

ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف نفوذ تجمعی در کاربری‌ها و بافت‌های مختلف خاک با استفاده از شبیه‌ساز باران

امین فاخر نیکجه¹، مهدی وفاخواه^{2*} و سید حمید رضا صادقی³

تاریخ دریافت: 91/11/30 تاریخ پذیرش: 92/04/01

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس

² استادیار گروه مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس

³ استاد گروه مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تربیت مدرس

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: vafakhah@modares.ac.ir

چکیده

نفوذپذیری از جمله مهمترین متغیرهای فیزیکی خاک‌ها و داده‌ای بنیادین در کلیه مدل‌های بارش و رواناب به منظور تعیین تلفات آب در سطح حوزه‌های آبخیز می‌باشد. اما اندازه‌گیری آن بسیار وقت‌گیر و پرهزینه بوده به همین دلیل برآورد مقادیر نفوذپذیری خاک‌ها توسط مدل‌های مختلف همواره از دغدغه‌های پژوهشگران بوده است. در این پژوهش به منظور تعیین بهترین معادله نفوذ در سطح حوضه آبخیز امامه، با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز بارش مقادیر نفوذپذیری ناشی از شبیه‌سازی یک رخداد بارش به مدت 90 دقیقه اندازه‌گیری و به روش بهینه‌سازی مربعات خطا، پارامترهای پنج مدل نفوذپذیری کوستیاکوف، گرین امپت، هورتون، سرویس حفاظت منابع طبیعی امریکا (NRCS) و فیلیپ در چهار کاربری اراضی شامل باغی، کشاورزی، مرتع و آیش و سه کلاس بافت شنی رسی لومی، لومی، شنی لومی محاسبه شد. سپس مقادیر نفوذ تجمعی برآوردی مدل‌های مختلف با استفاده از 8 آماره مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد که مدل‌های کوستیاکوف و NRCS بهترین عملکرد را در برآورد دقیق‌تر مقادیر نفوذ تجمعی در کل حوضه آبخیز داشت و دارای روند پایدارتری در برآورد نفوذ تجمعی در کاربری‌های مختلف بود. مدل هورتون در رتبه بعدی در کل حوضه قرار گرفت. به طور کلی مدل‌های تجربی (کوستیاکوف، هورتون و سرویس حفاظت خاک امریکا (NRCS)) در این حوضه عملکرد واقع بینانه‌تری در برآورد مقادیر نفوذ تجمعی نسبت به مدل‌های با پایه فیزیکی (مدل‌های گرین امپت و فیلیپ) از خود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: حوضه آبخیز امامه، شبیه‌ساز باران، کاربری اراضی، کلاسهای بافتی

Efficiency Evaluation of Different Infiltration Models in Different Land Uses and Soil Classes using Rainfall Simulator

A Fakher Nikche¹, M Vafakhah^{2*} and SHR Sadeghi³

Received: 18 February 2013 Accepted: 22 June 2013

¹- M.Sc. Student, Watershed Management Eng., Dept., Faculty of Natural Res., Tarbiat Modares Univ., Iran

²- Assist. Prof., Dept. of Watershed Management Eng., Faculty of Natural Res., Tarbiat Modares Univ. Iran

³- Prof., Dept. of Watershed Management Eng., Faculty of Natural Res., Tarbiat Modares Univ., Iran

* Corresponding Author Email: vafakhah@modares.ac.ir

Abstract

Infiltration is one of the most important soil physical variables and basic data in rainfall-runoff models for water loss determination in watersheds. Its measurement is, however, time consuming and costly. For this reason, soils infiltration rates determination by different models is always a serious concern to researchers. In this research, a single event precipitation was measured using rainfall simulator during a 90-minute rainfall for determination of the best infiltration equation in watershed scale. The parameters of five infiltration models namely Kostiakov, Green-Ampt, Horton, NRCS and Philip, were estimated by sum of squared error optimization for four different land uses and three soil textures of sandy clay loam, loam, and sandy loam. The cumulative infiltration rates estimated from the different models were compared using eight different statistics. The results showed that the Kostiakov and NRCS models had the highest priority score and the most permanent trend for accurate estimating of cumulative infiltration rate in different land uses whereas the Horton model was situated in the next position. Overall, the empirical models (Kostiakov, NRCS and Horton models) had the more realistic efficiency than the physical models (Green-Ampt and Philip models).

Keywords: Amameh watershed, Land use, Rainfall simulator, Soil texture classes

مقدمه
نفوذ در مدیریت کمی و کیفی منابع آبی و همچنین برآورد تولید رواناب سطحی مورد استفاده قرار می-گیرد. لذا شناخت کمی این پدیده جلوگیری از تخریب اراضی، منابع خاک و آب را به همراه خواهد داشت (دیپ و داس 2008). نفوذ به عنوان یک مکانیسم مهم در

امروزه اندازه گیری میزان نفوذ آب به داخل خاک به شکل گسترده ای در تهیه و اجرای طرح های توسعه-ای، طراحی سازه های هیدرولوژیکی، برنامه ریزی های مربوط به حفاظت خاک اهمیت دارد. بنابراین، پارامتر

تخمینی تجربی دارای محدودیت کمتری بوده اما وابسته به شرایطی هستند که برای آنها واسنجی شده‌اند. به همین دلیل معادلات مبتنی بر مبانی فیزیکی در شرایطی که خاک منطقه همگن باشد نتیجه مطلوبی ارائه می‌کنند (سپهوند و همکاران 1390)، اما این خصوصیت به ندرت در یک حوزه آبخیز دیده می‌شود، زیرا نفوذ به شدت تحت تاثیر تغییرات مکانی هستند. از آنجا که فرضیات و پارامترهای به کار رفته در مدل‌های نفوذ با هم متفاوت است، انتظار می‌رود در یک شرایط معین، مدلی خاص دارای عملکرد بهتری در مقایسه با بقیه باشد (میشرا و همکاران 2003، قربانی دشتکی و همکاران 1387). از این رو پژوهش‌های متعددی در زمینه ارزیابی و مقایسه مدل‌های نفوذ صورت گرفته است.

تورنر (2006) با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران صحرایی، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه مریلند عملکرد مدل‌های هورتون گرین امپت، هولتان، کوستیاکوف و فیلیپ را مورد ارزیابی قرار داد و بیان کرد که مدل گرین امپت بهترین مدل در برآورد نفوذپذیری در اراضی مورد بررسی بود. یوکویان و همکاران (2007) با استفاده از دستگاه شبیه‌ساز باران در سه شدت 53، 70 و 110 میلی‌متر در ساعت، نفوذپذیری در 28 نقطه از یک ایستگاه تحقیقات کشاورزی را اندازه‌گیری کرد و سه مدل هورتون، کوستیاکوف و کوستیاکوف اصلاح شده را با استفاده از معیار کارایی ناش ساتکلیف مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل هورتون بهترین کارایی را برای منطقه مورد مطالعه داشت. همچنین اگبادون و ادیس (2007)، رانبین و همکاران (2011)، دنوالت و بورلی (2011) و زینکین و همکاران (2013) در مطالعات مشابه‌ای در اراضی کشاورزی و خاک‌های چمنی و جنگلی دست کاشت بیان کردند که مدل‌های سه پارامتری از جمله هورتون و

علوم خاک نه تنها کنترل ورود آب به خاک بلکه نحوه توزیع مجدد آب در خاک و حتی آب‌های عمیق نفوذ یافته به آب‌های زیرزمینی را نیز در بر می‌گیرد (والیتاز 2010). به همین سبب تغییرات مکانی نفوذپذیری خاک نقشی بسیار مهمی در فرایندهای هیدرولوژیک ایفا کرده و تاثیر مستقیم به سزایی در واکنش حوزه‌های آبخیز دارد (هریست و دیک روگر 2003).

مقدار نفوذ آب به خاک تابع عواملی مانند بافت و ساختمان خاک، پوشش گیاهی، شیب سطح زمین و قابلیت پراکندگی ذرات سطح خاک می‌باشد (علیزاده 1384) که تغییرپذیری زمانی و مکانی آنها موجب تفاوت در مقادیر نفوذ در خاک‌های مختلف می‌شود (پرچی عراقی و همکاران 1389) به همین دلیل آزمایش‌های میدانی برای اندازه‌گیری مقادیر نفوذپذیری در شرایط ویژه هر منطقه ضروری است (مرادی باصری و همکاران 1390). تاکنون روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری نفوذپذیری در عرصه مورد استفاده قرار گرفته که از آن جمله استفاده از حلقه مضاعف، پلات‌های کوچک آزمایشی و دستگاه‌های شبیه‌ساز باران بیشتر مورد توجه بوده‌اند اما با توجه به آنکه اندازه‌گیری مستقیم دارای محدودیت‌های مختلف نظیر صرف هزینه و زمان زیاد می‌باشد، به همین دلیل، مدل‌های مختلفی به منظور برآورد نفوذ توسعه پیدا کرده‌اند. برخی از این مدل‌ها روابطی تجربی بوده که بر شکل منحنی سرعت نفوذ- زمان تطبیق داده شده و برخی دیگر با توجه به مبانی فیزیکی حاکم بر نفوذپذیری سعی در ساده سازی شرایط اولیه و مرزی جریان غیر اشباع دارند (والش و مک دونالد 2012). این فرضیات با وجودی که داده‌های فیزیکی مورد نیاز این مدل‌ها را کاهش می‌دهد بلکه از کارایی آنها به دلیل یکسان فرض کردن شرایط اولیه و مرزی می‌کاهند (قربانی دشتکی و همکاران 2009). در حالی که مدل‌های

مواد و روش‌ها

به منظور اجرای این تحقیق، حوزه آبخیز امامه به عنوان معرف البرز جنوبی به مساحت 3712 هکتار، با اقلیم ارتفاعات (بر اساس روش آمبرژه) و طیف گسترده‌ای از کاربری اراضی انتخاب شد.

معادلات نفوذ مورد بررسی در این پژوهش و همچنین شرح مختصری در خصوص این معادلات در جدول 1 درج شده است.

به منظور دستیابی به مشخصات بارندگی منطقه، از آمار ایستگاه هواشناسی امامه واقع در مرکز آبخیز با طول دوره آماری 43 ساله (1348 لغایت 1391) استفاده گردید. با توجه به منحنی‌های شدت، مدت، فراوانی منطقه متوسط شدت بارش در منطقه با دوره بازگشت 10 ساله، 60 میلی‌متر در ساعت تعیین شد. در ادامه پژوهش نفوذپذیری در 60 نقطه از سطح اراضی حوضه با پوشش مرتع، باغ، کشاورزی و آیش و با بافت‌های مختلف در سطح حوزه آبخیز، توسط دستگاه شبیه‌ساز باران کامفورست⁵ نمونه دانشگاه واگنینگن هلند اندازه‌گیری شد.

از ویژگی‌های این دستگاه شبیه‌ساز باران می‌توان به سهولت حمل، توانایی تعیین خصوصیات فرسایش خاک و میزان نفوذ اشاره کرد. همچنین در تحقیقات مطالعه و حفاظت خاک روشی استاندارد محسوب می‌شود (کاویان و همکاران 1389). این شبیه‌ساز باران از سه قسمت آب پاش با تنظیم کننده فشار به منظور تولید بارش با شدت مورد نیاز، پایه‌های قابل تنظیم و پلات 0/625 سانتی‌متر مربعی تشکیل شده و با داشتن 49 لوله موئینه قادر است در شدت 60 میلی‌متر در ساعت قطراتی به جرم 0/106 گرم با انرژی جنبشی برابر با 27/39 ژول بر مترمربع در میلی‌متر را تولید کند.

مزنسو¹ توصیف بهتری از میزان نفوذ تجمعی ارائه می‌دهند.

در ایران نیز نشاط و پاره کار (1386) اقدام به مقایسه مدل‌های مختلف نفوذپذیری در سه بافت توسط معیارهای ضریب تبیین و واریانس نمودند. نتایج نشان داد که در درازمدت مدل‌های فیلیپ و NRCS برآورد دقیق‌تری از نفوذپذیری ارائه کرده‌اند. در تحقیقی مشابه ملکی و همکاران (1391) با انجام آزمایش‌های نفوذپذیری در اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان با استفاده از حلقه مضاعف گزارش کردند که معادله کوستیاکوف از کمترین خطا برخوردار بود و مدل NRCS مقدار نفوذ آب را کمتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد کرد. نوالفقاری و همکاران (2012) با مقایسه مدل‌های نفوذ شوارتزندربور²، کوستیاکوف، کوستیاکوف اصلاح شده، هورتون، NRCS و فیلیپ به منظور تعیین بهترین معادله نفوذ در یک خاک کشاورزی و با استفاده از معیارهای جذر میانگین مربعات خطا³ و میانگین جذر میانگین مربعات خطا⁴ نتیجه گرفتند که مدل NRCS دارای کمترین توانایی در برآورد صحیح مقدار نفوذ بود.

بررسی سوابق مرتبط در این زمینه نشان می‌دهد که تلاش‌های بیشتر محققان در زمینه بررسی و ارزیابی معادلات مختلف نفوذ عمدتاً در اراضی کشاورزی و تحت سناریوهای مختلف در مورد نحوه آبیاری و شیوه کشت بوده است. لذا این تحقیق به منظور بررسی و ارزیابی معادلات مختلف نفوذ در بافت‌ها و کاربری‌های اراضی مختلف در طی شبیه‌سازی یک رخداد بارش در سطح حوزه آبخیز امامه تعریف گردیده است.

¹ Mezenzev

² Swartzendruber

³ RMSE (Root Mean Square Error)

⁴ MRMSE (Mean Root Mean Square Error)

⁵ Kamphorst

جدول 1- شرح مدل‌های مورد بررسی و پارامترهای آنها.

معادله	متغیرهای مدل	نام مدل	نوع مدل
$I = ct^a$	I مقدار نفوذ تجمعی (cm)، c و a ضرایب مدل برای خاک‌های مختلف که با آزمایش نفوذ به دست می‌آیند، t زمان (min)	کوستیاکوف	
$I = kt^b + c$	I مقدار نفوذ تجمعی (cm)، k و b تابعی از شماره منحنی نفوذ و c ضریب ثابت برابر با 0/6985، t زمان (min)	NRCS	تجربی
$I = Ct + m(1 - e^{-at})$	I مقدار نفوذ تجمعی (cm)، C و a ضرایب تجربی حاصل از آزمایش، t زمان (min)	هورتون	
$I = \frac{A}{i} + B$	I مقدار نفوذ تجمعی (cm)، A و B ضرایب ناشی از اندازه‌گیری نفوذ و i سرعت نفوذ	گرین امپت	فیزیکی
$I = st^{0.5} + k$	I مقدار نفوذ تجمعی (cm)، S ضریب تابع مکش خاک، k هدایت هیدرولیکی خاک، t زمان (min)	فیلیپ	

که در آن SSE مجموع مربعات خطا بر حسب سانتی‌متر مربع، $I(m)_j$ مقدار نفوذ تجمعی اندازه‌گیری شده در گام زمانی j ام (سانتی‌متر)، $I_p(t, \beta)_j$ مقدار نفوذ برآورد شده برای گام زمانی j ام (سانتی‌متر) و β پارامتر مدل می‌باشد. پس از تعیین پارامترهای مدل‌های مختلف نفوذ به منظور ارزیابی مدل‌ها و تعیین بهترین معادله نفوذ از مقایسه بین مقادیر نفوذ تجمعی مشاهداتی و برآوردی توسط مدل‌های مختلف نفوذ توسط معیارهای آماری میانگین خطا (ME)، قدر مطلق میانگین خطا (AME)، انحراف معیار جذر میانگین مربعات خطا ($MRMSE$)، جذر میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، معیار کفایت ناش - ساتکیف ($NSSS$)، ضریب کارایی (EF)، درصد خطای نسبی (RE)، ضریب تبیین (R^2) استفاده گردید.

$$ME = \frac{\sum_{j=1}^n I(p)_j - I(m)_j}{n} \quad [2]$$

مطلق آن باید تا حد امکان کوچک باشد. (پرچمی عراقی و همکاران 1389). آماره دیگری که برای مقایسه مدل‌ها، به کار رفت قدرمطلق میانگین خطا (AME) می‌باشد تفاوت این آماره با میانگین ME آن است که اشتباه ناشی از سرشکن شدن خطاهای برآورد در خاک‌های

مدت زمان هر اندازه‌گیری به منظور ثابت شدن مقدار نفوذ نهایی برابر با 90 دقیقه بوده و در طی این مدت در فواصل زمانی منظم به ترتیب شامل پنج اندازه‌گیری در فواصل یک دقیقه، پنج اندازه‌گیری در فواصل پنج دقیقه و شش اندازه‌گیری در فواصل ده دقیقه‌ای مقدار رواناب خروجی از پلات اندازه‌گیری با ابعاد 25 در 25 سانتی‌متر جمع‌آوری و با استوانه مدرج اندازه‌گیری شد.

به منظور تعیین پارامترهای معادلات نفوذ، در هر نقطه در مجاورت مکان‌های اندازه‌گیری نفوذ، با نمونه‌برداری از افق صفر تا 30 سانتی‌متری خاک خصوصیات بافتی خاک تعیین شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار Infiltr به روش بهینه‌سازی مربعات خطا مطابق تابع هدف 1 پارامترهای معادلات مختلف نفوذ تعیین شد.

$$SSE = \sum_{j=0}^n (I(m)_j - I_p(t, b)_j)^2 \quad [1]$$

که در آن $I(p)_j$ مقادیر مشاهداتی، $I(m)_j$ مقادیر برآوردی و n تعداد مشاهدات است. مقدار این آماره بیانگر آن است که مدل مورد بررسی نفوذ آب به خاک را بیش (مقادیر مثبت) یا کم برآورد (مقادیر منفی) می‌نماید اما به منظور داشتن یک برآورد دقیق از نفوذ مقدار قدر

با بررسی هریک از آماره‌های فوق امتیازی به مدل‌های مورد بررسی داده شد. روش امتیازدهی به این ترتیب بود که اختلاف بین مقدار آماره مورد ارزیابی به ازای هر مدل تعیین و بر تعداد مدل‌های مورد ارزیابی (پنج مدل) تقسیم شد. سپس بر این مبنا طبقه‌بندی امتیازات صورت گرفت و به هر مدل امتیازی داده شد. در نهایت مجموع امتیازات هر مدل رتبه نهایی مدل را به منظور تعیین بهترین مدل سنجش نفوذ در هر کاربری و کلاس بافتی خاک تعیین کرد. مزیت این سیستم امتیازدهی در آن است که اختلافات جزئی بین آماره‌های مورد ارزیابی در هر مدل وارد چرخه تصمیم‌گیری نهایی نمی‌شود بنابراین امتیازات واقع بینانه خواهد بود.

نتایج و بحث

مقایسه نتایج عملکرد مدل‌های مختلف نفوذ در کلاس‌های کاربری اراضی و بافت‌های مختلف خاک حوضه آبخیز امامه و همچنین امتیاز اختصاص یافته به هر مدل در جداول 2 و 3 آمده است. با توجه به نتایج مندرج در جدول 2، بر اساس رتبه نهایی، مدل کوستیاکوف در تمام کاربری‌های سطح حوضه حائز بالاترین رتبه بوده است پس از آن و به فاصله اندکی مدل NRCS بالاترین رتبه را داشت به طوری که در کاربری‌های کشاورزی و مرتعی هر دو مدل عملکرد یکسانی داشت. تنها در کاربری‌های آیش و باغی با اختلاف ناچیزی در مقدار ضریب تبیین مدل کوستیاکوف رتبه بهتری را کسب کرد، در حالی که بررسی سایر آماره‌ها نشان‌گر شباهت در عملکرد این دو مدل تجربی بود. بررسی نتایج بیانگر عملکرد مشابه هر سه مدل تجربی (کوستیاکوف، NRCS و هورتون) در اراضی مرتعی به عنوان قسمت عمده‌ای از سطح حوزه بود. این در حالی است که مدل هورتون در کاربری آیش ضعیف‌ترین عملکرد را داشت و در رتبه-ای پایین‌تر از مدل‌های فیزیکی قرار گرفته است. با توجه به جدول 2، برآوردهای مقادیر نفوذ تجمعی هیچ یک از مدل‌های فیزیکی مورد استفاده در این تحقیق در کاربری‌های مختلف، نزدیک به واقع نبود.

مختلف وارد چرخه ارزیابی مدل‌ها نشده و مقدار آن متأثر از مقادیر مثبت و منفی خطای برآورد در تک تک خاک‌ها نیست در صورتی که مقادیر ME و AME مساوی یا به هم نزدیک باشند نشان دهنده آن است که مدل مورد نظر درصدی بالا از مقادیر نفوذ تجمعی را بیش یا کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - I(m)_j)^2}{n}} \quad [3]$$

مقدار آماره $RMSE$ همواره مثبت بوده و با نزدیک شدن آن به صفر، عملکرد مدل مورد بررسی افزایش می‌یابد. مقدار این آماره خطای برآورد شده را در کل منحنی نفوذ بیان می‌کند با توجه به آنکه انحراف معیار بیان‌کننده دقت و منظم بودن یک آماره است و پراکنش اطلاعات را حول میانگین نشان می‌دهد، از این آماره نیز به منظور ارزیابی مدل‌ها استفاده شد. همچنین معیار کفایت ناش ساتکلیف نیز با استفاده از رابطه 4 محاسبه شد.

$$NSSS = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - I(m)_j)^2}{\sum_{j=1}^n (I(p)_j - \overline{I(p)_j})^2} \quad [4]$$

آماره دیگری که به منظور مقایسه بین مدل‌ها استفاده شد ضریب کارایی بود که با استفاده از رابطه 5 محاسبه گردید.

$$EF = (1 - \frac{D_1}{D_0}) \times 100 \quad [5]$$

$$D_1 = \sum_{j=1}^n (I(m)_j - I(p)_j)^2 \quad [6]$$

$$D_0 = \sum_{i=1}^n (I(m)_j - \overline{I(m)_j}) \quad [7]$$

از رابطه درصد خطای نسبی نیز برای مقایسه مدل‌های مختلف نفوذ استفاده شد. مقدار این آماره با استفاده از رابطه 8 محاسبه شد.

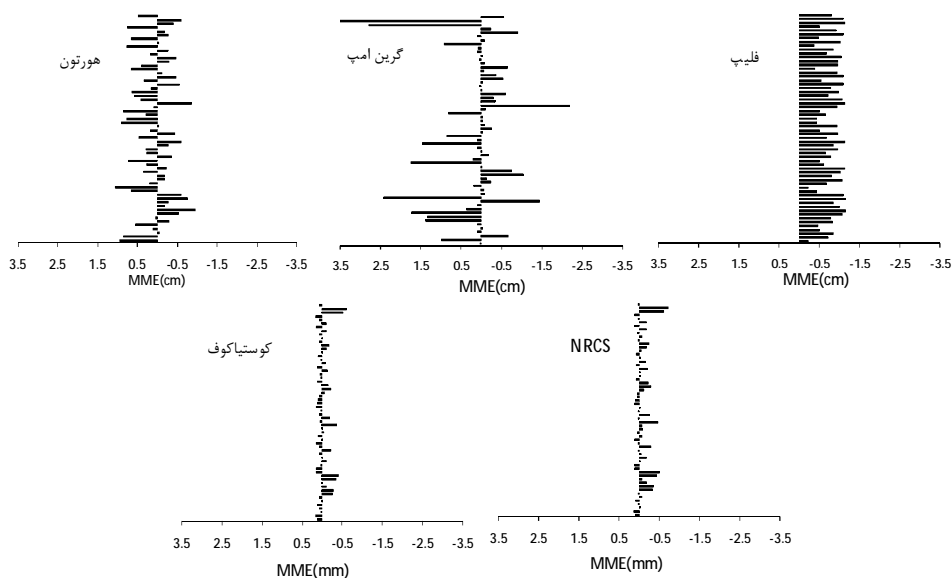
$$RE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{V_{mj} - V_{pj}}{V_{mj}} \right) \times 100 \quad [8]$$

که در آن V_{mj} عمق آب نفوذی مشاهده‌ای و V_{pj} عمق آب نفوذی محاسبه‌ای از مدل‌های نفوذ می‌باشد.

های بافتی خاک برآوردهای آن کمتر در حالی که برآوردهای مدل فیلیپ در تمام کاربری‌ها و کلاس‌های بافت خاک کمتر از مقادیر واقعی بود.

ارزیابی و مقایسه مدل‌های نفوذ گرین امپت، هورتون، کوستیاکوف، NRCS و فیلیپ در سطح حوضه آبخیز امامه با روش از امتیازدهی نهایی 8 آماره مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که علی‌رغم آن که مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش در کاربری‌ها و بافت‌های مختلف خاک عملکرد متفاوتی داشتند، اما در تمام کاربری‌های اراضی این حوزه آبخیز معادله کوستیاکوف برآورد واقع بینانه‌تری در تخمین مقادیر نفوذپذیری ناشی از بارش با شدت 60 میلی‌متر در ساعت از خود نشان داد؛ این مدل در خاک‌های شنی رسی لومی و شنی لومی بهترین عملکرد و بالاترین امتیاز را داشت. نتایج فوق با نتایج کسب شده توسط نشاط و پاره‌کار (1386) و ملکی و همکاران (1391) در مورد برتری مدل کوستیاکوف در بافت‌ها و کاربری‌های اراضی مختلف با استفاده از روش استوانه‌های مضاعف مطابقت دارد.

بررسی نتایج عملکرد مدل‌های مورد بررسی در کلاس‌های بافتی مختلف نشان داد که مدل NRCS در بافت‌های مختلف عملکرد پایدارتری در برآورد نفوذ تجمعی داشته است. این در حالی است که مدل کوستیاکوف در بافت‌های شنی رسی لومی و شنی لومی بالاترین عملکرد را داشت ولی در بافت لومی مدل NRCS و پس از آن هورتون عملکرد بهتری داشتند. بررسی نتایج عملکرد مدل‌های فیزیکی در کلاس‌های مختلف بافتی نیز تاکید دوباره‌ای بر این مطلب دارد که مدل‌های فیزیکی گرین امپت و فیلیپ نتوانسته‌اند مقادیر نفوذ تجمعی ناشی از بارش را با دقت بالایی برآورد کنند، در حالی که مقایسه مقادیر آماره MME نیز حاکی از آن است که برآوردهای مدل گرین امپت در کاربری‌های آیش و همچنین در بافت لومی کمتر از مقادیر واقعی بود. اما در سایر کاربری‌ها و بافت‌های خاک برآورد این مدل بیش‌تر از مقادیر واقعی بود. در کلاس‌های مختلف بافت خاک تنها در کلاس لومی مقادیر برآورد شده توسط آن بیش‌تر از مقادیر واقعی بود و در بقیه بافت‌ها کمتر بود. مشابه همین روند در مدل هورتون نیز مشاهده شد با این تفاوت که در بین کلاس‌ها



شکل 1- پراکنش میانگین خطای برآورد نفوذ تجمعی به وسیله مدل‌های نفوذ برای تمامی داده‌های شبیه‌سازی بارش.

جدول 2- مقادیر آماره‌های ارزیابی و رتبه عملکرد هریک از مدل‌های مورد بررسی در کاربری‌های مختلف.

فیلپ	نام مدل				معیار ارزیابی	نوع کاربری
	NRCS	هورتون	گرین امپت	کوستیاکوف		
0/79(3)	0/86(2)	0/93(1)	0/61(5)	0/87(1 ¹)	R ²	باغ
-0/50(3)	0/84(1)	0/72(1)	-2/29(5)	0/85(1)	EF(%)	
-22/15(4)	-2/39(1)	10/64(2)	13/10(2)	-2/55(1)	RE(%)	
-0/87(3)	-0/008(1)	0/108(1)	0/029(1)	0/003(1)	MME(cm)	
1/14(3)	0/454(1)	0/5(1)	1/7(6)	0/43(1)	MAME(cm)	
0/54(6)	0/87(1)	0/70(3)	0/60(5)	0/88(1)	MNSSS(cm)	
1/45(5)	0/53(1)	0/59(1)	1/58(6)	0/51(1)	MRMSE(cm)	
0/42(3)	0/12(1)	0/24(2)	0/66(5)	0/11(1)	SDRMSE(cm)	
4(30)	2(9)	3(11)	5(35)	1(8)	رتبه نهایی	
0/82(1)	0/90(1)	0/97(1)	0/56(5)	0/90(1)	R ²	کشاورزی
-0/50(2)	0/85(1)	0/81(1)	-3/09(5)	0/87(1)	EF(%)	
-20/4(4)	-2/31(1)	-7/59(1)	23/76(4)	-2/48(1)	RE(%)	
-1/05(4)	-0/03(1)	-0/44(2)	0/81(3)	-0/02(1)	MME(cm)	
1/37(3)	0/53(1)	-0/62(2)	2/39(4)	0/5(1)	MAME(cm)	
0/58(6)	0/89(1)	0/83(2)	0/55(6)	0/90(1)	MNSSS(cm)	
0/75(5)	0/30(1)	0/82(6)	0/58(6)	0/29(1)	MRMSE(cm)	
0/35(3)	0/08(1)	0/18(2)	0/57(3)	0/08(1)	SDRMSE(cm)	
3(28)	1(8)	2(17)	4(36)	1(8)	رتبه نهایی	
0/79(4)	0/82(2)	0/83(1)	0/80(3)	0/83(1)	R ²	آبش
-0/15(3)	0/80(1)	-1/02(6)	0/25(2)	0/81(1)	EF(%)	
-18/89(2)	-2/02(1)	46/79(4)	-2/48(1)	-2/16(1)	RE(%)	
-4/28(2)	0/09(1)	7/77(3)	-1/23(1)	0/12(1)	MME(cm)	
0/58(4)	0/26(1)	0/77(6)	0/48(3)	0/25(1)	MAME(cm)	
0/58(5)	0/82(1)	0/65(4)	0/75(2)	0/83(1)	MNSSS(cm)	
0/75(5)	0/30(1)	0/82(6)	0/58(3)	0/29(1)	MRMSE(cm)	
0/35(3)	0/088(1)	0/18(2)	0/57(6)	0/08(1)	SDRMSE(cm)	
4(28)	2(9)	5(32)	3(21)	1(8)	رتبه نهایی	
0/78(3)	0/85(2)	0/93(1)	0/59(7)	0/87(2)	R ²	مرتع
-0/58(5)	0/82(1)	0/70(1)	-0/89(6)	0/83(1)	EF(%)	
-22/25(4)	-2/28(1)	9/27(2)	4/92(2)	-2/39(1)	RE(%)	
-0/77(5)	-0/003(1)	0/09(1)	0/04(1)	0/001(1)	MME(cm)	
1/01(4)	0/40(1)	0/42(1)	1/20(5)	0/38(1)	MAME(cm)	
0/53(5)	0/86(1)	0/87(1)	0/57(5)	0/87(1)	MNSSS(cm)	
1/41(6)	0/47(1)	0/49(1)	1/31(5)	0/45(1)	MRMSE(cm)	
0/45(3)	0/11(1)	0/15(1)	0/76(6)	0/10(1)	SDRMSE(cm)	
2(35)	1(9)	1(9)	3(37)	1(9)	رتبه نهایی	

* امتیاز هر مدل به ازای آماره، M: میانگین، SD: انحراف معیار

جدول 3- مقادیر آماره‌های ارزیابی و رتبه عملکرد هریک از مدل‌های مورد بررسی در کلاس‌های بافتی مختلف.

نوع بافت	معیار ارزیابی	نام مدل			
		کوستیاکوف	گرین امپت	هورتون	NRCS
شنی رسی لومی	R ²	0/88(1*)	0/56(5)	0/94(1)	0/87(1)
	EF(%)	0/84(1)	-2/47(5)	0/45(1)	0/83(1)
	RE(%)	-2/44(1)	7/83(2)	5/64(1)	2/23(1)
	MME(cm)	-0/06(1)	2/27(1)	-0/28(1)	-0/12(1)
	MAME(cm)	4/23(1)	16/71(6)	5/12(1)	4/41(1)
	MNSSS(cm)	0/88(1)	0/51(5)	0/82(1)	0/87(1)
	MRMSE(cm)	0/50(1)	1/47(5)	0/60(1)	0/51(1)
	SDRMSE(cm)	0/14(1)	0/82(6)	0/25(2)	0/15(1)
	رتبه نهایی	1(8)	4(35)	2(9)	1(8)
	لومی	R ²	0/85(2)	0/68(5)	0/93(1)
EF(%)		0/83(1)	-0/23(5)	0/61(1)	0/82(1)
RE(%)		34/20(4)	13/02(2)	-2/30(1)	2/92(1)
MME(cm)		0/04(1)	-0/60(1)	1/35(1)	-0/006(1)
MAME(cm)		3/6(1)	9/8(5)	4/5(1)	3/7(1)
MNSSS(cm)		0/87(1)	0/64(4)	0/72(3)	0/86(1)
MRMSE(cm)		0/42(1)	1/20(7)	0/50(1)	0/43(1)
SDRMSE(cm)		0/12(1)	0/86(5)	0/12(1)	0/12(1)
رتبه نهایی		3(12)	4(34)	2(10)	1(9)
شنی لومی		R ²	0/87(1)	0/62(5)	0/93(1)
	EF(%)	0/84(1)	-1/29(5)	0/59(1)	0/83(1)
	RE(%)	-2/43(1)	9/39(2)	11/31(3)	2/33(1)
	MME(cm)	-0/02(1)	1/45(2)	0/92(2)	-0/08(1)
	MAME(cm)	4/10(1)	14/37(5)	5/26(1)	4/27(1)
	MNSSS(cm)	0/87(1)	0/41(5)	0/62(3)	0/86(1)
	MRMSE(cm)	0/48(1)	1/37(5)	0/60(1)	0/49(1)
	SDRMSE(cm)	0/12(1)	0/84(5)	0/21(1)	0/13(1)
	رتبه نهایی	1(8)	5(34)	3(13)	2(9)

* امتیاز هر مدل به ازای آماره، M: میانگین، SD: انحراف معیار

مدل‌های دو پارامتری متفاوت است که این امر ممکن است ناشی از تفاوت در بافت خاک‌ها و نیز اختلاف در روش‌های اندازه‌گیری نفوذپذیری در این آزمایش‌ها بوده باشد. بررسی نتایج حاصل نشان داد که مدل‌های فیزیکی گرین امپت و هورتون در هیچ یک از کاربری‌های اراضی و کلاس‌های بافتی خاک عملکرد مناسبی از خود نشان نداده است، در واقع بهترین عملکرد این مدل در کاربری آیش بود که با نتایج تورنر (2006) در مورد برتری مدل گرین امپت در برآورد نفوذ تجمعی ناشی از بارش در اراضی کشاورزی همخوانی ندارد. این مسئله

در بافت لومی، ضریب تبیین دو مدل NRCS و هورتون نسبت به بقیه مدل‌ها بیشتر بود این مسئله با توجه به عملکرد نزدیک این دو مدل قابل توجیه است. نتایج موید این مطلب است که مدل هورتون در کاربری مرتعی حائز بالاترین عملکرد در بین سایر کاربری‌ها بوده که با نتایج شوکلا و همکاران (2003) و یوکویان و همکاران (2007) در مورد برتری مدل هورتون در اراضی کشاورزی و نیز رانبین و همکاران (2011) و دئوانت و بورلی (2011) همچنین اگبادون و ادریس (2007) در مورد برتری مدل‌های سه پارامتری نسبت به

تجمعی برتر تشخیص داده شدند اما نباید چنین استنباط کرد که مدل‌های تجربی از مدل‌های فیزیکی مانند فیلپ و گرین آمپت که پایه علمی و اساس تحلیلی دارند برتر می‌باشند در واقع این معادلات فیزیکی برای شرایط ویژه‌ایی که خاک همگن، جریان تک بعدی و آب در سطح خاک تجمع دارد وضع شده‌اند و کلیه ضرائب معادلات فوق بسته به نوع خاک، وجود و یا فقدان سله سطحی در سطح خاک و رطوبت اولیه در پروفیل خاک دارای مقادیر متفاوتی هستند. این شرایط تنها در سطوح محدود اراضی کشاورزی آبی صادق بوده و قابل گسترش به سطح وسیع اراضی طبیعی در سطح گسترده یک حوزه آبخیز با طیف گسترده‌ایی از انواع خاک‌های ناهمگن و کاربری‌های مختلف، نمی‌باشند. از دیگر سو تجمع آب در سطح خاک در اراضی طبیعی به ندرت صورت گرفته و عمده آب نفوذ کرده به این اراضی ناشی از بارش و به صورت تدریجی می‌باشد که دارای تفاوت‌های چشم‌گیر در مقایسه با نفوذ آب در شیوه استوانه مضاعف است (صادقی 1389). بنابراین، با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان استفاده از معادلات تجربی نفوذ خصوصاً معادلات کوستیاکوف و NRCS به منظور تعیین مقادیر مختلف نفوذپذیری در کاربری‌ها و بافت‌های مختلف در سطح یک حوزه آبخیز را روشی کاربردی در تعیین مقادیر متوسط نفوذپذیری در یک حوزه آبخیز به عنوان اصلی‌ترین عامل در تلفات بارش قلمداد کرد.

ممکن است به دلیلی اختلاف در ماهیت خاک‌های مورد بررسی و عدم همگنی پروفیل خاک در منطقه مورد مطالعه بوده باشد. بررسی نتایج حاصل از مدل نفوذ فیلپ در این تحقیق موید آن است که این مدل نیز در هیچ یک از کاربری‌ها عملکرد مطلوبی در برآورد نفوذ تجمعی نداشت. با توجه به اینکه این معادله به عنوان یک مدل فیزیکی برای تعیین مقادیر نفوذپذیری در سطح نامحدود و در زمان طولانی مدت توسعه پیدا کرده است (بای‌وردی 1383). می‌توان عدم کارایی این مدل در تعیین صحیح مقادیر نفوذ تجمعی را به کم بودن زمان آزمایش (90 دقیقه) و نیز محدود بودن سطح اندازه‌گیری نسبت داد که با نتایج نشاط و پاره کار (1386) در مورد تناسب این مدل در درازمدت مطابقت دارد. همان طور که مقادیر آماره MME نیز نشان داد برآوردهای این مدل در تمام کاربری‌ها و بافت‌های خاک کمتر از مقادیر واقعی بود.

نتیجه گیری کلی

نتایج این تحقیق حاکی از توانایی بالای مدل‌های توسعه یافته تجربی در برآورد مقادیر نفوذپذیری ناشی از بارش در سطح حوضه آبخیز امامه می‌باشد. به طوری که مدل کوستیاکوف برترین مدل و پس از آن مدل‌های NRCS و هورتون به ترتیب بهترین عملکرد را در برآورد صحیح مقادیر نفوذ تجمعی داشتند. اگرچه در این تحقیق مدل‌های تجربی در برآورد مقادیر نفوذ

منابع مورد استفاده

- بای‌وردی م، 1383. اصول مهندسی آبیاری. انتشارات دانشگاه تهران.
- پرچی عراقی ف، میر لطیفی م، قربانی دشتکی ش، مهدیان م، 1389. ارزیابی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در برخی کلاس‌های بافتی و کاربری اراضی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد بیست و سوم، صفحه‌های 83 تا 112.
- سپهوندع، طایی سمیرمی م، میرنیاخ، مرادی ح، 1390. ارزیابی حساسیت مدل‌های نفوذ نسبت به تغییر پذیری رطوبت خاک. نشریه آب و خاک، جلد بیست و پنجم، صفحه‌های 338 تا 346.
- صادقی سحر، 1389. مطالعه و اندازه گیری فرسایش آبی، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، 200ص.
- علیزاده ا، 1384. هیدرولوژی کاربردی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

قربانی دشتکی ش، همایی م، مهدیان م، 1387. برآورد پارامترهای نفوذ آب به خاک با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله آب و خاک، جلد بیست و سوم، صفحه‌های 185 تا 198.

کاویان ع، آزموده ع، سلیمانی ک، وهاب زاده ق، 1389. تاثیر ویژگی‌های خاک بر رواناب و فرسایش خاک در اراضی جنگلی. نشریه مرتع و آبخیزداری، جلد شست و سوم، صفحه‌های 89 تا 104.

مرادی باصری ح، قربانی دشتکی ش، خداوردیلو ح، خلیل مقدم ب، گیوی ج، 1390. مقایسه کارایی برخی مدل‌های نفوذ آب به خاک در خاک‌های ورتی سول و غیر ورتی سول. مجله پژوهش آب ایران، جلد پنجم، صفحه‌های 187 تا 196.

ملکی ع، نامداریان ک، خاکسار ص، 1391. تعیین ضرایب معادله‌های نفوذ و ارزیابی آنها در اراضی دانشکده کشاورزی کشاورزی دانشگاه لرستان. مقاله‌های کلیدی نخستین همایش منطقه‌ای توسعه پایدار منابع طبیعی غرب کشور. الشتر، لرستان. 23 خرداد، 795ص.

نشاط ع، پاره کار م، 1386. مقایسه روش‌های تعیین سرعت نفوذ عمودی آب در خاک. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. جلد چهاردهم، صفحات 1 تا 10.

- Daunt R and Borrelli J, 2011. Field evaluation of infiltration models in lawn soils. *Irrigation Science* 29: 379-389.
- Deep K and Das KN, 2008. Optimization of infiltration parameters in hydrology. *World Journal of Modelling and Simulation* 4: 120-130.
- Ghorbani Dashtaki S, Homae M, Mahdian MH and Kouchakzadeh M, 2009. Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resources Management* 23: 2777-2790.
- Herbest M and Diekkruger B, 2003. Modeling the spatial variability of soil moisture in a micro scale catchment and comparison with field data using geostatistics. *Physical and Chemistry of the Earth* 28: 239-245.
- Igbadun E and Idris U, 2007. Performance evaluation of infiltration models in a hydromorphic soil. *Journal of Soil and Environment Research* 7: 53-58.
- Mishra K, Tyagi V and Singh P, 2003. Comparison of infiltration models. *Hydrological Processes* 17: 2629-2652.
- Runbin D, Clifford B and John B, 2011. Field evaluation of infiltration models in lawn soils. *Irrigation Science* 29: 379-389.
- Shukla MK, Lal R, Owens LB and Unkefer P, 2003. Land use and management impacts on structure and infiltration characteristics of soils in the north Appalachian region of Ohio. *Soil Science* 168: 167-177.
- Turner ER, 2006. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. M.Sc. thesis, University of Maryland, USA. 202 p.
- Valiantzas D, 2010. New Linearized two-parameter infiltration equation for direct determination of conductivity and sorptivity. *Journal of Hydrology* 384: 1-13.
- Walsh E and McDonnell KP, 2012. The influence of measurement methodology on soil infiltration rate. *International Journal of Soil Science* 7: 168-176.
- Yukuan W, Bin F, Pei Daojie X, Xiantuo W and Yongqiang W, 2007. Validation of three infiltration models on purple soil under simulated rainfall. *Progress in Natural Science* 102: 1059-1066.
- Zhiqin L, Nanjun L and Keqin W, 2013. Infiltration characteristics under different land uses in Yuanmou Dry-Hot Valley Area. Pp. 567-572. Proceedings of the 2nd International Conference on Green Communications and Networks (GCN 12-14 December 2012). Chongqing. China.
- Zolfaghari AA, Mirzaee S and Gorji M, 2012. Comparison of different models for estimating cumulative infiltration. *Journal of Soil Science* 7: 108-115.