذ		
		هورتون	فیلیپ	کوستیاکوف-لوییز
رس	MSI _r (-)	$H = c$ و $\Theta \uparrow$	-۲/۲۹۹	-۲/۲۹۲
		$\Theta = c$ و $H \uparrow$	-۰/۶۴۸	-۰/۶۴۷
	MSI _a (-)	$H = c$ و $\Theta \uparrow$	۲/۲۹۹	۲/۴۳۶
		$\Theta = c$ و $H \uparrow$	-۰/۶۴۸	-۰/۶۴۷
	رتبه	۲	۱	۳
	لومرسی	MSI _r (-)	$H = c$ و $\Theta \uparrow$	-۱/۰۲۷
$\Theta = c$ و $H \uparrow$			-۰/۴۲۹	-۰/۴۲۰
MSI _a (-)		$H = c$ و $\Theta \uparrow$	۱/۰۲۷	۱/۰۱۵
		$\Theta = c$ و $H \uparrow$	-۰/۴۲۹	-۰/۴۲۰
رتبه		۱	۲	۳
لوم		MSI _r (-)	$H = c$ و $\Theta \uparrow$	-۰/۲۶۵
	$\Theta = c$ و $H \uparrow$		-۰/۳۹۷	-۰/۳۹۵
	MSI _a (-)	$H = c$ و $\Theta \uparrow$	-۰/۲۶۵	-۰/۲۴۳
		$\Theta = c$ و $H \uparrow$	-۰/۳۹۷	-۰/۳۹۵
	رتبه	۱	۳	۲
	لومشنی	MSI _r (-)	$H = c$ و $\Theta \uparrow$	-۰/۰۴۱
$\Theta = c$ و $H \uparrow$			-۰/۴۶۰	-۰/۴۶۰
MSI _a (-)		$H = c$ و $\Theta \uparrow$	-۰/۰۴۱	-۰/۰۳۶
		$\Theta = c$ و $H \uparrow$	-۰/۴۶۰	-۰/۴۵۷
رتبه		۱	۳	۲
شن		MSI _r (-)	$H = c$ و $\Theta \uparrow$	-۰/۰۱۹
	$\Theta = c$ و $H \uparrow$		-۰/۳۳۷	-۰/۳۳۶
	MSI _a (-)	$H = c$ و $\Theta \uparrow$	-۰/۰۱۹	-۰/۰۱۸
		$\Theta = c$ و $H \uparrow$	-۰/۳۳۷	-۰/۳۳۶
	رتبه	۱	۲	۱
	رتبه نهایی		۲	۲

*رطوبت حجمی اولیه در حال افزایش و بار آبی ثابت ($H = c$ و $\Theta \uparrow$) و رطوبت حجمی اولیه ثابت و بار آبی در حال افزایش ($\Theta = c$ و $H \uparrow$)

فهرست منابع

۱. بای‌بوردی، م. ۱۳۸۸. فیزیک خاک، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ نهم، ۶۷۴ ص.
۲. پرجمی عراقی، ف. میرلطیفی، س.م. قربانی دشتکی، ش. و مهدیان، م. ۱۳۸۹. ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی و کاربری‌های اراضی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲، جلد ۴، ص ۱۹۳-۲۰۳.
۳. پناهی، م. میرلطیفی، س.م. و عباسی، ف. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل دو بعدی نفوذ واریک برای شرایط آبیاری جویچه‌ای. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شماره ۶، ص ۱۴۱۲-۱۴۰۴.

۴. جوادى، ع. مشعل، م و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۲. مقایسه کارایی برخی از معادلات نفوذ در شرایط مختلف اولیه و مرزی، مجله علمی تحقیقات آب، جلد یک، شماره یک، بهار و تابستان ۱۳۹۲، ص ۴۰-۲۹.
۵. تقی‌زاده، ز. وردی‌نژاد، و.ر. ابراهیمیان، ح. و خان‌محمدی، ن. ۱۳۹۱. ارزیابی مرزهای و تحلیل سیستم آبیاری سطحی با Win SRFR (مطالعه موردی آبیاری جویچه‌ای). نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۶، شماره ۶، ص ۱۴۵۹-۱۴۵۰.
۶. دربندی، ص. آیرملو، ن. جلیل‌زاده، م. و دربندی، ص. ۱۳۸۴. ارزیابی حساسیت ضرایب مدل‌های نفوذ به رطوبت اولیه خاک و تعیین مدل‌های ریاضی مربوطه. دومین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان، سوم و چهارم اسفند ماه، ص ۱۶۱۸-۱۶۲۵.
۷. سپهوند، ع. طایی سمیرمی، م. میرنیا، س.ا. و مرادی، ح.ر. ۱۳۸۹. ارزیابی حساسیت مدل‌های نفوذ نسبت به تغییرپذیری رطوبت خاک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۵، شماره ۲، خرداد - تیر ۱۳۹۰، ص ۳۴۶-۳۳۸.
۸. قربانی دشتکی، ش. همایی، م. و مهدیان، م. ۱۳۸۸. برآورد پارامترهای نفوذ آب به خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۳، شماره ۱، ص ۱۹۸-۱۸۵.
۹. ملک‌پور، ا. ۱۳۷۳. مدل ریاضی حرکت آب در فارو. پایان‌نامه کارشناسی ارشد تاسیسات آبیاری، دانشگاه تهران. ص ۶۸.
۱۰. نحوی‌نیا، م.ج. لیاقت، ع. و پارسی‌نژاد، م. ۱۳۸۹. کاربرد مدل‌های تجربی و آماری در پیش‌بینی میزان نفوذ آب در آبیاری جویچه‌ای. نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، ص ۷۶۹-۷۸۰.
11. Duan, R., Fedler, C.B., and Borrelli, J. 2011. Field evaluation of infiltration models in lawn Soil. *Irrigation Science*. 29: 379-389.
 12. Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Abbasi, F. and Navabian, M. 2012. Comparison of one- and two dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(10): 929-938.
 13. Holzapfel, E.A., Jara, J., Zuniga Marino, M.A., Paredes, J. and Bilib, M. 2004. Infiltration parameters for furrow irrigation. *Agricultural Water Management* 68(1): 19-32.
 14. Kandelous, M.M. and Simunek, J. 2010. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface subsurface drip irrigation. *Journal of Irrigations Science*, 28:435-444.
 15. Sarkar, R., Dutta, S. and Panigrahy, S. 2008. Effect of scale on infiltration in a macropore-dominated hillslope. *Currunt Science*. 94: 490-494.
 16. Shukla, M.K., Lal, R., Owens, L.B. and Unkefer, P. 2003. Land Use and Management Impacts on Structure and Infiltration Characteristics of Soils in the North Appalachian Region of Ohio. *Soil Science*, 168 (3): 167-177.
 17. Simunek, J., Sejna, M., and Van Genuchten, M.Th. 2006. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple soluge in variably-saturated media, Technical Manual, Version I.0, PC progress prague, Czech Republic, p. 241.
 18. Turner, Ellen. 2006. Comparison of Infiltration equation and their field validation with rainfall simulation. Thesis submitted to the faculty of the graduate school of the University of Maryland.

19. 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.

Archive of SID