فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب
سال چهارم● شماره سیزدهم ● پاییز ۱۳۹۲

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 آن‌جا 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 وآمپ 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 آن‌که 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 حالی‌که 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، گرین‌وآمپ و هورتون در رده‌های بعدی قرار گرفتند.

واژه‌های کلیدی: مدل نفوذ SCS، مدل فیلیپ، مدل کوستیاکف، مدل گرین وآمپ، مدل هورتون، نفوذ، کاربری اراضی، حوره 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 تا رسی ریز جمع‌آوری شده بود، به‌کار بردند و با استفاده از معیار کفایت ناش-ساتکلیف مدل‌ها را رتبه‌بندی کردند. در این رتبه‌بندی، مدل‌های نیمه‌تجربی Singh-yu، Holtan و Horton به ترتیب رتبه ۶/۵۲، ۵/۵۷ و ۵/۴۸ از ۱۰ را به خود اختصاص دادند. مدل‌های تجربی Huggin & Monke، modified Kostiakov، Kostiakov 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 کارآیی را برای منطقه مورد مطالعه داشته است.

همچنین، Chahinian و همکاران (۲۰۰۵) چهار مدل Morel-Seytoux، SCS، هورتون و فیلیپ 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 کوستیاکف، کوستیاکف اصلاح شده، فیلیپ و سازمان حفاظت خاک (SCS) مورد ارزیابی قرار داده و ضرایب آن‌ها را با استفاده از ۱۵ سری داده صحرایی تعیین نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد مدل سازمان حفاظت خاک (SCS) با خطای متوسط ۱۱/۶درصد در محاسبه حجم آب نفوذی از کارآیی بیشتری نسبت به سایر مدل‌های نفوذ در منطقه مورد مطالعه برخوردار بوده است.

موسوی و همکاران (۱۳۸۴) ضمن تعیین ضرایب مدل‌های نفوذ گرین‌وآمپ، فیلیپ، کوستیاکف، کوستیاکف 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 کوستیاکف بهترین برازش را با داده های 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 حالی‌که در درازمدت، مدل‌های فیلیپ و SCS نتایج بهتری داشته‌اند.

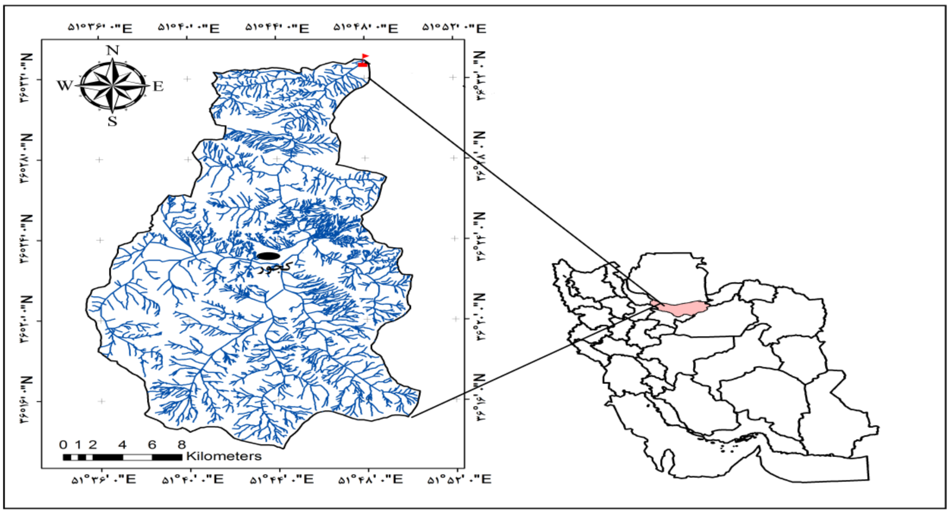
پرچمی‌عراقی و همکاران (۱۳۸۹) به‌منظور بررسی مدل‌های نفوذ گرین‌امپ، فیلیپ، کوستیاکوف، لوییز، سازمان حفاظت خاک امریکا (SCS) و هورتون در برآورد نفوذ تجمعی از شاخص‌های ME، MAME، RMSE و انحراف معیار RMSE و ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل کوستیاکوف-لوییز در تمامی شرایط 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، به‌طوری‌که یک مدل نفوذ در دو خاک مشابه از نظر خصوصیات فیزیکی، ممکن است دارای عملکرد متفاوت باشد (Sy، ۲۰۰۶). با توجه به ضرورت تعیین مقدار نفوذ در مطالعات هیدرولوژی و برنامه‌ریزی مدیریت آب و از آنجایی‌که هر مدل در شرایط خاص بهترین برازش را با داده‌های تجربی دارد، در این پژوهش، ارزیابی مدل‌های نفوذ سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS ، فیلیپ، کوستیاکف، 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. حوزۀ آبخیز کجور دارای مساحت ۱۳۲۶۳ هکتار است که در جنوب شرقی شهرستان نوشهر در طول جغرافیایی "۸ '۴۱ °۵۱ تا "۴۰ '۴۹ °۵۱ و عرض "۶ '۲۴ °۳۶ تا "۳۳ '۳۲ °۳۶ قرار گرفت این حوزۀ آبخیز از شمال با دریای خزر و از جنوب با بخش کجور مجاور است (شکل ۱). حداقل و حداکثر ارتفاع حوزه به‌ترتیب 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 سالیانه در پایین‌دست حوزه آبخیز و بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی نوشهر ۱۳۰۸/۸ و با گرادیان منفی به سمت ارتفاعات به‌حدود ۲۴۰میلی‌متر در بالادست کاهش می‌یابد. حداکثر و حداقل متوسط بارندگی ماهیانه به‌ترتیب در مهرماه با ۲۸۰/۴ میلی‌متر و تیرماه با ۳۷/۴ میلی‌متر رخ می‌دهد و حداکثر و حداقل میانگین دمای ماهیانه به‌ترتیب در تیر و مرداد ۲۵ و در بهمن ۶/۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (اداره کل منابع طبیعی نوشهر، ۱۳۸۱).



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

روش تحقیق

خلاصه‌ای از مدل‌های مورد بررسی به همراه پارامترهای مربوطه در جدول (۱) ارایه 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.

$$O(p) = \sum_{i=0}^{n} (y_e - y_o)^2 \quad (۱)$$

جدول (۱)- خلاصه‌ای از مدل‌های نفوذ مورد مطالعه

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

جدول (۲): مقادیر بیشینه و کمینه‌ی برخی از خصوصیات خاک‌شناسی در کاربری‌های مورد مطالعه

کاربری	**رس**	**لای**	**شن**	**ماده آلی**	**آهک**	**رطوبت**	**سنگریزه**	**جرم ویژه ظاهری** ($\mathbf{g.cm^{-3}}$)
				(٪)				
				(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 ۰/۹۷	۱/۴-۱/۵۹
کشاورزی	۴۰-۴۸	۲۹-۳۴	۲۳-۲۶	۲/۳۷-۴/۸۵	-۱۸/۶۶ ۱۴/۱۶	۲۳-۲۶	۰/۱۷-۴/۱۴	۱/۶۳-۱/۷۴
باغ	۳۲-۴۰	۳۲-۴۱	۲۲-۲۸	۲/۲۷-۳/۵	-۱۵/۵۰ ۵/۸۳	۲۰-۲۱	-۱۸/۵۷ ۲/۹۹	۱/۲۹-۱/۵۵

پس از تعیین پارامترهای مدل‌های مورد بررسی، مقادیر نفوذ حاصل از مدل‌های مختلف با مقادیر واقعی مقایسه شد و با استفاده از آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، معیار کفایت ناش-ساتکلیف (NSSS)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطا (ME)، کارآیی مدل‌های فیلیپ، کوستیاکوف، گرین‌وآمپ، سرویس حفاظت خاک امریکا و هورتون در کاربری‌های مورد مطالعه ارزیابی و مقایسه شد. آماره‌های مورد نظر به صورت زیر به ست می‌آیند:

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

مقدار آماره ME(cm) بیان کننده این است که مدل مورد بررسی نفوذ آب به خاک را بیش‌برآورد (مقادیر مثبت)، یا کم برآورد (مقادیر منفی) می‌نماید. 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 می‌یابد. مقدار خطای RMSE منحنی نفوذ ارائه می‌کند. برآورد شده را در کل

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

(۴)

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

$$NSSS = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{n}(y_o - y_e)^2}{\sum_{i=0}^{n}(y_o - \bar{y}_o)^2} \qquad (۵)$$

نتایج و بحث

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

جدول (۳) محدوده پارامترهای مدل‌های نفوذ سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS ، فیلیپ، کوستیاکف، گرین و آمپ و هورتون را در کاربری‌های متفاوت نشان می‌دهد.

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

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

جدول (۴) آماره‌های محاسبه شده برای ارزیابی صحت مدل‌های مورد مطالعه را در کاربری‌ها نشان می‌دهد. با توجه به این‌که 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 حالی‌که 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^2های مربوط به مدل‌های نفوذ مختلف نیز بیانگر این است که مدل کوستیاکوف در تمام کاربری‌ها بهترین بوده است، ضمن آن‌که 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 حالی‌که 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

می‌دهد که مدل‌های فیلیپ و SCS مدل‌های کم‌برآوردگر هستند و تقریبا 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 حالی‌که مدل‌های گرین‌وآمپ و هورتون در برخی موارد بیش‌برآوردگر و در برخی دیگر کم‌برآوردگر بوده‌اند و 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 مشابه‌ای از نظر کم‌برآوردی بوده‌اند که به خوبی در شکل (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

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

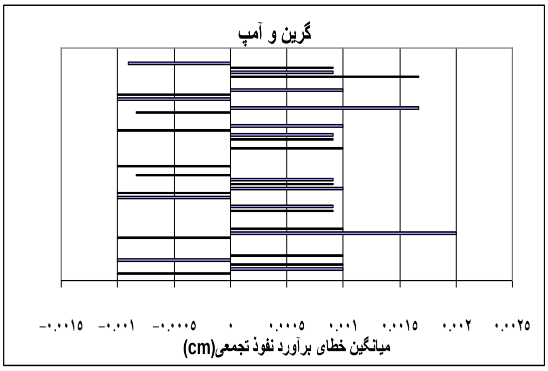
آماره / کاربری		میانگین R^2	RMSE	انحراف معیارRMSE	میانگین ME	میانگین قدرمطلق ME
جنگل	کوستیاکوف	۰/۹۸۶	۲/۵۸۸	۴/۷۵۸	-۰/۴۵۳	۰/۹۹۶
	گرین‌وآمپ	۰/۶۷۷	۲۲/۶۶۴	۳۷/۷۳۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۶
	هورتون	۰/۷۴۱	۲۸/۵۷۰	۴۱/۶۲۷	۶/۹۳۳	۱۰/۹۰۳
	SCS	۰/۹۶۸	۳/۳۴۱	۵/۲۲۲	-۰/۷۲۹	۰/۷۲۹
	فیلیپ	۰/۹۶۲	۹/۳۶۸	۱۷/۷۶۲	-۴/۲۳۲	۴/۲۳۳
ساحلی	کوستیاکوف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

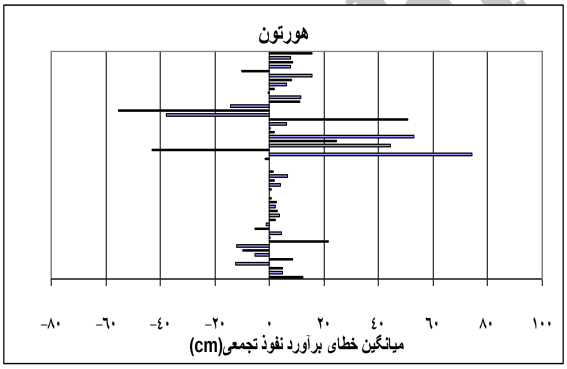
جدول(۵) مقادیر R^2 و معیار کفایت ناش-ساتکلیف را در کاربری‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که مقادیر جدول نشان می‌دهد شاخص‌های مختلف در تعیین میزان همبستگی مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری‌شده تغییری در انتخاب برترین معادله نفوذ در منطقه مورد مطالعه نداشته و در تمامی کاربری‌ها مدل کوستیاکوف مدل برتر بوده‌است، وتنها در رتبه‌بندی مدل‌ها تغییرات جزیی در بعضی مناطق دیده می‌شود که در جدول قابل مشاهده می‌باشد.

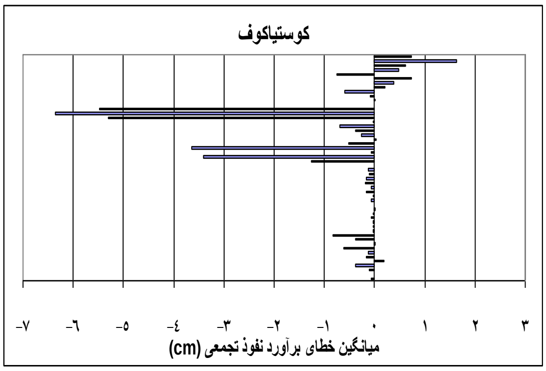
جدول(۵): مقادیر R^2 و معیار کفایت ناش-ساتکلیف در کاربری‌های مورد مطالعه

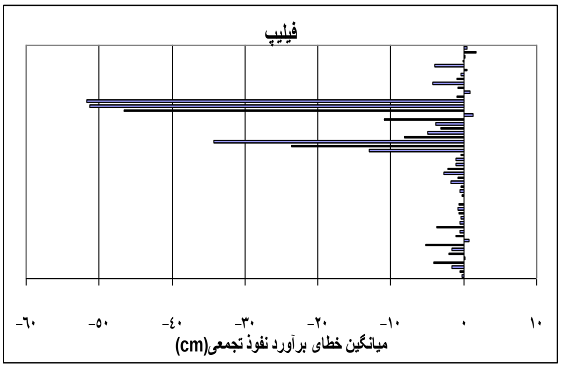
کاربری	آماره	R^2	رتبه مدل با استفاده از شاخص R^2	NSSS	رتبه مدل با استفاده از شاخص NSSS
جنگل	کوستیاکوف	۰/۹۸۶	۱	۰/۹۷۲	۱
	گرین‌وآمپ	۰/۶۷۷	۵	۰/۶۷۷	۳
	هورتون	۰/۷۴۱	۴	۰/۵۳۰	۵
	SCS	۰/۹۶۸	۲	۰/۹۳۶	۲
	فیلیپ	۰/۹۶۲	۳	۰/۶۶۰	۴
ساحلی	کوستیاکوف	۰/۹۸۸	۱	۰/۹۷۶	۱
	گرین‌وآمپ	۰/۷۲۴	۴	۰/۷۲۴	۴
	هورتون	۰/۴۱۲	۵	-۰/۱۳۸	۵
	SCS	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

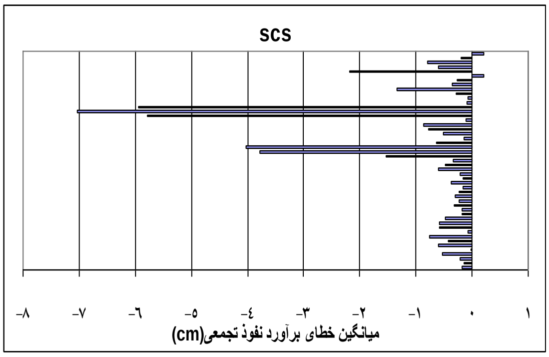
hive of SID





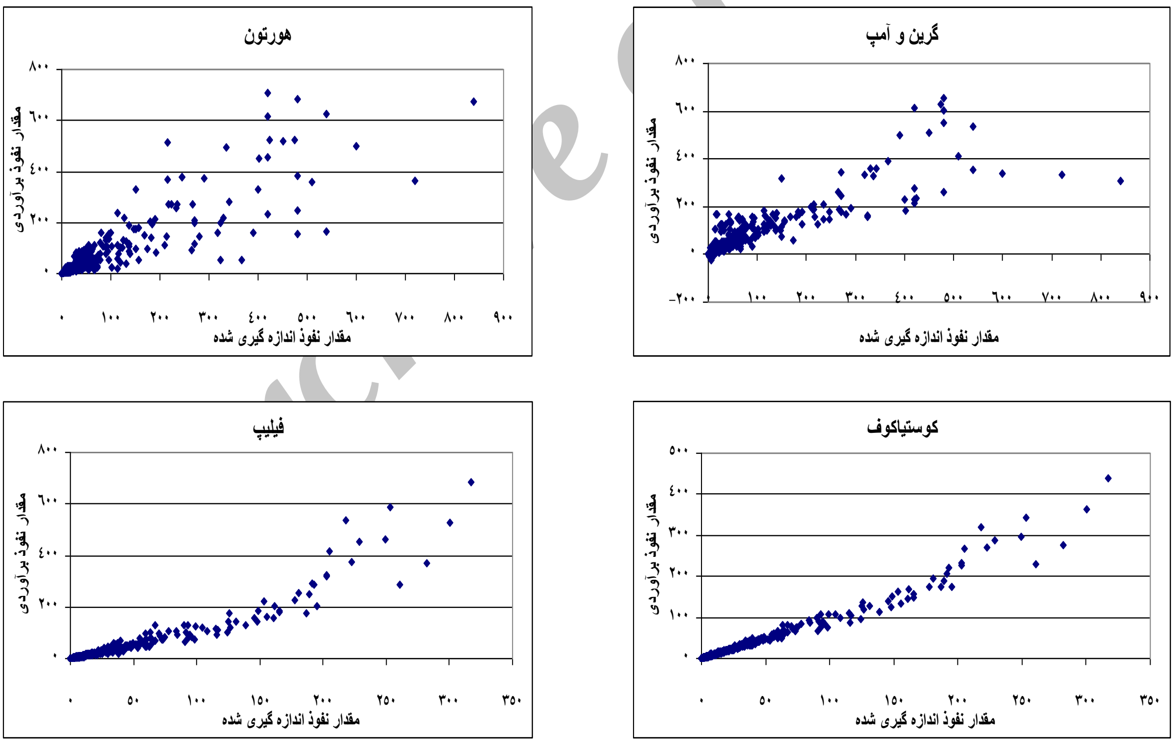


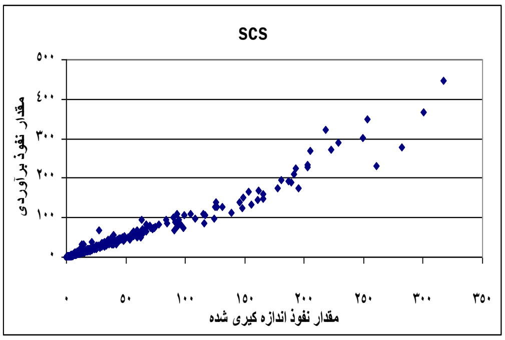




شکل (۲)- پراکنش میانگین خطای برآورد نفوذ تجمعی به وسیله مدل‌های نفوذ در تک تک نمونه‌ها

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 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)، مقادیر نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده و برآوردی

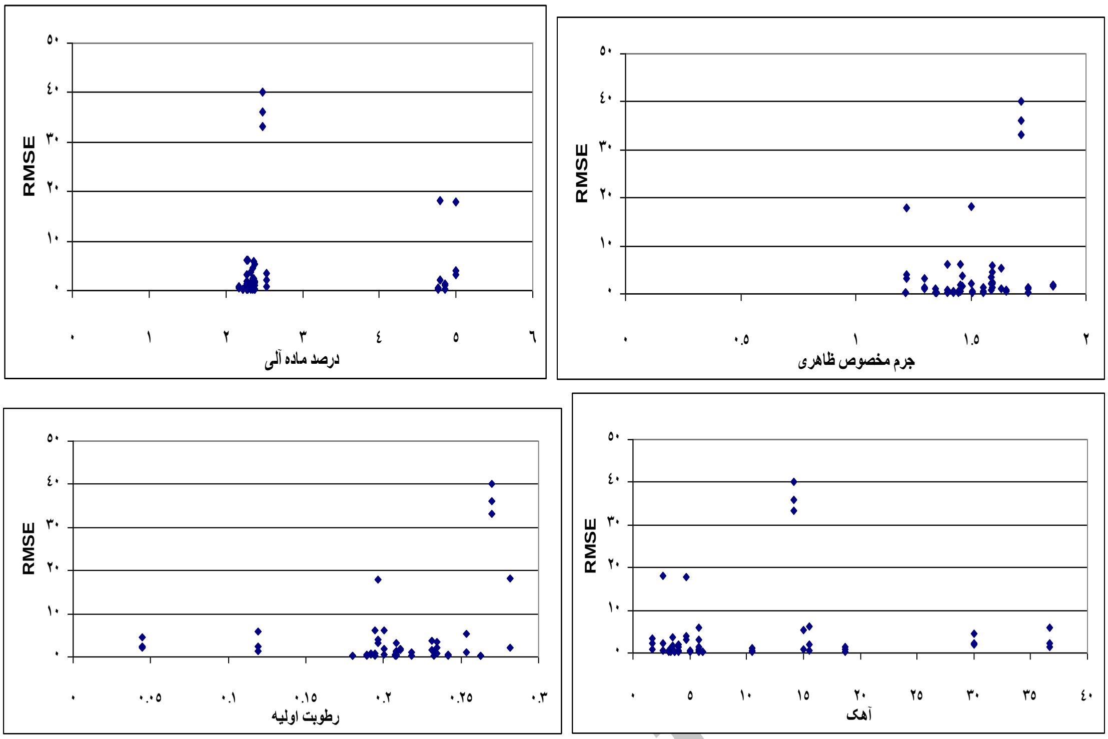
با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان چنین نتیجه گیری کرد که مدل‌های کوستیاکوف، SCS و فیلیپ در رتبه‌های اول تا سوم قرار می‌گیرند و مدل‌های گرین‌وآمپ و هورتون نیز در آخرین رده ارزیابی قرار دارند. اگرچه مدل SCS از نظر بیش یا کم‌برآوردی روند یکسان‌تری نسبت به مدل کوستیاکوف دارد، اما بالاتر بودن R^2 و کم‌تر 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 را در کلاس‌های بافتی رسی، سیلتی‌رسی‌لومی، رسی‌لومی، لومی، لومی‌شنی، شنی‌لومی 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.

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

نام مدل بافت خاک	کوستیاکوف	گرین‌وآمپ	هورتون	فیلیپ	SCS
رسی	۱۶/۵۸۶	۷۵/۶۹۲	۶۶/۰۴۹	۵۴/۸۷۱	۱۷/۵۷۹
سیلتی‌رسی‌لومی	۰/۴۲۹	۲/۷۵۷	۶/۲۶۹	۰/۴۹۷	۰/۶۴۱
رسی‌لومی	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
شنی‌لومی	۳/۱۹۷	۱۱/۶۰۶	۲۳/۷۲۱	۴/۷۴۵	۴/۲۴۷

با در نظر گرفتن این‌که هر کدام از مدل‌ها در شرایط خاصی ارایه 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، 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 $R^2= ۰/۰۸$ 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 ۰/۰۸ بر خطای مدل تاثیرگذار بوده است. بررسی ارتباط ویژگی‌های ذکر شده با مقادیر RMSE مدل‌های دیگر نیز نتایج مشابهی درپی

داشت و نشان داد که تنها مقادیر رطوبت اولیه به میزان اندکی بر خطای مدل موثر بوده است.



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

Archive of

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، گرین‌امپ و هورتون بعد از آن در رده‌های بعدی قرار گرفتند. بررسی مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردشده 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 حالی‌که در مدل‌های هورتون و گرین‌وآمپ، روند خاصی در خطای مدل مشاهده نشد. همچنین، عملکرد مدل‌ها در گروه‌های مختلف بافتی خاک نشان داد که به استثنای بافت‌های لومی و لومی‌شنی که در آن مدل SCS با میزان خطای کم‌تر مدل برتر بوده است، در سایر بافت‌ها مدل کوستیاکوف در رده‌ی نخست ارزیابی قرار گرفت.

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 برازش 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 نمودندکه مدل سازمان حفاظت خاک امریکا(SCS) نسبت به مدل کوستیاکوف، برازش 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 حالی‌که، در

این تحقیق، این مدل پس از کوستیاکوف در رتبه دوم قرار گرفت. در پژوهش صورت گرفته توسط Turner و همکاران (۲۰۰۶)، مدل گرین‌و آمپ، بهترین مدل و مدل هورتون بدترین برازش را با داده‌های تجربی داشته‌است که اگرچه در پژوهش حاضر نیز مدل هورتون بدترین کارایی را داشته است، اما مدل گرین‌وآمپ 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 مناسب‌ترین مدل به منظور برآورد مقادیر نفوذ می‌باشد که کاملا 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 ارایه شده است و برای شرایط خاصی بهترین برازش را با داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در استفاده از مدل‌ها برای مناطق مختلف باید این نکات مورد توجه قرار بگیرد.

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. پرچمی‌عراقی، ف.، س.م. میرلطیفی، ش. قربانی‌دشتکی 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 ح. 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 روش های 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 Sciense. 1002-0071(9):1059-1066.

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

S. S. Kavousi[1] M. Vafakhah[2*] M. H. Mahdian[3]

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 infilterometer, 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