

## ارزیابی معادلات نفوذ آب به خاک در شرایط تلفیق کیفیت آب آبیاری، رطوبت اولیه

### خاک و بار آبی ثابت

علی جوادی<sup>۱\*</sup>، بهروز مصطفی زاده فرد، محمد شایان نژاد و محمدرضا مصدقی

دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

ali.javadi@ag.iut.ac.ir

استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

behrouz@cc.iut.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

shayannejad@cc.iut.ac.ir

استاد گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان.

mosaddeghi@cc.iut.ac.ir

### چکیده

به منظور ارزیابی و طراحی یک سیستم آبیاری باید پدیده نفوذ آب به خاک و تغییرات آن با دقت کافی تعیین گردد. در شرایط شور و سدیمی بودن خاک و آب، اهمیت این مسئله بیشتر خواهد شد. هدف اصلی این پژوهش برآورد ضرایب معادلات مختلف نفوذ آب به خاک (کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، هورتون، فیلیپ و حفاظت خاک آمریکا) و عملکرد این معادلات در شرایط مختلف تلفیق کیفیت آب آبیاری، رطوبت اولیه خاک و بار آبی ثابت روی سطح خاک بود. ابتدا با استفاده از یک روش آزمایشگاهی، نفوذ آب در ستون‌های خاک به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد. سپس با وارد کردن داده‌های نفوذ تجمعی و زه‌آب به مدل HYDRUS-1D، پارامترهای هیدرولیکی خاک با حل معکوس بدست آمد. برای تعیین ضرایب معادلات، خروجی مدل HYDRUS-1D یعنی نفوذ تجمعی نسبت به زمان برازش داده شد. با محاسبه آماره-های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، انحراف معیار ریشه میانگین مربعات خطا (SDRMSE)، درصد خطای نسبی مطلق (AE)، درصد خطای نسبی (RE) معادلات نفوذ برای شرایط مختلف مورد استفاده، ارزیابی و رتبه‌بندی شدند. مقادیر RMSE، SDRMSE، NRMSE و AE برای معادله هورتون به ترتیب ۰/۰۴۳، ۰/۰۱۸، ۰/۰۰۶ و ۱ و برای معادله کوستیاکوف به ترتیب ۰/۲۳۴، ۰/۱۷۵، ۰/۰۲۵ و ۴ بدست آمد که بدین ترتیب هورتون مناسبترین و کوستیاکوف نامناسبترین روش شناخته شدند. مقایسه مقادیر NRMSE نشان داد که در بیشتر موارد، معادلات در حالت کم‌آبیاری مقدار نفوذ را با دقت بهتری برآورد می‌نمایند. خطای معادلات کوستیاکوف-لوئیس و فیلیپ در یک تیمار مشخص با افزایش مقدار آب آبیاری و نزدیک شدن به آخر فصل افزایش یافت ولی بقیه معادلات روند مشخصی نداشتند. در اندازه‌گیری نفوذ آب بررسی تاثیر رطوبت اولیه خاک، بار آبی روی سطح خاک و ویژگی‌های شیمیایی خاک ضروری است زیرا ضرایب معادلات نفوذ و در نتیجه راندمان آبیاری تحت تاثیر این پارامترها قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: ضرایب معادلات نفوذ، پارامترهای هیدرولیکی، کوستیاکوف-لوئیس و مدل HYDRUS-1D

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

\*- دریافت: آذر ۱۳۹۵ و پذیرش: تیر ۱۳۹۶

## مقدمه

برنامه‌ریزی درست آبیاری بستگی به پارامترهای مهمی از جمله تخمین دقیق نفوذ آب به خاک دارد. این پارامترها نقش مهمی در تعیین کارایی آبیاری دارند. در این میان مدل‌های ریاضی که بتوانند با تخمین مناسب این پارامترها را تعیین کنند کمک شایانی به پژوهش‌گران می‌نمایند. مدل HYDRUS یک مدل مناسب برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک است. پژوهش‌های انجام شده در مورد شبیه‌سازی حرکت آب در خاک با استفاده از مدل HYDRUS نشان‌دهنده توانایی بالای این مدل در شبیه‌سازی است (ابراهیمیان و همکاران ۲۰۱۲ و مشایخی و همکاران، ۲۰۱۶). امداد و طباطبایی (۱۳۹۲) گزارش کردند که با کاربرد آب با شوری‌های متفاوت ۰/۶، ۲ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر و مقادیر نسبت جذب سدیم (SAR) برابر ۰/۹، ۱۰ و ۳۰ در آبیاری جویچه‌ای یک خاک لوم رسی با جویچه‌های با شیب صفر و طول ۲۷ متر، میزان نفوذ نهایی اندازه‌گیری شده به روش دو نقطه در انتهای فصل آبیاری (پس از ۱۲ آبیاری) به ترتیب به میزان ۳،۴، ۴۵ و ۶۱ درصد نسبت به ابتدای فصل آبیاری کاهش می‌یابد. جوادی و همکاران (۱۳۹۳) به بررسی عملکرد معادلات مختلف نفوذ (کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ و هورتون) در آبیاری سطحی با استفاده از مدل HYDRUS پرداختند. نفوذ دو بعدی آبیاری جویچه‌ای با تغییر در رطوبت اولیه خاک (پیش از آبیاری) و بار آبی سطح خاک (هنگام آبیاری) با استفاده از حل معادله ریچاردز (مدل HYDRUS) شبیه‌سازی شد.

ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ با شاخص‌های ارزیابی آماری نشان داد که معادلات نفوذ تجربی (کوستیاکوف-لوئیس و هورتون) نسبت به معادله فیزیکی (فیلیپ) عملکرد بهتری در برآورد نفوذ تجمعی در شرایط اولیه و مرزی مختلف داشتند. یونگ‌یونگ و همکاران (۲۰۱۲) به مقایسه چهار معادله مختلف نفوذ (فیلیپ، کوستیاکوف-لوئیس، کوستیاکوف و هورتون) در توصیف پدیده نفوذ در جویچه‌های آبیاری پرداختند. نتایج نشان

داد که معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس رابطه بین نفوذ تجمعی و زمان را بهتر از سایر معادلات نفوذ بیان می‌کند. ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۲) عملکرد هفت معادله نفوذ (فیلیپ، هورتون، کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح شده، کوستیاکوف-لوئیس اصلاح شده، SCS و Swartzendruber) را در برآورد نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با استوانه‌های مضاعف در چهار کلاس بافت خاک (مالی‌سویل، اریدی‌سویل، اینسیتی‌سویل و انتی-سویل) بررسی کردند.

نتایج نشان داد بر اساس آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تبیین ( $R^2$ ) معادله کوستیاکوف-لوئیس اصلاح شده و معادله سازمان حفاظت خاک آمریکا در تمام خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین معادلات هستند. ثامنی و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی کارایی چند رابطه نفوذ (کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیس، هورتون، فیلیپ و حفاظت خاک آمریکا) با کاربرد آب‌های شور و سدیمی مختلف در دو خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی پرداختند. آنها از روش رتبه‌بندی بر اساس آماره‌های مختلف برای شناسایی بهترین معادله نفوذ استفاده کردند. به‌طور کلی معادله نفوذ کاستیاکوف-لوئیس با میانگین ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و درصد کارایی به ترتیب ۰/۹۹۷، ۰/۲۰۵ و ۹۹/۸۱ و حفاظت خاک آمریکا با مقادیر ۰/۹۹۲، ۰/۲۴۹ و ۹۸/۷۶ برای آماره‌های ذکر شده به ترتیب بهترین و بدترین معادله در خاک‌های مورد مطالعه و تیمارهای کیفیت آب مورد استفاده شناسایی شدند. بررسی پژوهش‌های انجام‌یافته در زمینه نفوذ نشان داد که کیفیت آب و ویژگی‌های خاک دو عامل بسیار مهم و تاثیرگذار بر معادلات نفوذ و ضرایب آنها می‌باشند که در طول فصل زراعی متغیر بوده و بنابراین استفاده از تابع نفوذ ثابت در طول فصل زراعی باعث کاهش کارایی آبیاری می‌گردد. پژوهش‌های انجام‌شده در مورد ارزیابی کارایی معادلات نفوذ دارای کاستی‌هایی از جمله عدم بررسی هم‌زمان کارایی معادلات نسبت به کیفیت آب

آب به خاک به روش بار ثابت اندازه‌گیری شد و سپس مدل HYDRUS-1D برای شرایط مورد مطالعه واسنجی شد و فرایند نفوذ برای شرایط مختلف بار آبی و رطوبت اولیه خاک شبیه‌سازی شد.

آبیاری، کیفیت شیمیایی خاک، رطوبت و بار آبی مختلف است؛ بنابراین با توجه به تحقیقات انجام شده، در این پژوهش به بررسی عملکرد معادلات مختلف نفوذ تحت تاثیر رطوبت اولیه خاک، کیفیت آب آبیاری و مدیریت بار آبی روی سطح خاک مختلف پرداخته شد.

### تیمارهای مورد مطالعه

این مطالعه شامل سه مجموعه مشابه ۲۴ تایی ستون خاک و طرح بلوک‌های کامل تصادفی بود. مجموعه‌ها شامل مجموعه یک، دو و سه بود و هر مجموعه دارای شش تیمار که شامل سه تیمار کیفیت آب آبیاری در چهار تکرار با دو سطح میزان آب آبیاری شامل آبیاری کامل و آبیاری با تخلیه ۳۰ درصد رطوبت خاک (کم‌آبیاری) بودند (جدول ۲). خاک مورد آزمایش دارای بافت لوم‌شنی بود که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۳) ارائه شده است.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش ارزیابی کارایی معادلات مختلف نفوذ آب به خاک در شرایط تلفیق کیفیت آب آبیاری و رطوبت اولیه خاک و بار آبی روی سطح انجام شد. در جدول (۱) معادلات نفوذ مورد بررسی شامل کوستیاکوف (۱۹۳۲)، هورتون (۱۹۴۰)، کوستیاکوف-لوئیس (مزنسیوف، ۱۹۴۸)، فیلیپ (۱۹۵۷) و حفاظت خاک آمریکا (NRCS) (۱۹۷۴) همراه با پارامترهای آنها ارائه شده است. ابتدا با استفاده از یک روش آزمایشگاهی، نفوذ

جدول ۱- معادلات نفوذ مورد مطالعه

معادله	پارامترها	نام معادله نفوذ
$Z=at^b$	زمان $t$ (cm), $a$ (min), $b$ (cm/min <sup>b</sup> ) و ضرایب تجربی (-)	کوستیاکوف
$Z=At^B+f_0t$	زمان $t$ (cm), $f_0$ (min), $A$ (cm/min) و $B$ ضرایب تجربی (-)	کوستیاکوف-لوئیس
$Z=St^{0.5}+k_s t$	زمان $t$ (cm), $S$ ضریب جذبی خاک (cm/min <sup>0.5</sup> ) و $k_s$ هدایت هیدرولیکی منطقه انتقال (cm/min)	فیلیپ
$Z=f_1 t + \frac{f_1 - f_f}{k} (1 - e^{-kt})$	زمان $t$ (cm), $f_1$ (min) سرعت اولیه نفوذ $f_1$ (cm/min) سرعت نهایی نفوذ $f_f$ (cm/min) و $k$ ثابت تناسب (-)	هورتون
$Z=ct^d+0.6985$	زمان $t$ (cm), $c$ (min), $d$ (cm/min <sup>d</sup> ) و ضرایب تجربی (-)	حفاظت خاک آمریکا

جدول ۲- ویژگی‌های آب آبیاری و نوع آبیاری ستون‌های آزمایشی تیمارهای مورد مطالعه

تیمار	کیفیت آب آبیاری		نوع آبیاری
	SAR (meq.L <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup>	EC (dS/m)	
۱	۰/۷۷	۰/۶	تخلیه ۳۰ درصد (کم‌آبیاری)
۲	۱۱/۳۰	۳	تخلیه ۳۰ درصد (کم‌آبیاری)
۳	۲۱/۳۸	۶	تخلیه ۳۰ درصد (کم‌آبیاری)
۴	۰/۷۷	۰/۶	کامل
۵	۱۱/۳۰	۳	کامل
۶	۲۱/۳۸	۶	کامل

### تهیه ستون‌های خاک

ستون‌ها از جنس لوله پلیکا به ارتفاع ۶۰ سانتی-متر و قطر ۲۵ سانتی‌متر بود. انتهای هر ستون خاک توسط یک توری و یک پارچه ضخیم پوشانده شده بود تا از جابجایی خاک و خروج ذرات ریز خاک جلوگیری شود. انتهای ستون‌ها با پنج سانتی‌متر سنگ‌ریزه با اندازه‌های مختلف پر شد تا زهکشی خاک به آسانی انجام پذیرد. خاک مورد نظر پس از عبور از الک هشت میلی‌متری، با چگالی ظاهری ۱/۵۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب درون ستون‌ها قرار داده شد به ترتیبی که ۱۵ سانتی‌متر فضای خالی برای افزودن آب روی سطح خاک وجود داشته باشد. پس از پرکردن ستون‌ها از خاک با چگالی ظاهری مورد نظر، ستون‌ها از پایین اشباع شدند (شکل ۱). سطح ستون‌ها به مدت ۴۸ ساعت با پلاستیک پوشانده شد و پس از ۴۸ ساعت وزن ستون‌ها برای تعیین درصد رطوبت زراعی اندازه‌گیری شد.

### آبیاری

از سه حالت کیفیت آب آبیاری شامل آب شور و سدیمی کم، شور و سدیمی متوسط و شور و سدیمی زیاد استفاده شد. سه کیفیت آب آبیاری با افزودن مقدار مورد نیاز دو نمک کلرید سدیم و کلرید کلسیم به آب مقطر ساخته شدند. در هر آبیاری رطوبت خاک به حد ظرفیت زراعی رسانده می‌شد. دور آبیاری برای آبیاری کامل به صورت روزانه بود و مقدار آب آبیاری بر اساس میزان تخلیه روزانه رطوبت خاک نسبت به رطوبت ظرفیت زراعی تعیین می‌شد. دور آبیاری برای آبیاری با تخلیه رطوبتی خاک برابر ۳۰ درصد بر اساس میزان تخلیه ۳۰ درصد رطوبت خاک نسبت به رطوبت ظرفیت زراعی محاسبه می‌گردید.

### محل انجام آزمایش

این پژوهش در آزمایشگاه پژوهشی گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

انجام شد. برای تنظیم میانگین دمای ۲۸ درجه سلسیوس در محیط از ترموستات دیجیتالی، فن تهویه و بخاری گازی استفاده شد (شکل ۲).

### آزمایش‌های نفوذپذیری

پس از انجام اولین، پنجمین و دهمین آبیاری برای مجموعه‌های ۲۴ تایی یک، دو و سه آزمایش نفوذ-پذیری انجام شد. زمان انجام آزمایش نفوذپذیری برای مجموعه‌ها در حالت ۳۰ درصد تخلیه رطوبت خاک انجام شد. به عنوان مثال در مجموعه دو، پس از اینکه پنجمین آبیاری برای تیمارهای کم‌آبیاری انجام شد، آبیاری تمامی تیمارها قطع می‌شد و زمانی که رطوبت خاک به تخلیه ۳۰ درصد می‌رسید، آزمایش نفوذپذیری انجام می‌شد. آزمایش نفوذپذیری با بار آبی ثابت پنج سانتی‌متر برای هر یک از سه مجموعه یک، دو و سه به ترتیب برای زمان‌های ۱۰۰، ۱۴۰ و ۱۴۰ دقیقه با استفاده از دستگاه ستون ماریوت انجام می‌شد. در حین انجام آزمایش نفوذپذیری، زه‌آب ستون‌های خاک نیز جمع‌آوری و حجم آنها تعیین می‌شد.

### جدول ۳- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد

مطالعه	
مقدار	ویژگی خاک
۱۵	رس (درصد)
۳۰	سیلت (درصد)
۵۵	شن (درصد)
۰/۷۲	هدایت الکتریکی در عصاره اشباع (dS/m)
۰/۶۵	نسبت جذب سدیم در عصاره اشباع $(\text{meq.L}^{-1})^{0.5}$
۷/۳۷	pH در عصاره اشباع



شکل ۱- اشباع کردن ستون‌های آزمایش از پایین

## شبیه سازی فرایند نفوذ تجمعی در شرایط مختلف بار آبی و رطوبت اولیه

برای شبیه سازی فرایند نفوذ تجمعی یک بعدی توسط مدل HYDRUS-1D، از ستون خاک همگن (تک لایه) به عمق ۴۰ سانتی متر، شرایط مرز بالایی خاک با بار آبی ثابت و مرز پایینی دارای رویه نشسته استفاده شد. چهار بار آبی ثابت روی سطح خاکها (۲/۵، ۵/۰، ۱۰/۰ و ۲۰/۰ سانتی متر) در طول مدت مدل سازی در نظر گرفته شد. مقادیر رطوبت اولیه خاک نیز در چهار نقطه بین رطوبت باقی مانده ( $\theta_r$ ) تا رطوبت اشباع ( $\theta_s$ ) انتخاب شد. لازم به ذکر است که مقادیر رطوبت باقی مانده و اشباع از طریق واسنجی بدست آمد. در کل تعداد شبیه سازی های انجام شده برابر با ۲۸۸ بود (تعداد رطوبت اولیه (۴) × تعداد بار آبی (۴) × تعداد تیمارها (۶) × تعداد مجموعه ها (۳)).

### تعیین ضرایب معادلات نفوذ مختلف

پس از اینکه مدل سازی در شرایط مختلف رطوبتی خاک و بار آبی ثابت انجام شد، داده های خروجی مدل (عمق آب نفوذ یافته در برابر زمان) با استفاده از ابزار Solver در نرم افزار Excel-2016 با معادلات مختلف نفوذ به روش غیرخطی برازش داده شدند. این کار طوری انجام شد که شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) حداقل شود.

### شاخص های ارزیابی

از شاخص های ارزیابی آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، انحراف معیار ریشه میانگین مربعات خطا (SDRMSE)، درصد خطای نسبی مطلق (AE)، درصد خطای نسبی (RE)، ضریب تبیین ( $R^2$ ) و ضریب کارایی (EF) استفاده گردید (جوادی و همکاران، ۱۳۹۳ و ثامنی و همکاران، ۱۳۹۳):

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



شکل ۲- محل انجام آزمایش

### واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک در مدل

#### آزمایشگاهی با مدل HYDRUS-1D

در این پژوهش برای مدل سازی یک بعدی فرایند نفوذ از مدل HYDRUS-1D نسخه ۴/۱۶ استفاده گردید. در ابتدای فرایند واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک نیاز به انتخاب تکرار برتر هر تیمار بود. در نتیجه برای بررسی اعتبار هر آزمایش و نیز تعیین بهترین تکرار از آماره ی آلفای کرونباخ استفاده گردید. این آماره به صورت زیر تعریف می گردد (هو و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k S_i^2}{S_T^2}\right) \quad (1)$$

که در آن:

k تعداد تکرارها،  $S_i^2$  واریانس تکرار i ام،  $S_T^2$  واریانس مجموع تکرارها می باشد. به منظور تعیین بهترین تکرار آزمایش با این روش، مقدار آماره آلفا کرونباخ در صورت حذف هر یک از تکرارها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. بدین ترتیب، تکراری که با حذف آن، مقدار این آماره کاهش بیشتری یافت، به عنوان بهترین تکرار انتخاب شد. پس از انتخاب تکرار برتر هر تیمار از مدل هیدرولیکی و نگونختن معلم برای واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک و شبیه سازی نفوذ در شرایط مختلف بار آبی روی سطح خاک و رطوبت اولیه خاک استفاده شد. برای واسنجی مدل از داده های نفوذ تجمعی و زه آب استفاده شد.

صفر باشد نشان می‌دهد که تغییرات معادله کاملاً سیستماتیک است. هر چه ضریب کارآبی معادله به یک نزدیک باشد برازش معادله از دقت بالاتری برخوردار است. 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, MNRMSE, SDMRMSE, MRE, MAE, MEF, MR<sup>2</sup>) در کلیه شرایط رطوبتی و بار آبی برای هر تیمار استفاده شد. شیوه رتبه‌بندی بدین صورت بود که آماره ارزیابی MRE در رتبه‌بندی در نظر گرفته نشد و معادله‌ای که کم‌ترین مقدار آماره‌های ارزیابی MRMSE, SDMRMSE, MNRMSE و MAE و بیش‌ترین مقدار آماره‌های ارزیابی MEF و MR<sup>2</sup> را داشت، بهترین رتبه (کمترین عدد) به آن تعلق گرفت. این کار برای هر تیمار جداگانه انجام گرفت. در مرحله بعد هر معادله‌ای که مجموع رتبه‌های کسب‌شده کمتری در کلیه تیمارهای یک مجموعه را داشت، بهترین (کمترین) رتبه نهایی را کسب نموده و به عنوان بهترین معادله نفوذ برای آن مجموعه شناسایی شد. در نهایت، هر معادله‌ای که مجموع رتبه‌های کسب‌شده کمتری را در هر سه مجموعه داشت به عنوان بهترین معادله نفوذ برای آبیاری سطحی انتخاب گردید.

## نتایج و بحث

### واسنجی

واسنجی پارامترهای هیدرولیکی و ن‌گن‌وختن - معلم با استفاده مدل HYDRUS برای سه مجموعه انجام شد. نتایج نشان داد که مدل HYDRUS با واسنجی پارامترهای هیدرولیکی توانست بخوبی و با دقت بالا مقادیر نفوذ و زهاب را شبیه‌سازی نماید. به عنوان نمونه در اینجا واسنجی مجموعه یک مطابق جدول (۴) ذکر شده است. نتایج پژوهشگران در واسنجی مدل هیدرولیکی و ن‌گن‌وختن - معلم با استفاده مدل HYDRUS نشان داده بود که دو پارامتر پارامتر شکل (l) و رطوبت باقیمانده ( $\theta_f$ )

$$SDRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RMSE_i - RMSE_{ave})^2} \quad (3)$$

$$NRMSE = RMSE / O_{ave} \quad (4)$$

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

$$RE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{O_i - P_i}{O_i} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - P_{ave})(O_i - O_{ave})]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{ave})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2} \quad (7)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2} \quad (8)$$

در روابط فوق:

$P_i$  مقدار برازش داده شده،  $O_i$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $O_{ave}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده،  $P_{ave}$  میانگین مقادیر برازش داده شده،  $RMSE_i$  مقدار ریشه میانگین مربعات  $RMSE_{ave}$  میانگین ریشه میانگین مربعات و  $n$  تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده است. مقادیر آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا و ریشه میانگین مربعات خطا نرمال‌شده همواره مثبت بوده و بهترین حالت عملکرد زمانی است که مقدار آنها 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 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 محاسبه‌شده 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 از مقدار قدر مطلق این آماره یعنی آماره خطای نسبی مطلق (AE) استفاده نمود. هر چه این آماره کوچک‌تر باشد نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها است. اختلاف مقدار قدر مطلق RE و AE نشان‌دهنده سیستماتیک بودن روند کم‌برآوردگر یا بیش‌برآوردگر بودن معادله نفوذ است که اگر اختلاف برابر

مشاهده می‌شود مدل HYDRUS با واسنجی هیدرولیکی توانست بخوبی و با دقت بالا مقادیر نفوذ و زهاب را شبیه‌سازی نماید.

کمترین تاثیر را بر دقت واسنجی می‌گذارد (مشایخی و همکاران، ۲۰۱۶). در نتیجه از چهار پارامتر رطوبت اشباع خاک ( $\theta_s$ )، هدایت هیدرولیکی اشباع ( $K_s$ ) و پارامترهای شکل ( $\alpha$  و  $n$ ) استفاده شد. همان‌طور که در جدول

جدول ۴- واسنجی پارامترهای هیدرولیکی خاک مجموعه یک

مقدار برای زهاب		مقدار خطا برای نفوذ		پارامترهای هیدرولیکی ون گنوختن-معلم				تیمار
RMSE (cm)	AE (%)	RMSE (cm)	AE (%)	$K_s$ (min.cm <sup>-1</sup> )	n (-)	$\alpha$ (cm <sup>-1</sup> )	$\theta_s$ (-)	
۰/۱۶	۲/۴۹	۰/۲۶	۴/۳۶	۰/۱۰۸۱	۲/۶۸	۰/۰۱۹۴۷	۰/۱۹۹۱	کم آبیاری با شوری کم
۰/۱۳	۲/۳۶	۰/۱۸	۴/۶۹	۰/۰۹۷۵۵	۲/۶۴۴	۰/۰۳۲۰۵	۰/۱۸۳۹	کم آبیاری با شوری متوسط
۰/۵۴	۶/۵۵	۰/۱۸	۳/۷۴	۰/۱۰۱۹	۲/۳۸۷	۰/۰۳۱۶۱	۰/۲۱۰۳	کم آبیاری با شوری زیاد
۰/۱۴	۵/۷۶	۰/۱۸	۵/۷۴	۰/۰۵۴۶۷	۲/۶۷۶	۰/۰۰۵	۰/۱۷۱۱	آبیاری کامل با شوری کم
۰/۰۳	۱/۴۰	۰/۰۸	۲/۴۷	۰/۰۷۰۸	۱/۶۱۷	۰/۰۲۸۶	۰/۲۰۳۱	آبیاری کامل با شوری متوسط
۰/۰۵	۳/۴۰	۰/۲۰	۸/۷۵	۰/۰۴۶۴	۲/۰۲۴	۰/۰۰۵	۰/۱۶۴۹	آبیاری کامل با شوری زیاد

بودند. مقایسه بین مقادیر MRE و MAE معادلات نفوذ نشان داد که هیچ کدام از معادلات نفوذ به طور سیستماتیک کم‌برآوردگر یا بیش‌برآوردگر نبودند. اثر کاهش کیفیت آب آبیاری و خاک در حالت آبیاری مشخص بر کارایی معادلات نشان داد که در روش کم-آبیاری، به جز معادله هورتون کارایی سایر معادلات کاهش یافت. در حالت آبیاری کامل نیز کارایی معادلات در تیمار آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی متوسط نسبت به سایر تیمارها بهتر بود که این امر نشان-دهنده معنی‌دار بودن اثر کاهش کیفیت آب آبیاری و خاک در یک روش آبیاری مشخص بود. نتایج اثر مقدار آبیاری در یک کیفیت مشابه نیز نشان داد که کارایی اکثر معادلات نفوذ در حالت آبیاری کامل نسبت به حالت کم‌آبیاری کاهش می‌یابد. مطابق جدول (۶) در مجموعه دوم، معادله نفوذ هورتون و کوستیاکوف-لوئیس مقدار نفوذ تجمعی را با خطای کم‌تری برآورد نمود. همانند مجموعه اول به جزء معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوئیس و SCS بقیه معادلات بیش‌برآوردگر بودند و همچنین هیچ کدام از معادلات نفوذ به طور سیستماتیک کم‌برآوردگر یا بیش-برآوردگر نبودند. اثر کاهش کیفیت آب آبیاری و خاک در مقدار آبیاری مشخص بر کارایی معادلات نشان داد که برخی از معادلات، نفوذ را با دقت بیشتر و برخی با دقت

#### ارزیابی معادلات نفوذ

پس از آنکه شبیه‌سازی فرآیند نفوذ توسط مدل HYDRUS-1D انجام شد، خروجی مدل با معادلات مختلف نفوذ برازش داده شدند. سپس آماره‌های MRMSE، MNRMSE، SDMRMSE، MAE، EF، MRE و  $R^2$  و رتبه عملکرد هر یک از معادلات نفوذ مورد بررسی برای شرایط متفاوت کیفیت آب آبیاری، بار آبی روی سطح خاک و رطوبت اولیه خاک مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۵ تا ۷). بدلیل اینکه تمام معادلات نفوذ دارای مقادیر بالایی از نظر ضرایب کارایی و تبیین بودند (تقریباً در همه موارد بین ۰/۹۹ تا ۱ بود) از ارائه این مقادیر صرف‌نظر شد و در ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ دخالت داده نشدند. در مجموعه اول مقایسه مقادیر MRMSE، MNRMSE و MAE معادله نفوذ هورتون با سایر معادلات نفوذ نشان می‌دهد که معادله هورتون مقدار نفوذ تجمعی را با خطای کم‌تری تخمین می‌زند (جدول ۵). مقادیر آماره SDMRMSE مدل هورتون در مقایسه با سایر معادلات، نفوذ تجمعی را با دقت یکسان-تری در هر یک از تیمارها برآورد نمود و از این لحاظ معادله کوستیاکوف در رده آخر ارزیابی قرار گرفت. با توجه به مقادیر MRE، به جزء معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوئیس و SCS بقیه معادلات بیش‌برآوردگر

کمتر برآورد نمودند. نتایج اثر حالت آبیاری در یک کیفیت مشابه نیز نشان داد که به جز معادلات نفوذ هورتون و SCS، سایر معادلات در حالت کم آبیاری نسبت به حالت آبیاری کامل کاهش کارایی داشتند. مطابق جدول (۷) همانند مجموعه دوم، در مجموعه سوم نیز معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس مقدار نفوذ تجمعی را با خطای کم-تری برآورد نمود. همانند مجموعه‌های قبل به جزء معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوئیس و SCS بقیه معادلات بیش برآوردگر بودند و هم‌چنین هیچ کدام از معادلات نفوذ به طور سیستماتیک کم برآوردگر یا بیش برآوردگر نبودند. همانند مجموعه دوم مقادیر آماره‌ها نشان دادند که با کاهش کیفیت آب آبیاری و خاک در مقدار آبیاری مشخص برخی از معادلات، نفوذ را با دقت بیشتر و برخی با دقت کم تر برآورد می‌کنند. با مقایسه مقدار خطا بین تیمارهای هم کیفیت ولی متفاوت در حالت آبیاری نتایج نشان داد که برخی از معادلات، نفوذ را با دقت بیشتر و برخی با دقت کمتر برآورد می‌کنند. مقادیر خطا در سه مجموعه نشان داد که مقدار خطای معادلات نفوذ کوستیاکوف-لوئیس و فیلیپ در یک تیمار مشخص با افزایش مقدار آب آبیاری و نزدیک شدن به پایان فصل افزایش یافت و بقیه معادلات از این نظر روند مشخصی نداشتند.

در شکل‌های ۳ تا ۵ خط یک به یک میزان نفوذ اندازه‌گیری شده در برابر نفوذ شبیه‌سازی با مدل HYDRUS و مقادیر نفوذ برازش داده شده با ابزار Solver آگسل آورده شده است. بدلیل تعداد بالای نمودارها (۱۸ عدد)، در اینجا به عنوان نمونه اثر نوع آبیاری و کیفیت آب آبیاری برای مجموعه یک (در دو کیفیت) و سه (در سه کیفیت آب) ذکر شده است. چنانچه در اشکال ملاحظه می‌شود مدل HYDRUS به خوبی با حل معکوس پارامترهای هیدرولیکی خاک توانسته با مقادیر اندازه‌گیری نفوذ مطابقت داشته باشد. برازش پنج معادله نفوذ با ابزار Solver نیز نشان داد که این ابزار توانسته با دقت بالا بر مقادیر اندازه‌گیری شده نفوذ برازش

یابد. در این میان دو معادله هورتون و کوستیاکوف-لوئیس نسبت به سایر معادلات دارای دقت بالایی بودند و معادله کوستیاکوف از این نظر بدترین عملکرد را نسبت به سایر معادلات داشته است. مقدار میانگین کل NRMSE در تمامی حالتها (۲۸۸ حالت) برای معادلات هورتون، کوستیاکوف-لوئیس، فیلیپ، SCS و کوستیاکوف به ترتیب برابر ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۸، ۰/۰۲۰، ۰/۰۲۴ و ۰/۰۲۵ سانتی‌متر بود همانند روش رتبه‌بندی عملکرد معادلات در سه مجموعه مورد مطالعه، مقدار میانگین کل NRMSE و سایر آماره‌های ارزیابی نیز بیانگر دقت بالای دو معادله هورتون و کوستیاکوف-لوئیس بود. مقایسه مقادیر NRMSE نشان داد که در بیشتر موارد، معادلات در حالت کم آبیاری نسبت به حالت آبیاری کامل مقدار نفوذ را با دقت بهتری برآورد می‌نمایند. نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نیز حاکی از آن بود که پژوهش‌گران دیگر نیز در مقایسه و ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ به نتایج متفاوت و برخی موارد ضد و نقیضی دست یافته‌اند. یکی از دلایل آن طبیعت تغییرپذیر فرایند نفوذ آب به خاک است به گونه‌ای که حتی عملکرد یک معادله می‌تواند در دو خاک مشابه متفاوت باشد (سی، ۲۰۰۶).

نتایج پژوهش‌های ثامنی و همکاران (۱۳۹۳)، پرچمی عراقی و همکاران (۱۳۸۹)، ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۲) و جوادی و همکاران (۱۳۹۳) نشان داد که از نظر رتبه‌بندی عملکرد معادله نفوذ کوستیاکوف-لوئیس و هورتون بهترین معادله و معادله کوستیاکوف به عنوان بدترین معادله هستند که با نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. کلمنز معادلات نفوذ مختلفی را به منظور استفاده در آبیاری سطحی، مورد مطالعه قرار داد و نتیجه گرفت که معادلات تجربی (کوستیاکوف-لوئیس و هورتون) بهتر از معادلات فیزیکی (فیلیپ) با داده‌های صحرائی هم‌خوانی دارند که با نتایج این پژوهش هماهنگی دارد (محمودیان شوشتری، ۱۳۷۶). معادلات تجربی (کوستیاکوف-لوئیس و هورتون) به لحاظ فرضیاتی که به شرایط سطح خاک و نیم‌رخ خاک مربوط می‌شود، دارای محدودیت کمتری



گردید. در خاک با کیفیت آب آبیاری شور و سدیمی کم درز و ترک ایجاد نشده و در نتیجه میزان نفوذ در این حالت کمتر بود؛ بنابراین کیفیت آب آبیاری با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر پراکنده شدن ذرات خاک و تخریب خاکدانه‌ها موثر است و سبب تشکیل سله‌های سطحی و در نتیجه تغییر در ضرایب توابع نفوذپذیری می‌گردد. ویژگی‌های خاک از جمله شوری و نسبت جذب سدیم نیز می‌توانند بر نفوذ موثر باشند (سوارز و همکاران، ۲۰۰۶؛ امداد، ۲۰۰۷ و زو و همکاران، ۲۰۰۸).

#### نتیجه‌گیری

نتایج ارزیابی عملکرد معادلات نفوذ نشان داد که دو معادله نفوذ هورتون و کوستیاکوف-لوئیس در برآورد نفوذ تجمعی از روند پایدارتری برخوردار هستند به گونه‌ای که این معادلات در اکثر حالات شبیه‌سازی مورد بررسی دارای رتبه نخست بودند؛ اما این روند در سایر معادلات نفوذ دیده نشد؛ بنابراین معادله نفوذ هورتون با میانگین ریشه میانگین مربعات خطا، انحراف معیار ریشه میانگین مربعات خطا، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و درصد خطای نسبی مطلق به ترتیب ۰/۰۴۳، ۰/۱۷۵، ۰/۰۲۵ و ۱ و معادله کوستیاکوف با مقادیر ترتیب مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین معادلات در تمامی تیمارهای مورد مطالعه شناخته شدند. بررسی کارایی معادلات نفوذ تحت تاثیر رطوبت خاک، بار آبی روی سطح خاک و ویژگی‌های شیمیایی خاک نشان داد نفوذ و کارایی معادلات نفوذ تحت تاثیر این عوامل قرار دارند و این عوامل باعث می‌شوند که دقت معادلات در برآورد نفوذ متفاوت باشد. در اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک بررسی تاثیر رطوبت اولیه خاک، بار آبی روی سطح خاک و ویژگی‌های شیمیایی خاک ضروری است زیرا ضرایب معادلات نفوذ و در نتیجه کارایی آبیاری تحت تاثیر این پارامترها قرار دارند.

هستند در عوض به شرایطی که بر اساس آن واسنجی شده‌اند، محدود می‌گردند. از آنجا که روش تعیین پارامترهای معادلات نفوذ روش برازشی بود، یکی از دلایل برتری معادلات کوستیاکوف-لوئیس و هورتون بیشتر بودن تعداد پارامترهای آنها نسبت به معادلات کوستیاکوف، فیلیپ، SCS می‌باشد. این ویژگی باعث انعطاف‌پذیری بیشتر این معادلات به هنگام تعیین پارامترها می‌گردد. همچنین دلیل قرار گرفتن معادله فیزیکی فیلیپ در رتبه میانی 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 است که به بهترین شکل بر داده‌های نفوذپذیری برازش یابند (پرچمی عراقی و همکاران، ۱۳۸۹).

با توجه به شکل (۳)، بررسی اثر شوری آب و خاک در اوایل فصل آبیاری نشان داد که در اوایل فصل آبیاری نوع آبیاری در یک کیفیت آب مشخص بر نفوذ تاثیرگذار می‌باشد ولی کیفیت آب آبیاری تاثیری بر میزان آب نفوذ نداشته است. با توجه به دو شکل ۴ و ۵، در انتهای فصل آبیاری (مشابه اواسط فصل) نتایج نشان داد که مدیریت آبیاری و کیفیت آب آبیاری و خاک بر میزان نفوذ موثر هستند. با توجه به شکل (۴) در نوع کم‌آبیاری با بدتر شدن کیفیت آب آبیاری و خاک میزان نفوذ کاهش یافت. این کاهش نفوذ بدلیل وجود سدیم بالا در آب آبیاری و خاک بود که باعث پراکنده شدن ذرات خاک و در نتیجه کاهش نفوذ بود. با توجه به شکل (۵)، عکس نوع کم‌آبیاری در نوع آبیاری کامل میزان نفوذ با بدتر شدن کیفیت آب و خاک افزایش یافت. دلیل افزایش این بود که برای انجام آزمایش نفوذپذیری نوع آبیاری کامل خاک همیشه مرطوب خشک شد. این خشک شدن باعث ایجاد درز و ترک درونی خاک با کیفیت آب آبیاری و خاک بدتر شد. در نتیجه این درز و ترک باعث افزایش نفوذ

جدول ۵- میانگین آماره‌های ارزیابی معادلات نفوذ در مجموعه اول بر اساس داده‌های شبیه‌سازی

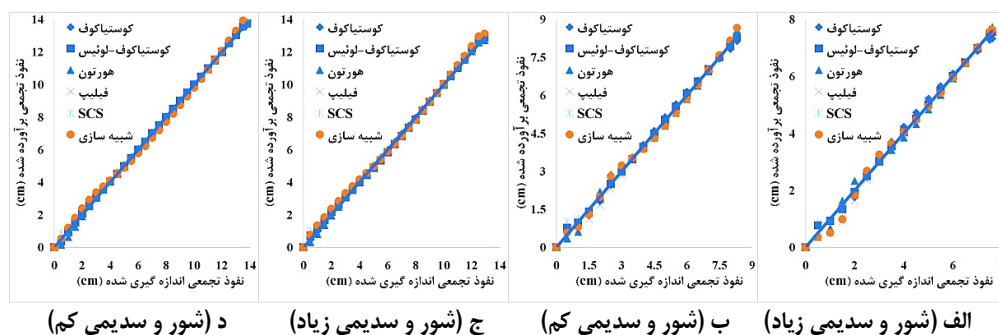
تیمار	آماره ارزیابی	نام معادله نفوذ				
		کوستیاکوف	کوستیاکوف-لونیس	هورتون	فیلیپ	SCS
کم آبیاری با کیفیت آب شور و سدیمی کم	MRMSE (cm)	۰/۲۳۶	۰/۰۷۹	۰/۰۳۵	۰/۱۵۷	۰/۱۴۸
	SDMRMSE (cm)	۰/۰۷۰۲	۰/۰۱۴۴	۰/۰۰۹۰	۰/۰۳۱۶	۰/۰۳۹۲
	MNRMSE (-)	۰/۰۲۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۳	۰/۰۱۷	۰/۰۱۶
	MAE (%)	۴/۳۹	۱/۴۶	۰/۶۰	۲/۷۳	۲/۱۴
	MRE (%)	۲/۵۴	-۰/۲۴	-۰/۲۴	۱/۳۳	۰/۴۸
	رتبه	۵	۲	۱	۴	۳
کم آبیاری با کیفیت آب شور و سدیمی متوسط	MRMSE (cm)	۰/۱۷۶	۰/۰۵۳	۰/۰۳۱	۰/۱۰۶	۰/۰۹۶
	SDMRMSE (cm)	۰/۳۹۹/۰	۰/۰۰۵۹	۰/۰۰۶۴	۰/۰۱۳۷	۰/۰۱۵۵
	MNRMSE (-)	۰/۰۲۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲
	MAE (%)	۴/۰۷	۱/۲۱	۰/۷۱	۲/۳۹	۲/۰۹
	MRE (%)	۲/۵۳	-۰/۳۰	۰/۳۳	۱/۲۷	-۰/۳۶
	رتبه	۵	۲	۱	۴	۳
کم آبیاری با کیفیت آب شور و سدیمی زیاد	MRMSE (cm)	۰/۱۸۳	۰/۰۵۷	۰/۰۴۰	۰/۱۰۸	۰/۰۹۹
	SDMRMSE (cm)	۰/۰۴۰۹	۰/۰۰۶۰	۰/۰۰۹۸	۰/۰۱۳۶	۰/۰۱۵۴
	MNRMSE (-)	۰/۰۲۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲
	MAE (%)	۳/۹۱	۱/۱۶	۰/۸۷	۲/۱۲	۱/۸۵
	MRE (%)	۲/۳۹	-۰/۲۹	۰/۴۱	۱/۱۵	-۰/۱۶
	رتبه	۵	۲	۲	۴	۳
آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی کم	MRMSE (cm)	۰/۲۱۹	۰/۱۰۴	۰/۰۳۰	۰/۲۳۸	۰/۱۵۳
	SDMRMSE (cm)	۰/۰۶۵۴	۰/۰۳۱۵	۰/۰۰۶۴	۰/۱۰۹۶	۰/۰۴۰۳
	MNRMSE (-)	۰/۰۳۹	۰/۰۱۷	۰/۰۰۴	۰/۰۴۰	۰/۰۲۵
	MAE (%)	۴/۷۸	۲/۱۴	۰/۵۱	۲/۸۴	۲/۹۳
	MRE (%)	۷۷/۱	-۰/۴۲	۱۵/۰	۲/۴۹	۲۶/۰
	رتبه	۴	۲	۱	۵	۳
آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی متوسط	MRMSE (cm)	۰/۱۱۸	۰/۰۳۵	۰/۰۴۴	۰/۰۶۴	۰/۰۷۱
	SDMRMSE (cm)	۰/۰۱۷۵	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۹۰	۰/۰۰۴۸	۰/۰۱۴۰
	MNRMSE (-)	۰/۰۲۰	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۰/۰۱۰	۰/۰۱۲
	MAE (%)	۳/۴۲	۰/۹۳	۱/۲۹	۱/۷۰	۲/۴۰
	MRE (%)	۲/۱۰	-۰/۲۲	۰/۶۱	۰/۹۱	-۱/۳۱
	رتبه	۵	۱	۲	۳	۴
آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی زیاد	MRMSE (cm)	۰/۱۶۶	۰/۰۸۹	۰/۰۳۳	۰/۱۸۱	۰/۱۱۸
	SDMRMSE (cm)	۰/۰۳۴۴	۰/۰۱۷۹	۰/۰۰۷۴	۰/۰۵۶۸	۰/۰۲۵۲
	MNRMSE (-)	۰/۰۳۴	۰/۰۱۷	۰/۰۰۶	۰/۰۳۵	۰/۰۲۳
	MAE (%)	۴/۲۹	۲/۲۰	۰/۷۱	۴/۲۹	۲/۷۲
	MRE (%)	۱/۵۲	-۰/۴۷	۰/۲۷	۲/۲۲	-۰/۳۲
	رتبه	۴	۲	۱	۵	۳
رتبه نهایی		۵	۲	۱	۴	۳

جدول ۶- میانگین آماره‌های ارزیابی معادلات نفوذ در مجموعه دوم بر اساس داده‌های شبیه‌سازی

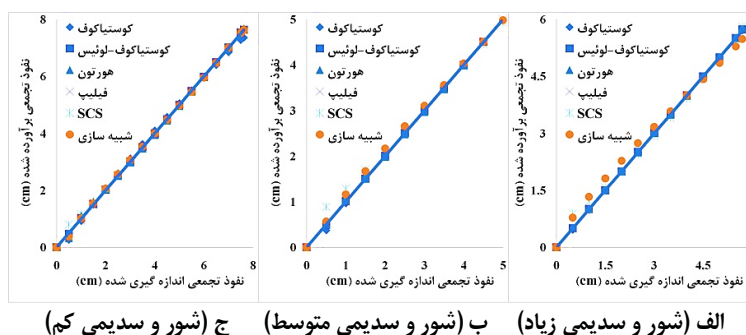
نام معادله نفوذ						تیمار
SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیاکوف- لوئیس	کوستیاکوف	آماره ارزیابی	
-۰/۱۲۸	-۰/۲۹۶	-۰/۰۵۸	-۰/۱۰۷	-۰/۱۳۱	MRMSE (cm)	کم آبیاری با کیفیت آب شور و سدیمی کم
-۰/۰۴۳۰	-۰/۱۶۶۶	-۰/۰۱۵۰	-۰/۰۲۵۵	-۰/۰۲۶۸	SDMRMSE (cm)	
-۰/۰۳۰	-۰/۰۷۰	-۰/۰۱۴	-۰/۰۲۵	-۰/۰۳۲	MNRMSE (-)	
۳/۸۳	۸/۳۴	۱/۲۱	۳/۱۵	۴/۱۰	MAE (%)	
-۱/۴۳	۴/۱۸	-۰/۵۳	-۰/۹۲	-۰/۲۱	MRE (%)	
۳	۵	۱	۲	۴	رتبه	
-۰/۰۷۵	-۰/۰۲۹	-۰/۰۲۲	-۰/۰۱۲	-۰/۰۵۵	MRMSE (cm)	کم آبیاری با کیفیت آب شور و سدیمی متوسط
-۰/۰۲۲۷	-۰/۰۰۲۹	-۰/۰۰۰۷	-۰/۰۰۰۳	-۰/۰۰۴۱	SDMRMSE (cm)	
-۰/۰۲۳	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۳	-۰/۰۱۶	MNRMSE (-)	
۷/۱۶	۱/۶۸	۱/۰۸	-۰/۶۱	۳/۰۴	MAE (%)	
-۶/۰۳	-۰/۸۶	-۰/۶۱	-۰/۱۷	۱/۹۸	MRE (%)	
۵	۳	۲	۱	۴	رتبه	
-۰/۱۰۸	-۰/۰۱۷	-۰/۰۲۶	-۰/۰۰۹	-۰/۰۴۵	MRMSE (cm)	کم آبیاری با کیفیت آب شور و سدیمی زیاد
-۰/۰۳۷۰	-۰/۰۰۰۴	-۰/۰۰۲۲	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۲۷	SDMRMSE (cm)	
-۰/۰۴۱	-۰/۰۰۶	-۰/۰۰۹	-۰/۰۰۳	-۰/۰۱۶	MNRMSE (-)	
۹/۳۳	۱/۰۳	۱/۷۷	-۰/۵۷	۲/۹۷	MAE (%)	
-۷/۹۲	-۰/۵۸	-۰/۸۹	-۰/۱۶	۱/۹۲	MRE (%)	
۵	۲	۳	۱	۴	رتبه	
-۰/۵۵۵	-۰/۵۰۷	-۰/۰۲۶	-۰/۱۳۸	-۰/۶۷۷	MRMSE (cm)	آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی کم
-۰/۷۰۶۰	-۰/۶۱۷۹	-۰/۰۰۵۴	-۰/۱۳۱۰	-۰/۹۶۹۲	SDMRMSE (cm)	
-۰/۰۲۹	-۰/۰۲۷	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۷	-۰/۰۳۶	MNRMSE (-)	
۴/۳۵	۴/۱۳	-۰/۱۴	۱/۰۲	۵/۶۳	MAE (%)	
۲/۵۳	۲/۴۱	-۰/۰۲	-۰/۱۵	۳/۳۶	MRE (%)	
۴	۳	۱	۲	۵	رتبه	
-۰/۶۰۶	-۰/۵۴۶	-۰/۰۲۸	-۰/۱۵۱	-۰/۷۲۶	MRMSE (cm)	آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی متوسط
-۰/۸۲۵۵	-۰/۷۱۰۷	-۰/۰۰۶۵	-۰/۱۵۳۷	-۰/۱۰۵۴	SDMRMSE (cm)	
-۰/۰۳۰	-۰/۰۲۷	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۷	-۰/۰۳۶	MNRMSE (-)	
۴/۴۷	۴/۱۶	-۰/۱۴	۱/۰۵	۵/۶۵	MAE (%)	
۲/۵۸	۲/۴۱	-۰/۰۲	-۰/۱۶	۳/۳۴	MRE (%)	
۴	۳	۱	۲	۵	رتبه	
-۰/۴۴۸	-۰/۳۴۵	-۰/۲۱۷	-۰/۲۶۹	-۰/۴۷۴	MRMSE (cm)	آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی زیاد
-۰/۲۱۱۲	-۰/۱۶۰۴	-۰/۲۲۱۵	-۰/۱۰۵۶	-۰/۲۵۰۹	SDMRMSE (cm)	
-۰/۰۲۰	-۰/۰۱۶	-۰/۰۰۸	-۰/۰۱۱	-۰/۰۲۲	MNRMSE (-)	
۲/۵۹	۲/۱۱	۱/۴۰	۱/۶۹	۳/۰۷	MAE (%)	
-۰/۶۲	-۰/۶۲	-۰/۷۶	-۰/۴۳	۱/۴۸	MRE (%)	
۳	۲	۱	۱	۴	رتبه	
۳	۲	۱	۱	۴	رتبه نهایی	

جدول ۷- میانگین آماره‌های ارزیابی معادلات نفوذ در مجموعه سوم بر اساس داده‌های شبیه‌سازی

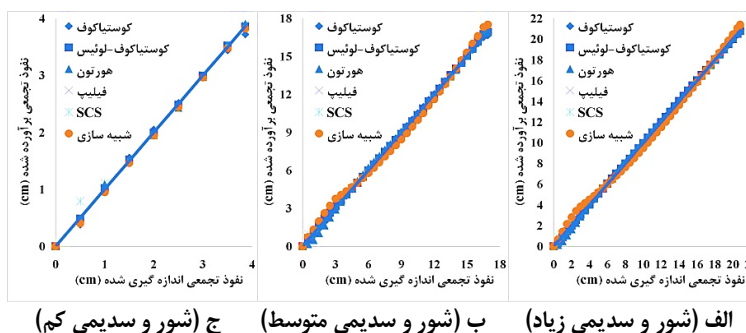
تیمار	آماره ارزیابی	نام معادله نفوذ			
		کوستیاکوف	کوستیاکوف-لونس	هورتون	فیلیپ
کم آبیاری با کیفیت آب شور و سدیمی کم	MRMSE (cm)	۰/۰۸۶	۰/۰۲۲	۰/۰۳۲	۰/۰۴۱
	SDMRMSE (cm)	۰/۰۱۰۰	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۲۲
	MNRMSE (-)	۰/۰۱۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۸
	MAE (%)	۳/۴۲	۱/۸۰	۱/۳۶	۱/۵۰
	MRE (%)	۲/۲۴	-۰/۲۳	-۰/۶۹	-۰/۸۷
رتبه	۴	۱	۲	۳	
کم آبیاری با کیفیت آب شور و سدیمی متوسط	MRMSE (cm)	۰/۰۵۱	۰/۰۱۰	۰/۰۲۸	۰/۰۱۹
	SDMRMSE (cm)	۰/۰۰۳۶	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۰۵
	MNRMSE (-)	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶
	MAE (%)	۲/۹۳	۰/۵۴	۱/۸۰	۰/۹۹
	MRE (%)	۱/۸۹	-۰/۱۵	-۰/۹۱	-۰/۶۲
رتبه	۴	۱	۳	۲	
کم آبیاری با کیفیت آب شور و سدیمی زیاد	MRMSE (cm)	۰/۰۵۶	۰/۰۱۲	۰/۰۲۹	۰/۰۲۳
	SDMRMSE (cm)	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۰۷
	MNRMSE (-)	۰/۰۱۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸	۰/۰۰۶
	MAE (%)	۳/۰۷	۰/۶۴	۱/۶۱	۱/۱۶
	MRE (%)	۲/۰۲	-۰/۱۵	-۰/۸۱	-۰/۶۷
رتبه	۴	۱	۳	۲	
آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی کم	MRMSE (cm)	۰/۰۴۱	۰/۰۰۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۷
	SDMRMSE (cm)	۰/۰۰۲۶	۰	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۰۵
	MNRMSE (-)	۰/۰۱۶	۰/۰۰۲	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷
	MAE (%)	۲/۸۷	۰/۳۸	۲/۱۹	۱/۱۶
	MRE (%)	۱/۷۵	-۰/۰۷	-۰/۹۹	-۰/۶۹
رتبه	۴	۱	۳	۲	
آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی متوسط	MRMSE (cm)	۰/۳۷۹	۰/۱۱۵	۰/۰۳۲	۰/۲۸۳
	SDMRMSE (cm)	۰/۲۲۴۶	۰/۰۴۹۴	۰/۰۰۸۹	۰/۱۳۹۷
	MNRMSE (-)	۰/۰۳۴	۰/۰۱۰	۰/۰۰۳	۰/۰۲۵
	MAE (%)	۵/۲۸	۱/۵۹	-۰/۳۴	۳/۸۲
	MRE (%)	۲/۹۲	-۰/۳۳	-۰/۱۲	۲/۰۶
رتبه	۵	۲	۱	۴	
آبیاری کامل با کیفیت آب شور و سدیمی زیاد	MRMSE (cm)	۰/۴۰۴	۰/۱۰۵	۰/۰۲۹	۰/۲۸۵
	SDMRMSE (cm)	۰/۲۸۰۸	۰/۰۴۵۷	۰/۰۰۷۷	۰/۱۴۹۵
	MNRMSE (-)	۰/۰۳۰	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	۰/۰۲۲
	MAE (%)	۵/۱۶	۱/۳۳	-۰/۳۵	۳/۵۳
	MRE (%)	۳/۱۶	-۰/۲۷	-۰/۱۶	۲/۰۶
رتبه	۵	۲	۱	۴	
رتبه نهایی	۵	۱	۲	۳	



شکل ۳- نمودار یک به یک نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و برآورده شده برای مدیریت آبیاری کامل (اشکال الف و ب) و مدیریت کم‌آبیاری (اشکال ج و د) در مجموعه یک



شکل ۴- نمودار یک به یک نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و برآورده شده برای سه کیفیت آب مدیریت کم‌آبیاری در مجموعه سه



شکل ۵- نمودار یک به یک نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و برآورده شده برای سه کیفیت آب مدیریت آبیاری کامل در مجموعه سه

## فهرست منابع

۱. امداد، م. ر؛ و س. ح، طباطبایی. ۱۳۹۲. تاثیر کیفیت آبیاری (شوری-سدیمی) بر تغییرات نفوذ و راندمان کاربرد آب در آبیاری جویچه‌ای. مجله پژوهش آب ایران، سال هفتم، شماره دوازدهم، بهار و تابستان، صفحات ۱۵۷-۱۵۱.
۲. پرچمی عراقی، ف. س. م، میرلطیفی، ش، قربانی دشتکی. و م، مهدیان. ۱۳۸۹. ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی و کاربری‌های اراضی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲، جلد ۴، صفحات ۲۰۳-۱۹۳.

۳. ثامنی، ع.، م. پاکجو، س. ع.، ا. موسوی. و ع. ا. کامکارحقیقی. ۱۳۹۳. ارزیابی چند رابطه نفوذ آب به خاک با کاربرد آب‌های شور و سدیمی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۲۸، شماره ۲، صفحات ۴۰۸-۳۹۵.
۴. 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. نشریه آب و خاک مشهد (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۸، شماره ۵، صفحات ۹۰۷-۸۹۹.
۵. علیزاده، ح. ع.، ع. لیاقت. و م. نوری محمدیه. ۱۳۸۸. ارزیابی توابع کاهش جذب آب توسط گوجه‌فرنگی در شرایط تنش همزمان شوری و خشکی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۳، شماره ۳، صفحات ۹۷-۸۸.
۶. محمودیان شوشتری، م. ۱۳۷۶. پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکوف-لوییز معادل با پارامترهای معادل نفوذ SCS، مجله خاک و آب، جلد ۱۱، شماره ۱.
7. Duan, R., C.B. Fedler., and J. Borrelli. 2011. Field evaluation of infiltration models in lawn Soil. *Irrigation Science*, 29: 379–389.
8. Ebrahimiyan, H., A. Liaghat, M. Parsinejad, F. Abbasi., and M. Navabian. 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.
9. Ho, R. 2006. *Handbook of univariate and multivariate data analysis and interpretation with SPSS*. Chapman and Hall/CRC. 403pp.
10. Horton, R.E. 1940. An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5: 399–417.
11. Kostiaikov, 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. *Transactions Congress International Society for Soil Science*, 6th, Moscow, Part A: 17–21.
12. Mashayekhi, P., Sh. Ghorbani-Dashtaki, M.R. Mosaddeghi., and H. Shirani. 2016. Different scenarios for inverse estimation of soil hydraulic parameters from double-ring infiltrometer data using HYDRUS-2D/3D. *International Agrophysics*. Volume 30, Issue 2, 203–210
13. Mezenzev, V.J. 1948. Theory of formation of the surface runoff. *Meteorologiae Hidrologia*, 3: 33–40.
14. Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. *Soil Science*, 83: 345–357.
15. Sy, N.L. 2006. Modeling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrological Science Journal*, 51:3–20.
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. Yongyong, Z., W. Pute, Z. Xining., and L. Ping. 2012. Evaluation and modeling of furrow infiltration for uncropped ridge–furrow tillage in Loess Plateau soils. *Soil Research*, 50: 360–370.
18. Zolfaghari, A., S. Mirzaee., and M. Gorji. 2012. Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. *International Soil Science*, 7:108–115.