

## ارزیابی کارایی مدل‌های نفوذ آب به خاک تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی و مدیریت بقایا در تناوب گندم-ذرت

جهانبخش میرزاوند<sup>1</sup>، عبدالمجید ثامنی، سید علی اکبر موسوی، صادق افضلی نیا

و نجفعلی کریمیان

استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

زرقان، ایران. پست الکترونیکی: [j.mirzavand@areeo.ac.ir](mailto:j.mirzavand@areeo.ac.ir)

دانشیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز: [asameni@hotmail.com](mailto:asameni@hotmail.com)

دانشیار بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز: [aamousavi@gmail.com](mailto:aamousavi@gmail.com)

دانشیار بخش فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زرقان،

ایران: [a.fzalinia@areeo.ac.ir](mailto:a.fzalinia@areeo.ac.ir)

استاد سابق بخش علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز: [nkarimian@yahoo.com](mailto:nkarimian@yahoo.com)

دریافت: 97/5/1 و پذیرش: 97/10/10

### چکیده

فرآیند نفوذ آب به خاک در کارآمدی طراحی سامانه‌های آبیاری از اهمیت خاصی برخوردار است. از سوی دیگر، پدیده نفوذ آب به خاک و تغییرات آن به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک تحت تأثیر مدیریت بقایای گیاهی و روش‌های خاک‌ورزی قرار می‌گیرد. هدف اصلی این پژوهش برآورد ضرایب مدل‌های مختلف نفوذ آب به خاک (کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوئیز، فلیپ، هورتون و سازمان حفاظت خاک آمریکا) و کارایی آن‌ها تحت تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی (خاک‌ورزی رایج، کم خاک‌ورزی و بی خاک‌ورزی) و مدیریت بقایا (حفظ بقایای به صورت ایستاده و حذف تمام بقایا از سطح خاک) بود. به این منظور، پژوهشی مزرعه‌ای در سال 1395 و 1396 در منطقه زرقان استان فارس (بافت خاک لوم رسی سیلینی) با طرح کرت‌های یک بار خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی در تناوب گندم-ذرت با سه تکرار اجرا شد. فرآیند نفوذ آب به خاک برای هر محصول زراعی با استفاده از روش استوانه‌های دوگانه با 3 تکرار مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از برازش هر مدل بر داده‌های نفوذ تجربی بر اساس بهینه‌سازی غیر خطی، آماره‌های ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد کارایی (EF) تعیین و مدل‌ها، از نظر درستی برآورد نفوذ ارزیابی و رتبه بندی شدند. نتایج نشان داد که مدل کوستیاکوف-لوئیز در کشت گندم و حذف بقایا در سامانه‌های خاک‌ورزی رایج (با  $EF$  و  $RMSE$ ،  $R^2$  به ترتیب 0/99 و 0/07 و 99/99) و کم خاک‌ورزی (با  $EF$  و  $RMSE$ ،  $R^2$  به ترتیب 0/99 و 0/13 و 99/99) و مدل هورتون در کشت ذرت و حفظ بقایا در سامانه بی خاک‌ورزی (با  $EF$  و  $RMSE$ ،  $R^2$  به ترتیب 0/99 و 0/14 و 99/70)، بهترین کارایی را در برآورد نفوذ آب به خاک داشتند. در میان سامانه‌های خاک‌ورزی، مدل‌های حفاظت خاک آمریکا، کوستیاکوف و فلیپ در هر دو کشت از این نظر ناکارآمدترین بودند. بطور کلی، در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله زرقان در استان فارس جهت کمی‌سازی فرآیند نفوذ آب به خاک مدل‌های کوستیاکوف-لوئیز و هورتون به ترتیب در کشت گندم و ذرت می‌تواند قابل توصیه باشد.

واژه‌های کلیدی: کم خاک‌ورزی، مدل کوستیاکوف-لوئیز، مدل هورتون.

<sup>1</sup> نویسنده مسئول، آدرس: استان فارس، شیراز، زرقان، بلوار شهید بخشنده، کدپستی 7341653111

## مقدمه

مهم‌ترین مشخصه فیزیکی خاک از نظر کشاورزی نفوذ می‌باشد. فرآیند نفوذ در خاک از پارامترهای مهم در طراحی سامانه‌های آبیاری، مطالعات هیدرولوژی، مدیریت منابع آب، حفاظت خاک، طراحی و اجرای پروژه‌های زهکشی و تخمین مقدار آب مورد نیاز گیاهان می‌باشد (نیکچه و همکاران، 1393). بنابراین مطالعه و کمی کردن فرآیند نفوذ آب به خاک و انتخاب مناسب‌ترین سامانه آبیاری برای هر منطقه بخصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که میزان تبخیر و تعرق بیشتر از نزولات جوی است و برای تأمین نیاز واقعی گیاه بایستی عملیات آبیاری صورت گیرد، امری ضروری و اجتناب ناپذیر است (نشاط و پاره‌کار، 1386). فرآیند نفوذ آب به خاک تابع عواملی مانند بافت و ساختمان خاک، رطوبت خاک، کیفیت آب، دمای آب و خاک، قابلیت پراکندگی ذرات سطح خاک و پوشش گیاهی می‌باشد که تغییرپذیری زمانی و مکانی آن‌ها موجب تفاوت در میزان نفوذ آب در خاک‌های مختلف می‌شود (پرچمی عراقی و همکاران، 1389). مطالعات قبلی نشان داده است که انجام روش‌های متفاوت خاک‌ورزی و مدیریت بقایای گیاهی بر سطح خاک می‌تواند کمیت و کیفیت مدیریت خاک را که نقشی موثر و مستقیم بر میزان نفوذ آب به خاک دارد تحت تأثیر قرار دهد. لیبیک و همکاران (2009) بیان کردند که فشردگی خاک در زمین‌های کشاورزی عمدتاً به وسیله عبور ماشین آلات سنگین در طی عملیات خاک‌ورزی، کاشت، کوددهی و در نهایت برداشت ایجاد می‌شود که می‌تواند اثر منفی بر آب ذخیره شده در خاک، کارایی مصرف آب، ویژگی‌های رشد و نمو گیاه، توسعه و توزیع ریشه در خاک، جذب مواد غذایی توسط ریشه و عملکرد گیاه داشته باشد. به عبارت دیگر، کاهش تردد ماشین آلات در سامانه‌های کم خاک‌ورزی و بی خاک‌ورزی سبب بهبود وضعیت ساختمان خاک و افزایش خلل و فرج درشت در مقایسه با خاک‌ورزی رایج می‌شود.

رمضانی و همکاران (2011) نشان دادند که با کاهش تردد ماشین آلات خاک‌ورزی در خاک مقدار خلل و فرج درشت و هم‌چنین درصد جریان آب در خاک افزایش می‌یابد. لیتچ و الکایسی (2012) نشان دادند که خاک‌ورزی به دلیل شکستن حفرات درشت و فشرده کردن حفرات ریز، نفوذ آب به خاک را کاهش می‌دهد. بنابراین تغییر روش خاک‌ورزی از روش‌های رایج به روش‌های حفاظتی اجتناب ناپذیر است. خاک‌ورزی حفاظتی سبب بهبود ساختمان خاک، افزایش راندمان آب و کاهش هزینه تولید می‌شود (دویتا و همکاران، 2007). اثر مثبت خاک-

ورزی حفاظتی بر قدرت نگهداری آب خاک و بهبود ساختمان خاک توسط سایر محققان گزارش شده است (آلوز و استینیچ، 2009؛ ایرینا و همکاران، 2012). فان و همکاران (2013) نشان دادند که شدت نفوذ آب به خاک در سامانه بی‌خاک‌ورزی از  $1/6$  تا  $2/1$  و مقدار آب نفوذ یافته از  $1/4$  تا 2 برابر بیشتر از سامانه خاک‌ورزی رایج بود که احتمالاً دلیل آن افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها و موجودات مفید خاکزی و ایجاد خلل و فرج درشت در خاک می‌باشد. هم‌چنین، نتایج نشان داده است که حفظ و نگهداری بقایای گیاهی در سطح خاک و در بلند مدت منجر به افزایش کربن آلی خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش تراکم خاک می‌شود (آناهی-دومینگو و همکاران، 2015). مولامبا و لال (2008) گزارش کردند که میزان آب قابل استفاده گیاه و تخلخل کل خاک با حفظ بقایای گیاهی غلات به عنوان مالچ افزایش یافت. لال (2009) بیان کرد که برگرداندن بقایای گیاهی به خاک سبب بهبود نفوذپذیری آب به خاک می‌شود.

در اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک و تعیین پارامترهای آن روش‌های مختلفی بیان شده است، که استفاده از مدل‌های تعیین نفوذ آب به خاک از اتلاف وقت و کاهش هزینه‌های مطالعه که برای اندازه‌گیری نفوذ آب به خاک در سطح وسیع لازم است، جلوگیری می‌شود (نشاط و پاره‌کار، 1386). به‌طور کلی مدل‌های نفوذ آب به خاک، شامل مدل‌هایی با اساس فیزیکی و یا تجربی می‌باشد (لارسون و ایلیاسون، 2006). در مدل‌هایی با اساس فیزیکی مانند مدل گرین-آمیت و فیلیپ با تکیه بر مبنای فیزیکی سعی در ساده‌سازی شرایط اولیه و شرایط مرزی در معادله جریان در محیط غیراشباع شده است. این فرضیات، داده‌های فیزیکی مورد نیاز این مدل‌ها را کاهش می‌دهد اما از کارایی آن‌ها به سبب تغییر شرایط اولیه و مرزی می‌کاهد (آگروکاستریتی و کرکیدز، 2003). مدل‌های تجربی از جمله کوستیاکوف، هورتون، کوستیاکوف-لوتیز و مدل حفاظت خاک آمریکا به لحاظ فرضیاتی که به شرایط سطح خاک و نیم‌رخ خاک مربوط می‌شود، دارای محدودیت کم‌تری هستند و در عوض به شرایطی که به آن واسنجی شده‌اند، محدود می‌گردند (سعدی‌خانی و سهرابی، 1396). مطالعات گسترده‌ای در زمینه ارزیابی و مقایسه عملکرد مدل‌های نفوذ آب به خاک در شرایط متفاوت انجام شده است (میشرا و همکاران، 2003؛ رشیدی و سیفی، 2007؛ قربانی دشتکی و همکاران، 2009). ذوالفقاری و همکاران (2012) گزارش کردند که براساس آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین، مدل کوستیاکوف-لوتیز و مدل سازمان حفاظت-

گیاهی، پژوهشی مزرعه‌ای در دو سال زراعی 95-1394 و 96-1395 در تناوب گندم-ذرت (الگوی غالب منطقه) و در دو فصل زراعی (چهار کشت) در مرکز تحقیقات کشاورزی زرقان، استان فارس با متوسط بارندگی سالانه درازمدت 235 میلی‌متر (طول جغرافیایی  $52^{\circ}71'35''$  شرقی و عرض جغرافیایی  $29^{\circ}76'42''$  شمالی و ارتفاع 1596 متر از سطح دریا) خاکی با مشخصات (Fine, Carbonatic, Thermic, Typic Calcixerpts) به صورت کرت‌های یک بار خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل مدیریت بقایای گیاهی در دو سطح (حفظ بقایای گیاهی) به صورت ایستاده و حذف تمام بقایای گیاهی از سطح خاک) به عنوان فاکتور اصلی و روش خاک‌ورزی در سه سطح (خاک‌ورزی رایج (شخم با گاوآهن برگردان‌دار، دیسک و تراز کردن به وسیله ترازکننده کششی)، کم خاک‌ورزی (یک بار استفاده از خاک‌ورز مرکب متشکل از پنجه‌غازی و روتاری) و بی خاک‌ورزی (بدون هیچ‌گونه عملیات شخم یا خاک‌ورزی)) به عنوان فاکتور فرعی بودند. گندم در اواسط آبان ماه 1394 در مزرعه کشت و در اواخر خرداد ماه 1395 برداشت شد. سپس گیاه زراعی ذرت در تناوب قرار گرفت و در مهرماه برداشت شد. در ادامه تناوب گندم در آبان ماه 1395 کشت و سپس در خرداد ماه 1396 برداشت گردید.

ذرت در اوایل تابستان کشت و در اواخر مهرماه برداشت شد. ابعاد کرت‌های آزمایشی  $20 \times 6$  متر بود. در کشت گندم، هر کرت شامل 30 خط کاشت و فاصله خطوط کاشت 20 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در کشت ذرت، هر کرت شامل 8 خط کاشت و فاصله خطوط کاشت 70 سانتی‌متر بود. فاصله‌ی بین کرت‌های فرعی 2 متر و تکرارها 8 متر در نظر گرفته شد. قبل از کشت یک نمونه خاک مرکب از عمق صفر تا 30 سانتی‌متری تهیه و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با روش‌های استاندارد معمول در موسسه تحقیقات خاک و آب اندازه‌گیری شد (جدول 2). در طول فصل رشد، مزرعه با روش غرقابی آبیاری شد. همچنین، با کاربرد چندین نوبت سمپاشی با علفکش‌های مناسب و اختصاصی برای هر گیاه زراعی، علف‌های هرز کنترل شد. در تیمار حفظ بقایا، محصول به وسیله دستگاه کمباین برداشت شد، به طوری که حدود 30 درصد بقایای گیاهی به صورت ایستاده با ارتفاع حدود 30 سانتی‌متر باقی ماند. در شرایط حذف بقایا، گیاه از محل طوقه در سطح خاک کف‌بُر و از مزرعه خارج شد.

خاک آمریکا در تمام خاک‌های مورد مطالعه در ایران (شامل بافت خاک مالی‌سویل، اریدی‌سویل، اینسیتی‌سویل و آنتی‌سویل) به ترتیب مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین مدل‌ها بودند. میرزایی و همکاران (2014) نشان دادند که مدل کوستیاکوف-لوتیز در بیش از 50 درصد خاک‌های مورد مطالعه در ایران (شامل بافت خاک لوم رُسی و لوم سیلنتی) مناسب‌ترین مدل برآورد نفوذ تجمعی بود. فکوری و همکاران (2013) بیان کردند که در کاربری کشاورزی مدل‌های هورتون، کوستیاکوف و کوستیاکوف-لوتیز از دقت بالاتری در برآورد سرعت نفوذ و نفوذ تجمعی برخوردار بودند. شوکلا و همکاران (2003) نشان دادند که در مقایسه با سایر مدل‌های مورد بررسی، مدل هورتون دارای بهترین عملکرد در بیان کمی فرآیند نفوذ آب به خاک بود. آن‌ها گزارش کردند که ضرایب معادلات نفوذ از جمله هدایت هیدرولیکی نزدیک به اشباع و جذب آب خاک تابعی از زمان بوده و در سامانه بی خاک‌ورزی و همراه با کاربرد کود دامی در مقایسه با سایر تیمارها بیشتر بود. نشاط و پاره‌کار (1386) نشان دادند که عملکرد مدل کوستیاکوف در مقایسه با مدل‌های گرین-امپت، فیلیپ، هورتون و سازمان حفاظت خاک آمریکا در برآورد نفوذ تجمعی و با در نظر گرفتن آماره‌ی ضریب تبیین مناسب-ترین مدل برای برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ آب به خاک (شامل بافت خاک لوم رُسی، رُسی و لومی) بود. ماریا-آپراسیدا و همکاران (2014) دریافتند که مدل هورتون برای ارزیابی نفوذ آب به خاک (بافت خاک اُتی-سول) در سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی مناسب‌ترین بود. توماسینی و همکاران (2010) نشان دادند که مدل هورتون در خاک‌های اکسی‌سول تحت سامانه‌های مختلف خاک-ورزی بهترین مدل در ارزیابی نفوذ آب به خاک بود. با توجه به اهمیت نفوذ و حرکت آب در خاک به خصوص در تناوب گیاهان زراعی و همچنین، تحقیقات اندکی که در خصوص ارزیابی مدل‌های مختلف نفوذ آب به خاک در سامانه‌های مختلف خاک‌ورزی انجام شده است، هدف از انجام این پژوهش ارزیابی کارایی چندین مدل نفوذ آب به خاک تحت تأثیر تلفیق روش‌های مختلف خاک‌ورزی و مدیریت بقایای گیاهی در تناوب گندم-ذرت در استان فارس بود.

## مواد و روش‌ها

به منظور بررسی و تعیین بهترین مدل نفوذ آب به خاک شامل مدل‌های کوستیاکوف، کوستیاکوف-لوتیز، فیلیپ، هورتون و سازمان حفاظت خاک آمریکا (جدول 1) تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی و مدیریت بقایای

جدول 1- شرح مدل‌های مورد بررسی و پارامترهای آن‌ها

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

I\* نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) و t زمان (دقیقه) می‌باشد. S\*\* و K به ترتیب ضریب جذب آب خاک (cm/ $\sqrt{\text{min}}$ )

و معیاری از هدایت هیدرولیکی اشباع (cm/min) در مدل فیلیپ، k ضریب تجربی معادله کوستیاکوف (cm/min)<sup>b</sup>، k'، b' و A' ضرایب تجربی مدل کوستیاکوف- لوییز به ترتیب با ابعاد (cm/min)<sup>b</sup>، (بدون واحد) و (cm/min) می‌باشد.

که در آن Pi مقدار برازش یا برآورد، Oi مقدار اندازه‌گیری شده یا مشاهده و n تعداد داده‌های مدل‌سازی شده می‌باشد. ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) و کارایی مدل (EF) به ترتیب از معادله‌های 2 و 3 محاسبه گردید.

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

$$EF = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2]}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{ave})^2} \quad (3)$$

که در آن Pi، Qi، n مشابه معادله 1 و O<sub>ave</sub> و P<sub>ave</sub> به ترتیب میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر برازش داده شده می‌باشد. کارایی مدل بین صفر تا 1 متغیر است (گاهی اوقات این شاخص به صورت درصد نیز بیان می‌شود). زمانی که کارایی مدل برابر با 1 باشد مقدار نفوذ تجمعی برآورد شده برابر با مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده خواهد بود. برای ارزیابی کارایی مدل‌های مختلف نفوذ آب به خاک براساس آماره‌های ذکر شده، از روش رتبه‌بندی براساس کراؤس و همکاران (2005) استفاده شد. شیوه رتبه‌بندی بدین صورت بود مدلی که از کمترین RMSE اما از بیشترین EF و R<sup>2</sup> برخوردار باشد بهترین رتبه (کمترین عدد) به آن تعلق گرفت. این کار برای هر تیمار جداگانه صورت گرفت. در مرحله بعد هر مدلی که مجموع رتبه‌های کسب شده کمتری در کلیه تیمارهای یک مجموعه را داشت، بهترین رتبه نهایی (کمترین عدد) را کسب نموده و به عنوان بهترین مدل نفوذ برای آن مجموعه شناسایی شد. در نهایت، میانگین رتبه‌ها به عنوان رتبه نهایی مدل در نظر گرفته شد.

فرآیند نفوذ آب به خاک با استفاده از روش استوانه-های دوگانه (مضاعف) پس از برداشت هر گیاه زراعی و با 3 تکرار انجام شد (54 تست نفوذ) که جمعاً برای هر دو محصول گندم و ذرت 108 تست نفوذ مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری نفوذ استوانه‌ها به صورت هم‌مرکز حدود 15 سانتی‌متر در خاک فرو رفتند. سپس بین دو استوانه و درون استوانه داخلی آب ریخته شد و میزان نفوذ آب به خاک (حجم آب نفوذ یافته به خاک) در طول آزمایش از زمان شروع آزمایش تا دقیقه دوم آزمایش فواصل زمانی 15 ثانیه، از دقیقه دوم تا دقیقه دهم با فاصله زمانی یک دقیقه و پس از آن در فواصل زمانی مناسب تا رسیدن به شرایط پایدار ثبت شد. قبل از انجام آزمایش نفوذ، جهت اندازه‌گیری رطوبت اولیه خاک، از خاک مجاور محل‌های اندازه‌گیری، نمونه‌برداری و با روش وزنی رطوبت خاک تعیین شد. هر یک از مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، کوستیاکوف- لوییز، فیلیپ، سازمان حفاظت خاک آمریکا و هورتون (جدول 1) با استفاده از ابزار بهینه‌سازی در نرم افزار اکسل 2013 با معادله‌های مختلف نفوذ به روش غیرخطی برازش داده شدند. این فرآیند به نحوی انجام شد که شاخص آماری ریشه میانگین مربعات خطا حداقل شود. از شاخص‌های ارزیابی درستی تخمین: ضریب تبیین (R<sup>2</sup>)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد کارایی (EF) استفاده گردید (جوادی و همکاران، 1393؛ ثامنی و همکاران، 1393؛ قربانی دشتکی و همکاران، 2010). میانگین مربعات خطا (MSE) که خطای برآورد شده را در کل منحنی نفوذ نشان می‌دهد، به شرح معادله 1 تعیین گردید. این آماره همواره مثبت بوده و با نزدیک شدن آن به صفر، عملکرد مدل مورد بررسی افزایش می‌یابد. معادله 1:

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

جدول 2- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش

ویژگی‌های خاک	مقدار (میانگین)
شن (درصد)	15/2
سیلت (درصد)	48/6
رُس (درصد)	36/2
قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی‌زیمنس بر متر)	0/65
اسیدیته در خمیر اشباع خاک	7/9
ماده آلی خاک (درصد)	1/01
کربنات کلسیم معادل (درصد)	40/5
کلاس بافت خاک	لوم رُسی سیلتی

## نتایج و بحث

شاخص‌های آماری شامل ضریب تبیین، میانگین مربعات خطا و کارایی مدل برای هر کدام از مدل‌های نفوذ آب به خاک تحت تأثیر روش‌های مختلف خاک-ورزی و مدیریت بقایا در تناوب گندم-ذرت محاسبه شده است. در کشت گندم، بیشترین کارایی مدل (99/9 درصد) با کمترین میانگین مربعات خطا (0/07) در سامانه خاک‌ورزی رایج برای مدل کوستیاکوف- لوئیز به دست آمد که در شرایط حذف بقایا نسبت به مدل‌های حفاظت خاک آمریکا، فیلیپ، کوستیاکوف و هورتون به ترتیب 0/5، 0/1، 0/3 و 0/2 درصد از کارایی بالاتری برخوردار بود. در مقابل، حفظ بقایای گیاهی به صورت ایستاده منجر به افزایش بیشتر کارایی مدل کوستیاکوف- لوئیز نسبت به مدل‌های حفاظت خاک آمریکا، فیلیپ، کوستیاکوف و هورتون به ترتیب به میزان 0/5، 0/3، 0/8 و 0/2 درصد شد که به‌طور میانگین نسبت به شرایط حذف بقایا بیش از 60 درصد کارایی مدل کوستیاکوف- لوئیز را افزایش داد (جدول 3). در سامانه بی خاک‌ورزی (در کشت گندم)، بالاترین کارایی مدل (99/9 درصد) در مدل کوستیاکوف- لوئیز با میانگین مربعات خطا 0/085 مشاهده شد و سپس بیشترین کارایی مدل (99/8 درصد) در مدل فیلیپ با میانگین مربعات خطا 0/102 گزارش شد. در کشت ذرت، بیشترین کارایی مدل (99/8 درصد) در سامانه کم خاک‌ورزی و حذف بقایای گیاهی در مدل کوستیاکوف- لوئیز با میانگین مربعات خطا 0/119 حاصل شد. علاوه بر این، مدل هورتون با میانگین مربعات خطا 0/146 در سامانه بی خاک‌ورزی و حفظ بقایای گیاهی از کارایی بالایی (99/7 درصد) در ارزیابی وضعیت نفوذ آب به خاک برخوردار بود (جدول 3).

کارایی مدل‌های نفوذ آب به خاک بر مبنای رتبه‌بندی مدل‌ها و براساس شاخص‌های آماری ضریب تبیین، میانگین مربعات خطا و کارایی مدل در جدول 4 گزارش شده است. در تناوب گندم-ذرت و در تمام سطوح خاک-

ورزی و بقایا، پایین‌ترین رتبه (عدد 5) در تعیین کارایی مدل نفوذ آب به خاک برای مدل حفاظت خاک آمریکا حاصل شد. در حالی که در کشت گندم مدل کوستیاکوف و در کشت ذرت مدل فیلیپ از کارایی پایینی در پیش بینی وضعیت نفوذ آب به خاک برخوردار بودند (جدول 4). نتایج نشان داد در تناوب گندم- ذرت بیشترین رتبه (عدد 1) برای مدل کوستیاکوف- لوئیز در سامانه خاک‌ورزی رایج و کم خاک‌ورزی در شرایط حذف بقایا مشاهده شد در حالی که در سامانه بی خاک‌ورزی و حفظ بقایا بیشترین کارایی در ارزیابی وضعیت نفوذ آب به خاک در کشت گندم و ذرت به ترتیب در مدل کوستیاکوف- لوئیز و مدل هورتون مشاهده شد (جدول 4). علاوه بر این، به منظور تعیین بهترین مدل بر اساس هر سه شاخص آماری ضریب تبیین میانگین مربعات خطا و کارایی مدل به هر کدام از مدل‌ها رتبه‌ای بر اساس میانگین رتبه‌های هر سه آماره، اختصاص داده و در جدول 5 گزارش درج شده است. در کشت گندم و حذف بقایا، مدل کوستیاکوف- لوئیز در سامانه خاک-ورزی رایج و کم خاک‌ورزی و مدل هورتون در سامانه بی خاک‌ورزی از کارایی بالایی در ارزیابی وضعیت نفوذ آب به خاک برخوردار بودند. در کشت گندم و حفظ بقایا، مدل کوستیاکوف- لوئیز در سامانه خاک‌ورزی رایج و بی خاک‌ورزی و مدل هورتون در سامانه کم خاک‌ورزی و بی خاک‌ورزی و حذف بقایا، کارایی بالایی نشان دادند. در کشت ذرت و حذف بقایا، مدل کوستیاکوف- لوئیز در سامانه خاک‌ورزی رایج و کم خاک‌ورزی و مدل هورتون در سامانه بی خاک-ورزی کارایی بالایی در ارزیابی وضعیت نفوذ آب به خاک داشتند. در مقابل، در شرایط حفظ بقایا مدل هورتون در تمام سطوح خاک‌ورزی از کارایی بالایی در ارزیابی نفوذ آب به خاک برخوردار بود. نتایج نشان داد کمترین رتبه (عدد 5) برای مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در تمام سطوح خاک‌ورزی و مدیریت بقایا گزارش شد (جدول 5).

کشت ذرت		کشت گندم		شاخص‌های آماری	روش‌های خاک‌ورزی	مدل نفوذ آب به خاک
حفظ بقایا (30 درصد بقایا)	حذف بقایا	حفظ بقایا (30 درصد بقایا)	حذف بقایا			
0/979	0/985	0/994	0/995	R <sup>2</sup>	خاک‌ورزی رایج	مدل حفاظت خاک آمریکا
0/719	0/325	0/230	0/198	RMSE		
97/5	97/81	99/21	99/41	EF		
0/989	0/993	0/992	0/996	R <sup>2</sup>	کم خاک‌ورزی	مدل حفاظت خاک آمریکا
0/450	0/252	0/367	0/298	RMSE		
98/7	99/20	99/00	99/42	EF		
0/982	0/975	0/994	0/821	R <sup>2</sup>	بی‌خاک‌ورزی	مدل فیلیپ
0/425	0/371	0/224	0/179	RMSE		
97/60	96/40	99/30	81/9	EF		
0/980	0/984	0/830	0/998	R <sup>2</sup>	خاک‌ورزی رایج	مدل کوستیاکف
0/652	0/322	0/117	0/116	RMSE		
97/8	99/2	99/70	99/8	EF		
0/992	0/998	0/995	0/998	R <sup>2</sup>	کم خاک‌ورزی	مدل کوستیاکف
0/422	0/138	0/276	0/197	RMSE		
98/73	99/8	99/4	99/7	EF		
0/990	0/990	0/998	0/827	R <sup>2</sup>	بی‌خاک‌ورزی	مدل کوستیاکف
0/281	0/218	0/102	0/134	RMSE		
98/9	99/8	99/8	82/60	EF		
0/985	0/996	0/995	0/996	R <sup>2</sup>	خاک‌ورزی رایج	مدل کوستیاکف - لوئیز
0/571	0/132	0/140	0/162	RMSE		
98/3	99/6	99/5	99/6	EF		
0/993	0/998	0/995	0/998	R <sup>2</sup>	کم خاک‌ورزی	مدل کوستیاکف - لوئیز
0/324	0/130	0/236	0/148	RMSE		
99/3	99/8	99/83	99/8	EF		
0/992	0/991	0/998	0/825	R <sup>2</sup>	بی‌خاک‌ورزی	مدل کوستیاکف - لوئیز
0/253	0/200	0/122	0/144	RMSE		
99/1	99/00	99/84	82/5	EF		
0/986	0/996	0/999	0/999	R <sup>2</sup>	خاک‌ورزی رایج	مدل کوستیاکف - لوئیز
0/564	0/125	0/073	0/070	RMSE		
98/3	99/61	99/99	99/9	EF		
0/994	0/998	0/840	0/999	R <sup>2</sup>	کم خاک‌ورزی	مدل کوستیاکف - لوئیز
0/291	0/119	0/353	0/129	RMSE		
99/4	99/80	83/3	99/9	EF		
0/992	0/991	0/999	0/830	R <sup>2</sup>	بی‌خاک‌ورزی	مدل هورتون
0/246	0/196	0/085	0/089	RMSE		
99/2	99/0	99/9	83/0	EF		
0/994	0/992	0/998	0/997	R <sup>2</sup>	خاک‌ورزی رایج	مدل هورتون
0/383	0/168	0/125	0/134	RMSE		
99/30	99/10	99/8	99/73	EF		
0/996	0/994	0/997	0/998	R <sup>2</sup>	کم خاک‌ورزی	مدل هورتون
0/264	0/210	0/211	0/192	RMSE		
99/50	99/40	99/64	99/80	EF		
0/997	0/995	0/996	0/830	R <sup>2</sup>	بی‌خاک‌ورزی	مدل هورتون
0/146	0/155	0/178	0/084	RMSE		
99/70	99/4	99/61	83/09	EF		

RMSE, R<sup>2</sup> (واحد: توان دوم واحد داده ها) و EF به ترتیب عبارتند از: ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و درصد کارایی مدل. همچنین، تعداد مشاهدات (n) برای هر محصول 54 نقطه بود.

جدول 4- رتبه‌های اختصاص یافته به مدل‌های نفوذ بر اساس شاخص‌های آماری محاسبه شده در روش‌های مختلف خاک‌ورزی، مدیریت بقایا در تناوب گندم-ذرت

مدل نفوذ آب به خاک															تیمارها	
هورتون			کوستیاکوف - لوئیز			کوستیاکوف			فیلیپ			حفاظت خاک آمریکا			خاک‌ورزی	مدیریت بقایا
E	RMS	R <sub>2</sub>	EF	RMS	R <sub>2</sub>	EF	RMS	R <sub>2</sub>	EF	RMS	R <sub>2</sub>	EF	RMS	R <sub>2</sub>		
F	E			E			E		E	E		E	E			
کشت گندم																
3	3	3	1	1	1	4	4	4	2	2	2	5	5	5	خاک‌ورزی رایج	حذف بقایا
2	3	2	1	1	1	2	2	3	3	4	3	4	5	4	کم خاک-ورزی	
2	2	1	2	2	2	4	4	4	3	3	3	5	5	5	بی خاک-ورزی	
2	3	2	1	1	2	4	4	3	3	2	4	5	5	4	خاک‌ورزی رایج	
2	1	1	2	2	3	1	3	2	3	5	2	4	4	5	کم خاک-ورزی	حفظ بقایا (30 درصد بقایا)
4	4	3	1	1	1	2	3	2	3	2	2	5	5	4	بی خاک-ورزی	
کشت ذرت																
4	3	2	1	1	1	1	2	1	3	4	3	5	5	4	خاک‌ورزی رایج	حذف بقایا
2	4	2	1	1	1	1	2	1	1	3	1	3	5	3	کم خاک-ورزی	
1	1	1	2	2	2	3	3	2	1	4	3	4	5	4	بی خاک-ورزی	
1	1	1	2	2	2	3	3	3	5	4	4	4	5	5	خاک‌ورزی رایج	
1	2	1	2	1	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	کم خاک-ورزی	حفظ بقایا (30 درصد بقایا)
1	1	1	2	2	2	3	3	2	4	4	3	5	5	4	بی خاک-ورزی	

شاخص‌های آماری مورد مطالعه نشان داد مدل هورتون مناسب‌ترین مدل در کشت ذرت برای برآورد نفوذ تجمعی بود اما از نظر نوع مدل مناسب بین تیمارهای مختلف خاک‌ورزی و بقایا تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد.

البته در برخی از تیمارهای خاک‌ورزی و بقایا برخی از مدل‌ها، مقدار نفوذ تجمعی را بیشتر و در برخی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد نمودند. به نظر می‌رسد پایین بودن میانگین مربعات خطا در مدل کوستیاکوف- لوئیز تحت تأثیر روش‌های خاک‌ورزی در تناوب گندم-ذرت نسبت به سایر مدل‌ها مورد ارزیابی از جمله مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا، نشان‌دهنده مقدار خطای برآورد شده کمتر در کل منحنی نفوذ آب به خاک و افزایش کارایی این مدل در ارزیابی نفوذ آب به خاک بود. درحالی که، مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا برای اکثر تیمارها دارای بیشترین خطای برآورد است که با

مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری و برآورده شده با استفاده از مدل‌های نفوذ برای کشت گندم و ذرت به ترتیب در شکل 1 و 2 نشان داده شده است. همان‌گونه که شکل 1 نشان می‌دهد در کشت گندم، بیشترین تطابق میان نفوذ اندازه‌گیری و برآورد شده با استفاده از مدل‌های مورد مطالعه در شرایط خاک‌ورزی رایج و کم خاک‌ورزی با حفظ بقایا (به ترتیب شکل 1 ج و ح) مشاهده شد در حالی که در سایر تیمارهای مدیریت خاک‌ورزی و بقایا با گذشت زمان از شروع فرآیند نفوذ، اختلاف میان نفوذ تجمعی اندازه‌گیری و برآورد شده افزایش یافت. در مقابل در کشت ذرت، بیشترین اختلاف میان نفوذ اندازه‌گیری و برآورد شده با استفاده از مدل‌های نفوذ مورد مطالعه در سامانه بی خاک‌ورزی و حذف بقایا مشاهده شد (شکل 2 ج) در حالی که حفظ بقایا در این سامانه منجر به افزایش تطابق نفوذ اندازه‌گیری و برآورد شده گردید (شکل 2 خ). هرچند رتبه بندی مدل‌ها با استفاده از

سازگاری کافی ندارد (قربانی دشتکی و همکاران، 2009). مظلوم و فولادمند (2013) گزارش کردند که مدل کوستیاکوف نسبت به مدل فیلیپ برای برآورد نفوذ تجمعی آب به خاک در شرایط اندازه‌گیری شده با استوانه‌های مضاعف در شهرستان مرودشت استان فارس تحت تأثیر سامانه خاک‌ورزی رایج مناسب‌ترین بود. جوادی و همکاران (1393 و 1396) گزارش کردند که مدل‌های نفوذ تجربی (کوستیاکوف- لوئیز و هورتون) نسبت به مدل‌های فیزیکی (فلیپ) کارایی بهتری در برآورد نفوذ تجمعی در شرایط اولیه و مرزی مختلف داشتند. این یافته با نتایج چاهینیان و همکاران (2005) که نشان دادند مدل‌های تجربی به دلیل در نظر گرفتن عوامل مؤثر بر نفوذ (مانند بافت خاک، کیفیت آب، رطوبت اولیه خاک، جرم مخصوص ظاهری خاک و شرایط لایه سطح خاک) از کارایی بالاتری در ارزیابی نفوذ آب به خاک برخوردار می‌باشد، هم‌خوانی دارد.

#### نتیجه‌گیری

فرآیند نفوذ آب به خاک از پارامترهای مهم در طراحی سامانه‌های آبیاری و تخمین مقدار آب مورد نیاز گیاهان می‌باشد و استفاده از مدل‌های ارزیابی نفوذ آب به خاک در جهت انتخاب مناسب‌ترین سامانه آبیاری امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های کوستیاکوف-لوئیز و هورتون در برآورد نفوذ آب به خاک از روند پایدارتری برخوردار هستند به گونه‌ای که تحت تأثیر سامانه‌های متفاوت خاک‌ورزی و مدیریت بقایا گیاهی مناسب‌ترین مدل ارزیابی نفوذ آب به خاک در کشت گندم بودند. در کشت ذرت، مدل کوستیاکوف- لوئیز در شرایط حذف بقایا و مدل هورتون در شرایط حفظ بقایا بهترین عملکرد را در بررسی وضعیت نفوذ آب به خاک نشان داد. اگرچه در تمام سامانه‌های خاک‌ورزی و سطوح بقایا مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در تناوب گندم-ذرت نامناسب‌ترین کارایی را در ارزیابی نفوذ آب به خاک داشت. بطورکلی، در مناطق نیمه‌خشک از جمله زرقان که مدل‌های نفوذ آب به خاک تحت تأثیر رطوبت خاک و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قرار دارند، این عوامل باعث می‌شوند که دقت مدل در برآورد نفوذ متفاوت باشد، در نتیجه جهت کمی‌سازی فرآیند نفوذ آب به خاک مدل‌های کوستیاکوف- لوئیز و هورتون به ترتیب در کشت گندم و ذرت قابل توصیه است اگرچه جهت پیشنهاد مدلی برای برآورد واقعی مقدار نفوذ آب به خاک همچنان به تحقیقات بیشتری نیاز است.

نتایج مطالعات ذوالفقاری و همکاران (2012) مطابقت دارد. براساس آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تبیین، در مطالعه نامبرده شده نیز مدل کوستیاکوف- لوئیز و مدل سازمان حفاظت خاک آمریکا در تمام خاک‌های مورد مطالعه در ایران (شامل بافت خاک مالی‌سویل، اریدی‌سویل، اینسیتی‌سویل و آنتی‌سویل) به ترتیب مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین مدل‌ها بودند. ثامنی و همکاران (1393) نشان دادند که مدل نفوذ کوستیاکوف- لوئیز با میانگین ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و درصد کارایی به ترتیب  $0/997$ ،  $0/205$  و  $99/81$  و حفاظت خاک آمریکا با مقادیر  $0/992$ ،  $0/249$  و  $98/76$  به ترتیب بهترین و بدترین مدل‌های نفوذ در دو خاک لوم رُسی و لوم سیلتی بودند.

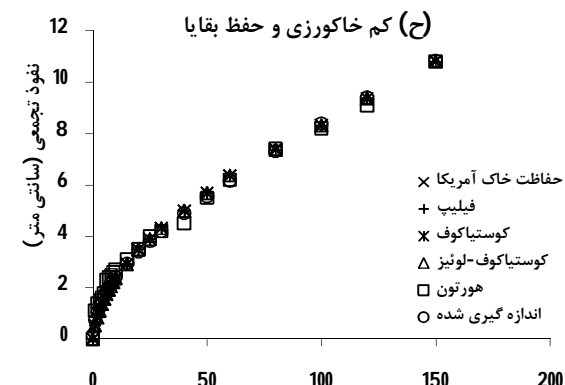
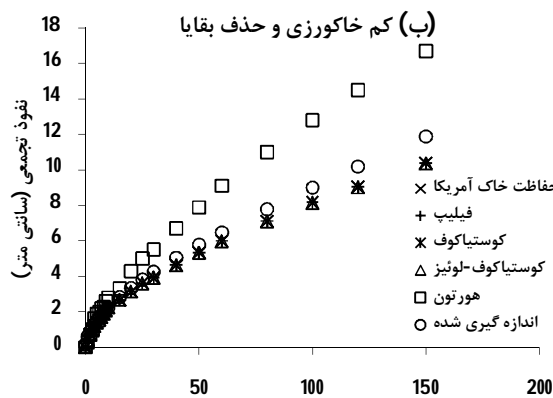
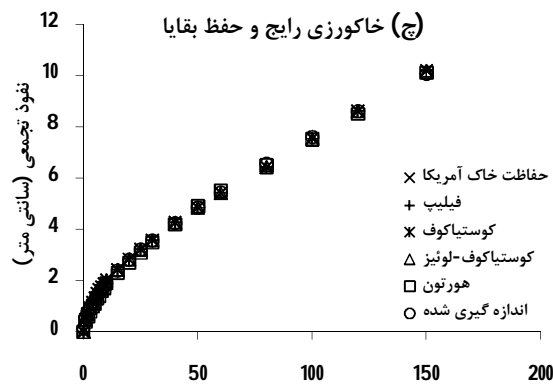
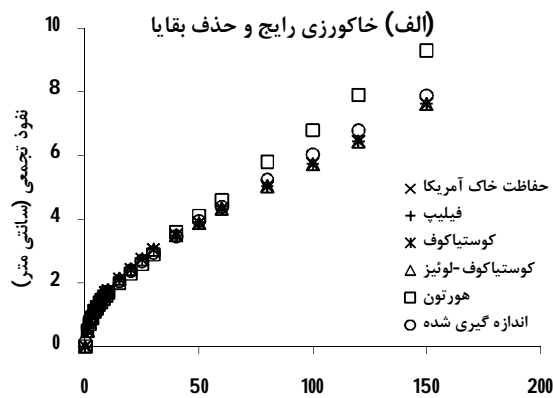
گودرزی و همکاران (1391) گزارش کردند که مدل کوستیاکوف در میان مدل‌های سازمان حفاظت خاک آمریکا، فیلیپ و کوستیاکوف-لوئیز برای مدل‌سازی نفوذ آب به خاک در شرایط اندازه‌گیری شده با استوانه‌های دوگانه در خاک‌های رسی مانند دشت اشترینان استان لرستان مناسب‌ترین بود. به نظر می‌رسد مدل‌های تجربی (کوستیاکوف- لوئیز و هورتون) به لحاظ فرضیاتی که به شرایط سطح خاک و نیم‌رخ خاک یعنی یکنواخت بودن خاک و رطوبت اولیه در نیم‌رخ خاک مربوط می‌شود، دارای محدودیت کمتری هستند و بر اساس پارامترهایی که از طریق برازش منحنی نفوذ تعیین می‌گردند و یا از روش‌های دیگر تخمین زده می‌شوند (سعدی‌خانی و سهرابی، 1396). از آنجا که روش تعیین آماره‌های مدل-های نفوذ آب به خاک برآزشی بود، یکی از دلایل برتری مدل‌های کوستیاکوف- لوئیز و هورتون بیشتر بودن تعداد پارامترهای آن‌ها نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه در این پژوهش می‌باشد. این ویژگی باعث انعطاف پذیری بیشتر این مدل‌ها در تعیین پارامترها می‌گردد. نیک قلب‌پور و همکاران (1395) نشان دادند که پارامتر K در معادله فیلیپ دارای وابستگی مکانی بالایی می‌باشد و پارامتر S دارای اثر قطعه‌ای است و با دانستن برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک میزان نفوذ در این مدل قابل تخمین است. درحالی که معادلات تجربی مانند کوستیاکوف به دلیل در نظر گرفتن شرایط واقعی نفوذ، دارای دقت بالایی می‌باشند.

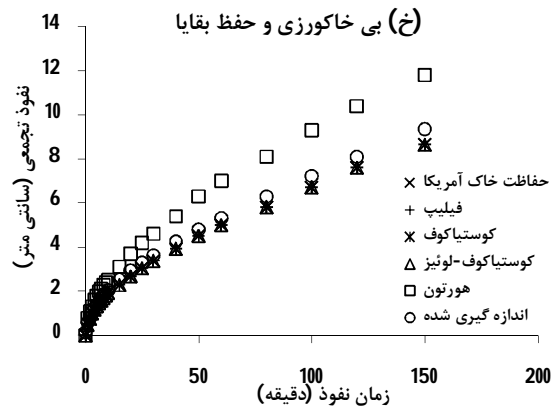
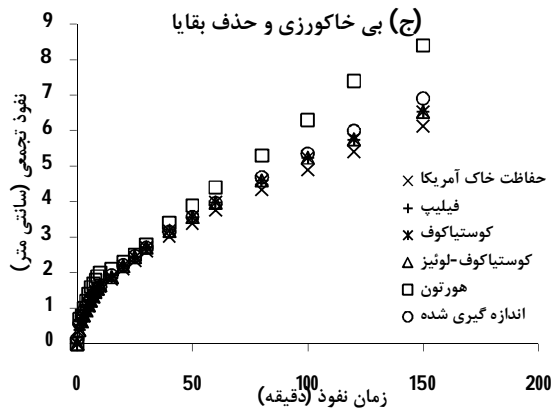
هم‌چنین، پایین بودن کارایی برخی مدل‌ها از جمله مدل فیلیپ در ارزیابی وضعیت نفوذ آب به خاک تحت تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی به دلیل برخی ساده‌سازی‌ها در شرایط مرزی و اولیه و یا همگن فرض شدن خاک در بنیان این مدل‌ها باشد که با شرایط طبیعی،



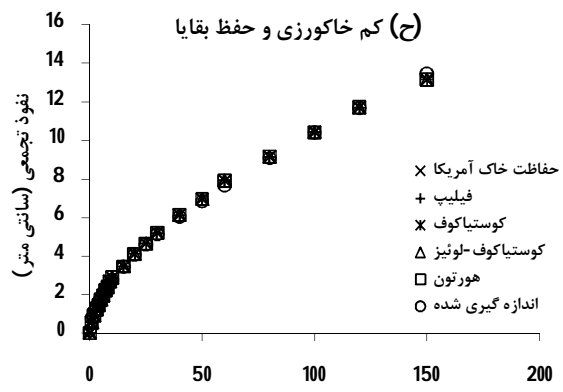
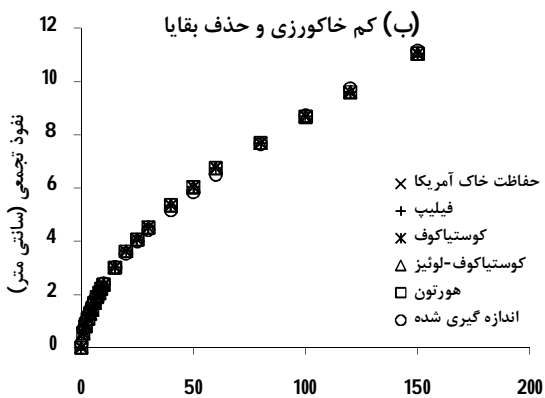
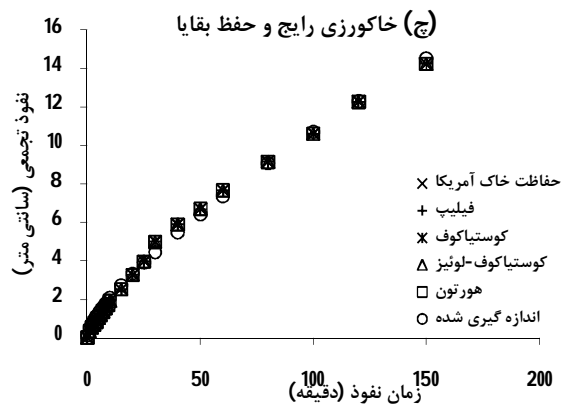
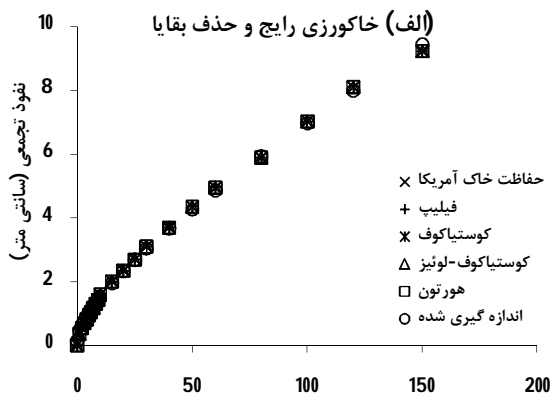
جدول 5- رتبه‌بندی مدل‌های نفوذ آب به خاک برای روش‌های مختلف خاک‌ورزی، مدیریت بقایا براساس میانگین رتبه حاصل از شاخص‌های ضریب تبیین، میانگین مربعات خطای نرمال شده و درصد کارایی مدل در تناوب گندم-ذرت

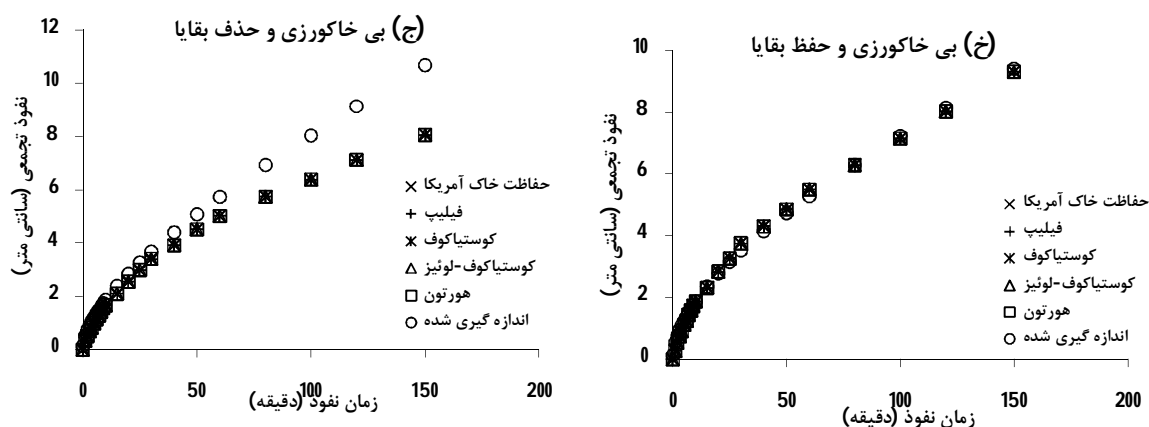
میانگین رتبه مدل‌های نفوذ براساس شاخص‌های محاسبه شده						
مدیریت بقایا	خاک‌ورزی	1	2	3	4	5
<b>کشت گندم</b>						
حذف بقایا	خاک‌ورزی رایج	کوستیاکوف- لوئیز	فیلیپ	هورتون	کوستیاکوف	حفاظت خاک آمریکا
	کم خاک‌ورزی	کوستیاکوف- لوئیز	هورتون	کوستیاکوف	فیلیپ	حفاظت خاک آمریکا
حفظ بقایا (30 درصد بقایا)	بی‌خاک‌ورزی	هورتون	کوستیاکوف- لوئیز	فیلیپ	کوستیاکوف	حفاظت خاک آمریکا
	خاک‌ورزی رایج	کوستیاکوف- لوئیز	هورتون	فیلیپ	کوستیاکوف	حفاظت خاک آمریکا
	کم خاک‌ورزی	هورتون	کوستیاکوف	کوستیاکوف- لوئیز	فیلیپ	حفاظت خاک آمریکا
<b>کشت ذرت</b>						
حذف بقایا	خاک‌ورزی رایج	کوستیاکوف- لوئیز	کوستیاکوف	هورتون	فیلیپ	حفاظت خاک آمریکا
	کم خاک‌ورزی	کوستیاکوف- لوئیز	کوستیاکوف	فیلیپ	هورتون	حفاظت خاک آمریکا
حفظ بقایا (30 درصد بقایا)	بی‌خاک‌ورزی	هورتون	کوستیاکوف- لوئیز	کوستیاکوف	فیلیپ	حفاظت خاک آمریکا
	خاک‌ورزی رایج	هورتون	کوستیاکوف- لوئیز	کوستیاکوف	فیلیپ	حفاظت خاک آمریکا
	کم خاک‌ورزی	هورتون	کوستیاکوف	کوستیاکوف- لوئیز	فیلیپ	حفاظت خاک آمریکا





شکل 1- مقایسه نفوذ تجمعی (سانتی‌متر) اندازه‌گیری و برآورد شده با مدل‌های نفوذ با گذشت زمان (دقیقه) تحت تأثیر مدیریت سامانه‌های خاک‌ورزی و بقایای گیاهی در کشت گندم (میانگین نقاط اندازه‌گیری شده در هر آزمایش)





شکل 2- مقایسه نفوذ نیتروژن (سانتی‌متر) اندازه‌گیری و برآورد شده با مدل‌های نفوذ با گذشت زمان (دقیقه) تحت تأثیر مدیریت سامانه‌های خاک‌ورزی و بقایای گیاهی در کشت ذرت (میانگین نقاط اندازه‌گیری شده در هر آزمایش)

### فهرست منابع:

1. پرجمی عراقی، ف.، م. میرلطیفی، ش. قربانی دشتکی و م. مهدیان. 1389. ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی و کاربری اراضی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. 23: 83-112.
2. جوادی، ع.، م. مشعل و ح. ابراهیمیان. 1393. ارزیابی عملکرد و حساسیت معادلات نفوذ نسبت به شرایط اولیه و مرزی مختلف در آبیاری جویچه‌ای. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. 28: 787-799.
3. جوادی، ع.، ب. مصطفی‌زاده‌فرد، م. شایان‌نژاد و م. ر. مصدقی. 1396. ارزیابی معادلات نفوذ آب به خاک در شرایط تلفیق کیفیت آب آبیاری، رطوبت اولیه خاک و بار آبی ثابت. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. 31: 469-482.
4. ثامنی، ع.، م. پاکجو، س. ع. ا. موسوی. و ع. ا. کامکارحقیقی. 1393. ارزیابی چند رابطه نفوذ آب به خاک با کاربرد آب-های شور و سدیمی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. 28: 395-408.
5. سدی خانی، م. ر. و ا. سهرابی. 1396. تأثیر کاربری اراضی بر کارایی برخی از مدل‌های نفوذ آب به خاک. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار. 7: 127-138.
6. گودرزی، ل.، ع. م. آخوندعلی و ح. زارعی. 1391. ارزیابی و تعیین ضرایب مدل‌های نفوذ آب به خاک در دشت اشتریان. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. 3: 39-44.
7. نشاط، ع.، و م. پاره‌کار. 1386. مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. 14: 186-195.
8. نیکچه، ا. ف.، م. وفاخواه، و ح. ر. صادقی. 1393. ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف نفوذ تجمع در کاربری‌ها و بافت‌های مختلف خاک با استفاده از شبیه ساز باران. نشریه دانش آب و خاک. 24: 183-193.
9. نیک قلب‌پور، م.، ح. اسدی، و م. گرجی. 1395. ارزیابی پراکنش مکانی سرعت نفوذ آب و ارتباط آن با برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه کوهین. نشریه پژوهش‌های خاک. 30: 201-213.
10. Alvarez, R., and H.S. Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*. 104: 1-15

11. Anahí Domínguez, J.C.B. 2015. Tillage effects on certain physical and hydraulic properties of a loamy soil under a crop rotation in a semi-arid region with a cool climate. *Applied Soil Ecology*. 98: 166-176.
12. Argyrokastriti, I., and P. Kerkides. 2003. A note to the variable sorptivity infiltration equation. *Water Resources Management*. 17: 133-145.
13. Chahinian, N., R. Moussa, P. Andrieux, and M. Voltz. 2005. Comparison of infiltration models to simulated flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*. 306: 191-214.
14. De Vita, P., E. Di Paolo, G. Fecondo, N. Di Fonzo, and M. Pisante. 2007. No tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil and Tillage Research*. 92: 69-78.
15. Fakuri, T., H. Emami, and B. Ghahreman. 2013. Estimation of cumulative penetration of water into the soil using the particle size distribution in different agricultural land uses. *Journal of Water Research and Agriculture*. 26: 379-390.
16. Fan, R., X. Zhang, X. Yang, A. Liang, S. Jia, and X. Chen. 2013. Effects of tillage management on infiltration and preferential flow in a black soil, Northeast China. *Chinese Geographical Science*. 23: 312-320.
17. Ghorbani Dashtaki, S., M. Homaeae, and M. Kouchakzadeh. 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.
18. Ghorbani Dashtaki, S., M. Homaeae, M.H. Mahdian, and M. Kouchakzadeh. 2009. Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resource Management*. 23: 1573-1650.
19. Goddard, T., M. Zoebisch, Y. Gan, W. Ellis, A. Watson, and S. Sombatpanit. 2008. No-till farming systems. World Association, Soil and Water Conservation (WASWC), Special, Publication No 3.
20. Irena, M., B. Andrzej, S. Zuzanna, and D. Tomasz. 2012. The effect of various long-term tillage systems on soil properties and spring barley yield. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 36: 217-226.
21. Krause, P., D. Boyle, and F. Base. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model. *Advances in Geosciences*. 5: 89-97.
22. Lal, R. 2009. Soil quality impacts of residue removal for bio-ethanol production. *Soil and Tillage Research*. 102: 233-241.
23. Lampurlanés, J., and C. Cantero-Martínez. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal*. 95: 526-536
24. Larsson, M., and S. Eliasson. 2006. The influence of land-use change, root abundance and macrospores on saturated infiltration rate-a field study on Western Java, Indonesia. *Water Resources Engineering*. 186: 85-97.
25. Licht, M., and M. Al-Kaisi. 2012. Less tillage for more water. Integrated Crop Management News, Iowa State University Extension and Outreach, Department of Agronomy.
26. Lipiec, B.U.J. 2009. Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction: The fractal approach. *Ecological Complexity*. 3:256-271.
27. Maria-Aparecida do, N.D.S., E. Panachuki, T.A. Sobrinho, P.T. Sanche de Oliveira, and D. B. Bicca Rodrigue. 2014. Water infiltration in an ultisol after cultivation of common bean. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 38: 1612-1620.
28. Mazloom, H., and H. Fooladmand. 2013. Evaluation and determination of the coefficients of infiltration models in Marvdasht region, Fars province. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*. 1: 822-829.
29. Mirzaee, S., A. Zolfaghari, M. Gorji, M. Dyck, and S. Ghorbani. 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.

30. Mishra, S.K., J.V. Tyagi, and V.P. Singh. 2003. Comparison of infiltration models. *Hydrological Processes*. 17: 2629–2652.
31. Mulumba, L.N., and R. Lal. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*. 98: 106-111
32. Ramazani, N., A.R. Barzegar, G. Sayyad, G.H. Haghnia, and Y. Mansuri. 2012. Effect of compaction on physical and hydraulic properties of a loamy soil. *Journal of Water and Soil*. 26: 214-225.
33. Rashidi, M., and K. Seyfi. 2007. Field comparison of different infiltration models to determine the soil infiltration for border irrigation method. *Journal of Agricultural & Environmental Science*. 2: 628-632.
34. Shukla, M.K., R. Lal, L.B. Ownes, and P. Unkefer. 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.
35. Tomasini, B. A., A.C.T. Vitorino, M.V. Garbiate, C.M.A. Souza, and T. Alves Sobrinho. 2010. Water infiltration in soil cultivated with sugarcane: Under different cropping systems and models of adjustment of infiltration equations. *Applied Engineering in Agriculture*. 30: 1060-1070.
36. Zolfaghari, A., S. Mirzaee, and M. Gorji. 2012. Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. *International Journal of Soil Science*. 7: 108-115.

## Evaluation of Water Infiltration Models Efficiency Affected by Tillage Systems and Residue Management in Wheat-Corn Rotation

J. Mirzavand<sup>1</sup>, A. M. Sameni, S. A. A. Moosavi, S. Afzalinia  
and N. A. Karimian

Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zarghan; E-mail: j.mirzavand@areeo.ac.ir

Associates Professor, Soil Science Department, School of Agriculture, Shiraz University; E-mail: asameni@hotmail.com

Associates Professor, Soil Science Department, School of Agriculture, Shiraz University; E-mail: aamousavi@gmail.com

Associate Professor, Agricultural Engineering Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Zarghan, Iran; E-mail: a.fzalinia@areeo.ac.ir

Professor, Soil Science Department, School of Agriculture; Shiraz University, E-mail: nkarimian@yahoo.com

Received: July, 2018 and Accepted: December, 2018

### Abstract

Water infiltration process into the soil is significantly affected by plant residue management and tillage systems, which are important factors for designing efficient irrigation systems, especially in arid and semi-arid regions. We aimed to estimate the coefficients of infiltration process models (including Kostiakov-Lewis, Kostiakov, Horton, SCS and Philip) and their performance under the effect of residue management (residue removal and retention) and different tillage systems (conventional tillage, reduced tillage, and no-tillage). The field experiment was conducted in wheat (*Triticum aestivum* L.)-corn (*Zea mays* L.) rotation based on split-plot design with three replications, in Zarghan, Fars province, during 2016 and 2017. The water infiltration process was determined by double ring method in three replications for each crop. Then, the statistical criteria of determination coefficient ( $R^2$ ), root mean square error (RMSE), and efficiency model (EF) were defined by Solver tools and used to quantify and classify the infiltration process models. In wheat cultivation and residue removal, the highest performance for estimating of water infiltration was obtained by Kostiakov-Lewis model under conventional tillage ( $R^2$ , RMSE, EF were 0.99, 0.07 and 99.99%, respectively). In the case of reduced tillage,  $R^2$ , RMSE, EF were 0.99, 0.13, and 99.99%, respectively), while Horton's model in corn cultivation and residue retention was the best model under no-tillage system ( $R^2$ , RMSE, EF were 0.99, 0.14 and 99.70%, respectively). Among tillage systems, the lowest performance of models was observed for SCS, Kostiakov, and Philip models in a wheat-corn-wheat rotation. Overall, to quantifying water infiltration process into the soil under arid and semi-arid region such as Zarghan, it is recommendable to apply Kostiakov-Lewis and Horton models in, respectively, wheat and corn fields.

**Keywords:** Horton Model, Kostiakov-Lewis Model, Reduced Tillage

<sup>1</sup> Corresponding author: Fars, Shiraz, Zarghan, Bakhshande Boulevard. Postcode: 7341653111