

## ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در کاربری‌های اراضی مختلف

مجید رئوف<sup>۱\*</sup> و زیبا صدائی آذر<sup>۲</sup>

### چکیده

در این پژوهش مقدار سرعت نفوذ آب در خاک با استفاده از پنج مدل نفوذ فیلپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف- لوییس، گرین- آمپت و هورتون برآورد شد. آزمایش‌های نفوذ با دستگاه استوانه‌های مضاعف، در سه کاربری اراضی مختلف شامل کاربری جنگل، مرتع و کشاورزی واقع در منطقه فندق‌لو اردبیل انجام شد. برای تعیین بهترین مدل در بین سه کاربری از محک‌های آماری RE، RMSE و  $R^2$  استفاده شد. نتایج نشان داد که برای کاربری جنگل، مدل کوستیاکوف- لوییس (RE، RMSE و  $R^2$  به ترتیب برابر با ۰/۶۱۴، ۰/۰۲۳، ۰/۹۱۱۹)، برای کاربری مرتع مدل گرین- آمپت (RE، RMSE و  $R^2$  به ترتیب برابر با ۲/۸۲۴، ۰/۰۵۶، ۰/۹۱۹۶) و برای کاربری کشاورزی مدل فیلپ (RE، RMSE و  $R^2$  به ترتیب برابر با ۲/۹۰۱، ۰/۰۴۶، ۰/۸۴۰۸) با توجه به خطای آماری کمتر بهترین مدل برای کمی کردن سرعت نفوذ آب در خاک شناخته شدند. مدل‌های نفوذ فیلپ و گرین- آمپت تا حدودی بیشتر از سایر مدل‌ها مقدار سرعت نفوذ را نزدیک به هم تخمین می‌زنند زیرا هر دو اساس فیزیکی دارند. مدل نفوذ هورتون در دو کاربری مرتع و کشاورزی دارای بیشترین خطای آماری در بین مدل‌ها بوده و یک مدل بیش‌برآورد برای کمی کردن سرعت نفوذ آب تشخیص داده شد.

**واژه‌های کلیدی:** استوانه‌های مضاعف، فندق‌لو، کاربری اراضی، مدل بهینه نفوذ، نفوذ.

**ارجاع:** رئوف م. و صدائی آذر ز. ۱۳۹۵. بررسی ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در کاربری‌های اراضی مختلف. مجله پژوهش آب ایران. ۲۱: ۳۶-۲۷.

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

\*نویسنده مسئول: [majidraof2000@yahoo.co.uk](mailto:majidraof2000@yahoo.co.uk)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۷/۲۲

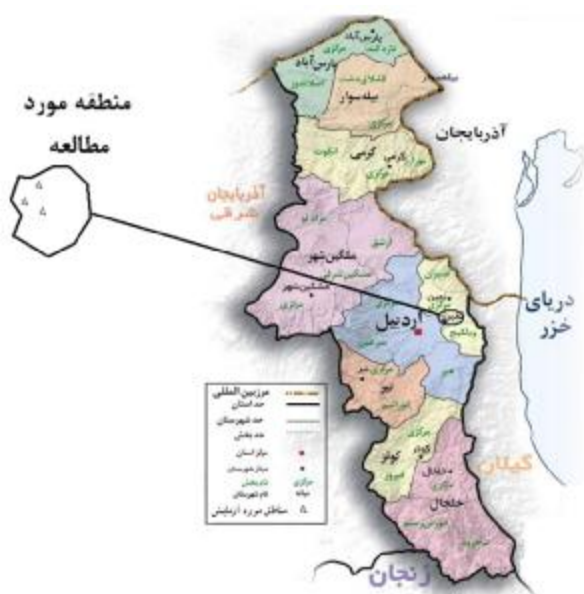
## مقدمه

نفوذ آب به خاک به‌عنوان فرایند اولیه ورود آب از سطح خاک به داخل ناحیه غیراشباع خاک است. این فرایند یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی بوده و یکی از مهم‌ترین پارامترهای خاک است که ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شرایط سطحی خاک و کیفیت آب روی آن تأثیر دارند. نفوذ آب به داخل خاک تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی و ضریب زبری سطح خاک (رئوف و همکاران ۲۰۰۹a)، خصوصیات فیزیکی خاک (رئوف b ۲۰۰۹)، شیب زمین و آهنگ پخش آب (رئوف، ۱۳۸۸) قرار می‌گیرد. کمی کردن پدیده نفوذ آب به خاک در مدیریت حوضه‌های آبخیز مهم است (مخیبیر، ۲۰۰۸). از طرفی کمی کردن این پدیده برای تخمین مقدار و زمان آب آبیاری و نیز تعیین مقدار آب قابل استفاده برای رشد گیاه مهم است (فیلیپ، ۱۹۵۷a).

برای کمی کردن این پدیده دو روش وجود دارد. در روش اول از یکسری قوانین و روابط اثبات شده مانند قانون بقای جرم (معادله ریچاردز) و قانون بقای انرژی (قانون دارسی) استفاده شده است که پس از تلفیق آن‌ها معادلات ریاضی نفوذ مانند معادله فیلیپ، هورتون و گرین-آمپت به دست می‌آید. این مدل‌ها یک مدل تخمینی با اساس فیزیکی هستند. مهم‌ترین حسن آن‌ها در نظر گرفتن فرایند فیزیکی نفوذ آب در خاک است. پس با داشتن برخی خصوصیات فیزیکی خاک ضریب‌های این مدل‌ها قابل تعیین هستند. در مدل‌های فیزیکی با تکیه بر مبانی فیزیکی و شرایط اولیه و مرزی، معادله جریان آب در خاک در محیط غیراشباع ساده‌سازی شده است. نقص عمده این مدل‌ها یکنواخت و همگن در نظر گرفتن محیط است. همچنین این مدل‌ها به دلیل فرضیات ساده‌کننده در نظر گرفته شده به داده‌های فیزیکی کمتری نیاز دارند (اسمیت، ۱۹۷۶). در روش دوم از یکسری روابط تجربی از جمله کوستیاکوف، کوستیاکوف لوئیس و سازمان حفاظت خاک آمریکا استفاده می‌شود. این مدل‌ها نیز یک مدل تخمینی تجربی محسوب شده و محدود به شرایطی هستند که برای آن‌ها واسنجی شده است. ضریب‌های این معادله‌ها از طریق برازش منحنی و روش‌های آماری ساده تخمین زده می‌شوند. از محاسن این معادلات این است که بسیاری از عوامل مؤثر در پدیده نفوذ را در نظر می‌گیرند (پرچی و همکاران، ۱۳۸۹). برای ارزیابی مدل‌های نفوذ مختلف در

کاربری‌های اراضی متفاوت پژوهش‌های مختلفی انجام شده است. از جمله نتایج پژوهش‌های انجام شده از سوی فکوری و همکاران (۱۳۹۰)، در ارتباط با تأثیر کاربری‌های اراضی مختلف روی نفوذ آب در خاک نشان داد که در بین مدل‌های نفوذ مختلف، مدل نفوذ کوستیاکوف پس از مدل هورتون در کلیه کاربری‌ها شامل کاربری‌های کشاورزی، باغ و مرتع به جهت بالا بودن ضریب همبستگی و پایین بودن خطای مدل نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده، مدل مناسبی برای کمی کردن پدیده نفوذ آب در خاک است. بررسی‌های انجام شده از سوی محمدی و همکاران (۱۳۸۳)، در ارتباط با تعیین بهترین مدل نفوذ آب در خاک نشان داد که در بین سه مدل نفوذ شامل کوستیاکوف، فیلیپ و هورتون، مدل نفوذ کوستیاکوف دارای برازش بهتری با داده‌های اندازه‌گیری شده نفوذ تجمعی بوده و دقت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر دارد. همچنین نتایج نشان داد که با سبک‌تر شدن بافت خاک دقت مدل نیز افزایش می‌یابد. پرچی و همکاران (۱۳۸۹)، در پژوهشی عملکرد شش مدل نفوذ شامل مدل‌های تخمینی تجربی و فیزیکی را در کاربری‌های اراضی متفاوت و کلاس‌های مختلف بافت خاک مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که با توجه به محک‌های آماری مورد استفاده در بیشتر کاربری‌ها و کلاس‌های بافت خاک مختلف، کمترین خطای مدل نسبت به داده‌های نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده به روش استوانه‌های مضاعف، مربوط به مدل نفوذ کوستیاکوف-لوئیس و بیشترین خطا مربوط به مدل گرین-آمپت است. در این پژوهش یکی از دلایل برتری مدل نفوذ کوستیاکوف-لوئیس نسبت به سایر مدل‌ها، تعداد پارامتر بیشتر آن و در نتیجه انعطاف‌پذیری بالاتر این مدل به هنگام تعیین ضریب‌های مدل عنوان شد. پرچی و همکاران (۱۳۸۹) بیان کردند که پژوهش‌های انجام شده در خصوص انتخاب بهترین مدل نفوذ نتایج متناقض و متفاوتی داشته و نمی‌توان از بین مدل‌های مختلف یک مدل نفوذ را برتر دانست. در حقیقت این امر را می‌توان به طبیعت تغییرپذیر فرایند نفوذ آب به خاک (سی، ۲۰۰۶)، تفاوت در شرایط اولیه و مرزی با توجه به شیوه اندازه‌گیری نفوذ (بردوج و سینگ، ۱۹۹۲) و در نهایت استفاده از آماره‌های متفاوت برای ارزیابی مدل‌های نفوذ نسبت داد (بلوچی و همکاران، ۲۰۰۰). نتایج بررسی‌های واهرن و همکاران

در آن‌ها هر سه کاربری مرتع، جنگل و کشاورزی وجود داشته باشد) اندازه‌گیری شد. در تمام آزمایش‌های نفوذ، آزمایش‌ها تا زمانی ادامه پیدا می‌کردند که در حداقل سه قرائت متوالی سرعت نفوذ آب در خاک ثابت (حالت ماندگار) شده باشد (بوده‌نیایک و همکاران، ۲۰۰۴). سپس در زمان تجزیه و تحلیل داده‌ها پایه زمانی ثابت نفوذ (برابر ۱۲۰ دقیقه) در نظر گرفته شد. در تمام آزمایش‌های نفوذ حداکثر زمان رسیدن به حالت ماندگار برابر ۱۲۰ دقیقه بود و محاسبه نفوذ جمعی برای بقیه آزمایش‌ها (که زمان آن‌ها بین ۱۰۰ تا ۱۲۰ دقیقه بود) تا ۱۲۰ دقیقه انجام شد. قبل از انجام آزمایش نفوذ، رطوبت اولیه خاک اندازه‌گیری شد که میزان آن در کاربری جنگل بیشتر از دو کاربری دیگر بود. یک نمونه دست خورده خاک از محل آزمایش استوانه مضاعف برای تعیین رطوبت اولیه و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تهیه شد. درصد کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون کربن آلی اندازه‌گیری شد. همچنین برخی خصوصیات خاک شامل جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر، جرم مخصوص ظاهری و هدایت هیدرولیکی اشباع به روش استوانه دست نخورده، اسیدیته خاک به روش پتانسیومتری با دستگاه pH متر الکترونیکی، هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع با دستگاه EC متر الکترونیکی و درصد ذرات خاک به روش هیدرومتری اندازه‌گیری شد (جدول ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

(۲۰۰۹)، در ارتباط با تعیین معادله مناسب نفوذ در چهار کاربری اراضی شامل زمین‌های زراعی، تازه جنگل کاری شده، از قبل جنگل کاری شده و جنگل قدیمی نشان داد که نقاط قابل کشت ساختار ماکروپوری تخریب شده داشته و این موضوع سبب کاهش نفوذ شده و بعد از نفوذ اولیه از میزان نفوذ کاسته می‌شود و در نهایت در مرزهای پایینی افق خاک ظرفیت نفوذ در نقاط کشت شده پایین‌تر از نقاط جنگلی است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که نه فقط ماکروپورها و رطوبت اولیه خاک تحت تأثیر کاربری زمین قرار می‌گیرد، بلکه خصوصیات نگهداری آب خاک نیز سبب تغییر توزیع منافذ شده و تغییر در کاربری زمین اثر جداگانه‌ای روی پدیده نفوذ و نگهداری آب خواهد داشت.

هدف این پژوهش ارزیابی و مقایسه کارایی معادلات نفوذ مختلف شامل فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف- لوئیس، هورتون و گرین- آمپت در مدل‌سازی نفوذ آب به خاک در سه کاربری اراضی متفاوت شامل جنگل، مرتع و کشاورزی است.

## مواد و روش‌ها

این پژوهش در منطقه فندقلو استان اردبیل انجام شد (شکل ۱). این منطقه دنباله جنگل‌های نیمه‌گرمسیری استان گیلان بوده و در ۱۰ کیلومتری جنوب شهرستان نمین قرار دارد. رژیم بارندگی و رطوبتی آن از دریای مازندران بهره گرفته و از نظر اقلیمی یک منطقه کوهستانی است (بی‌نام، ۱۳۷۰). براساس گزارش ایستگاه سینوپتیک فرودگاه اردبیل (نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به منطقه مورد بررسی) متوسط بارندگی سالانه در آن ۲۹۰/۴ میلی‌متر است. بر اساس نقشه توپوگرافی، حداقل ارتفاع این منطقه از سطح دریاهای آزاد ۱۵۰۰ متر و حداکثر آن ۱۸۵۰ متر است. منطقه مورد نظر در بازه طول جغرافیایی  $38^{\circ} 10'$  تا  $38^{\circ} 30'$  شرقی و عرض جغرافیایی بین  $48^{\circ} 30'$  تا  $48^{\circ} 45'$  شمالی واقع است. مساحت منطقه مورد بررسی حدود ۱۶ هزار هکتار بوده که  $4422/9$  هکتار آن را مناطق جنگلی و بقیه را مراتع و زمین‌های زراعی تشکیل می‌دهد.

در این بررسی میزان نفوذپذیری آب در خاک با استفاده از دستگاه استوانه‌های مضاعف (باور، ۱۹۸۶) در هر کاربری و با سه تکرار (در سه منطقه مختلف اما مشابه و مناسبی که

جدول ۱- مقادیر برخی پارامترهای فیزیکی اندازه‌گیری شده

پارامتر	واحد	کاربری جنگل		کاربری مرتع		کاربری کشاورزی	
		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
جرم مخصوص ظاهری	gr/cm <sup>3</sup>	۰/۹۳	۰/۰۵۷	۱/۱۶	۰/۰۶۴	۱/۲۴	۰/۰۶۸
جرم مخصوص حقیقی	gr/cm <sup>3</sup>	۲/۳۴	۰/۱۶	۲/۳۶	۰/۱۸	۲/۴	۰/۱۸
تخلخل کل	%	۶۰/۲۵	۴/۱۱	۵۰/۸۴	۳/۹۵	۴۸/۳	۳/۶۵
هدایت هیدرولیکی اشباع	Cm/min	۰/۲۳	۰/۰۳۱	۰/۲۳	۰/۰۴۸	۰/۲۱	۰/۰۲۴
مواد آلی	%	۴/۹۱	۰/۸۷	۲/۳۳	۰/۵۳	۱/۳۹	۰/۲۵
شن	%	۳۱/۶۳	۳/۵۶	۴۲/۰۸	۴/۲۳	۳۷/۵۴	۲/۹۷
سیلت	%	۴۲/۵۴	۴/۴۵	۳۵/۰۱	۳/۶۴	۳۵/۸۳	۲/۶۷
رس	%	۲۵/۸۳	۳/۳۴	۲۲/۹۱	۳/۴۲	۲۶/۶۳	۲/۹۵
اسیدیته	-	۶/۷۳	۱/۱۱	۷/۰۷	۱/۲۲	۷/۱۴	۱/۰۲
هدایت الکتریکی	(μs/cm)	۴۱۶/۳	۴۲/۲۳	۳۸۶/۶	۳۸/۴۳	۳۸۹/۶	۳۲/۴۸
بافت خاک	-	لوم	لوم	لوم	لوم	لوم	لوم

شده بر مدل‌های نفوذ (با استفاده از نرم‌افزار Excel) و استخراج معادلات نفوذ استفاده شد.

### نتایج

#### برازش مدل‌های نفوذ بر داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت نفوذ آب در خاک

مقادیر برخی خصوصیات فیزیکی اندازه‌گیری شده در جدول ۱ و همچنین مقادیر ضریب‌های تجربی مدل‌های نفوذ در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به جدول ۲ دیده می‌شود که مقدار ضریب جذب در نظر گرفته شده مدل فیلیپ در کاربری جنگل کمتر از دو کاربری دیگر بوده است. همچنین بالاترین ضریب آگذری مدل فیلیپ در سه کاربری مربوط به کاربری جنگل است. در این جدول بالاترین مقدار ضریب c مدل کوستیاکوف-لوییس مربوط به کاربری جنگل و مرتع است. ضریب c این مدل مقدار سرعت نفوذ نهایی آب در خاک است که مهم‌ترین دلیل این امر ساختمان خاک مناسب‌تر این دو کاربری نسبت به کاربری کشاورزی است. همچنین مقادیر محک‌های آماری RE، RMSE و R<sup>2</sup> برای هر کاربری جداگانه در جدول ۳ آمده است. در کاربری جنگل با توجه به مقادیر کم خطای آماری، هر پنج مدل نفوذ هماهنگی خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داده ولی مدل کوستیاکوف-لوییس دارای بیشترین هماهنگی است. بیشترین ضریب همبستگی در این کاربری مربوط به مدل فیلیپ است. در شکل ۲ مقادیر سرعت نفوذ آب در خاک در طول مدت آزمایش نفوذ برای سه کاربری جنگل، مرتع

بر اساس نتایج، بافت خاک هر سه کاربری، از نوع لوم تعیین شد. برای تخمین مقدار سرعت نفوذ آب در خاک از پنج مدل نفوذ مختلف استفاده شد که در زیر به آن‌ها اشاره شده است:

مدل فیلیپ

$$i = \frac{1}{2} S t^{-0.5} + A \quad (1)$$

مدل کوستیاکوف

$$i = k t^{-a} \quad (2)$$

مدل کوستیاکوف-لوییس

$$i = a k t^{a-1} + c \quad (3)$$

مدل گرین-آمپت

$$i = \frac{A'}{F} + B' \quad (4)$$

مدل هورتون

$$i = f_c + (f_0 - f_c) e^{-k t} \quad (5)$$

در کلیه معادلات بالا i سرعت نفوذ آب در خاک (cm/min)، t زمان نفوذ از شروع آن (min)، A ضریب آگذری خاک (cm/min)، S ضریب جذب خاک (cm<sup>0.5</sup>/min<sup>0.5</sup>), a (-), k (-), A' (cm<sup>2</sup>/min) و B' ضریب‌های ثابت خاک، c سرعت نفوذ نهایی آب در خاک (cm/min)، F نفوذ تجمعی آب در خاک (cm) و f<sub>0</sub> و f<sub>c</sub> به ترتیب سرعت نفوذ اولیه و نهایی آب در خاک (cm/min) هستند. برای ارزیابی مدل‌های نفوذ آب در خاک در برآورد سرعت نفوذ آب در خاک از محک‌های آماری خطای نسبی (RE)، خطای متوسط مربعات ریشه (RMSE) و ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>) استفاده شد (رئوف، ۱۳۸۸). بعد از خطی‌سازی معادلات نفوذ ذکر شده، از رگرسیون خطی جهت برازش داده‌های اندازه‌گیری

دیگر که تخمین خوبی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده دارند، مدل هورتون برای تخمین سرعت نفوذ آب در خاک توصیه نمی‌شود.

و کشاورزی آورده شده است. با توجه به این نتایج مشاهده می‌شود که در کاربری مرتع مدل هورتون برخلاف کاربری جنگل دارای هماهنگی کمتری بوده و در بین مدل‌های

جدول ۲- ضریب‌های تجربی مدل‌های نفوذ آب خاک مورد استفاده در هر کاربری

کاربری کشاورزی	کاربری مرتع	کاربری جنگل	ضریب‌های مدل	مدل
۰/۱۸۶	۰/۱۷۹	۰/۲	A (cm/min)	فیلیپ
۰/۸۲۳	۱/۴۶۸	۰/۴۷۲	S (cm/min <sup>0.5</sup> )	
۰/۷۴۸	۰/۶۸۲	۰/۸۲۱	a (-)	کوستیاکوف
۰/۷۲۶	۱/۳۷۴	۰/۵۴۷	k (-)	
۰/۳۷۹	۰/۲۱۷	۰/۲۵۳	a (-)	
۰/۰۱۴	۰/۰۴۴	۰/۰۱۱	b (-)	کوستیاکوف- لوییس
۰/۲۱	۰/۲۳	۰/۲۳	c (cm/min)	
۲۱/۵۸۸	۶۶/۹۶۶	۸/۴۶۹	A' (cm <sup>2</sup> /min)	گرین- آمپت
۱۳/۸۲۴	۱۳/۱۸۸	۱۴/۵۱۶	B' (cm/min)	
۴/۷۵۷	۴/۵۱۴	۱۱/۲۳	K (-)	هورتون

جدول ۳- مقادیر محک‌های آماری برازش مدل‌های نفوذ بر داده‌های حاصل از اندازه‌گیری سرعت نفوذ آب

کشاورزی			مرتع			جنگل			نام مدل
R <sup>2</sup>	RMSE	RE (%)	R <sup>2</sup>	RMSE	RE (%)	R <sup>2</sup>	RMSE	RE (%)	
۰/۸۴۱	۰/۰۴۶	۲/۹۰۱	۰/۹۴۲	۰/۰۰۱	۲/۸۸۷	۰/۹۱۴	۰/۰۴۶	۱/۹۰۸	فیلیپ
۰/۸۵۶	۰/۰۵۴	۳/۴۲	۰/۹۱۸	۲/۰۵۸	۲/۹۲۴	۰/۸۳۵	۰/۰۲۹	۲/۰۶۱	کوستیاکوف
۰/۸۱۴	۰/۰۵۶	۳/۴۷۶	۰/۸۸۵	۰/۰۷۵	۳/۷۵۰	۰/۹۱۲	۰/۰۲۳	۱/۶۱۴	کوستیاکوف- لوییس
۰/۷۶۳	۰/۰۵۴	۳/۳۸۲	۰/۹۲	۰/۰۵۶	۲/۸۲۴	۰/۸۸۳	۰/۰۲۷	۱/۹۱۹	گرین- آمپت
۰/۸۵۶	۰/۱۲۲	۷/۶۴	۰/۷۹۳	۰/۲۲۸	۱۱/۴۱۹	۰/۸۹۴	۰/۰۲۳	۱/۶۲۸	هورتون

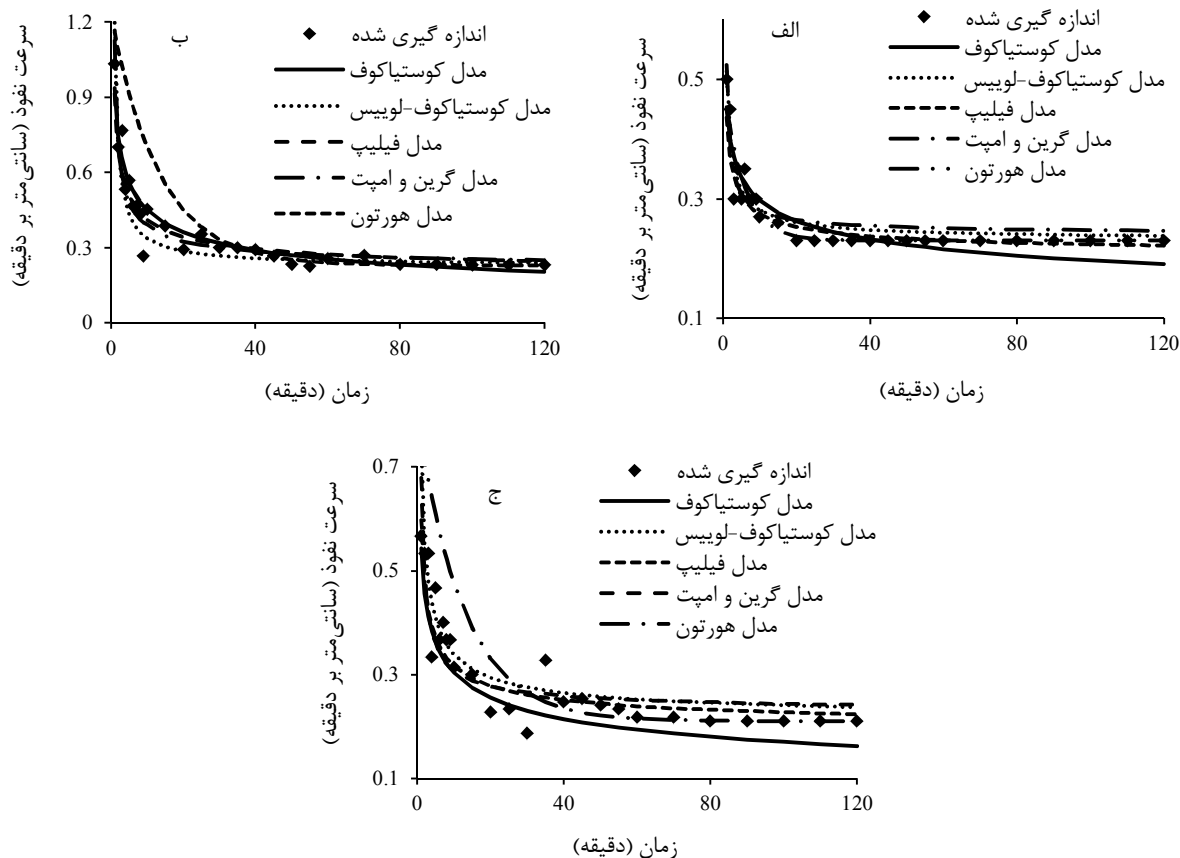
این بخش با نتایج پرچمی و همکاران (۱۳۸۹) همخوانی دارد. در شکل ۳ نقاط حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده در اطراف خط ۱:۱ برای پنج مدل نفوذ آب آورده شده است.

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که مدل فیلیپ در هر سه کاربری جنگل، مرتع و کشاورزی مقدار سرعت نفوذ را کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند و کم‌برآوردی مدل فیلیپ در زمان‌های انتهایی آزمایش شدیدتر می‌شود. مدل کوستیاکوف در کاربری جنگل و مرتع در اکثر زمان‌ها مقدار سرعت نفوذ را بیشتر و در کاربری کشاورزی در بیشتر زمان‌ها کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند. مدل کوستیاکوف- لوییس در کاربری‌های جنگل و کشاورزی در بیشتر زمان‌ها مقدار سرعت نفوذ را بیشتر و در کاربری مرتع کمتر تخمین می‌زند. مدل گرین- آمپت مقدار سرعت نفوذ را در هر سه کاربری در زمان‌های ابتدایی، بیشتر و پس از

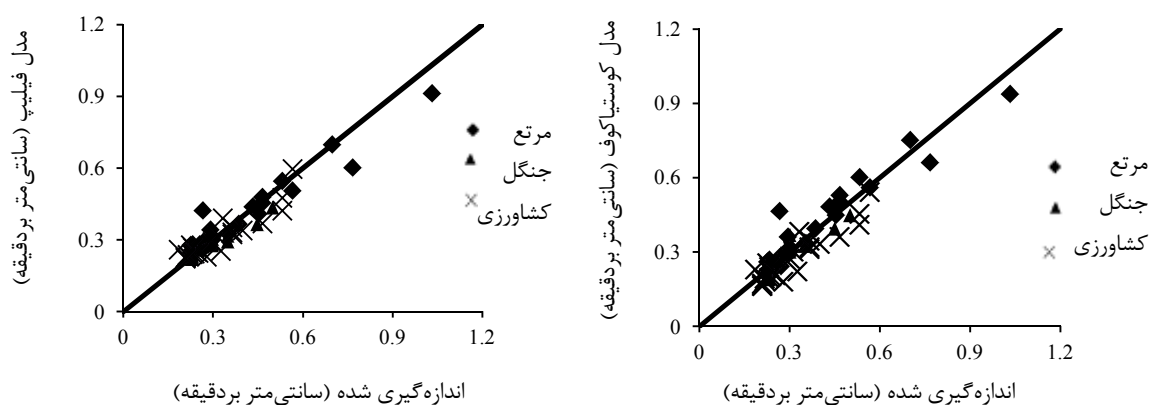
همچنین بالاترین ضریب همبستگی مربوط به مدل فیلیپ و کمترین خطای آماری، مربوط به مدل گرین- آمپت است. در کاربری کشاورزی نیز دیده می‌شود که مدل هورتون دارای هماهنگی کمتری با مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت نفوذ نسبت به سایر مدل‌ها بوده و با این وجود دارای بیشترین ضریب همبستگی است. در بین مدل‌ها، مدل فیلیپ دارای بیشترین هماهنگی با مقادیر واقعی سرعت نفوذ آب در خاک است. همچنین با توجه به مقدار بالای خطای مدل هورتون در کاربری‌های مرتع و کشاورزی، این مدل در این کاربری‌ها توصیه نمی‌شود. به صورت کلی می‌توان گفت با توجه به محک‌های آماری مستخرج از برازش مدل‌های نفوذ بر مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت نفوذ آب در خاک در سه کاربری مشاهده می‌شود که به ترتیب مدل‌های کوستیاکوف- لوییس، گرین- آمپت و فیلیپ بیشترین برازش را با داده‌های اندازه‌گیری شده سرعت نفوذ دارند. نتیجه گرفته شده در

جنگل تا حدودی نزدیک به مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند.

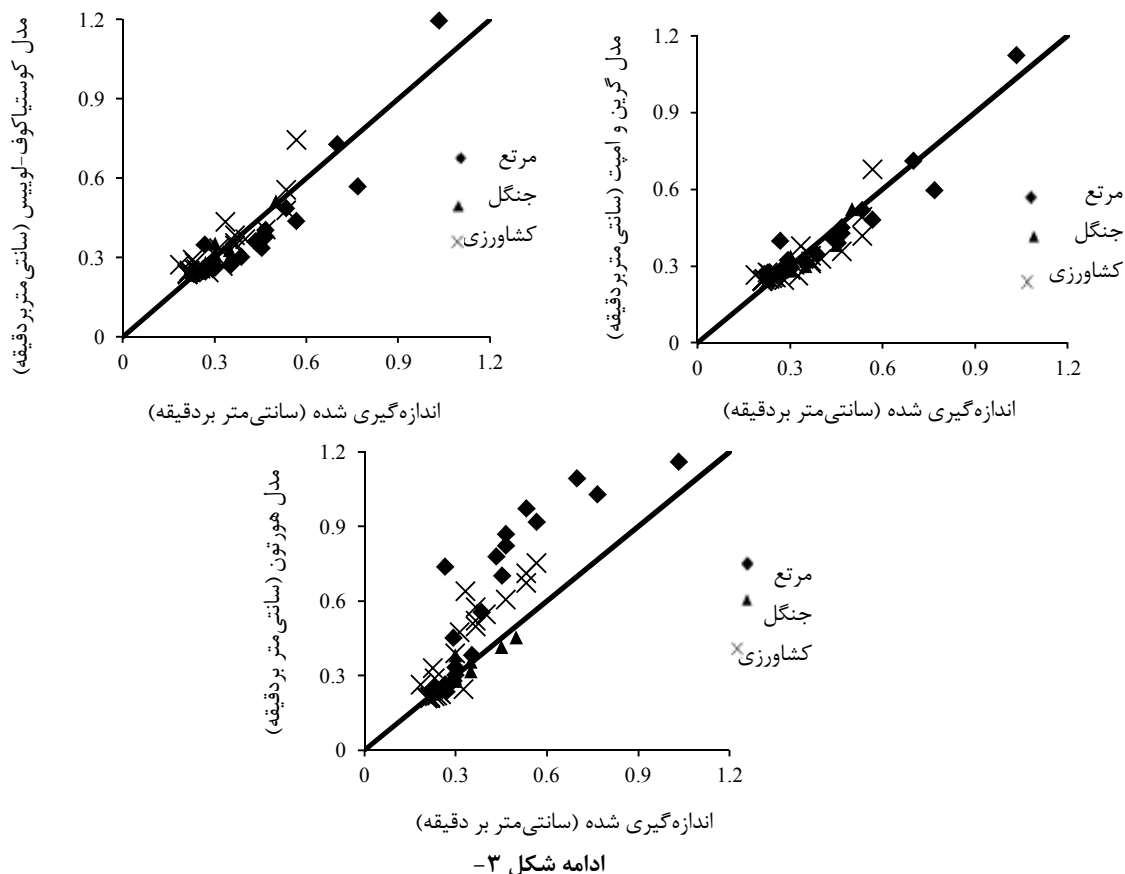
آن کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین می‌زند. مدل هورتون در کاربری‌های مرتع و کشاورزی مقدار سرعت نفوذ را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده و در کاربری



شکل ۲- مقادیر سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل‌های نفوذ مختلف در سه کاربری مختلف جنگل (الف)، مرتع (ب) و کشاورزی (ج)



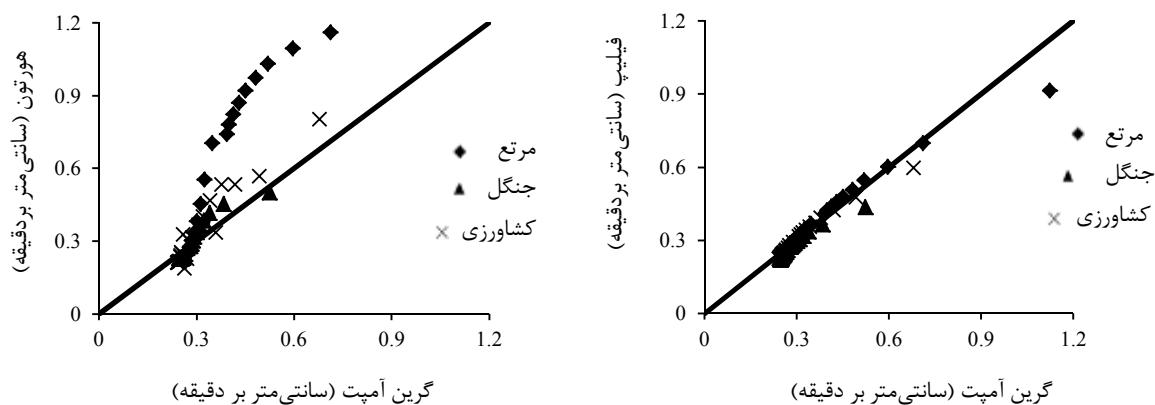
شکل ۳- مقایسه سرعت نفوذ اندازه‌گیری شده و برآورد شده با مدل‌های مختلف در سه کاربری جنگل، مرتع و کشاورزی



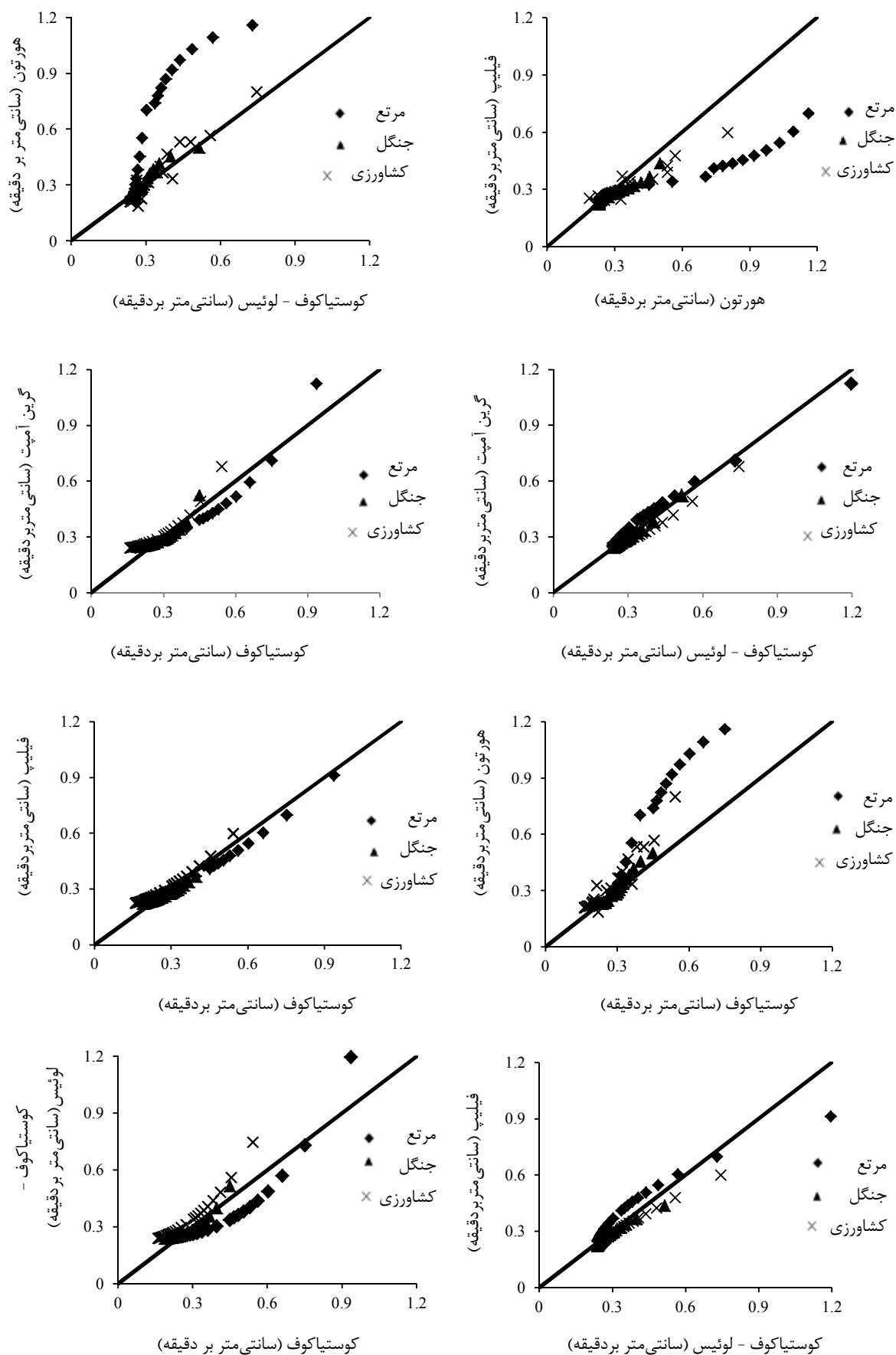
دو اساس فیزیکی داشته و از معادلات حاکم بر جریان در محیط‌های متخلخل مشتق شده‌اند و ثانیاً دارای تعداد پارامتر تجربی برابر می‌باشند. همچنین غیر از مدل هورتون که نسبت به سایر مدل‌ها مقدار سرعت نفوذ را بیشتر تخمین می‌زند سایر مدل‌ها مقدار سرعت نفوذ را تا حدودی نزدیک به هم برآورد می‌کنند.

#### مقایسه مدل‌های نفوذ در سه کاربری مختلف

مقایسه مقادیر برآورد شده سرعت نفوذ (در زمان‌های ثابت داده‌های اندازه‌گیری شده)، با پنج مدل نفوذ مختلف در شکل ۴ در اطراف خط ۱:۱ آمده است. هماهنگی این شکل در بین پنج مدل نفوذ مختلف مدل‌های نفوذ فیلیپ و گرین- آمیت تا حدودی بیشتر از سایر مدل‌ها مقدار سرعت نفوذ را نزدیک به هم تخمین می‌زنند زیرا اولاً هر



شکل ۴- مقایسه مدل‌های مختلف نفوذ با همدیگر



ادامه شکل ۴-



داشته و به ترتیب برای این سه کاربری توصیه می‌شوند.

### منابع

۱. بی‌نام. ۱۳۷۰. شناسایی و مطالعه برخی گونه‌های گیاهی موجود در منطقه فندق‌لو اردبیل. گزارش نهایی طرح مطالعاتی. اداره منابع طبیعی اردبیل. ۱۷۴ ص.
۲. پرچمی عراقی ف. میرلطفی م. قربانی دشتکی ش. و مهدیان م. ح. ۱۳۸۹. ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های اراضی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۴): ۲۰۵-۱۹۳.
۳. رئوف م. ۱۳۸۸. بررسی پدیده نفوذ و خصوصیات هیدرولیکی خاک در اراضی شیبدار. پایان نامه دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز. ۱۳۲ ص.
۴. فکوری ت. امامی ح. و قهرمان ب. ۱۳۹۰. تأثیر کاربری‌های مختلف بر روی نفوذ آب در خاک. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۵(۲): ۱۹۵-۲۰۵.
۵. محمدی م. ح. و رفاهی ح. ۱۳۸۴. تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک. مجله علوم کشاورزی ایران. ۳۶(۶): ۱۳۹۱-۱۳۹۸.
۶. نشاط ع. و پاره‌کار م. ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۴(۳): ۱۸۶-۱۹۵.
7. Bodhinayake W. L. Si B. C. and Xiao C. 2004. New method for determining water-conducting macro- and mesoporosity from tension infiltrometer. Soil Science Society of American Journal. 68:760-769.
8. 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.
9. Bhardwaj A. and Singh R. 1992. Development of a portable simulator infiltrometer for infiltration, runoff and erosion studies. Agricultural Water Management. 22(4): 235-243.
10. Bower H. 1986. Intake rate. Cylinder infiltrometer, In A. Klute (Ed.) Methods of soil analysis. Part 1, Physical and mineralogical properties, 2nd ed ASA, Madison, WI. pp. 825-843.
11. Mukheibir P. 2008. Water resources management strategies for adaptation to climate-induced impacts in south Africa. Water Resource Management. 22: 1259-1276.

مقدار ضریب جذب و ضریب آب‌گذری در نظر گرفته شده (برای مدل فیلیپ) در بین سه کاربری نشان داد که کمترین ضریب جذب و بیشترین ضریب آب‌گذری خاک مربوط به کاربری جنگل است که این امر را با توجه به پیروی این پارامتر از پتانسیل ماتریک خاک می‌توان به بالا بودن محتوای رطوبتی خاک در کاربری جنگل که سبب کاهش پتانسیل ماتریک خاک شده است ارتباط داد. همچنین با توجه به اینکه ضریب آب‌گذری خاک تحت تأثیر ساختمان خاک است، پس یکی از مهم‌ترین دلایل بالا بودن ضریب آب‌گذری در کاربری جنگل مواد آلی بیشتر است که سبب بهبود فرآیند خاکدانه‌سازی شده است و به دنبال آن ساختمان خاک در این کاربری پایدارتر و در نهایت ضریب آب‌گذری خاک استخراج شده در این کاربری نسبت به دو کاربری دیگر بیشتر است. از دیگر دلایل بالا بودن این پارامتر می‌توان به رشد میکروارگانیسم‌های خاک در کاربری جنگل اشاره نمود.

در بین پنج مدل نفوذ مورد بررسی، مدل نفوذ هورتون برای بررسی‌های حوضه‌های آبخیز و برای شرایط وجود بارندگی ارائه گردیده است (ویلیامز، ۱۹۹۸). از آنجاکه برای شبیه‌سازی در این روش آن بهتر است که بارش توسط باران‌سازها شبیه‌سازی شود، یک مدل بیش برآوردگر بوده و دارای خطای آماری بیشتری در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت نفوذ آب بود. براساس بررسی‌های نشاط و همکاران (۱۳۸۵)، مدل‌های کوستیاکوف و هورتون برای پیش‌بینی در بلندمدت خطای قابل توجهی نشان می‌دهند زیرا این مدل‌ها بر مبنای داده‌های تجربی در کوتاه مدت برآورد شده‌اند. مدل فیلیپ در دراز مدت تخمین مناسب‌تری دارد. نتایج گرفته شده در این بخش با نتایج نشاط و همکاران (۱۳۸۵) همخوانی نشان می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که در بین پنج مدل نفوذ مختلف در بین سه کاربری، مدل نفوذ کوستیاکوف-لوییس با توجه به کمترین خطای آماری بهترین برآورد را برای تخمین سرعت نفوذ آب در خاک داشته و پس از آن مدل گرین-آمپت با خطای آماری کمتر نسبت به سایر مدل‌ها دارای دقت بیشتری است. همچنین در سه کاربری جنگل، مرتع و کشاورزی به ترتیب مدل‌های کوستیاکوف-لوییس، گرین-آمپت و فیلیپ کمترین خطای آماری را

12. Phillip J. R. 1957a. The theory of infiltration. 1: The infiltration equation and its solution. *Soil Science*. 83:345-357.
13. Raoof M. Sadraddini S. A. A. Nazemi A. H. and Marofi S. 2009a. Estimating saturated and unsaturated hydraulic conductivity and sorptivity coefficient in transient state in sloping lands. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 7(3&4): 861-864.
14. Raoof M. Sadraddini S. A. A. Nazemi A. H. and Marofi S. 2009b. Estimating Saturated and Unsaturated Hydraulic Conductivity in Steady State in Sloping Lands. 10 th International Agricultural Engineering Conference, Bangkok, Thailand, 7 – 10 December.
15. Smith R. E. 1976. Approximations for vertical infiltration patterns. *Transactions of the ASCE*, 19(3): 505-509.
16. Sy N. L. 2006. Modelling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrological Science Journal*. 51(1): 3-20.
17. Wahren K. H. Feger K. Schwarzel and Munch A. 2009. Land-use effects on flood generation-considering soil hydraulic measurements in modeling. *Advance Geoscience*. 21: 99-107.
18. Williams J. R. Ouyang Y. Song Chen J. Ravi V. and Corporation D. 1998. Estimation of infiltration rate in vados zone: application of selected mathematical models. EPA. 600. R. 97. 128b.