

ارزیابی برخی معادلات نفوذ آب در خاک در کاربری‌های مختلف در حوزه آبخیز کجور

سیده مائده کاوسی^۱ مهدی وفاخواه^۲ محمدحسین مهدیان^۳

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۹/۰۲

چکیده

مطالعه نفوذ به عنوان یکی از اجزای چرخه آب به منظور مدیریت و برنامه‌ریزی پروژه‌های آبی ضروری می‌باشد. از آن جا که اندازه‌گیری نفوذ در عرصه هزینه‌بر و مستلزم صرف زمان زیاد است، لذا از مدل‌های مختلف برای برآورد مقدار نفوذ استفاده می‌شود که هر مدل در شرایط خاص، برازش مناسبی را با داده‌های تجربی از خود نشان می‌دهد. انتخاب مدل مناسب در مدیریت منابع آب حائز اهمیت می‌باشد. از این‌رو، در این تحقیق، ابتدا با استفاده از استوانه مضاعف در چهار کاربری جنگل، باغ، کشاورزی و اراضی ساحلی، اقدام به اندازه‌گیری نفوذ شد و در مرحله بعد، مدل‌های نفوذ سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS، فیلیپ، کوستیاکف، گرین و آمپ و هورتون با استفاده از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2)، معیار کفایت ناش-ساتکلیف (NSSS)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، و میانگین خطا (ME) مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل کوستیاکوف در هر چهار کاربری با بالاتر بودن R^2 ، معیار کفایت ناش-ساتکلیف و RMSE کمتر، بهترین برازش را با داده‌های تجربی داشته است. ضمن آن که مقادیر ME بیانگر این بوده که مدل کوستیاکوف در کاربری باغ، مقادیر را بیشتر از مقدار واقعی ارزیابی کرده است و در سایر کاربری‌ها، مدل کم‌برآوردگر بوده است. در حالی که مدل نفوذ سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS در تمام کاربری‌ها دارای کم‌برآوردی بوده و از این حیث عملکرد پایدارتری نسبت به سایر مدل‌ها از خود نشان داده است. در مجموع، مدل کوستیاکوف در تمام کاربری‌ها در رتبه نخست قرار گرفت و پس از آن مدل‌های سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS، فیلیپ، گرین و آمپ و هورتون در رده‌های بعدی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: مدل نفوذ SCS، مدل فیلیپ، مدل کوستیاکف، مدل گرین و آمپ، مدل هورتون، نفوذ، کاربری اراضی، حوزه آبخیز کجور.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس Email:vafakhah@modares.ac.ir

۳- دانشیار سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

مقدمه

برای برنامه‌ریزی و طراحی پروژه‌های آب به منظور استفاده برای کاربری‌های مختلف نظیر شرب، آبیاری، صنعتی و نیروگاه‌های آبی در یک منطقه، ارزیابی دقیق و پیش‌بینی رواناب منطقه نیاز است. طراحی ساختارهای هیدرولوژیکی بزرگ همانند سدها، پل‌ها به آگاهی از فرآیندهای بارش رواناب تحت شرایط حد نیاز دارد (Jain و Kumar, ۲۰۰۶). از طرفی، مدیریت کمی و کیفی آب نیاز به درک کامل و دقیق چرخه رواناب دارد (Chahinian و همکاران، ۲۰۰۵). در این ارتباط، مطالعه نفوذ به عنوان یکی از اجزای مهم چرخه آب ضروری است. نفوذ عامل کلیدی در تمام مدل‌های بارش و رواناب است (Jain و Kumar, ۲۰۰۶). برای پیش‌بینی صحیح میزان رواناب و ارزیابی مناسب برای مدیریت منابع آب، تخمین مناسب از میزان نفوذ در منطقه عامل اساسی می‌باشد. مدل‌های مختلفی به منظور برآورد نفوذ ارائه شده است که هرکدام از مدل‌ها در شرایطی، بهترین برازش را با داده‌های تجربی دارد. انتخاب مدل کارآ به منظور تخمین رواناب عامل مهمی در مدیریت کنترل سیلاب می‌باشد (Chainian و همکاران، ۲۰۰۵)

تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه مقایسه مدل‌های نفوذ انجام شده است. از آن جمله Mishra و همکاران (۲۰۰۵)، ۱۴ مدل نفوذ را برای ۲۴۳ داده که از مراتع هند و ایالات متحده در خاک‌هایی با بافت شنی درشت تارسی ریز جمع‌آوری شده بود، به کار بردند و با استفاده از معیار کفایت ناش-ساتکلیف مدل‌ها را رتبه‌بندی کردند. در این رتبه‌بندی، مدل‌های نیمه‌تجربی Holtan, Singh-yu و Horton به ترتیب رتبه ۶/۵۲، ۵/۵۷ و ۵/۴۸ از ۱۰ را به خود اختصاص دادند. مدل‌های تجربی Huggin & Kostiakov, modified Kostiakov, Monke به ترتیب دارای رتبه ۵/۵۷، ۵/۳۰، ۵/۲۲ و مدل‌های فیزیکی غیرخطی و مدل خطی Smith-Parlange دارای رتبه ۵/۴۸ و ۵/۲۲ شدند.

همچنین، Turner (۲۰۰۶) با استفاده از پلات-باران‌ساز اقدام به تعیین سرعت نفوذ کرده و عملکرد مدل‌های هورتون، گرین‌وآمپ، هولتان، کوستیاکوف و فیلیپ را مورد ارزیابی قرار داد. طبق نتایج حاصله، مدل گرین‌وآمپ بهترین نتایج را داشته است و بعد از آن

مدل‌های هولتان، فیلیپ، کوستیاکوف و هورتون در رده‌های بعدی قرار گرفت.

در تحقیقی دیگر، Yukyan و همکاران (۲۰۰۷) سه مدل هورتون، کوستیاکوف و کوستیاکوف اصلاح شده را برای شیب‌هایی با خاک‌هایی با ارغوانی مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، با استفاده از باران‌ساز، مقادیر نفوذ اندازه‌گیری شده و تعداد ۲۸ داده جمع‌آوری شد. داده‌های مشاهداتی با نتایج حاصل از مدل‌های مورد بررسی با استفاده از معیار کفایت ناش-ساتکلیف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل هورتون با معیار کفایت ناش-ساتکلیف ۶۹/۷ درصد بهترین کارایی را برای منطقه مورد مطالعه داشته است.

همچنین، Chahinian و همکاران (۲۰۰۵) چهار مدل SCS, Morel-Seytoux, SCS, Morel-Seytoux را مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج حاصله، مدل Morel-Seytoux با RMSE کمتر، بهترین عملکرد و مدل SCS بدترین نتایج را نسبت به سایر مدل‌ها داشته است، همچنین، کارایی مدل هورتون از مدل فیلیپ بهتر بوده است. در مطالعه‌ای دیگر، Oku و همکاران (۲۰۰۵)، مدل‌های کوستیاکوف و فیلیپ را در تیمارهای مختلف مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند، مدل فیلیپ با ضریب تبیین ۹۹ درصد در زمین‌های پوشیده از گراس، نسبت به مدل کوستیاکوف با ضریب تبیین ۹۷ درصد مدل برتری بوده، همچنین در زمین‌هایی تحت کودهای آلی، مدل فیلیپ با ضریب تبیین ۹۹ درصد در مقایسه با مدل کوستیاکوف با ضریب تبیین ۹۷ درصد، کارایی بهتری داشته است. برای خاک‌های لخت نیز مدل فیلیپ با ضریب تبیین ۹۴ درصد نسبت به مدل کوستیاکوف با ضریب تبیین هفت درصد عملکرد بهتری داشته است.

در داخل کشور نیز ملکی و همکاران (۱۳۸۳) برای تعیین مدل نفوذ مناسب برای اراضی نیشکر جنوب اهواز، مدل‌های نفوذ کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح شده، فیلیپ و سازمان حفاظت خاک (SCS) مورد ارزیابی قرار داده و ضرایب آن‌ها را با استفاده از ۱۵ سری داده صحرائی تعیین نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد مدل سازمان حفاظت خاک (SCS) با خطای متوسط ۱/۶ درصد در محاسبه حجم آب نفوذی از کارایی بیشتری نسبت به سایر مدل‌های نفوذ در منطقه مورد مطالعه برخوردار بوده است.

عملکرد متفاوت باشد (Sly, 2006). با توجه به ضرورت تعیین مقدار نفوذ در مطالعات هیدرولوژی و برنامه‌ریزی مدیریت آب و از آنجایی که هر مدل در شرایط خاص بهترین برازش را با داده‌های تجربی دارد، در این پژوهش، ارزیابی مدل‌های نفوذ سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS، فیلیپ، کوستیاکوف، گرین و آمپ و هورتون به منظور انتخاب مدل مناسب به عنوان هدف اصلی، مد نظر قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

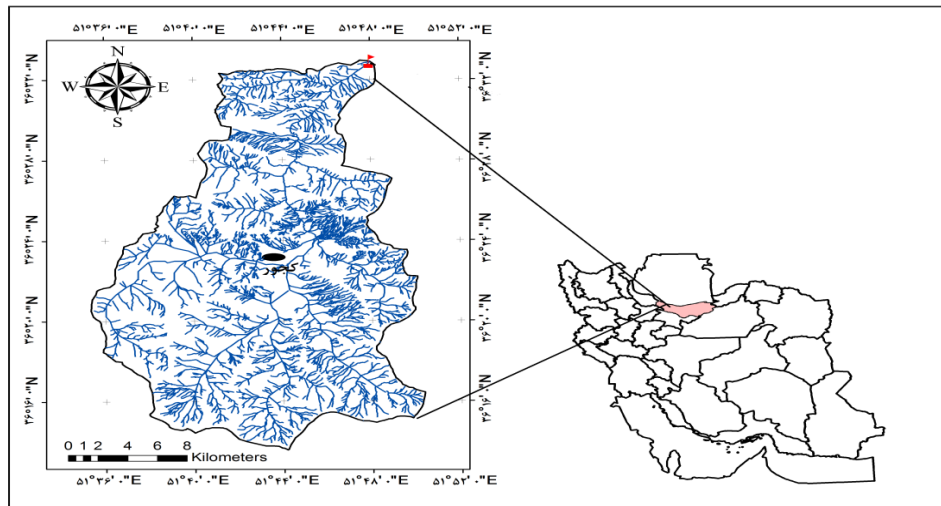
بخشی از حوزه آبخیز کجور و زمین‌های کشاورزی، باغات اطراف و بخشی از حواشی ساحلی پایین دست برای تحقیق حاضر انتخاب شد. حوزه آبخیز کجور دارای مساحت ۱۳۲۶۳ هکتار است که در جنوب شرقی شهرستان نوشهر در طول جغرافیایی $41^{\circ} 41' 8''$ تا $41^{\circ} 49' 40''$ و عرض $36^{\circ} 24' 6''$ تا $36^{\circ} 32' 33''$ قرار گرفته این حوزه آبخیز از شمال با دریای خزر و از جنوب با بخش کجور مجاور است (شکل ۱). حداقل و حداکثر ارتفاع حوزه به ترتیب ۱۵۰ و ۲۶۵۰ متر از سطح آب‌های آزاد می‌باشد. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی کوپن دارای اقلیم بری و زمستان سرد و خشک و تابستان کوتاه است. میانگین بارندگی سالانه در پایین دست حوزه آبخیز و بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی نوشهر ۱۳۰۸/۸ و با گرادبان منفی به سمت ارتفاعات به حدود ۲۴۰ میلی‌متر در بالادست کاهش می‌یابد. حداکثر و حداقل متوسط بارندگی ماهیانه به ترتیب در مهرماه با $280/4$ میلی‌متر و تیرماه با $37/4$ میلی‌متر رخ می‌دهد و حداکثر و حداقل میانگین دمای ماهیانه به ترتیب در تیر و مرداد ۲۵ و در بهمن ۶/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (اداره کل منابع طبیعی نوشهر، ۱۳۸۱).

موسوی و همکاران (۱۳۸۴) ضمن تعیین ضرایب مدل‌های نفوذ گرین‌وآمپ، فیلیپ، کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح شده و هورتون، مقادیر حاصل از این مدل‌ها را با داده‌های تجربی مقایسه کرده و برازش مدل‌های مختلف نفوذ و همخوانی آن‌ها را با مشاهدات تجربی نشان داد که مدل تجربی کوستیاکوف بهترین برازش را با داده‌های تجربی بدست آمده در خاک منطقه نشان داد. محمدی و رفاهی (۱۳۸۴) از توابع انتقالی برای تخمین پارامترهای مدل‌های فیلیپ، هورتون و کوستیاکوف استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مدل کوستیاکوف با R^2 بالاتر، برازش بهتری با داده‌های واقعی داشته است.

در تحقیقی دیگر، نشاط و پاره‌کار (۱۳۸۶) عملکرد پنج مدل کوستیاکوف، گرین‌وآمپ، هورتون، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و فیلیپ را در برآورد نفوذ تجمعی و سرعت نفوذ مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد مدل کوستیاکوف با بالاترین R^2 و کم‌ترین واریانس، در کلیه شرایط بهتر بوده است، در حالی که در درازمدت، مدل‌های فیلیپ و SCS نتایج بهتری داشته‌اند.

پرچی‌عراقی و همکاران (۱۳۸۹) به منظور بررسی مدل‌های نفوذ گرین‌وآمپ، فیلیپ، کوستیاکوف، لوییز، سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) و هورتون در برآورد نفوذ تجمعی از شاخص‌های ME، MAME، RMSE و انحراف معیار RMSE و ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل کوستیاکوف-لوییز در تمامی شرایط بهترین مدل بوده است.

جمع‌بندی تحقیقات قبلی، حاکی از آن است که تحقیقات مختلف دارای نتایج متفاوت و بعضاً ضد و نقیضی بوده است که این تضاد به دلیل طبیعت تغییرپذیری فرآیند نفوذ می‌باشد، به طوری که یک مدل نفوذ در دو خاک مشابه از نظر خصوصیات فیزیکی، ممکن است دارای



شکل (۱): موقعیت حوزه آبخیز کجور در استان مازندران

روش تحقیق

خلاصه‌ای از مدل‌های مورد بررسی به همراه پارامترهای مربوطه در جدول (۱) ارائه شده است. برای جمع آوری داده به منظور ارزیابی این پنج روش، ابتدا در چهار کاربری جنگل، کشاورزی، باغ و زمین‌های ساحلی، میزان نفوذ با استفاده از روش استوانه مضاعف اندازه‌گیری شد. جدول (۲) مقادیر بیشینه و کمینه برخی از خصوصیات خاک‌شناسی را در محل‌های اندازه‌گیری نفوذ نشان می‌دهد. پس از اندازه‌گیری میزان نفوذ، پارامترهای هر یک از مدل‌های مورد بررسی به روش حداقل مجموع

مربعات خطا تعیین شد. برای تعیین پارامترهای مدل، فیلیپ بر مبنای روش نظری مورد استفاده در اشتقاق این مدل، وجود ویژگی‌هایی چون منحنی رطوبتی و هدایت آبی غیراشباع ضروری است (Warrick و همکاران، ۱۹۹۲). با توجه به این که در این پژوهش از داده‌های استوانه‌های مضاعف استفاده شد، پارامترهای مدل فیلیپ نیز همچون سایر مدل‌ها به روش حداقل مربعات خطا تعیین شد. تابع هدف به‌منظور تعیین پارامترهای مدل‌های مورد نظر به شرح معادله (۱) است.

$$O(p) = \sum_{i=0}^n (y_e - y_o)^2 \quad (1)$$

جدول (۱) - خلاصه‌ای از مدل‌های نفوذ مورد مطالعه

معادله	پارامترها	نام مدل
$I = St^{\frac{1}{2}}$	I (L) نفوذ تجمعی، S شیب منحنی نفوذ، t (T) زمان	گرین و آمپ
$I = St^{\frac{1}{2}} + At$	I (L) نفوذ تجمعی، t (T) زمان، S ضریب جذب خاک (تابع مکش خاک) و A نماینده اثر ثقلی است	فیلیپ
$I = kt^b$	I (L) نفوذ تجمعی، ضرایب تجربی k (-) و b (-) زمان t (T) معادله هستند.	کوستیاکوف
$I = at^b + c$	I (L) نفوذ تجمعی و واحد آن اینچ یا سانتی متر، ضریب a (L) و نیز ضریبی بدون بعد است. b (-) را دارا بوده‌اواحد	سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)
$I = i_f t + \frac{(i_0 - i_f)}{\beta} (1 - e^{-\beta t})$	I (L) نفوذ تجمعی، i (LT^{-1}) سرعت اولیه نفوذ، i_f (LT^{-1}) سرعت نهایی نفوذ، β (-) ثابت تناسب و t (T) زمان نفوذ	هورتون

جدول (۲): مقادیر بیشینه و کمینه ی برخی از خصوصیات خاک شناسی در کاربری های مورد مطالعه

کاربری	رس	لای	شن	ماده آلی (%)	آهک	رطوبت	سنگریزه	جرم ویژه ظاهری (g.cm ⁻³)
				(بیشینه-کمینه)				
جنگل	۲۲-۴۲	۳۱-۴۵	۱۷-۳۴	۲/۱۶-۴/۹۹	۲/۶-۶/۱	۱۷-۲۸	۰/۳۸-۲۲/۲	۱/۲۱-۱/۸۵
ساحلی	۱۳-۲۶	۱-۲۸	۴۶-۸۶	۲/۳۵-۲/۵۳	۱/۶-۳۶/۶	۴-۲۳	-۵۱/۱۲	۱/۴-۱/۵۹
							۰/۹۷	
کشاورزی	۴۰-۴۸	۲۹-۳۴	۲۳-۲۶	۲/۳۷-۴/۸۵	-۱۸/۶۶	۲۳-۲۶	۰/۱۷-۴/۱۴	۱/۶۳-۱/۷۴
					۱۴/۱۶			
باغ	۳۲-۴۰	۳۲-۴۱	۲۲-۲۸	۲/۲۷-۳/۵	-۱۵/۵۰	۲۰-۲۱	-۱۸/۵۷	۱/۲۹-۱/۵۵
					۵/۸۳		۲/۹۹	

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (y_o - y_e)^2}{n}} \quad (۳)$$

(۴)

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=0}^n (y_o - \bar{y}_o)(y_e - \bar{y}_e)}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (y_o - \bar{y}_o)^2 \sum_{i=0}^n (y_e - \bar{y}_e)^2}} \right]^2$$

$$NSSS = 1 - \quad (۵)$$

$$\frac{\sum_{i=0}^n (y_o - y_e)^2}{\sum_{i=0}^n (y_o - \bar{y}_o)^2}$$

نتایج و بحث

در این پژوهش به منظور انتخاب مدل نفوذ برتر ابتدا پارامترهای مربوط به مدل های نفوذ مختلف تعیین، و سپس نتایج حاصل از مدل ها به کمک آماره های ضریب تبیین (R^2)، ضریب کارایی ناش-ساتکلیف (NSSS)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME) مورد ارزیابی قرار گرفت.

جدول (۳) محدوده پارامترهای مدل های نفوذ سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS، فیلیپ، کوستیاکف، گرین و آمپ و هورتون را در کاربری های متفاوت نشان می دهد.

پس از تعیین پارامترهای مدل های مورد بررسی، مقادیر نفوذ حاصل از مدل های مختلف با مقادیر واقعی مقایسه شد و با استفاده از آماره های ضریب تبیین (R^2)، معیار کفایت ناش-ساتکلیف (NSSS)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME)، کارایی مدل های فیلیپ، کوستیاکوف، گرین و آمپ، سرویس حفاظت خاک آمریکا و هورتون در کاربری های مورد مطالعه ارزیابی و مقایسه شد. آماره های مورد نظر به صورت زیر به ست می آیند:

$$ME = \sum_{i=0}^n \frac{y_o - y_e}{n} \quad (۲)$$

مقدار آماره ME(cm) بیان کننده این است که مدل مورد بررسی نفوذ آب به خاک را بیش برآورد (مقادیر مثبت)، یا کم برآورد (مقادیر منفی) می نماید. برای برآوردی مطمئن از نفوذ، باید مقدار قدر مطلق آن تا حد امکان کوچک باشد. آماره دیگر، جذر میانگین مربعات خطا است که به صورت رابطه (۳) محاسبه شد. مقدار RMSE همواره مثبت بوده و با نزدیک شدن آن به صفر، عملکرد مدل مورد بررسی افزایش می یابد. مقدار خطای RMSE منحنی نفوذ ارائه می کند. برآورد شده را در کل

جدول (۳): محدوده پارامترهای مدل‌های نفوذ سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS، فیلیپ، کوستیاکف، گرین‌وآمپ و هورتون

پارامتر هر مدل	کاربری‌ها	جنگل	اراضی ساحلی	کشاورزی	باغ
کوستیاکف	c	۰/۲۸۲	۰/۸۰۶	۲/۰۰۵	۱/۸۴۵
		۱۰/۷۹۳	۱/۹۲۲	۱۲/۳۴۳	۸/۹۶۳
		۰/۴۶	۰/۶۴۸	۰/۳۱	۰/۳۶۶
گرین و آمپ	a	۰/۹۷۰	۰/۹۴	۰/۶۶	۰/۷۰
		-۰/۰۱۲	۰/۵۳۸	۴/۰۹۹	۳/۲۷۸
		۸۱/۰۳۰	۲/۵۶۲	۵۳/۵۴۵	۵۹/۱۸۳
هورتون	b	-۰/۶۳۶	۰/۱۲۳	-۱/۶۷۴	-۱/۰۴۰
		۲/۲۶۸	۰/۹۹۷	۲/۶۰۰	۰/۴۱۰
		۰/۰۱۰	۰/۰۶۸	۰/۰۱۰	۰/۱۲۰
SCS	ib	۰/۹۹۷	۰/۸۵۰	۰/۴۰۸	۰/۳۰۷
		۰/۰۵۶	۰/۲۶۰	۰/۳۵۵	۰/۹۰۵
		۱۱/۸۸۰	۱/۸۶۴	۱۲/۰۳۰	۶/۲۸۴
فیلیپ	fo	۰/۰۰۰	-۰/۰۰۷	۰/۰۴۷	۰/۰۴۷
		۰/۰۹۷	۰/۰۴۵	۰/۰۹۸	۰/۱۰۴
		۰/۰۰۶	۰/۳۲۴	۱/۳۷۷	۱/۳۱۷
کوستیاکف	a	۱۱/۵۱۴	۱/۳۶۷	۱۱/۶۷۹	۸/۳۵۳
		۰/۴۲۳	۰/۷۶۶	۰/۳۲۴	۰/۳۵۲
		۱/۹۵۲	۱/۰۳۰	۰/۶۷۷	۰/۷۷۹
فیلیپ	S	-۰/۰۸۷	۰/۶۵۵	۲/۱۲۴	۱/۶۵۰
		۹/۱۵۲	۱/۶۵۹	۸/۲۹۰	۸/۰۸۰
		۰/۰۲۲	۰/۱۳۲	-۰/۴۴۲	۰/۰۲۶
کوستیاکف	K	۲/۴۳۶	۰/۹۴۶	۲/۳۴۶	۰/۴۴۹

جدول (۴) آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی صحت مدل‌های مورد مطالعه را در کاربری‌ها نشان می‌دهد. با توجه به این که مقدار انحراف معیار RMSEها پراکنش خطای برآورد حول میانگین RMSEها را نشان می‌دهد، لذا این شاخص بیانگر این است که هر مدل با چه پراکنشی نفوذ آب به خاک را در خاک‌های مختلف برآورد می‌کند. با توجه به این شاخص مدل کوستیاکوف مقادیر را با دقت یکسان‌تری برآورد کرده است. از این نظر، مدل SCS در رده بعدی قرار گرفت، در حالی که دقت تخمین در مدل هورتون نسبت به دیگر معادلات غیریکنواخت‌تر بوده است. مقادیر RMSE نشان می‌دهد که مدل کوستیاکوف کمترین خطای برآورد را داشته و در نتیجه بهترین مدل و مدل هورتون بدترین مدل بوده است. مقایسه R^2 های مربوط به مدل‌های نفوذ مختلف نیز بیانگر این است که مدل کوستیاکوف در تمام کاربری‌ها بهترین

بوده است، ضمن آن که مقادیر میانگین ME نشان می‌دهد که این مدل در کاربری‌های جنگل، کشاورزی و باغ مدل مقدار نفوذ را کمتر و در اراضی ساحلی مقدار نفوذ را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است، در حالی که مدل‌های SCS و فیلیپ در تمام کاربری‌ها، میانگین خطایشان منفی بوده و مقدار نفوذ را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند و از این نظر، عملکردشان از پایداری بیشتری برخوردار بوده است. همچنین، در کاربری کشاورزی، تمامی مدل‌ها دارای میانگین خطای منفی بوده‌اند و مقدار نفوذ را کم برآورد کرده‌اند. در مجموع، مقایسه MEها بیانگر آن است که مدل‌های SCS و فیلیپ و کوستیاکوف کم‌برآوردگر و معادلات گرین‌وآمپ و هورتون بیش‌برآوردگر می‌باشند. شکل (۲) پایداری یا عدم پایداری مدل‌ها را در بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی معادلات نفوذ در تک‌تک خاک‌ها نشان می‌دهد، این شکل نشان

عملکرد ناپایداری در خاک‌های مختلف از خود نشان داده‌اند. نزدیک بودن قدرمطلق میانگین MEها و میانگین قدرمطلق MEها در مدل‌های فیلیپ و SCS نیز بیانگر همین نکته است که این مدل‌ها در یکان یکان خاک‌ها دارای عملکرد مشابهی از نظر کم‌برآوردی بوده‌اند که به خوبی در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

می‌دهد که مدل‌های فیلیپ و SCS مدل‌های کم‌برآوردگر هستند و تقریباً در تمام موارد میزان نفوذ را کمتر از مقدار واقعی ارزیابی کرده‌اند. مدل کوستیاکوف نیز در حالت کلی، مدلی کم‌برآوردگر می‌باشد و تنها در کاربری باغ مقادیر نفوذ را بیشتر از مقدار حقیقی آن ارزیابی کرده است، در حالی که مدل‌های گرین‌وآمپ و هورتون در برخی موارد بیش‌برآوردگر و در برخی دیگر کم‌برآوردگر بوده‌اند و

جدول (۴) - آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی صحت مدل‌ها

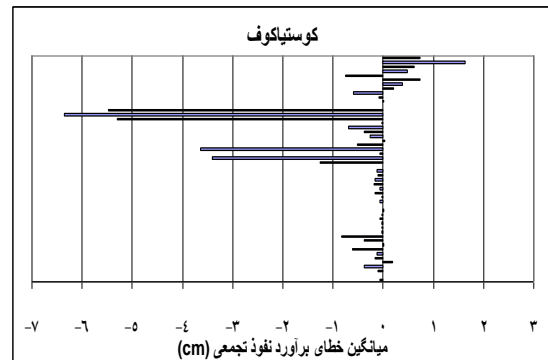
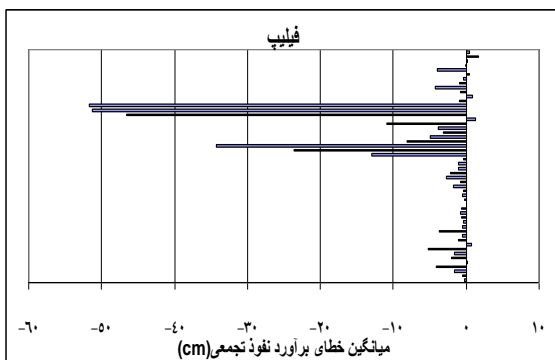
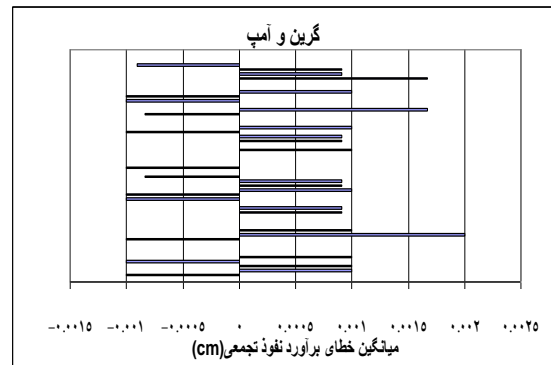
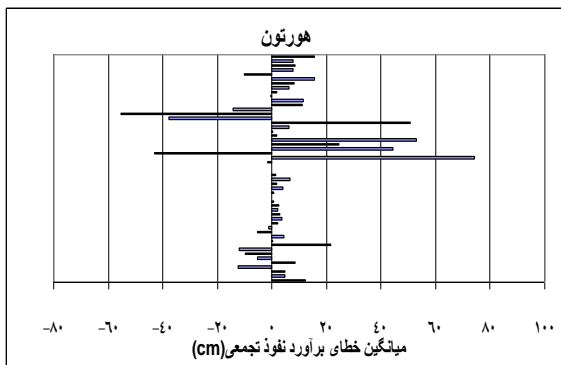
میانگین قدرمطلق ME	میانگین ME	انحراف معیار RMSE	RMSE	میانگین R^2	آماره کاربری
۰/۹۹۶	-۰/۴۵۳	۴/۷۵۸	۲/۵۸۸	۰/۹۸۶	کوستیاکوف
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۲	۳۷/۷۳۰	۲۲/۶۶۴	۰/۶۷۷	گرین‌وآمپ
۱۰/۹۰۳	۶/۹۳۳	۴۱/۶۲۷	۲۸/۵۷۰	۰/۷۴۱	هورتون
۰/۷۲۹	-۰/۷۲۹	۵/۲۲۲	۳/۳۴۱	۰/۹۶۸	SCS
۴/۲۳۳	-۴/۲۳۲	۱۷/۷۶۲	۹/۳۶۸	۰/۹۶۲	فیلیپ
۰/۹۹۶	۰/۳۸۵	۱/۵۷۵	۲/۷۸۴	۰/۹۸۸	کوستیاکوف
۰/۹۶۶	۰/۰۰۰۲	۴/۱۶۸	۹/۳۴۹	۰/۷۲۴	گرین‌وآمپ
۰/۸۹۴	۶/۷۵۶	۷/۶۲۵	۱۹/۱۲۵	۰/۴۱۲	هورتون
۰/۹۹۴	-۰/۵۹۲	۲/۹۳۳	۲/۸۳۹	۰/۹۸۳	SCS
۰/۹۹۳	-۰/۷۲۵	۴/۳۲۱	۳/۷۹۶	۰/۹۸۰	فیلیپ
۲/۲۴۶	-۲/۲۴۴	۱۸/۱۳۱	۱۴/۷۶۷	۰/۹۵۳	کوستیاکوف
۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۲	۶۱/۴۳۶	۷۱/۵۱۲	۰/۶۸۲	گرین‌وآمپ
۰/۹۰۳	-۳/۵۷۷	۴۸/۰۳۱	۶۶/۶۱۳	۰/۷۴۴	هورتون
۲/۵۲۳	-۲/۵۲۳	۱۸/۸۴۷	۱۵/۵۷۹	۰/۹۴۶	SCS
۲۰/۵۵۲	-۱۹/۹۹۹	۵۷/۴۰۹	۴۸/۴۲۸	۰/۸۰۹	فیلیپ
۰/۹۹۸	-۰/۱۴۱	۱/۸۷۴	۱/۸۰۲	۰/۹۹۲	کوستیاکوف
۰/۹۷۴	۰/۰۰۰۱	۱۹/۲۹۳	۲۲/۴۹۴	۰/۹۰۸	گرین‌وآمپ
۰/۹۱۹	۱/۳۱۷	۲۰/۳۱۳	۴۳/۶۶۲	۰/۷۳۲	هورتون
۰/۳۲۵	-۰/۳۲۵	۲/۰۱	۲/۱۶۳	۰/۹۹۰	SCS
۰/۹۹۴	-۱/۶۱۴	۴/۵۴۵	۴/۷۲۳	۰/۹۷۲	فیلیپ

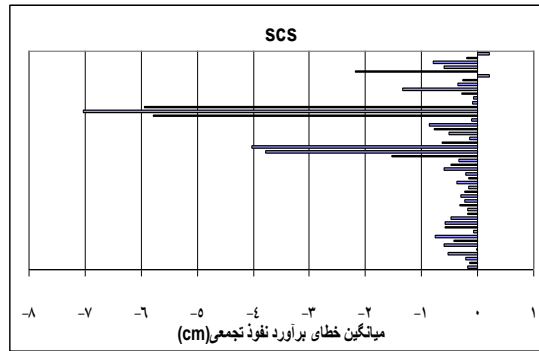
مطالعه نداشته و در تمامی کاربری‌ها مدل کوستیاکوف مدل برتر بوده‌است، و تنها در رتبه‌بندی مدل‌ها تغییرات جزئی در بعضی مناطق دیده می‌شود که در جدول قابل مشاهده می‌باشد.

جدول (۵) مقادیر R^2 و معیار کفایت ناش-ساتکلیف را در کاربری‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که مقادیر جدول نشان می‌دهد شاخص‌های مختلف در تعیین میزان همبستگی مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده تغییری در انتخاب برترین معادله نفوذ در منطقه مورد

جدول (۵): مقادیر R^2 و معیار کفایت ناش-ساتکلیف در کاربری‌های مورد مطالعه

کاربری	آماره	R^2	رتبه مدل با استفاده از شاخص R^2	NSSS	رتبه مدل با استفاده از شاخص NSSS
جنگل	کوستیاکوف	۰/۹۸۶	۱	۰/۹۷۲	۱
	گرین‌وآمپ	۰/۶۷۷	۵	۰/۶۷۷	۳
	هورتون	۰/۷۴۱	۴	۰/۵۳۰	۵
	SCS	۰/۹۶۸	۲	۰/۹۳۶	۲
	فیلیپ	۰/۹۶۲	۳	۰/۶۶۰	۴
ساحلی	کوستیاکوف	۰/۹۸۸	۱	۰/۹۷۶	۱
	گرین‌وآمپ	۰/۷۲۴	۴	۰/۷۲۴	۴
	هورتون	۰/۴۱۲	۵	-۰/۱۳۸	۵
	SCS	۰/۹۸۳	۲	۰/۹۵۳	۲
	فیلیپ	۰/۹۸۰	۳	۰/۸۹۰	۳
کشاورزی	کوستیاکوف	۰/۹۵۳	۱	۰/۹۱۳	۱
	گرین‌وآمپ	۰/۶۸۲	۵	۰/۶۸۲	۳
	هورتون	۰/۷۴۴	۴	۰/۵۵۱	۴
	SCS	۰/۹۴۶	۲	۰/۹۰۰	۲
	فیلیپ	۰/۸۰۹	۳	۰/۰۵۵	۵
باغ	کوستیاکوف	۰/۹۹۲	۱	۰/۹۸۹	۱
	گرین‌وآمپ	۰/۹۰۸	۴	۰/۹۰۸	۴
	هورتون	۰/۷۳۲	۵	۰/۶۳۱	۵
	SCS	۰/۹۹۰	۲	۰/۹۸۶	۲
	فیلیپ	۰/۹۷۲	۳	۰/۹۲۳	۳

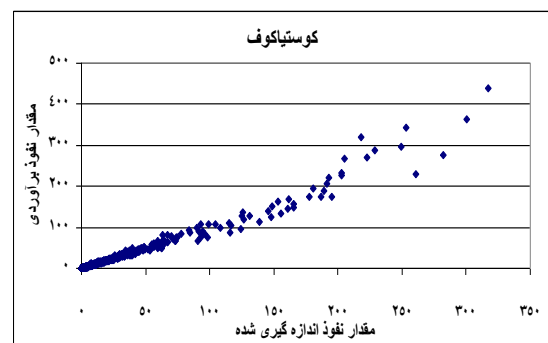
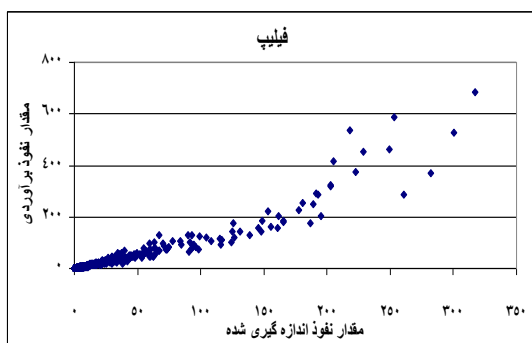
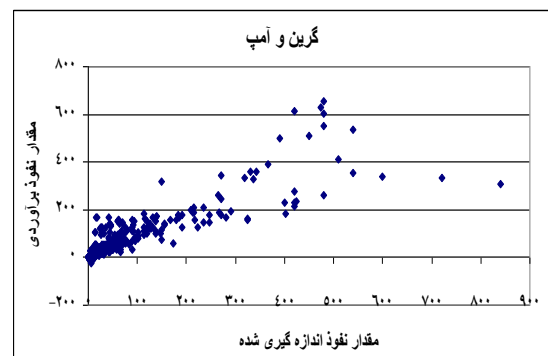
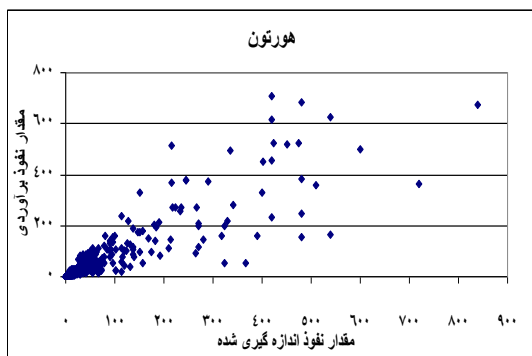


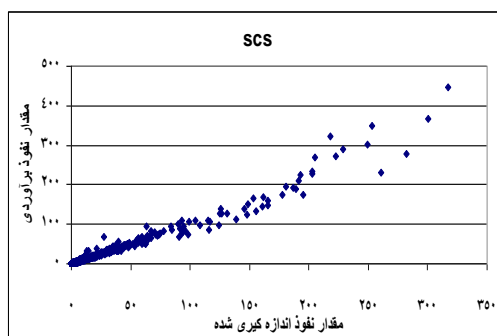


شکل (۲) - پراکنش میانگین خطای برآورد نفوذ تجمعی به وسیله مدل‌های نفوذ در تک تک نمونه‌ها

تخمین مدل‌ها افزایش می‌یابد که این خطا در مدل‌های گرین‌وآمپ و هورتون دارای روند مشخصی نبوده، اما در مدل‌های کوستیاکوف، فیلیپ و SCS ملاحظه می‌گردد که با افزایش مقدار نفوذ تجمعی مدل مقادیر را کمتر برآورد می‌نماید.

شکل (۳) نیز ارتباط بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردی برای هر نقطه را در زمان‌های متفاوت نشان می‌دهد. این شکل حاکی از وجود همبستگی بالا بین مقادیر برآوردشده و اندازه‌گیری‌شده می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش نفوذ تجمعی، مقدار خطای





شکل (۳)، مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و برآوردی

را در کلاس‌های بافتی رسی، سیلتی‌رسی لومی، رسی لومی، لومی‌شنی، شنی لومی نشان می‌دهد. داده‌های این جدول نشان می‌دهد که به استثنای بافت‌های لومی و لومی‌شنی مدل کوستیاکوف در رده نخست ارزیابی قرار دارد. در بافت‌های لومی و لومی‌شنی مدل SCS با میزان خطای کم‌تر مدل برتر بوده‌است. ضمن آن‌که مدل هورتون در تمامی بافت‌ها دارای بدترین نتایج بوده و تنها در بافت رسی میزان خطای آن از معادله گرین‌وآمپ کمتر بوده است.

با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان چنین نتیجه گیری کرد که مدل‌های کوستیاکوف، SCS و فیلیپ در رتبه‌های اول تا سوم قرار می‌گیرند و مدل‌های گرین‌وآمپ و هورتون نیز در آخرین رده ارزیابی قرار دارند. اگرچه مدل SCS از نظر بیش یا کم‌برآوردی روند یکسان‌تری نسبت به مدل کوستیاکوف دارد، اما بالاتر بودن R^2 و کم‌تر بودن مقدار RMSE در مدل کوستیاکوف و همچنین دقت برآورد یکسان‌تر در این مدل، آن‌را در ارجحیت قرار می‌دهد. جدول (۶) میانگین RMSE‌های مدل‌های مختلف

جدول (۶): میانگین RMSE در کلاس‌های مختلف بافتی خاک

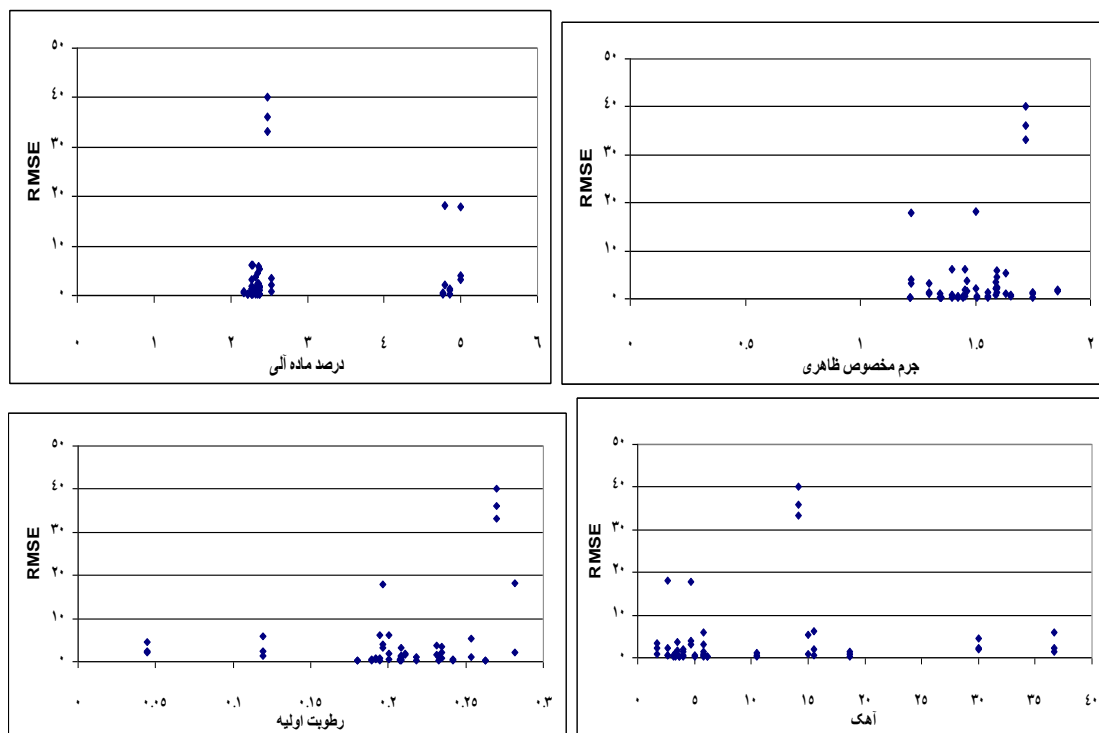
نام مدل	کوستیاکوف	گرین‌وآمپ	هورتون	فیلیپ	SCS
رسی	۱۶/۵۸۶	۷۵/۶۹۲	۶۶/۰۴۹	۵۴/۸۷۱	۱۷/۵۷۹
سیلتی‌رسی لومی	۰/۴۲۹	۲/۷۵۷	۶/۲۶۹	۰/۴۹۷	۰/۶۴۱
رسی لومی	۲/۰۹۷	۲۰/۷۱۰	۳۲/۴۶۴	۶/۷۵۴	۳/۱۸۸
لومی	۴/۰۲۰	۳۲/۴۸۲	۳۷/۳۳۱	۱۴/۲۶۸	۲/۴۷۶
لومی‌شنی	۳/۰۳۱	۹/۶۹۷	۱۹/۸۵۴	۱/۹۴۴	۱/۵۶۹
شنی لومی	۳/۱۹۷	۱۱/۶۰۶	۲۳/۷۲۱	۴/۷۴۵	۴/۲۴۷

جرم مخصوص ظاهری و درصد ماده آلی و میزان RMSE هیچ نوع رابطه معنی‌داری وجود ندارد و تنها بین میزان درصد رطوبت اولیه و RMSE رابطه ضعیفی با $R^2=0.08$ وجود دارد که می‌توان مطرح نمود میزان خطای مدل تحت تاثیر عوامل متعددی قرار دارد که رطوبت اولیه یکی از این عوامل بوده که به میزان 0.08 بر خطای مدل تاثیرگذار بوده است. بررسی ارتباط ویژگی‌های ذکر شده با مقادیر RMSE مدل‌های دیگر نیز نتایج مشابهی در پی

با در نظر گرفتن این‌که هر کدام از مدل‌ها در شرایط خاصی ارزیاب شده‌اند و عوامل متعددی در بروز خطای مدل به هنگام استفاده از این مدل‌ها در شرایط مورد آزمایش تاثیرگذار است، لذا به منظور بررسی اثرات آهک، جرم مخصوص ظاهری، درصد رطوبت اولیه، درصد ماده آلی بر میزان خطای مدل، نمودار پراکنش مقادیر RMSE مدل کوستیاکوف به عنوان تابعی از این خصوصیات در شکل (۴) رسم شده است. بررسی ارتباط بین مقدار ویژگی‌های یادشده و مقدار RMSE نشان داد که بین مقادیر آهک،

اندکی بر خطای مدل موثر بوده است.

داشت و نشان داد که تنها مقادیر رطوبت اولیه به میزان



شکل (۴): نمودار پراکنش RMSE به عنوان تابعی از آهک، ماده آلی، رطوبت اولیه و جرم مخصوص ظاهری

در رابطه با این تحقیق، نشاط و پاره‌کار (۱۳۸۳) نیز در تحقیقی که در خاک‌های لومی، رسی و لومی رسی انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که کوستیاکوف بهترین برآزش را با داده‌های تجربی دارد که مشابه با نتایج این تحقیق می‌باشد. نتایج محمدی و رفاهی (۱۳۸۴) نیز در خاک‌های لومی، لومی شنی، لومی رسی و شنی لومی نشان داد که مدل کوستیاکوف بهترین عملکرد را در برآورد مقدار نفوذ دارا می‌باشد که با نتیجه پژوهش حاضر همخوانی دارد. از طرفی، ملکی و همکاران (۱۳۸۳) گزارش نمودند که مدل سازمان حفاظت خاک امریکا (SCS) نسبت به مدل کوستیاکوف، برآزش بهتری با داده‌های تجربی دارد که با نتیجه این تحقیق همخوانی ندارد.

همچنین Oku و همکاران (۲۰۰۵) نیز به این نتیجه رسیدند که مدل فیلیپ کارایی بهتری نسبت به مدل کوستیاکوف دارد که با نتیجه این پژوهش همخوانی ندارد. همچنین، نتایج Chahinian و همکاران (۲۰۰۵) نشان داد که مدل سازمان حفاظت خاک امریکا (SCS) مدل مناسبی برای برآورد نفوذ ارزیابی نشد، در حالی که، در

نتیجه‌گیری

ارزیابی و مقایسه مدل‌های نفوذ گرین‌آمپ و هورتون، کوستیاکوف، SCS و فیلیپ نشان داد که مدل کوستیاکوف برای برآورد نفوذ آب در خاک دقت بهتری را داشته است و مدل‌های SCS، فیلیپ، گرین‌آمپ و هورتون بعد از آن در رده‌های بعدی قرار گرفتند. بررسی مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده نشان داد که تمامی مدل‌ها در مقادیر بالای نفوذپذیری، خطایشان افزایش یافت که این خطا در معادلات کوستیاکوف، SCS و فیلیپ به صورت کم‌برآوردی بوده است. در حالی که در مدل‌های هورتون و گرین‌آمپ، روند خاصی در خطای مدل مشاهده نشد. همچنین، عملکرد مدل‌ها در گروه‌های مختلف بافتی خاک نشان داد که به استثنای بافت‌های لومی و لومی شنی که در آن مدل SCS با میزان خطای کم‌تر مدل برتر بوده است، در سایر بافت‌ها مدل کوستیاکوف در رده‌ی نخست ارزیابی قرار گرفت.

مناسب‌ترین مدل به منظور برآورد مقادیر نفوذ می‌باشد که کاملاً با نتایج این تحقیق همخوانی ندارد، که دلیل این ناهمخوانی تفاوت در سرشت خاک‌ها و مجموع شرایط حاکم بر آزمایش‌ها می‌باشد، چراکه هر کدام از این مدل‌ها در شرایط ویژه‌ای ارائه شده است و برای شرایط خاصی بهترین برآزش را با داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در استفاده از مدل‌ها برای مناطق مختلف باید این نکات مورد توجه قرار بگیرد.

این تحقیق، این مدل پس از کوستیاکوف در رتبه دوم قرار گرفت. در پژوهش صورت گرفته توسط Turner و همکاران (۲۰۰۶)، مدل گرین و آمپ، بهترین مدل و مدل هورتون بدترین برآزش را با داده‌های تجربی داشته‌است که اگرچه در پژوهش حاضر نیز مدل هورتون بدترین کارایی را داشته است، اما مدل گرین و آمپ نیز برای منطقه نتایج مناسبی نداشته و در واقع پس از هورتون دارای بالاترین میزان خطای برآورد بوده است. Yukuan و همکاران (۲۰۰۷) به این نتیجه رسیدند که مدل هورتون

منابع

۱. اداره کل منابع طبیعی نوشهر. ۱۳۸۱. طرح جنگلداری کجور، سری ۳ آغوزچال. آبخیز ۴۶. وزارت جهاد کشاورزی. سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور. ۳۷۹ص.
۲. پرچی عراقی، ف.، س.م. میرلطیفی، ش. قربانی دشتکی و م.ح. مهدیان. ۱۳۸۹. ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی خاک و کاربری‌های اراضی. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۹۳-۲۰۵ (۲) ۴
۳. قربانی دشتکی، ش.، م. همایی و م.ح. مهدیان. ۱۳۸۸. برآورد پارامترهای نفوذ آب به خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی آب و خاک. ۱۸۵-۱۹۸ (۱) ۲۳
۴. محمدی، م.ح. و ج. رفاهی. ۱۳۸۴. تخمین پارامترهای معادلات نفوذ توسط خصوصیات فیزیکی خاک. علوم کشاورزی ایران. ۱۳۹۱-۱۳۹۸ (۶) ۳۶
۵. ملکی، ع.، م. بهزاد و م. برومندنسب. ۱۳۸۳. تعیین ضرایب معادله‌های نفوذ و ارزیابی آن‌ها در اراضی نیشکر جنوب اهواز (واحد امیرکبیر). کشاورزی (ویژه نامه مهندسی علوم آب). ۲۷-۴۶ ۳۱.
۶. موسوی، س.ب.، م.ر. نیشابوری و و. فیضی‌اصل. ۱۳۸۴. نفوذپذیری و تعیین ضرایب معادلات نفوذ با روش‌های استوانه مضاعف، بارانساز مصنوعی و آبپاش. دانش کشاورزی. ۷۹-۹۱ (۱) ۱۵.
۷. نشاط، ع. و م. پاره‌کار. ۱۳۸۶. مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۸۶-۱۹۵ (۳) ۱۴.
8. Chahinian, N., R. Moussa, P. Andrieux and M. Voltz, 2005. Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*. 306:191-214.
9. Mishra, S., J. Tyagi and V. Singh. 2003. Comparison of infiltration models. *Hydrological Processes*. 17:2629-2652.
10. Oku, E.E., A.N. Essoka and S.I. Oshunsanya. 2005. Determination of infiltration characteristics and suitability of Kostiakov and Philip infiltration models in predicting infiltration into soils under different treatments. *Global Journal of Pure and Applied Sciences*. 11(3):323-326.
11. Sy, N.L. 2006. Modeling the infiltration process with a multi-layer perceptron artificial neural network. *Hydrol. Sci. J.*, 51(1): 3-20.
12. Turner, E.R. 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. MSc. thesis. University of Maryland. USA. 202 pp.
13. Yukuan, W., F. Bin, X. Pei, W. Daojie, W. Xiantuo and W. Yongqiang. 2007. Validation of three infiltration models on purple soil under simulated rainfall. *Progress in Natural Science*. 1002-0071(9):1059-1066.

Evaluation of Some Infiltration Models for Different Land Uses in Kojour Watershed

S. S. Kavousi¹ M. Vafakhah^{2*} M. H. Mahdian³

Abstract

Infiltration study as a component of hydrological cycle is necessary for water projects management and planning. Because infiltration rate measurement is very time-consuming and costly in field, therefore various models are used for the infiltration rate estimation; however each model, in certain circumstances may show the best fitness for experimental data. Choice of suitable model is important in water resources management, thus in this research, first, infiltration rate measured in four land uses including forest, garden, agriculture and seacoast using double ring infiltrometer, and then infiltration models of American soil conservation service (SCS), Philip, Kostiakov, Green-Ampt and Horton used and thus evaluated by coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe sufficiency score (NSSS), root mean squared error (RMSE) and mean error (ME). The results showed that Kostiakov model had the best fitness to experimental data with maximum of R^2 and NSSS and minimum of RMSE in all land uses. Also, ME values showed that Kostiakov model in garden land use, overestimated the infiltration rate, but in other land uses, model had underestimates. Besides, SCS model in all land uses estimated the infiltration rate less than real values and thus showed stable function than the other models. Totally, Kostiakov model, for all land uses, was placed at the first rank and SCS, Philip, Green-Ampt and Horton were placed in next ranks, respectively.

Keywords: SCS Infiltration Model, Philip Model, Kostiakov Model, Green-Ampt Model, Horton Model, Infiltration, Koujor Watershed.

¹ M.Sc. Student, Watershed Management Engineering Department, Natural Resources Faculty, Tarbiat Modares University

^{2*} Corresponding Author, Assistant Professor, Watershed Management Engineering Department, Natural Resources Faculty, Tarbiat Modares University, Email:vafakhah@modares.ac.ir

³ Associate Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization