

## ارزیابی چند رابطه نفوذ آب به خاک با کاربرد آب‌های شور و سدیمی

عبدالمجید ثامنی، مرتضی پاکجو، سید علی اکبر موسوی<sup>۱\*</sup> و علی اکبر کامکار حقیقی

دانشیار، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، بخش علوم خاک.

asameni@hotmail.com

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، بخش علوم خاک.

pakjoo\_morteza@yahoo.com

استادیار، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، بخش علوم خاک.

aamousavi@gmail.com

استاد، دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، بخش مهندسی آب.

aakamgar@shirazu.ac.ir

### چکیده

نفوذ و مدلسازی فرایند نفوذ یکی از پارامترهای مهم در طراحی و اجرای پروژه‌های آبیاری، زهکشی، مدیریت منابع آب، حفاظت خاک، مطالعات هیدرولوژی و تغذیه مصنوعی است که تحت تاثیر ویژگی‌های خاک و آب نفوذ یافته به خاک از جمله میزان شوری و سدیم قرار می‌گیرد. هدف از این تحقیق بررسی میزان نفوذپذیری و ارزیابی مدل‌های نفوذ کوستیاکف-لوئیز، کوستیاکف، هورتون، سازمان حفاظت خاک-آمریکا و فیلپ در شرایط نفوذ آب با شوری ۰/۵، ۰/۳، ۰/۲ و ۰/۱ دسی‌زیمنس بر متر و نسبت جذب سدیم ۰/۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ بود. میزان نفوذ عمودی آب به خاک با روش استوانه‌های مضاعف و با ۵ تکرار در دو خاک آهکی سری دانشکده با بافت لومرسی و سری کوی اساتید با بافت لوم‌شنی از ایستگاه تحقیقات دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز واقع در منطقه باجگاه اندازه‌گیری و مدل‌ها به آنها برازش داده شد. با محاسبه معیارهای آماری ضریب تبیین، درصد کارایی مدل و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده کارایی مدل‌ها برای کیفیت‌های آب مورد استفاده، ارزیابی و رتبه‌بندی انجام شد. مدلی که دارای بهترین رتبه بود به‌عنوان بهترین و پایدارترین مدل شناخته شد. به‌طور کلی مدل کوستیاکف-لوئیز با میانگین ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و درصد کارایی به ترتیب ۰/۹۹۷، ۰/۲۰۵ و ۹۹/۸۱ و مدل حفاظت خاک آمریکا با مقادیر ۰/۹۹۲، ۰/۲۴۹ و ۹۸/۷۶ برای آماره‌های ذکر شده به ترتیب مناسبترین و نامناسبترین مدل در هر دو خاک مورد مطالعه و تیمارهای کیفیت آب مورد استفاده شناخته شدند. بنابراین در مناطق خشک و نیمه‌خشک که به‌طور عمده از آب‌های با کیفیت نامطلوب استفاده می‌شود می‌توان با اطمینان قابل قبولی از مدل کوستیاکف-لوئیز برای مدلسازی فرایند نفوذ آب به خاک استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های نفوذ، کیفیت آب آبیاری

۱- آدرس نویسنده مسئول: دانشگاه شیراز، دانشکده کشاورزی، بخش علوم خاک

\* دریافت: شهریور ۱۳۹۲ و پذیرش: مرداد ۱۳۹۳

مقدمه

در ساده‌سازی شرایط اولیه و مرزی جریان در محیط غیراشباع دارند (رالز، ۱۹۹۳؛ هاورکمپ و همکاران، ۱۹۸۷). فرضیات این مدل‌ها، داده‌های فیزیکی مورد نیاز آنها را کاهش می‌دهد (هاورکمپ و همکاران، ۱۹۸۷). مدل‌های تجربی از نظر فرضیات مربوط به شرایط سطح و نیمرخ خاک، محدودیت کمتری دارند ولی در مقابل به شرایطی که برای آن واسنجی شده‌اند محدود می‌شوند. از مدل‌های تجربی می‌توان مدل‌های کوستیاکوف، هورتون، کوستیاکف-لوییز و مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) را نام برد (هاورکمپ و همکاران، ۱۹۸۷). شرح مدل‌های گفته شده در جدول (۱) ارائه شده است.

نفوذ آب به خاک از اجزاء 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 (رالز، ۱۹۹۳). اهمیت این فرایند سبب ارائه مدل‌های گوناگون برای کمی کردن این فرایند شده است (اگروکاستریتی و کرکیدز، ۲۰۰۳؛ رالز، ۱۹۹۳؛ هاورکمپ و همکاران، ۱۹۸۷). به‌طور کلی مدل‌های نفوذ به دودسته تقسیم می‌شوند: ۱-مدل‌های فیزیکی و ۲-مدل‌های تجربی (رالز، ۱۹۹۳). مدل‌های فیزیکی مانند گرین-امپت و فیلپ پایه و اساس فیزیکی داشته و با تکیه بر اصول فیزیکی، سعی

جدول ۱- شرح مدل‌های نفوذ مورد بررسی و ضرایب آنها

معادله*	ضرایب**	مدل
$I = St^{A/2} + At$	A و S	فیلپ
$I = kt^b$	b و k	کوستیاکوف
$I = k_1 t^{b_1} + A' t$	$A', b_1, k_1$	کوستیاکوف-لوییز
$I = Ct + m(1 - e^{-at})$	a, m, C	هورتون
$I = \alpha t^b + 0.6985$	b و $\alpha$	سازمان حفاظت خاک آمریکا

\* I نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) و t زمان (دقیقه) می‌باشد. \*\* S و A به ترتیب عبارتند از: ضریب جذب آب خاک ( $cm/\sqrt{min}$ ) و معیاری از هدایت هیدرولیکی اشباع ( $cm/min$ ) در معادله فیلپ، K ضریب تجربی معادله کوستیاکوف ( $(cm/min)^b$ )،  $k'$  و  $b'$  عبارتند از: ضرایب تجربی معادله کوستیاکوف-لوییز به ترتیب با ابعاد  $(cm/min)^b$ ، (بی بعد) و ( $cm/min$ ). سایر ضرایب روابط، ضرایب تجربی می‌باشند.

(مرسوم)، مرتع و جنگل در منطقه اوهایو آمریکا به روش استوانه‌های مضاعف و با استفاده از آماره‌های مجموع مربعات خطا، ضریب کارایی مدل و شاخص توافق ویلموت بررسی و گزارش شد که در مقایسه با سایر مدل‌ها، مدل هورتون دارای بهترین عملکرد می‌باشد. همچنین نوع کاربری اراضی اثر معنی‌داری بر مقادیر پارامترهای مدل‌های مورد بررسی داشت به طوری که ضرایب معادلات نفوذ (شامل ضریب جذب آب خاک (S) و هدایت هیدرولیکی نزدیک به اشباع (A) به زمان وابسته بوده و در شرایط بدون خاک‌ورزی و همراه با کاربرد کود دامی در مقایسه با سایر تیمارها بیشتر بود

از آنجا که فرضیات و ضرایب در مدل‌های نفوذ با هم متفاوت است انتظار می‌رود در یک شرایط معین، مدلی خاص دارای عملکرد بهتری در مقایسه با سایرین باشد. از این رو پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های نفوذ انجام شده است (قربانی دشتکی و همکاران، ۲۰۰۹؛ میثرا و همکاران، ۲۰۰۳؛ رشیدی و سیفی، ۲۰۰۷). در پژوهشی عملکرد ۱۰ مدل نفوذ (مدل‌های تجربی و فیزیکی) در شش شرایط کاربری اراضی شامل شرایط بدون خاک‌ورزی و بدون کاربرد کود دامی، بدون خاک‌ورزی با کاربرد کود دامی، تناوب ذرت و سویا در شرایط بدون خاک‌ورزی، خاک‌ورزی سنتی

میرزایی و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی عملکرد هشت مدل نفوذ (گرین-امپت، فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا، کوستیاکوف، هورتون، لوئیز-کوستیاکوف، لویز-کوستیاکوف اصلاح شده و سارتن درویر) در خاک‌های با کلاس بافتی متفاوت واقع در مناطق مختلف ایران با کاربرد معیارهای ارزیابی مختلف، گزارش کردند ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا معیارهای مناسبی برای ارزیابی مدل‌های مختلف نبودند در حالی که معیارهای آماره F، آماره  $C_p$  مالوز و معیار اطلاعات آکائیک در ارزیابی مدل‌ها اعتبار بیشتری داشتند.

آنان همچنین گزارش کردند با در نظر گرفتن هر یک از آماره ها، مدل لوئیز-کوستیاکوف اصلاح شده در بیش از ۵۰ درصد خاک‌ها مناسبترین مدل برآورد نفوذ تجمعی بود و به‌طور کلی مدل لوئیز-کوستیاکوف اصلاح شده برای برآورد نفوذ در خاک‌های لوم، لومرسی و لوم-رسی سیلتی مناسبترین بود در حالی که برای خاک‌های لوم سیلتی مدل لوئیز-کوستیاکوف مناسبترین مدل بود. پژوهش‌های انجام شده حاکی از آن است که پژوهشگران در مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های 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 مدل می‌تواند در دو خاک مشابه متفاوت باشد (سی، ۲۰۰۶). همچنین بسته به روش اندازه‌گیری نفوذ و شرایط اولیه و مرزی فرایند نفوذ (مانند ارتفاع آب روی سطح خاک، رطوبت خاک قبل از نفوذ و ...)، جریان آب در خاک متفاوت خواهد بود و سبب ایجاد تفاوت در نتایج می‌شود (بردواج و سینگ، ۱۹۹۲).

استفاده از آماره‌های متفاوت به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌ها نیز می‌تواند سبب تفاوت در نتایج شود (هر یک از آماره‌های ارزیابی یک مدل بیانگر جنبه خاصی از عملکرد آن می‌باشد از این نظر استفاده صرف از یک آماره ارزیابی ممکن است به تنهایی برای ارزیابی

(شوگلا و همکاران، ۲۰۰۳). در تحقیق دیگری عملکرد مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، هورتون، هولتان، فیلیپ و گرین-امپت در برآورد سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده به روش باران مصنوعی در خاک‌های با بافت لوم‌شنی تا رس‌شنی با شیب یک تا پنج درصد در مناطق ساحلی مالبرو و مرینلد آمریکا با استفاده از آماره ریشه میانگین مربعات خطا ارزیابی و گزارش شد که مدل‌های گرین-امپت، هولتان، فیلیپ، کوستیاکوف و هورتون به ترتیب، در رتبه‌های یک تا پنج ارزیابی قرار گرفتند (ترنر، ۲۰۰۶).

نشاط و پاره‌کار (۱۳۸۵) نیز عملکرد مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، گرین-امپت، فیلیپ، هورتون و سازمان حفاظت خاک آمریکا را برای برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده به روش استوانه مضاعف با در نظر گرفتن آماره ضریب تبیین مقایسه و گزارش کردند که مدل کوستیاکوف در همه خاک‌های مورد مطالعه (بافت‌های رس‌لومی، رسی و لومی) مناسب‌ترین مدل در کوتاه مدت بود درحالی که مدل‌های فیلیپ و سازمان حفاظت-خاک آمریکا در طولانی مدت مناسبترین مدل‌ها تشخیص داده شدند.

آنان همچنین گزارش کردند ضرایب مدل کوستیاکوف بسته به طول مدت اندازه‌گیری متغیر بود و چون این مدل بر مبنای داده‌های تجربی در کوتاه مدت برآورده شده برای پیش‌بینی در بلند مدت، با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه خواهد بود در حالی که مقدار خطا در مدل‌های فیلیپ و سازمان حفاظت خاک آمریکا اندک خواهد بود. ذوالفقاری و همکاران (۲۰۱۲) عملکرد هفت مدل نفوذ را در برآورد نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با استوانه های مضاعف در چهار کلاس بافت خاک لوم-رسی، لوم سیلتی، لوم و لومرسی سیلتی مربوط به خاک‌های مالی سولز، اریدی سولز، انتی سولز و اینسپتی سولز واقع در پنج استان ایران را بررسی و گزارش کردند مدل کوستیاکوف اصلاح شده (لوئیز-کوستیاکوف) و مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در تمام خاک‌های مورد مطالعه به ترتیب مناسبترین و نامناسبترین مدل‌ها می‌باشند.

۸/۵ درصد بود. همچنین گزارش شده کیفیت آب آبیاری به‌طور معنی‌داری بر ساختمان خاک، نفوذپذیری و کاربرد موثر آبیاری (نفوذ بیشتر آب در خاک و ایجاد رواناب کمتر)، تاثیر داشته و در خاک‌های لومی رسی کاربرد ۲۳۸-۲۶۱ میلی‌متر از آب با نسبت جذب سدیم (SAR) برابر با ۱۰ و ۳۰، مقدار پایداری خاکدانه‌ها، عمق نفوذ آب در خاک و سرعت نهایی نفوذ آب را کاهش داد درحالی- که مقدار جرم مخصوص ظاهری و تشکیل سله سطحی را افزایش داده است (امداد، ۲۰۰۷).

امداد و طباطبایی (۱۳۹۲) نیز گزارش کردند با کاربرد آب با شوری ۰/۶، ۲ و ۶ دسی‌زیمنس بر متر در آبیاری جویچه‌ای یک خاک لوم رسی بدون محدودیت شوری و قلیائیت با جویچه‌هایی با شیب صفر و طول ۲۷ متر، میزان نفوذ نهایی اندازه‌گیری شده به روش دو نقطه در انتهای آزمایش (پس از ۱۲ آبیاری) به ترتیب به میزان ۳۴، ۴۵ و ۶۱ درصد نسبت به ابتدای دوره کاهش یافت.

در تحقیق دیگری، با استفاده از شبیه‌ساز باران رابطه بین تیمارهای پلیمری و کیفیت آب آبیاری (مقادیر نسبت جذب سدیم ۵، ۱۵ و ۲۵ و قابلیت هدایت-الکتریکی ۰/۵، ۲ و ۵ دسی‌زیمنس بر متر) بر نفوذپذیری در خاک‌های لومی‌شنی بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در قابلیت هدایت الکتریکی برابر پنج دسی‌زیمنس بر متر و نسبت جذب سدیم پنج نفوذپذیری حداکثر است و در همین قابلیت هدایت الکتریکی، با افزایش نسبت جذب سدیم، نفوذپذیری کاهش می‌یابد و سرعت نفوذپذیری در نسبت جذب سدیم برابر ۲۵ در مقایسه با نسبت‌های جذب سدیم ۱۵ و ۵ در قابلیت هدایت الکتریکی برابر پنج دسی‌زیمنس بر متر، بیشتر کاهش می‌یابد (الداربی، ۱۹۹۰).

با توجه به اهمیت مدل‌سازی فرایند نفوذ آب به خاک و از طرفی کمبود آب‌های با کیفیت مناسب و ضرورت استفاده از آب‌هایی با به‌طور نسبی کیفیت نامطلوب دارند در مناطق خشک و نیمه‌خشک و همچنین اثر ویژگی‌های کیفی آب شامل قابلیت هدایت الکتریکی و

عملکرد یک مدل مناسب نباشد (بلوچی و همکاران، ۲۰۰۲). در برخی از پژوهش‌ها (صادق زاده و همکاران، ۲۰۰۷) به دامنه معقول فیزیکی مقادیر پارامترهای مدل‌های نفوذ برازش داده شده توجهی نشده است. به عنوان نمونه، در پژوهش صادق زاده و همکاران (۲۰۰۷)، مقدار پارامتر A در مدل فیلپ مقداری منفی به دست آمده است که توجیه فیزیکی ندارد.

کیفیت آب آبیاری نیز می‌تواند با تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بر پراکنده شدن خاک و تخریب خاکدانه‌ها موثر باشد و سبب تشکیل سله‌های سطحی و موجب تغییر در توابع نفوذپذیری شود (امداد و طباطبایی، ۱۳۹۲؛ شینبرگ و لتی، ۱۹۸۴). همچنین ویژگی‌های خاک از جمله شوری و نسبت جذب سدیم نیز می‌توانند بر نفوذ آب به خاک موثر باشند (زو و همکاران، ۲۰۰۸).

در پژوهشی اثر آبشویی با آب‌های شور و سدیمی بر میزان نفوذپذیری در شش خاک از خاک‌های پرتغال و فلسطین اشغالی با شبیه‌ساز باران بررسی و بیان شد که نفوذپذیری با افزایش رس و سیلت کاهش یافت و تغییر نفوذپذیری خاک‌ها در پاسخ به کاربرد سدیم بستگی به مقدار شوری خاک داشته به‌گونه‌ای که غلظت نمک بیشتر از ۱۰ میلی‌مول بر لیتر از اثرات مخرب سدیم تبادلی ( $ESP \geq 20\%$ ) جلوگیری می‌کند (شینبرگ و همکاران، ۱۹۹۱). گزارش شده، افزایش نسبت جذب سدیم (SAR) آب آبیاری، نفوذپذیری خاک‌های رسی و لومی را کاهش می‌دهد.

در خاک‌های رسی، افزایش نسبت جذب سدیم (SAR) از دو به چهار، به‌طور معنی‌داری زمان نفوذپذیری را افزایش و سرعت نفوذپذیری را کاهش داد و برای خاک‌های لومی نسبت جذب سدیم برابر شش سبب افزایش زمان نفوذپذیری و کاهش سرعت نفوذ شد (سوارز و همکاران، ۲۰۰۶). بن‌هور (۱۹۹۲) گزارش کردند که سرعت نهایی نفوذ در خاکی با سدیم قابل تبادل ۳۰ درصد، شش برابر کمتر از خاکی با سدیم قابل تبادل

به صورت هم‌مرکز (حدود ۱۵ سانتی‌متر) در خاک، بین دو استوانه و درون استوانه داخلی آب با کیفیت مورد نظر ریخته شد. در طول آزمایش با افزودن آب به استوانه داخلی، ارتفاع سطح آب ثابت نگه داشته شد و مقدار آبی که در فواصل زمانی مختلف افزوده شد (حجم آب نفوذ یافته به خاک) تا رسیدن به شرایط پایدار ثبت شد. به منظور برآزش مدل‌های کوستیاکف-لوئیز، کوستیاکف، هورتون، سازمان حفاظت خاک آمریکا و فیلپ به داده‌های اندازه‌گیری شده تابع هدف به صورت زیر تعریف شد (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۱):

$$SSE = \sum_{j=1}^m (I(m)_j - I(p)_j)^2 \quad (1)$$

که در آن SSE مجموع مربعات خطا  $(cm^2)$   $I(m)_j$  مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در زمان  $j$  (cm)،  $I(p)_j$  مقدار نفوذ تجمعی برآورد شده برای زمان  $j$  (cm) و  $n$  تعداد مقایسه‌ها می‌باشد. صحت عملکرد مدل‌های مورد بررسی در برآورد نفوذ تجمعی برای هر خاک و در هر تیمار کیفیت آب با محاسبه آماره‌های ارزیابی ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و کارایی مدل (EF) تعیین شد (قربانی دشتکی و همکاران، ۲۰۱۰). NRMSE که خطای برآورد شده را در کل منحنی نفوذ نشان می‌دهد همواره مثبت بوده و با نزدیک شدن آن به صفر، عملکرد مدل مورد بررسی افزایش می‌یابد.

کارایی مدل عددی بین صفر تا یک متغیر است (گاهی اوقات این شاخص به صورت درصد نیز بیان می‌شود). زمانی که کارایی مدل برابر با یک باشد مقدار نفوذ تجمعی برآورد شده برابر با مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده خواهد بود. به طور کلی با توجه به آنچه گفته شد مدلی که NRMSE کمتر، لیکن EF و  $R^2$  بیشتری داشته باشد کارایی زیادتری خواهد داشت. با توجه به هر یک از آماره‌ها، به هر مدل رتبه‌ای اختصاص داده شد و میانگین رتبه‌ها به عنوان رتبه نهایی مدل در نظر گرفته شد و رتبه‌بندی نهایی مدل‌ها بر اساس آن انجام شد.

نسبت جذب سدیم بر فرایند نفوذ آب به خاک، ارزیابی مدل‌های نفوذ به‌ویژه برای خاک‌های کشور که اکثراً آهکی هستند امری ضروری است. با توجه به اینکه هر یک از مدل‌ها براساس تعداد نمونه‌های محدود و یا براساس شرایط و فرضیات خاص بوجود آمده‌اند و از طرفی با توجه به شرایط خشک و نیمه‌خشک کشور، هدف از انجام این تحقیق ارزیابی برخی روابط نفوذ آب به خاک تحت شرایط نفوذ آب با کیفیت‌های (شوری و سدیم) متفاوت در دو سری از خاک‌های آهکی استان فارس بود.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق در دو خاک با بافت متفاوت شامل سری کوی‌اساتید (خاک رسوبی آبرفتی واریزه-ای Xerorthents با بافت لوم‌شنی سنگریزه‌دار و سری-دانشکده (خاک آهکی Xerochrepts با بافت لوم‌رسی) از اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز (باجگاه) در ارتفاع ۱۸۱۰ متری از سطح دریا انجام شد (ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است (موسوی، ۲۰۱۰).

آب با کیفیت‌های مورد نظر شامل مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی (۰/۵، ۳، ۶ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) و نسبت جذب سدیم (۰/۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰) از افزودن مقادیر لازم از کلرید سدیم و کلرید کلسیم به آب مقطر تهیه شد. مقدار لازم از نمک‌های ذکر شده بر اساس رابطه نسبت جذب سدیم (نسبت غلظت سدیم به مجذور غلظت کلسیم، غلظت‌ها بر حسب مول در لیتر) و رابطه تجربی بین غلظت نمک‌های محلول، میلی‌گرم در لیتر، و قابلیت هدایت الکتریکی، دسی‌زیمنس بر متر، (قابلیت هدایت-الکتریکی  $X = 640$  = غلظت نمک‌های محلول) برای هر تیمار کیفیت آب محاسبه شد (صادق‌زاده و همکاران، ۲۰۰۷).

آزمایش‌های نفوذ با استوانه‌های مضاعف و در پنج تکرار (۱۶۰ نقطه) انجام شد. پس از کوبیدن استوانه‌ها

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

ویژگی‌های خاک	خاک سری دانشکده	خاک سری کوی اساتید
شن (درصد)	۱۶/۳۴	۴۰/۰۲
سیلت (درصد)	۵۷/۸۷	۴۶/۹۷
رس (درصد)	۲۵/۸۱	۱۳/۰۱
قابلیت هدایت الکتریکی (دسی زیمنس بر متر)	۰/۶۵	۰/۶۹
پ هاش	۷/۸۴	۷/۶۵
ماده آلی (درصد)	۲/۲۹	۲/۳۴
ظرفیت تبادل کاتیونی (ساتی مول بار مثبت در کیلوگرم)	۴۹/۵۲	۴۳/۴۰
کربنات کلسیم معادل (درصد)	۴۰/۸۰	۴۰/۷۰
درصد سدیم قابل تبادل	۳/۸۷	۳/۰۵

## نتایج و بحث

آماره‌های رتبه‌بندی مدل‌های نفوذ برای خاک‌ها و کیفیت‌های آب مورد مطالعه در جداول (۳) و (۴) ارائه شده است. پس از اختصاص رتبه، براساس شاخص‌های آماری و رتبه نهایی، مدلی که رتبه کمتری داشت به‌عنوان بهترین مدل معرفی شد (جدول (۵)). مدل کوستیاکف-لوئیز در اکثر موارد در هر دو خاک و با کاربرد آب با کیفیت-های مختلف از جمله بهترین مدل‌ها شناخته شد درحالی که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا از جمله مدل‌های ناپایدار شناخته شد. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده در مدل کوستیاکف-لوئیز نسبت به دیگر مدل‌ها کمتر بوده و به صفر نزدیک است (جدول (۳) و (۴)) که نشان می‌دهد مقدار خطای برآورد شده در کل منحنی نفوذ کم بوده و عملکرد این مدل مناسب می‌باشد درحالی که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا دارای بیشترین خطای برآورد می‌باشد. مدل کوستیاکف-لوئیز در هر دو خاک و با

کاربرد کیفیت‌های مختلف آب دارای بیشترین درصد کارایی بود که نشان می‌دهد مقادیر برآوردی به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک است درحالی که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا دارای کمترین درصد کارایی بود. نتایج مدل کوستیاکف-لوئیز در مقایسه با سایر مدل‌ها ضریب تبیین بیشتری داشت که نشان می‌دهد مقادیر نفوذ برآوردی به اندازه‌گیری نزدیک است درحالی که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا دارای کمترین ضریب تبیین بود و نشان‌دهنده خطای زیاد در نفوذ برآوردی به‌وسیله این مدل می‌باشد.

مدل کوستیاکف-لوئیز در برآورد نفوذ در اکثر کیفیت‌های آب به کاربرده شده دارای رتبه نخست بود درحالی که مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در اکثر موارد ناکارآمدترین مدل و در رتبه آخر بود که ممکن است به دلیل بیشتر و کمتر بودن تعداد ضرایب به‌ترتیب در مدل‌های کوستیاکوف-لوئیز و سازمان حفاظت خاک آمریکا باشد.

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی مدل‌های نفوذ آب به خاک با کاربرد آب با کیفیت‌های مختلف در خاک سری دانشکده

SAR (meq L <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup>				آماره ارزیابی*	EC (dS m <sup>-1</sup> )
۳۰	۲۰	۱۰	۰.۵		
مدل کوستیاکف-لوئیز					
۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	R <sup>2</sup>	
۰/۰۶۳	۰/۰۶۹	۰/۱۰۱	۰/۰۶۴	NRMSE	۰/۵
۹۹/۸۹	۹۹/۹۱	۹۹/۸۱	۹۹/۹۱	EF	
۰/۹۹۶	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	R <sup>2</sup>	
۰/۱۰۱	۰/۱۱۳	۰/۰۶۲	۰/۰۷۱	NRMSE	۳
۹۹/۶۷	۹۹/۹۰	۹۹/۹۷	۹۹/۹۲	EF	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۴	R <sup>2</sup>	
۰/۰۷۹	۰/۰۹۸	۰/۰۷۳	۰/۱۱۵	NRMSE	۶
۹۹/۹۳	۹۹/۹۴	۹۹/۸۹	۹۹/۴۶	EF	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۶	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	R <sup>2</sup>	
۰/۰۸۴	۰/۱۲۴	۰/۰۷۶	۰/۱۱۵	NRMSE	۱۲
۹۹/۹۱	۹۹/۶۶	۹۹/۹۰	۹۹/۸۶	EF	
مدل کوستیاکف					
۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۰۹۸	۰/۱۱۴	۰/۱۴۵	۰/۱۲۲	NRMSE	۰/۵
۹۹/۷۷	۹۹/۷۲	۹۹/۶۷	۹۹/۷۹	EF	
۰/۹۹۶	۰/۹۹۶	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	R <sup>2</sup>	
۰/۱۳۲	۰/۲۳۲	۰/۱۳۹	۰/۰۸۷	NRMSE	۳
۹۹/۶۳	۹۹/۶۱	۹۹/۸۴	۹۹/۸۷	EF	
۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۴	R <sup>2</sup>	
۰/۱۶۰	۰/۱۴۸	۰/۱۲۱	۰/۱۳۶	NRMSE	۶
۹۹/۸۴	۹۹/۸۸	۹۹/۷۷	۹۹/۴۰	EF	
۰/۹۹۸	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۱۱۱	۰/۱۷۳	۰/۱۵۴	۰/۱۵۴	NRMSE	۱۲
۹۹/۸۷	۹۹/۵۶	۹۹/۶۷	۹۹/۷۹	EF	
مدل فیلیپ					
۰/۹۹۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۶	R <sup>2</sup>	
۰/۱۷۰	۰/۰۸۹	۰/۱۴۳	۰/۱۲۹	NRMSE	۰/۵
۹۸/۶۳	۹۹/۸۵	۹۹/۶۷	۹۹/۲۴	EF	
۰/۹۹۴	۰/۹۹۷	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	R <sup>2</sup>	
۰/۱۶۸	۰/۱۵۵	۰/۱۱۷	۰/۱۰۰	NRMSE	۳
۹۹/۱۴	۹۹/۷۸	۹۹/۸۳	۹۹/۸۶	EF	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۸۷	R <sup>2</sup>	
۰/۱۰۰	۰/۱۲۹	۰/۱۴۸	۰/۲۰۳	NRMSE	۶
۹۹/۹۰	۹۹/۸۷	۹۷/۵۴	۹۷/۴۲	EF	
۰/۹۹۸	۰/۹۹۶	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۱۲۹	۰/۱۵۱	۰/۱۷۵	۰/۲۰۱	NRMSE	۱۲
۹۹/۸۰	۹۹/۳۹	۹۹/۵۲	۹۹/۲۹	EF	
مدل هورتون					
۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۱۳۱	۰/۱۲۹	۰/۱۶۴	۰/۱۴۴	NRMSE	۰/۵
۹۹/۶۲	۹۹/۷۱	۹۹/۶۱	۹۹/۶۹	EF	
۰/۹۹۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	R <sup>2</sup>	
۰/۱۵۸	۰/۱۴۷	۰/۱۶۵	۰/۱۲۷	NRMSE	۳
۹۹/۵۰	۹۹/۸۰	۹۹/۷۴	۹۹/۶۵	EF	
۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	R <sup>2</sup>	
۰/۱۶۴	۰/۱۶۹	۰/۱۶۷	۰/۱۳۰	NRMSE	۶
۹۹/۸۵	۹۹/۸۳	۹۹/۵۵	۹۹/۴۸	EF	
۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۱۶۱	۰/۱۱۸	۰/۱۶۰	۰/۱۶۲	NRMSE	۱۲
۹۹/۷۳	۹۹/۷۵	۹۹/۷۶	۹۹/۷۴	EF	
مدل حفاظت خاک آمریکا					
۰/۹۹۱	۰/۹۸۹	۰/۹۹۴	۰/۹۹۱	R <sup>2</sup>	
۰/۱۶۶	۰/۲۲۴	۰/۲۳۲	۰/۲۱۲	NRMSE	۰/۵
۹۸/۹۲	۹۸/۴۷	۹۸/۲۹	۹۸/۸۳	EF	
۰/۹۸۷	۰/۹۹۲	۰/۹۹۷	۰/۹۹۱	R <sup>2</sup>	
۰.۲۳۸	۰/۲۶۱	۰/۲۰۳	۰/۲۵۶	NRMSE	۳

۴۰۲ / ارزیابی چند رابطه نفوذ آب به خاک با کاربرد آب‌های شور و سدیمی

۹۸/۲۹	۹۸/۳۰	۹۸/۶۴	۹۸/۸۰	EF	
۰/۹۹۴	۰/۹۹۷	۰/۹۸۹	۰/۹۵۹	R <sup>2</sup>	
۰/۲۳۱	۰/۲۵۸	۰/۱۶۰	۰/۲۴۵	NRMSE	۶
۹۹/۲۵	۹۴/۵۸	۹۴/۷۱	۹۴/۳۹	EF	
۰/۹۹۰	۰/۹۹۰	۰/۹۹۴	۰/۹۹۵	R <sup>2</sup>	
۰/۲۵۱	۰/۲۷۳	۰/۲۲۰	۰/۲۳۳	NRMSE	۱۲
۹۸/۷۲	۹۹/۷۲	۹۹/۳۰	۹۹/۴۷	EF	

\*. R<sup>2</sup>، NRMSE و EF به ترتیب عبارتند از: ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و درصد کارایی مدل. EC و SAR به ترتیب عبارتند از قابلیت هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم آب مورد استفاده.

جدول ۴- شاخص‌های ارزیابی مدل‌های نفوذ آب به خاک با کاربرد آب با کیفیت‌های مختلف در خاک سری کوی اساتید

SAR (meq L <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup>				آماره ارزیابی <sup>o</sup>	EC (dS m <sup>-1</sup> )
۳۰	۲۰	۱۰	۰/۵		
مدل کوستیاکف-لوئیز					
۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	R <sup>2</sup>	
۰/۱۳۹	۰/۱۰۳	۰/۱۲۶	۰/۰۷۱	NRMSE	۰/۵
۹۹/۷۹	۹۹/۸۶	۹۹/۸۵	۹۹/۹۵	EF	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	R <sup>2</sup>	
۰/۱۳۱	۰/۱۸۹	۰/۰۷۹	۰/۱۲۱	NRMSE	۳
۹۹/۸۶	۹۹/۷۴	۹۹/۹۵	۹۹/۸۸	EF	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۱۳۴	۰/۱۱۳	۰/۱۰۳	۰/۱۲۶	NRMSE	۶
۹۹/۸۹	۹۹/۸۵	۹۹/۸۹	۹۹/۷۳	EF	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	R <sup>2</sup>	
۰/۰۹۵	۰/۱۰۵	۰/۰۹۳	۰/۰۹۶	NRMSE	۱۲
۹۹/۸۸	۹۹/۸۹	۹۹/۸۸	۹۹/۷۹	EF	
مدل کوستیاکف					
۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	R <sup>2</sup>	
۰/۱۳۰	۰/۱۳۱	۰/۱۲۷	۰/۰۸۷	NRMSE	۰/۵
۹۹/۷۹	۹۹/۷۷	۹۹/۸۴	۹۹/۹۴	EF	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	R <sup>2</sup>	
۰/۱۴۱	۰/۱۸۹	۰/۰۸۵	۰/۱۵۳	NRMSE	۳
۹۹/۸۶	۹۹/۷۴	۹۹/۹۴	۹۹/۷۹	EF	
۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۱۶۳	۰/۱۱۷	۰/۱۵۲	۰/۱۳۱	NRMSE	۶
۹۹/۸۶	۹۹/۸۴	۹۹/۷۵	۹۹/۶۶	EF	
۰/۹۹۷	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۸	R <sup>2</sup>	
۰/۱۱۷	۰/۱۰۸	۰/۱۳۱	۰/۱۰۵	NRMSE	۱۲
۹۹/۷۹	۹۹/۸۹	۹۹/۷۳	۹۹/۷۵	EF	
مدل فیلیپ					
۰/۹۹۵	۰/۹۹۳	۰/۹۹۵	۰/۹۹۹	R <sup>2</sup>	
۰/۲۷۵	۰/۲۵۵	۰/۲۵۶	۰/۱۱۷	NRMSE	۰/۵
۹۸/۸۳	۹۶/۹۹	۹۸/۶۰	۹۹/۸۲	EF	
۰/۹۹۷	۰/۹۹۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	R <sup>2</sup>	
۰/۲۰۷	۰/۳۱۸	۰/۱۹۸	۰/۱۷۳	NRMSE	۳
۹۹/۶۶	۹۹/۰۲	۹۹/۵۳	۹۹/۷۷	EF	
۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۰/۹۹۱	۰/۹۹۶	R <sup>2</sup>	
۰/۲۹۳	۰/۲۱۴	۰/۴۹۶	۰/۱۶۹	NRMSE	۶
۹۸/۹۸	۹۹/۳۸	۹۵/۹۳	۹۸/۸۸	EF	
۰/۹۹۴	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۸۹	R <sup>2</sup>	
۰/۲۸۴	۰/۱۹۸	۰/۲۶۰	۰/۳۶۳	NRMSE	۱۲
۹۷/۷۲	۹۹/۲۲	۹۸/۹۷	۹۵/۶۱	EF	
مدل هورتون					
۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۱۹۰	۰/۲۰۹	۰/۱۶۲	۰/۲۲۳	NRMSE	۰/۵
۹۹/۶۶	۹۹/۵۷	۹۹/۷۵	۹۹/۶۶	EF	
۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۱۹۰	۰/۱۱۳	۰/۱۸۸	۰/۱۹۳	NRMSE	۳
۹۹/۸۲	۹۹/۸۶	۹۹/۶۷	۹۹/۷۱	EF	
۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۴	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	



۰/۲۰۱	۰/۱۲۹	۰/۲۲۶	۰/۱۶۶	NRMSE	۶
۹۹/۸۰	۹۹/۷۹	۹۹/۴۱	۹۹/۶۹	EF	
۰/۹۹۵	۰/۹۹۸	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	R <sup>2</sup>	
۰/۲۱۴	۰/۱۴۴	۰/۱۷۸	۰/۱۶۶	NRMSE	۱۲
۹۹/۵۰	۹۹/۷۵	۹۹/۶۵	۹۹/۵۵	EF	
مدل حفاظت خاک آمریکا					
۰/۹۹۴	۰/۹۹۴	۰/۹۹۵	۰/۹۹۷	R <sup>2</sup>	
۰/۲۷۹	۰/۲۴۲	۰/۲۷۹	۰/۲۱۳	NRMSE	۰/۵
۹۹/۲۴	۹۹/۲۶	۹۹/۳۴	۹۹/۶۷	EF	
۰/۹۹۶	۰/۹۹۴	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	R <sup>2</sup>	
۰/۲۸۵	۰/۳۵۰	۰/۲۴۴	۰/۲۵۸	NRMSE	۳
۹۹/۴۹	۹۹/۱۹	۹۹/۵۸	۹۹/۵۰	EF	
۰/۹۹۷	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	۰/۹۸۹	R <sup>2</sup>	
۰/۲۶۵	۰/۲۵۶	۰/۲۳۳	۰/۲۴۷	NRMSE	۶
۹۹/۶۸	۹۹/۳۳	۹۹/۴۲	۹۸/۷۲	EF	
۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	۰/۹۹۵	۰/۹۹۲	R <sup>2</sup>	
۰/۲۲۷	۰/۲۴۲	۰/۲۲۷	۰/۲۲۴	NRMSE	۱۲
۹۹/۳۹	۹۹/۴۲	۹۹/۴۰	۹۸/۹۹	EF	

\* R<sup>2</sup>, NRMSE, EF به ترتیب عبارتند از: ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و درصد کارایی مدل. EC و SAR به ترتیب عبارتند از قابلیت هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم آب مورد استفاده.

جدول ۵- نتایج رتبه‌بندی نهایی مدل‌های نفوذ برای کیفیت‌های مختلف براساس میانگین رتبه حاصل از شاخص‌های ضریب تبیین، میانگین مربعات خطای نرمال شده و درصد کارایی مدل در دو خاک مورد مطالعه

میانگین رتبه مدل‌های نفوذ بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه شده					کیفیت‌های آب		
۵	۴	۳	۲	۱	نوع خاک	SAR	EC (dS m <sup>-1</sup> )
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۰/۵	۰/۵
هورتون	SCS آمریکا	فیلیپ	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	هورتون	فیلیپ	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۰/۵	۳
امریکا SCS	هورتون	فیلیپ	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	فیلیپ	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	هورتون	دانشکده	۰/۵	۶
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۰/۵	۱۲
امریکا SCS	SCS آمریکا	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	هورتون	کوستیا کوف	فیلیپ	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۱۰	۰/۵
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	هورتون	کوستیا کوف	فیلیپ	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۱۰	۳
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	هورتون	فیلیپ	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۱۰	۶
امریکا SCS	فیلیپ	SCS آمریکا	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	فیلیپ	کوستیا کوف	هورتون	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۱۰	۱۲
امریکا SCS	SCS آمریکا	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	هورتون	کوستیا کوف	فیلیپ	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۲۰	۰/۵
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	کوستیا کوف	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۲۰	۳
امریکا SCS	فیلیپ	کوستیا کوف-لوتیز	کوستیا کوف	هورتون	اساتید		
امریکا SCS	هورتون	فیلیپ	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۲۰	۶
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	فیلیپ	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	هورتون	دانشکده	۲۰	۱۲
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	SCS آمریکا	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۳۰	۰/۵
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۳۰	۳
امریکا SCS	فیلیپ	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
امریکا SCS	کوستیا کوف	هورتون	فیلیپ	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۳۰	۶
امریکا SCS	SCS آمریکا	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		
-----	SCS آمریکا	فیلیپ - هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	دانشکده	۳۰	۱۲
فیلیپ	SCS آمریکا	هورتون	کوستیا کوف	کوستیا کوف-لوتیز	اساتید		

برای برآورد نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با استوانه‌های مضاعف مناسب‌تر است. گودرزی و همکاران (۱۳۹۱) نیز مدل کوستیاکوف را با خطای نسبی هشت درصد در مقایسه با مدل‌های فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا و کوستیاکوف-لوئیز برای مدلسازی نفوذ اندازه‌گیری شده با استوانه‌های مضاعف در سه نقطه از خاک های رسی دشت اشترینان (لرستان) مناسب تر معرفی کردند.

در حالی که یافته‌های این تحقیق با نتایج شوکلا و همکاران (۲۰۰۳) و ترنر (۲۰۰۶) که به ترتیب مدل‌های هورتون و گرین-امپت را مدل مناسب برای پیش‌بینی نفوذ اندازه‌گیری شده با روش باران ساز مصنوعی معرفی نمودند مطابقت نداشت که به‌طور احتمالی بخشی به دلیل تفاوت در روش اندازه‌گیری نفوذ (استفاده از روش باران-ساز مصنوعی در تحقیق ترنر (۲۰۰۶) و بخشی به دلیل استفاده از آماره‌های متفاوت مورد استفاده برای تعیین مدل مناسب در این تحقیقات (استفاده از شاخص توافق ویلموت، میانگین مربعات خطا و کارایی مدل در تحقیق شوکلا و همکاران (۲۰۰۳) با تحقیق حاضر است. دلیل دیگری که به عنوان یکی از دلایل تفاوت در کارایی مدل‌های مختلف نفوذ به‌وسیله شوکلا و همکاران (۲۰۰۳) در نظر گرفته ناشی از تفاوت کاربری اراضی می‌باشد که می‌تواند بر کارایی مدل‌های مختلف در مدلسازی فرایند نفوذ موثر بوده و سبب تفاوت در مدل‌های مناسب معرفی شده باشد.

از آنجا که پارامترهای مدل‌های یاد شده با برآزش مدل به مقادیر اندازه‌گیری شده تعیین شده‌اند یکی از دلایل احتمالی برتری مدل کوستیاکوف-لوئیز ممکن است بیشتر بودن تعداد عامل‌های آن نسبت به مدل‌های حفاظت خاک آمریکا، کوستیاکوف، فیلیپ می‌باشد. این ویژگی سبب انعطاف‌پذیری بیشتر این مدل به هنگام تعیین پارامترها گردید. همچنین مدل نظری فیلیپ در رتبه‌های میانی قرار گرفته است. دلیل این امر آن است که این مدل از جمله مدل‌های نظری بوده و در بنیان این مدل برخی ساده سازی‌ها در شرایط مرزی و اولیه برای حل رابطه

همان‌گونه که در جدول‌های (۳ و ۴) مشاهده می‌شود پنج مدل برای نفوذ آب با کیفیت‌های مختلف در دو نوع خاک مورد مطالعه (سری دانشکده و سری کوی اساتید) با استفاده از آماره های ضریب تبیین، درصد کارایی و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تعیین بهترین مدل بر اساس هر سه شاخص مذکور، به هر کدام از مدل‌ها رتبه‌ای اختصاص داده شد و مدلی که کمترین رتبه را به خود اختصاص داد به عنوان بهترین مدل انتخاب شد که نتایج آن برای خاک های مورد مطالعه در جدول (۵) ارائه شده است.

در بین مدل‌های نفوذ مورد بررسی (کوستیاکوف، فیلیپ، حفاظت خاک آمریکا، هورتون، کوستیاکوف-لوئیز) مدل کوستیاکوف-لوئیز در خاک‌های مورد مطالعه و کیفیت‌های آب مورد استفاده حائز رتبه نخست شد و جزء پایدارترین مدل‌ها شناخته شد و مدل حفاظت خاک آمریکا هم در اکثر موارد از جمله ناپدارترین مدل‌ها به حساب آمد. از آنجا که تحقیقات مشابهی در زمینه ارزیابی مدل‌های نفوذ برای نفوذ آب با کیفیت‌های مختلف وجود نداشت بنابراین مقایسه نتایج ارزیابی مدل‌های مورد مطالعه در این پژوهش با نتایج پژوهش‌های موجود برای نفوذ آب معمولی به خاک مقایسه شده است.

به طور کلی در بسیاری از تحقیقات انجام شده مدل کوستیاکوف و یا کوستیاکوف-لوئیز به عنوان مدل مناسب برای مدلسازی فرایند نفوذ آب معمولی به خاک معرفی شده است. به طوری که نتایج این تحقیق با یافته‌های نشاط و پاره‌کار (۱۳۸۵) که مدل کوستیاکوف را مناسب‌ترین مدل برای برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده با استوانه‌های مضاعف معرفی نمودند به طور نسبی مطابقت دارد. مظلوم و فولادمند (۲۰۱۳) نیز پس از ارزیابی مدل‌های کوستیاکوف و فیلیپ برای نفوذ آب معمولی به یک خاک لوم رسی در مقادیر رطوبت اولیه متفاوت در شهرستان مرودشت (استان فارس) گزارش کردند مدل کوستیاکوف در مقایسه با مدل فیلیپ

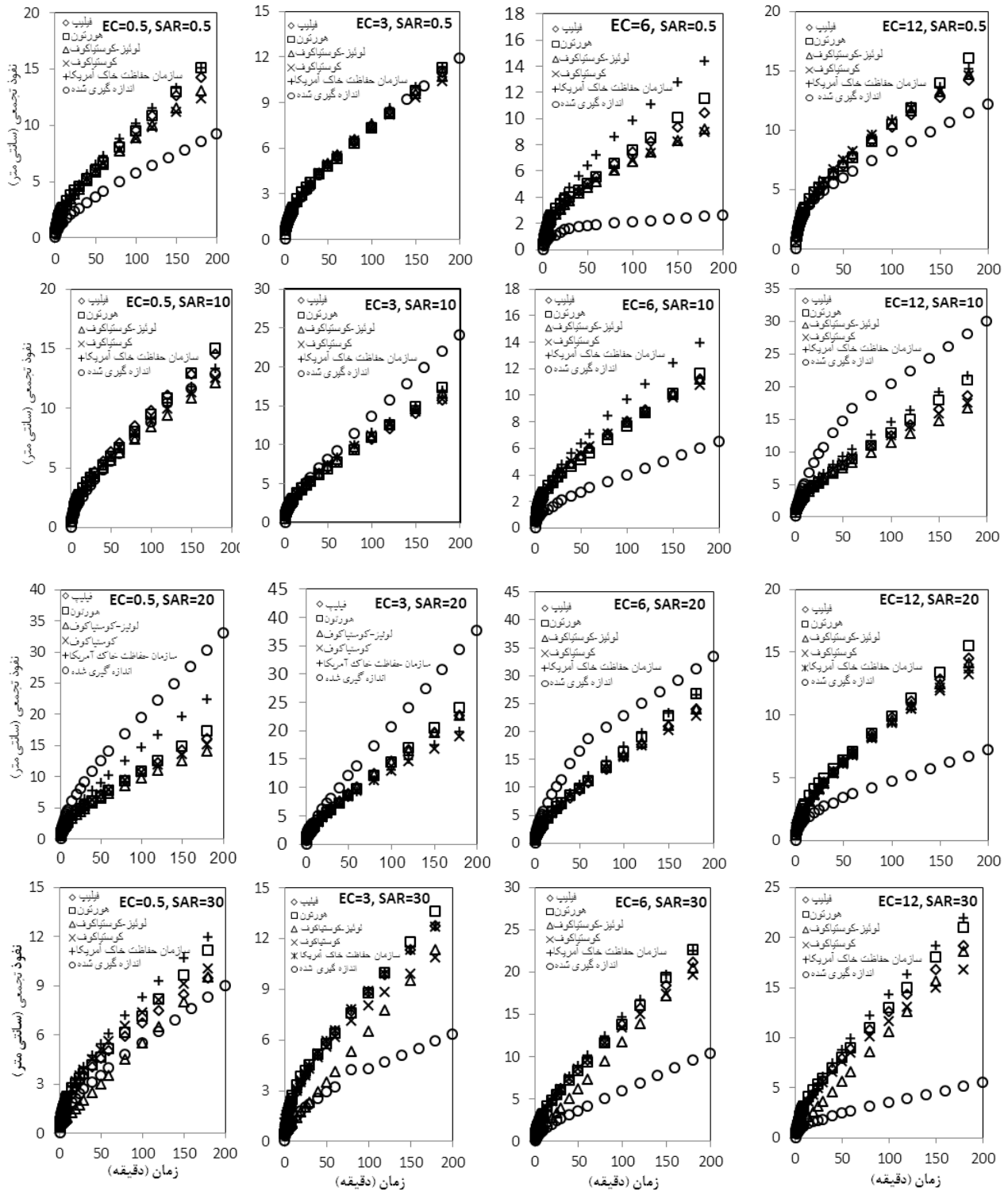
شده با مدل‌های مختلف و همچنین بیشترین و کمترین تفاوت بین نتایج حاصل از مدل‌های مختلف در شرایطی حاصل شده که قابلیت هدایت الکتریکی آب به ترتیب ۰/۵ و ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر بود. در نفوذ آب با نسبت جذب سدیم ۲۰، مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در تمام مقادیر قابلیت هدایت الکتریکی آب استفاده شده، با مقادیر برآورد شده حاصل از مدل‌های مختلف به‌طور قابل ملاحظه‌ای تفاوت داشت.

نتایج همچنین نشان داد در اغلب کیفیت‌های آب تفاوت بین نفوذ تجمعی اندازه‌گیری و برآورد شده با مدل‌های مختلف و همچنین اختلاف بین نفوذ تجمعی برآورد شده با استفاده از مدل‌های مختلف با گذشت زمان از شروع فرایند نفوذ افزایش یافت به‌عبارتی کمترین و بیشترین تفاوت‌های ذکر شده به ترتیب در ابتدا و انتهای نفوذ حاصل شد. مظلوم و فولادمند (۲۰۱۳) نیز برای نفوذ آب معمولی به خاک لوم‌رسی در شهرستان مرودشت (استان فارس) گزارش کردند تفاوت بین نفوذ اندازه‌گیری و برآورد شده با مدل‌های کوستیاکوف و فیلیپ با گذشت زمان افزایش یافت که با نتایج این تحقیق هم‌خوانی دارد. به‌طورکلی نتایج نشان داد بیشترین تطابق نسبی بین مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با نتایج حاصل از کاربرد مدل‌های مختلف برای نفوذ آب با مقادیر متفاوت نسبت جذب سدیم استفاده شده، در قابلیت هدایت الکتریکی سه دسی‌زیمنس بر متر حاصل شد. البته همانگونه که آماره‌های محاسبه شده جداول (۲) و (۳) نشان می‌دهد در اغلب تیمارهای کیفیت آب، مدل کوستیاکوف-لونیژ مناسبترین مدل برای برآورد نفوذ بود و از نظر نوع مدل مناسب بین تیمارهای مختلف کیفیت آب تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود نداشت. هرچند در برخی کیفیت‌های آب، مدل‌ها نفوذ را بیشتر و در برخی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد نمودند (شکل ۱).

ریچاردز در نظر گرفته شده و خاک همگن فرض شده که ممکن است با شرایط طبیعی سازگاری کافی نداشته باشد. لیکن در بنیان مدل‌های تجربی این گونه محدودیت‌ها اعمال نمی‌شود و هدف از استخراج مدل‌های تجربی آن بوده که این مدل‌ها به بهترین شکل بر داده‌های آزمایش نفوذپذیری برازش یابند (قربانی دشتکی و همکاران، ۲۰۰۹). به دلیل اینکه مدل‌های نفوذ براساس تعداد نمونه‌های محدود یا براساس فرضیات خاص بوجود آمده‌اند بنابراین کمی نمودن و ارزیابی کردن مدل‌های نفوذ امری ضروری است و به نظر می‌رسد که هر منطقه از یک الگو یا یک مدل خاص پیروی می‌کند.

به‌گونه‌ای که دون و همکاران (۲۰۱۱) نیز پس از بررسی عملکرد مدل‌های فیلیپ، هورتون، سازمان حفاظت خاک آمریکا، کوستیاکوف و مزنکو برای برآورد میزان نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده با استوانه‌های مضاعف در سه خاک چمنی با بافت‌های شنی و لوم‌رسی شنی (سه اندازه‌گیری در هر خاک) در ایالت تگزاس آمریکا گزارش نمودند مدل‌های مزنکو و هورتون نسبت به سایر مدل‌ها برتری دارد. آنان نیز گزارش کردند مدل‌های سه پارامتری برای تشریح رابطه نفوذ تجمعی و زمان در خاک‌های چمنی مورد مطالعه مناسب‌تر می‌باشند.

در شکل (۱) مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری و برآورد شده با استفاده از مدل‌های نفوذ مورد مطالعه برای کیفیت‌های مختلف آب در خاک سری‌دانشکده به عنوان نمونه نشان داده شده است. همان‌گونه که نتایج شکل (۱) نشان می‌دهد در شرایط استفاده از آب با کمترین مقدار نسبت جذب سدیم ( $SAR=0.5$ )، بیشترین و کمترین تطابق بین نفوذ تجمعی اندازه‌گیری و برآورد شده با مدل‌های مختلف به‌کار برده شده و همچنین بیشترین و کمترین تفاوت بین نتایج حاصل از مدل‌های مختلف در شرایطی حاصل شده که قابلیت هدایت الکتریکی آب به ترتیب سه و شش دسی‌زیمنس بر متر بود. در حالی که در شرایط نفوذ آب با نسبت‌های جذب سدیم ۱۰ و ۳۰، بیشترین و کمترین تطابق بین نفوذ اندازه‌گیری و برآورد



شکل ۱ - مقایسه نفوذ تجمعی (سنتی متر) اندازه‌گیری و برآورد شده با مدل‌های نفوذ با گذشت زمان (دقیقه) برای نفوذ آب‌های با قابلیت هدایت الکتریکی ( $EC, dS m^{-1}$ ) و نسبت جذب سدیم ( $SAR, meq^{0.5} L^{0.5}$ ) متفاوت در خاک سری دانشکده

## نتیجه گیری

نامطلوب استفاده می شود می توان از مدل کوستیاکف-لوئیز برای مدل سازی فرایند نفوذ آب به خاک استفاده نمود. با توجه به تفاوت های نتایج حاصل از این تحقیق با تعدادی از تحقیقات گذشته و از طرفی تفاوت های موجود در جنس و ویژگی های خاک و نوع کاربری اراضی، کیفیت آب مورد استفاده و نوع سامانه های کشاورزی پیشنهاد می شود در مواردی که نیاز به مدل سازی فرایند نفوذ است ابتدا با انجام آزمایش مدل مناسب با در نظر گرفتن شرایط منطقه تعیین و در مراحل بعدی از مدل مناسب معرفی شده برای مدل سازی نفوذ و دیگر کاربردهای آن (طراحی سامانه های آبیاری، مطالعات آب های سطحی، سیل خیزی، ایجاد رواناب و ...) استفاده شود.

در خاک ها و کیفیت های آب مورد مطالعه، مدل کوستیاکف-لوئیز مناسبتر از سایر مدل ها بود و در رتبه نخست قرار گرفت در حالی که در اغلب کیفیت های آب مورد استفاده مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا از جمله نامناسبترین مدل ها شناخته شد و در رتبه آخر قرار گرفت. به طور کلی نتایج نشان داد تناسب مدل های مورد استفاده برای مدل سازی فرایند نفوذ در زمان های کوتاه مدت و در خاک های مورد مطالعه تحت تاثیر کیفیت آب قرار نگیرد و همانگونه که گفته شد در اکثر موارد مدل کوستیاکف-لوئیز مناسبترین و مدل حفاظت خاک آمریکا نامناسبترین مدل شناخته شد. بنابراین می توان گفت در مناطق خشک و نیمه خشک که به طور عمده از آب های با کیفیت

## فهرست منابع

۱. امداد، م. ر. و س. ح. طباطبائی. ۱۳۹۲. تأثیر کیفیت آب آبیاری (شور سدیمی) بر تغییرات نفوذ و راندمان کاربرد آب در آبیاری جویچه ای. مجله پژوهش آب ایران، سال هفتم، شماره دوازدهم، بهار و تابستان، صفحات ۱۵۷-۱۵۱.
۲. گودرزی، ل. ع. م. آخوندعلی و ح. زارعی. ۱۳۹۱. ارزیابی و تعیین ضرایب مدل های نفوذ آب به خاک در دشت اشترینان. نشریه حفاظت منابع آب و خاک، سال اول، شماره سوم، بهار، صفحات ۴۴-۳۹.
۳. نشاط ع. و پاره کار م. ۱۳۸۵. مقایسه روش های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، سال چهاردهم، شماره اول، صفحات ۱۹۵-۱۸۶.
4. Al-Darby, A. M. 1990. Effect of water quality on infiltration of loamy sand soil treated with three gel-conditioners. *Soil Technology*, 3:83-90.
5. Argyrokastriti, I. and Kerkides, P. 2003. A note to the variable sorptivity infiltration equation. *Water Resources Management*, 17:133-145.
6. Bellocchi, G., Fila, G. and Donatelli, M. 2002. An indicator of solar radiation model performance based on a fuzzy expert system. *Agronomy Journal*, 94:1222-1233.
7. Ben-Hur, M. 1992. Exchangeable Na, polymer, and water quality effect on water infiltration and soil loess. *Arid Soil Research*, 6:311-317.
8. Bhardwaj, A. and Singh, R. 1992. Development of a portable simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies. *Agricultural Water Management*, 22:235-248.
9. Duan, R., Fedler C. B. and John, Borrelli. 2011. Field evaluation of infiltration models in lawn soils. *Irrigation Science*, 29:379-389.
10. Emdad, M. R. 2007. Effect of water quality on soil structure and infiltration under furrow irrigation. *Irrigation Science*, 23:50-60.
11. Ghorbani Dashtaki, S., Homaei, M. and Kouchakzadeh M. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. *Soil Use and Management*, 26:68- 74.

12. Ghorbani Dashtaki, S., Homaei, M. Mahdian, M. H. and Kouchakzadeh, M. 2009. Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resource Management*, 23:1573-1650.
13. Haverkamp, R., Rendon, L. and Vachaud, G. 1987. Infiltration equations and their applicability for predictive use. In: Yu- SI Fok (ed.) Infiltration development and application. *Honolulu Hawaii*, 145:142-152.
14. Mazloom, H. and Fooladmand, H. 2013. Evaluation and determination of the coefficients of infiltration models in Marvdasht region, Fars province. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(8): 822-829.
15. Mirzaee, S., Zolfaghari, A., Gorji, M., Dyck, M. and Ghorbani, S. 2014. Evaluation of infiltration models with different numbers of fitting parameters in different soil texture classes. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60:681-693.
16. Mishra, S. K., Tyagi, J. V. and Singh, V. P. 2003. Comparison of infiltration models. *Hydrological Processes*, 17:2629–2652.
17. Moosavi, A. A. 2010. Spatial variability and the effect of water quality on soil hydraulic properties and development of pedotransfer functions and artificial neural networks for their estimation. Ph.D. Thesis, Shiraz University, Shiraz, IR Iran.
18. Mukheibir, P. 2008. Water resources management strategies for adaptation to climate-induced impacts in South Africa. *Water Resources Management*, 22:1259–1276.
19. Rashidi, M. and Seyfi, K. 2007. Field comparison of different infiltration models to determine the soil infiltration for border irrigation method. *Journal of Agricultural & Environmental Science*, 2:628-632.
20. Rawls, W. J. 1993. Infiltration and soil water movement. In: Handbook of Hydrology, Maidment, D. R. (Ed.). McGraw-Hill, New York.
21. Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook No 60, USDA, USA.
22. Sadeghzadeh, K., Shirmohamadi, A. Montans, H. J. and Felton, G. 2007. Evaluation of infiltration models in contaminated landscape. *Journal of Environmental Science and Health*, 42:983-988.
23. Shainberg, I., Gal, M., Bet Dagan, A., Ferreira, E. and Goldstein B. 1991. Effect of water quality and amendments on erosion from several Mediterranean soils. 4:135-146.
24. Shainberg, I. and Letey, J. 1984. Response of soil to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 52:1-57.
25. Shukla, M. K., Lal, R., Ownes, 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*, 168:167–177.
26. Suarez, L., Wood, D. and Lesch, M. 2006. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. *Agricultural Water Management*, 86:150-164.
27. Sy, N. L. 2006. Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrological Science Journal*, 51:3–20.
28. Turner, E. R. 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. M.Sc. Thesis, University of Maryland, USA. 202 p.
29. Zhou, X., Lin, H. S. and White, E. A. 2008. Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land use and their temporal changes. *Catena*, 73:180-188.
30. Zolfaghari, A., Mirzaee, S. and Gorji, M. 2012. Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. *International Journal of Soil Science*, 7:108-115.