

## مقایسه سه روش مختلف برآورد تلفات بارش در مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب (مطالعه موردی: حوضه قره‌سو در کرمانشاه)

میلاذ مرادی<sup>۱</sup>، یعقوب دین‌پژوه<sup>۲\*</sup>، سمیه عزیزی<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۳/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۱/۱۲)

### چکیده

مدل‌سازی بارش- رواناب یکی از راه‌حل‌های کلیدی در هیدرولوژی برای دستیابی به خصوصیات سیلاب، مانند میزان دبی اوج و زمان رسیدن به اوج به‌شمار می‌رود. یکی از مشکلات اساسی در اجرای HEC-HMS در ایران و سایر کشورهای جهان، که اساساً مدل در آن توسعه داده نشده، انتخاب مناسب‌ترین روش برای تخمین مقدار نفوذ است. در این پژوهش، عملکرد مدل HEC-HMS با استفاده از سه روش مختلف تخمین شامل نفوذ شماره منحنی (CN)، گرین-آمپت و اولیه-ثابت در پیش‌بینی حجم رواناب، جریان اوج و زمان رسیدن به اوج سیلاب ارزیابی شد، و آب‌نمود رخدادهای بارش- رواناب در حوضه قره‌سو واقع در استان کرمانشاه شبیه‌سازی شد. هشت رخداد بارش- رواناب، توسط مدل HEC-HMS شبیه‌سازی شد و با رخدادهای نظیر مشاهداتی مقایسه شد. نتایج نشان داد روش شماره منحنی در پیش‌بینی حجم رواناب (پس از واسنجی) دقت قابل قبولی ( $R^2=0/84$ ،  $E=0/81$  و  $CRM=0/06$ ) دارد. با این حال، روش اولیه-ثابت، میزان دبی اوج را با دقت زیادی ( $R^2=0/96$ ،  $E=0/95$  و  $CRM=0/01$ ) برآورد کرد. همچنین، شکل آب‌نمودهای واسنجی‌شده، بسیار شبیه به آب‌نمودهای مشاهداتی در روش‌های شماره منحنی و اولیه-ثابت بود. با این حال، به‌کارگیری روش گرین-آمپت اعتمادپذیری کمی را در برآورد حجم رواناب کل و دبی اوج از خود نشان می‌دهد. دقت مدل در برآورد زمان اوج سیلاب‌های مدل‌سازی‌شده، با مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط روش‌های منتخب ارزیابی شد که نتایج ارزیابی زمان اوج سیلاب، بیشترین اطمینان‌پذیری را در روش شماره منحنی (۶/۳۶ درصد) نشان می‌دهند.

**کلیدواژه‌گان:** آمپت، تلفات اولیه-ثابت، دبی اوج، شماره منحنی، گرین-HEC-HMS

## مقدمه

مدل‌های کامپیوتری قادر به پیش‌بینی آثار منفی رواناب و سیل (مانند فرسایش خاک و انتقال آلاینده در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف) هستند [۱ و ۲]. با وجود در دسترس بودن دستورالعمل کتاب‌های راهنما، استفاده از این مدل‌ها مشکل است، به خصوص در حوضه‌هایی که مشخصات اقلیمی و جغرافیایی آن با جایی که در آن مدل هیدرولوژیکی استفاده شده، تفاوت دارد. در چنین شرایطی، در دسترس بودن مطالعات پیشین، که در آنها مدل‌ها با موفقیت استفاده و صحت‌سنجی شده‌اند، تحلیل فرایندهای هیدرولوژیکی را آسان می‌کند و در نتیجه دستورالعمل‌هایی را برای مدیریت آبخیز ارائه می‌دهد. مدل‌های بارش-رواناب، از ابزارهای مناسب برای بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی منابع آبی است. مدل‌سازی بارش-رواناب یکی از راه‌حل‌های کلیدی در هیدرولوژی برای دستیابی به خصوصیات سیلاب، مانند میزان دبی اوج و زمان رسیدن به اوج به‌شمار می‌رود. یکی از مدل‌های پرکاربرد برای شبیه‌سازی بارش-رواناب، مدل HEC-HMS است [۳].

گامیندوگا و همکارانش [۴] با استفاده از روش آب‌نمود واحد اشنایدر و مدل HEC-HMS رواناب حوضه مانپام (در کشور زیمباوه) را شبیه‌سازی کردند. یافته‌ها نشان داد مدل به‌طور موفقیت‌آمیزی حجم رواناب و دبی اوج را هم در مرحله واسنجی ( $NSE=0.68$ ) و هم در مرحله صحت‌سنجی ( $NSE=0.61$ ) پیش‌بینی می‌کند. یک حوضه نیمه‌خشک در شمال غرب چین توسط گاو و همکارانش [۵] با استفاده از مدل HEC-HMS مدل‌سازی هیدرولوژیکی شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد که مدل همواره آب‌نمودهای زمستان، بهار و همچنین برخی جریان‌های تابستانی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند که علت آن اختلاف بین پاسخ غیرخطی بارش-رواناب در حوضه عنوان شده است. رحمان و همکارانش [۶] با به‌کارگیری مدل HEC-HMS، رابطه بارش-رواناب را به‌منظور روندیابی آب‌نمود سیلاب در غرب عربستان شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد هر دو آب‌نمود (واسنجی شده و صحت‌سنجی شده) سازگاری بسیار مناسبی (خطای نسبی ۲/۱ درصد) با آب‌نمودهای مشاهداتی دارند. گرمه‌ای و همکارانش [۷] روش‌های واسنجی خودکار الگوریتم ازدحام ذرات و شبه‌خودکار الگوریتم Nelder و Mead روی مدل HEC-HMS در حوضه آبریز سد کارده را

مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد آب‌نمودهای حاصل از مدل PSO-HMS برازش مناسب‌تری با مشاهدات داشتند. کابوسی و جلینی [۸] نقش مخازن تأخیری در کنترل سیلاب خروجی از حوضه جعفرآباد گلستان را با استفاده از مدل HEC-HMS بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد احداث مخازن تأخیری، حجم سیلاب را در مخزن خالی، نیمه‌پر و پر به‌ترتیب، به اندازه ۶۱/۱، ۳۳/۲ و ۰/۸ درصد کاهش می‌دهد. طاهری تیزرو و همکارانش [۹] با تلفیق مدل GLDAS و WMS/HEC-HMS، رواناب منطقه پل‌رود واقع در استان گیلان را شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل تلفیقی HEC-HMS و GLDAS ارائه شده، ابزار قابل قبولی برای پیش‌بینی رواناب در مناطق بدون آمار است. داریان و همکارانش [۱۰] بر اساس الگوریتم ژنتیک (GA) واسنجی خودکار، مدل HEC-HMS را به‌منظور شبیه‌سازی رواناب حاصل از ذوب برف در حوضه آجی‌چای تبریز استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده دقت خوب مدل هیبرید HEC-HMS و GA در مقایسه با سایر روش‌های موجود است.

یکی از مشکلات اساسی در اجرای HEC-HMS در ایران و سایر کشورهای جهان، که اساساً مدل در آن توسعه داده نشده است، انتخاب مناسب‌ترین روش برای تخمین مقدار نفوذ است. به نظر می‌رسد، به‌منظور اطمینان از قابلیت استفاده مدل یادشده لازم است پژوهش جامعی در زمینه انتخاب مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی نفوذ انجام گیرد. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی توانایی مدل HEC-HMS در پیش‌بینی حجم رواناب، جریان اوج و زمان به اوج رسیدن سیلاب، و همچنین شبیه‌سازی آب‌نمودهای رخدادهای بارش-رواناب در حوضه قره‌سو واقع در غرب ایران و انتخاب مناسب‌ترین روش تخمین نفوذ از بین سه روش CN، گرین-آمپت و مقدار اولیه-ثابت است. به‌همین منظور، از بین روش‌های مختلف برای تخمین مقدار نفوذ مدل HEC-HMS در حوضه آبریز قره‌سو در کرمانشاه ارزیابی شده و عملکرد آن در حوضه یادشده ارائه می‌شود.

## مواد و روش‌ها

## منطقه پژوهش شده

حوضه آبخیز قره‌سو به مساحت ۵۲۷۸ کیلومتر مربع و

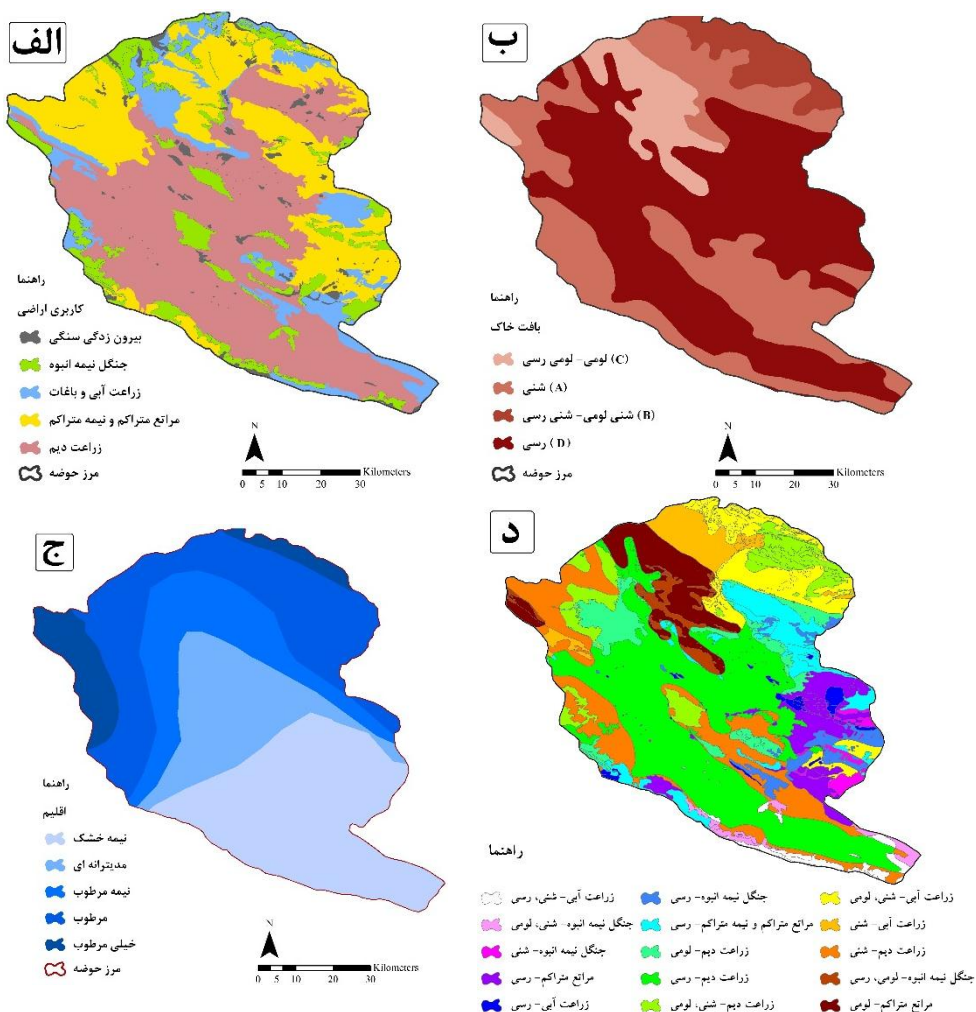
سطح حوضه) که ۱۰ درصد از سطح را بافت شنی-لومی و ۱۲ درصد را نیز بافت لومی-رسی تشکیل می‌دهد (شکل ۲). بافت خاک این حوضه در گروه هیدرولوژیکی B است. اقلیم غالب منطقه، طبق طبقه‌بندی دومارتن نیمه‌مرطوب و مدیترانه‌ای (شکل ۲)، با متوسط بارش سالانه ۵۰۴ میلی‌متر است. متوسط دمای کمینه سالانه ۴/۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط دمای بیشینه سالانه ۲۰/۵ درجه سانتی‌گراد است. با این حال، در این حوضه کمترین دمای مطلق معادل ۲۵/۳- درجه سانتی‌گراد و بیشترین دمای تجربه‌شده معادل ۴۴/۱ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. به‌طور متوسط تعداد روزهای بارش بیش از ۰/۱ (میلی‌متر در روز) معادل ۷۸ روز در سال، تعداد روزهای برفی ۲۸ روز در سال و تعداد روزهای یخبندان معادل ۸۱ روز در سال است.

محیط ۳۵۰/۳۱ کیلومتر در بازه ۰۰' تا ۳۴° ۵۴' عرض شمالی و ۲۲' تا ۴۶° ۲۲' طول شرقی در استان کرمانشاه، در غرب ایران قرار دارد. آبراهه‌های حوضه قره‌سو، مرک و رازآور هستند که از کوه‌های شاهو و دالاهو سرچشمه می‌گیرند و به سمت جنوب شرقی حوضه جریان دارند (شکل ۱). این زیرحوضه در شمال غربی حوضه کرخه واقع شده است. ارتفاع متوسط حوضه ۱۵۷۰ متر و شیب متوسط آن شش درصد است. مناطق جنگلی پنج درصد و مراتع نیز ۲۵ درصد از مساحت حوضه را به‌خود اختصاص می‌دهند (شکل ۲).

کاربری اراضی حوضه بیشتر کشاورزی (۷۰ درصد سطح حوضه) است. با این حال، محصولات زراعی (بیشتر گندم و جو) و باغی نیز در این حوضه تولید می‌شوند. بافت خاک حوضه اغلب رسی و شنی است (حدود ۷۸ درصد از



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز قره‌سو در ایران به‌همراه شبکه آبراهه‌ها و مدل رقومی ارتفاعی



شکل ۲. نقشه‌های الف) کاربری اراضی؛ ب) بافت خاک (گروه هیدرولوژیکی خاک)؛ ج) اقلیم و د) واحد هیدرولوژیکی همگن حوضه قره‌سو

روندیابی سیل در کانال، رابط گرافیکی پیشرفته اجزای سامانه هیدرولوژیکی با ویژگی‌های تعاملی، سیستمی برای ذخیره و مدیریت داده‌ها و وسیله‌ای برای نمایش و گزارش خروجی‌های مدل است.

گام اول در استفاده از مدل HEC-HMS تعریف مساحت حوضه و زیرحوضه‌ها، شبکه آبراهه‌ها و اتصال‌های آنهاست. در مرحله نخست، حجم رواناب، توسط یکی از روش‌های نفوذ به دلخواه کاربر محاسبه می‌شود. تلفات بارش توسط روش‌های متفاوت برای هر گام زمانی محاسبه و از کل عمق بارش در آن گام زمانی کسر می‌شود؛ عمق باقی‌مانده، به‌عنوان بارش مازاد در نظر گرفته می‌شود و به‌طور یکنواخت در سراسر حوضه توزیع می‌شود. سپس، HEC-HMS بارش مازاد را به‌طور مستقیم و از طریق روش انتقال بارش - رواناب به رواناب تبدیل می‌کنند. در نهایت، روش جریان پایه در آغاز شبیه‌سازی توفان به‌عنوان

#### مدل HEC-HMS

مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب در حوضه‌ها و تخمین مقدار رواناب سطحی حوضه با تقسیم‌بندی آن به اجزای مختلف هیدرولوژیکی و هیدرولیکی به‌هم‌پیوسته، طراحی شده است [۱۱]. مدل HEC-HMS در سال ۱۹۹۸ توسط اداره مهندسی ارتش ایالات متحده توسعه داده شد [۱۲] که پیش‌بینی جریان حوضه در محدوده گسترده‌ای از سطوح جغرافیایی را انجام می‌دهد [۱۳]. در این مدل، روابط ساده ریاضی برای آماده‌سازی توابع مدل (فرایندهای هواشناسی، هیدرولوژیکی و هیدرولیکی) استفاده شد، اجزای مدل شامل بارش، نفوذ، رواناب مستقیم، جریان پایه و روندیابی سیلاب است. هر جزء در مدل، وظیفه خاصی را در فرایند بارش - رواناب در زیرحوضه به‌عهده دارد [۱۴]. مدل HEC-HMS شامل چهار بخش مدلی تحلیلی برای محاسبه جریان سطحی مانند

منحصره‌فرد است که رفتار هیدرولوژیکی منحصره‌فردی را نشان می‌دهد. برای تخمین نفوذ نیز از سه روش شامل CN، گرین-آمپت و روش نفوذ اولیه- ثابت استفاده شد. علت این تصمیم، در دسترس بودن پارامترهای ورودی مدل یا سهولت در تخمین آنها با استفاده از داده‌های موجود است. افزون بر این، ثابت شده است که دو روش ابتدایی- ثابت و CN به‌طور موفقیت‌آمیزی در مدل‌سازی سیلاب استفاده شده‌اند [۱۶].

در این پژوهش، متوسط وزنی مقدار شماره منحنی برای هر زیرحوضه با استفاده از پلی‌گون تیسسن محاسبه شد. برای این کار شماره منحنی برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیک زیرحوضه‌ها تعیین شد. علاوه بر این، شماره منحنی برای شرایط رطوبت پیشین (AMC) خاک حوضه با لحاظ کردن رخداد بارش به‌روزرسانی شد. شرایط رطوبت پیشین، با توجه به عمق بارش در دوره زمانی پنج‌روزه قبلی تعیین شد [۱۷]. بنابراین، زمان تأخیر (در روش SCS)، که وابسته به شماره منحنی است، برای هر زیرحوضه محاسبه شد (جدول ۳). در روش گرین-آمپت، پارامترهای ورودی (پتانسیل مکش جبهه رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی) توابعی از گروه هیدرولوژیکی رایج و بافت خاک‌های زیرحوضه‌ها است که بر اساس شرایط حوضه از مقادیر پیشنهادی راهنمای HEC-HMS مطابق جدول ۳ استفاده شد.

#### آزمون توکی

این آزمون پس از رد آزمون صفر در آنالیز واریانس، به مقایسه همه تفاوت‌ها می‌پردازد. اگر در آزمون F تفاوت معناداری بین میانگین گروه‌ها ثابت شود، با آزمون توکی تفاوت معنادار بین هر دو گروه بررسی می‌شود. آماره این آزمون به‌صورت زیر است [۱۸]:

$$HSD = q_{\alpha, k, N-k} \sqrt{\frac{MSE}{n}} \quad (1)$$

که در آن MSE همان میانگین مربعات خطای به‌دست‌آمده در آزمون تجزیه واریانس (ANOVA) است.

جریان زیرسطحی تأخیری برای رسیدن به آبراهه‌های حوضه اعمال می‌شود [۱۳].

#### اجرا و ارزیابی مدل HEC-HMS

در این پژوهش، به‌منظور صحت‌سنجی مدل، از اطلاعات ایستگاه‌های منتخب واقع در حوضه قره‌سوی کرمانشاه در دوره آماری (۱۳۹۲-۱۳۹۴) استفاده شد:

- بارش‌های ساعتی، گردآوری‌شده از ۱۳ ایستگاه باران‌سنجی (که هشت ایستگاه آن در داخل حوضه و پنج ایستگاه دیگر با بیشترین فاصله ۱۲ کیلومتر از مرز حوضه در خارج از آن قرار دارند) (شکل ۳)؛
- جریان آب سطحی، اندازه‌گیری‌شده در یک گام زمانی یک‌ساعته در خروجی حوضه.

به‌منظور تخمین میانگین بارش منطقه‌ای از روش چندضلعی تیسسن استفاده شد که ۱۳ چندضلعی سطح حوضه را پوشش داد (شکل ۳). اگر فاصله زمانی بین دو بارش متوالی شش ساعت یا بیشتر می‌شد به‌عنوان دو رویداد بارش مجزا و مستقل در نظر گرفته می‌شد [۱۵]. برای ارزیابی مدل، همه رخدادهای با جریان اوج بیش از ۱۱۰ مترمکعب بر ثانیه در نظر گرفته شده و در نتیجه یک نمونه هشت‌تایی رخداد بارش- رواناب حاصل شد. در این پژوهش، عمق بارش در بازه ۳۸-۲۱۹ (میلی‌متر) و شدت آن در بازه ۲/۵-۱۷/۳ (میلی‌متر بر ساعت) و مدت دوام بارش در بازه ۱۶ تا ۹۵ (ساعت) است. بیشینه جریان اوج مشاهداتی برابر ۵۴۰ مترمکعب بر ثانیه بود (جدول ۱). در جدول ۲ همبستگی بین اجزای مختلف بارش و رواناب آورده شده است که در بین آنها، همبستگی بین عمق بارش و حجم کل رواناب، مدت دوام بارش و حجم کل رواناب و حجم کل رواناب و دبی اوج بیشتر بود.

در این پژوهش، از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ۵۰ متری برای تقسیم حوضه به سه زیرحوضه و تهیه شبکه جریان استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار GIS، نقشه واحدهای پاسخ هیدرولوژیک (HRUs) به‌دست آمد (شکل ۲-۵). به این منظور، دو لایه کاربری اراضی و بافت خاک روی هم قرار گرفتند و واحدهای پاسخ هیدرولوژیک خاک شناسایی شدند. از این‌رو، هر واحد پاسخ هیدرولوژیک نشان‌دهنده یک کاربری خاص و بافت خاک

جدول ۱. مشخصات هیدرولوژیکی هشت رخداد بارش - رواناب استفاده شده در مرحله صحت سنجی HEC-HMS در حوضه قره سو در کرمانشاه

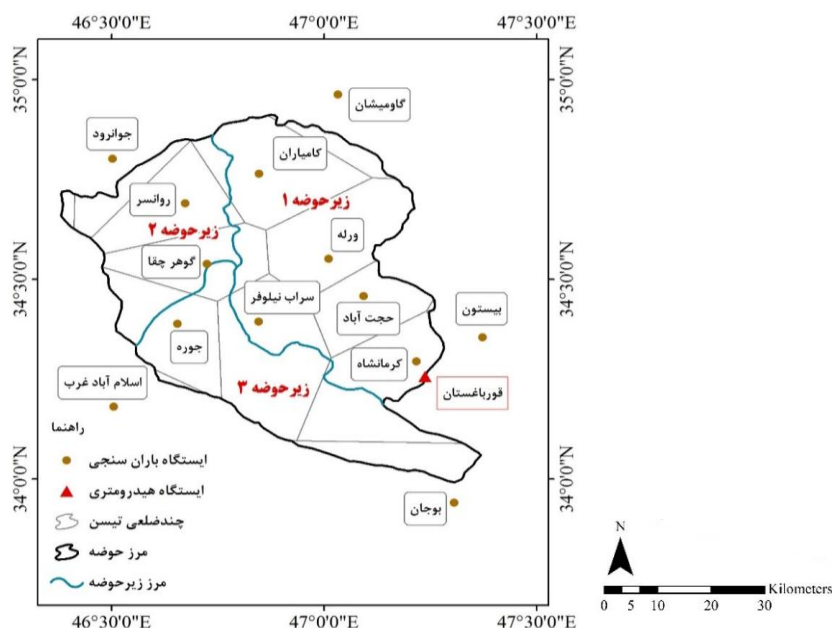
مشخصات رخداد								مشخصات بارش
رواناب				بارش				
$t_p$	$Q_p$	$C_V$	V	I		$T_D$	D	
				پیشینه	متوسط			
۴	۳۶۴	۰/۳۹	۳۰/۸۱	۷/۴	۲/۱۹	۳۶	۷۹	۱۶ و ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۲
۱۲	۳۱۰	۰/۵۸	۶۶/۰۷	۴/۶	۱/۵۵	۷۴	۱۱۵	۱۷ تا ۲۰ آبان ۱۳۹۲
۵	۴۳۰	۰/۴۲	۳۵/۲۸	۱۰/۱	۱/۴۲	۵۹	۸۴	۲۰ تا ۲۲ اسفند ۱۳۹۲
۱۰	۲۲۰	۰/۲۲	۱۲/۹۸	۵/۶	۲/۴۶	۲۴	۵۹	۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳
۳	۱۳۵	۰/۳۴	۱۸/۳۶	۲/۵	۱/۳۵	۴۰	۵۴	۲۴ و ۲۵ مهر ۱۳۹۳
۴	۱۶۱	۰/۸۴	۳۱/۹۲	۳/۳	۰/۹۷	۳۹	۳۸	۲ و ۳ آذر ۱۳۹۳
۱	۱۱۷	۰/۵۶	۲۷/۴۴	۶/۲	۳/۰۶	۱۶	۴۹	۲۴ فروردین ۱۳۹۴
۷	۵۴۰	۰/۶۷	۱۴۶/۷۳	۱۷/۳	۲/۳۱	۹۵	۲۱۹	۶ تا ۹ آبان ۱۳۹۴

توجه: D عمق بارش (mm)،  $T_D$  مدت تداوم بارش (h)، I شدت بارش ( $mmh^{-1}$ ), V حجم رواناب (mm) در سطح حوضه،  $C_V$  ضریب رواناب،  $Q_p$  جریان اوج ( $m^3s^{-1}$ )،  $t_p$  زمان اوج (h) است.

جدول ۲. ماتریس ضریب همبستگی بین مشخصه های مختلف بارش و رواناب رخداد های استفاده شده در مرحله صحت سنجی مدل HEC-HMS

رواناب				بارش				رخداد
$t_p$	$Q_p$	$C_V$	V	I		$T_D$	D	
				پیشینه	متوسط			
-/۲۲	-/۷۱	-/۱	۰/۹۳*	۰/۸۱	۰/۰۳	۰/۷۸	-	D
-/۲۸	-/۶۴	-/۱۴	۰/۷۷*	۰/۴۱	-/۰/۰۸	-	-	$T_D$
-/۰/۱	-/۰/۴	-/۰/۰۹	-/۰/۰۲	۰/۱۷	-	-	-	I (متوسط)
-/۰/۵	-/۶۵	-/۰/۰۵	-/۰/۷۶	-	-	-	-	I (پیشینه)
-/۱۴	۰/۵۵*	-/۲۳	-	-	-	-	-	V
-/۰/۰۶	-/۰/۳	-	-	-	-	-	-	$C_V$
-/۱۷	-	-	-	-	-	-	-	$Q_p$
-	-	-	-	-	-	-	-	$t_p$

\*مقادیر در سطح ۰/۰۵ معنادارند (آزمون توکی).



شکل ۳. زیر حوضه ها و چندضلعی های تیسن ایستگاه های باران سنجی حوضه قره سو در کرمانشاه

۱۲/۷ میلی‌متر (برای شرایط رطوبت پیشین نوع سوم؛ خاک خیس) برای مناطق کشاورزی و جنگلی اعمال شد. تلفات اولیه با توجه به کاربری اراضی برای هر زیرحوضه عددی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، به‌علت فقدان مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر توصیه‌شده توسط راهنمای HEC-HMS مطابق با جدول ۳ استفاده شد.

روش ابتدایی - ثابت دو پارامتر به‌شرح تلفات اولیه (IL) و میزان ثابت (CR) دارد که در پژوهش حاضر، برای برآورد تلفات اولیه با توجه به محدوده پیشنهادی توسط راهنمای HEC-HMS مقادیر ۳۸/۱ میلی‌متر (برای شرایط رطوبت پیشین نوع اول؛ خاک خشک)، ۲۵/۴ میلی‌متر (برای شرایط رطوبت پیشین نوع دوم؛ خاک با رطوبت متوسط) و

جدول ۳. پارامترهای ورودی سه روش مختلف نفوذ برای صحت‌سنجی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو

پارامتر	شرایط رطوبت پیشین			زیرحوضه
	۱	۲	۳	
روش نفوذ SCS-CN				
مدل پیش‌فرز	I	۵۵	۴۷	۵۰
	II	۶۲	۵۸	۶۰
	III	۸۰	۷۶	۷۹
	I	۱۲/۷	۹/۶	۱۱/۹
	II	۱۱/۹	۷/۸	۸/۴
	III	۷/۸	۵/۱	۶/۷
	I	۸۰/۱	۱۱۷/۲	۹۱/۱
	II	۵۱/۶	۶۹/۴	۵۴/۲
	III	۳۲/۷	۳۷/۴	۳۳/۵
مدل واسنجی‌شده	I	۷۱	۶۳	۶۵
	II	۷۵	۷۰	۷۱
	III	۸۱	۷۸	۷۹
	I	۱۰	۸/۱	۹/۴
	II	۷/۳	۵/۹	۶/۸
	III	۶/۷	۴/۲	۵/۵
	I	۳۹/۵	۵۰/۶	۴۳/۱
	II	۳۱/۲	۴۱/۱	۳۲
	III	۲۹/۴	۳۶/۵	۲۹/۱
روش نفوذ Initial and Constant				
مدل پیش‌فرز	I	۳۹/۹	۴۰/۷	۴۰/۵
	II	۲۷/۸	۲۸/۳	۲۸/۲
	III	۱۵/۲	۱۵/۶	۱۵/۵
		۵/۷۲		
	I	۳۹/۹	۴۰/۷	۴۰/۵
	II	۲۷/۸	۲۸/۳	۲۸/۲
مدل واسنجی‌شده	III	۱۵/۲	۱۵/۶	۱۵/۵
		میزان ثابت (mm h <sup>-1</sup> )		
	I	۳۹/۹	۴۰/۷	۴۰/۵
	II	۲۷/۸	۲۸/۳	۲۸/۲
	III	۱۵/۲	۱۵/۶	۱۵/۵
		میزان ثابت (mm h <sup>-1</sup> )		
مدل واسنجی‌شده	I	۴۷	۵۰/۶	۴۲/۹
	II	۲۹/۷	۳۰/۹	۳۲/۱
	III	۱۹/۱	۲۲/۹	۲۱/۷
		میزان ثابت (mm h <sup>-1</sup> )		
		تلفات اولیه <sup>+</sup> (mm)		
		رابطه شماره ۲		
روش Green-Ampt				
	۴۷۳/۳	۵۰۲/۱۵	۵۹۲/۴	پتانسیل مکش جبهه رطوبتی خاک (mm)
	۴۳/۷۴	۵۴/۸۴	۴۲/۴۸	هدایت هیدرولیکی (mm h <sup>-1</sup> )

<sup>+</sup> برآورد شده توسط روش SCS-CN

<sup>\*</sup> برآورد شده توسط راهنمای HEC-HMS

به طوری که اشاره شد، واسنجی پارامترهای ورودی تلفات اولیه مدل، با استفاده از راهنمای مرجع انجام شد. پس از خاتمه فرایند بهینه‌سازی، مقادیر بهینه برای صحت‌سنجی مدل توسط چهار رخداد بارش دیگر استفاده شد.

در این پژوهش، عملکرد مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رویدادهای بارش- رواناب با معیارهای ارزیابی شد که شامل مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده حجم رواناب و جریان اوج، ضریب تعیین ( $R^2$ )، ضریب بهره‌وری نش- ساتکلیف (E)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب مقدار باقی‌مانده (CRM) بودند. چنانچه مقادیر معیارهای RMSE و CRM صفر و مقادیر معیارهای  $R^2$  و E به یک نزدیک شوند، عملکرد مدل به مقدار بهینه نزدیک می‌شود. اگر  $E > 0.75$  باشد، عملکرد مدل خوب؛ اگر  $0.75 \leq E \leq 0.26$  باشد عملکرد مدل رضایت‌بخش؛ و اگر  $E < 0.26$  باشد، عملکرد مدل نامطلوب ارزیابی می‌شود [۲۱]. دقت مدل در تخمین زمان تا اوج با مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ارزیابی شد.

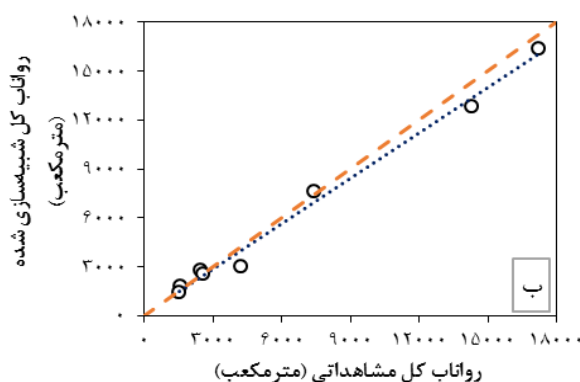
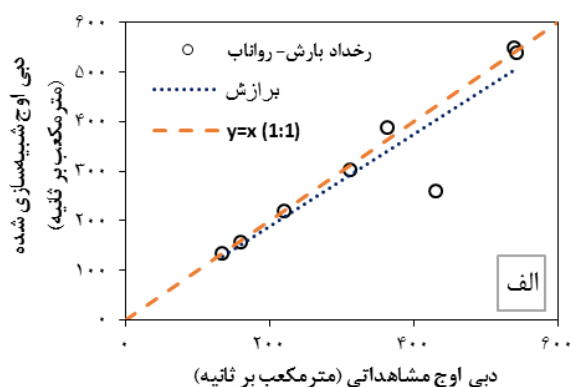
### نتایج و بحث

با توجه به آماره‌های  $R^2$  و E عملکرد مدل در تخمین حجم کل رواناب بهتر از جریان اوج بود. تعداد هفت رویداد از کل هشت رویداد بارش- رواناب از نظر تخمین مقادیر دبی اوج بسیار نزدیک به خطی با شیب (۱:۱) بودند (شکل ۴).

در این پژوهش، روش SCS-UH به‌عنوان روش تبدیل بارش به رواناب انتخاب شد، چون نه تنها به ورودی کم (فقط زمان تأخیر) نیاز دارد، بلکه [۱۶] نیز عملکرد مناسب این روش را در مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه گزارش کرده‌اند. برای ارزیابی مدل، حجم کل رواناب سطحی و دبی اوج برای هشت رخداد منتخب با استفاده از سه روش نفوذ شبیه‌سازی شد. روش دبی پایه ثابت، برای جداسازی آب‌نمود مستقیم جریان سطحی از آب‌نمود کل انتخاب شد.

در این پژوهش روش گرین- آمپت به دلیل سادگی و عدم نیاز در فرایند صحت‌سنجی مدل استفاده شد. در حالی که دو روش CN و ابتدایی- ثابت ابتدا نسبت به حساس‌ترین ورودی‌ها واسنجی شده و سپس صحت‌سنجی شدند [۱۶ و ۱۹]. در این زمینه، چهار رخداد برای واسنجی و چهار رویداد دیگر برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد.

برای روش CN، فرایند واسنجی/صحت‌سنجی با اصلاح شماره منحنی اولیه برای هر زیرحوضه با توجه به شرایط رطوبت پیشین صورت پذیرفت. مقدار شماره منحنی به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در پیش‌بینی دقیق رواناب [۲۰] است و نیز به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر ورودی در مدل بارش- رواناب [۲۱] محسوب می‌شود. واسنجی مجزا برای هر شرایط رطوبت پیشین، وابسته به اهمیت مقدار خاک، به‌عنوان یک عامل کنترل رواناب در رگبارهای با شدت کم تا متوسط است [۲۱].



شکل ۴. مقایسه الف) دبی اوج و ب) رواناب کل شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-HMS (روش SCS-CN) و مقادیر مشاهداتی در خروجی حوضه قره‌سو در کرمانشاه



مورد حجم رواناب و دبی اوج به کمتر از چهار درصد کاهش یافت (جدول ۴).

اگر در پژوهش حاضر رخداد ۲۰-۲۲ اسفند ۱۳۹۲ حذف شود، مقادیر E تا حدود ۰/۹۰ (برای دبی اوج) و تا ۰/۹۲ (برای رواناب کل) افزایش می‌یابد و عملکرد مدل را می‌توان «خوب» در نظر گرفت. در پژوهش حاضر مقادیر بهره‌وری مدل، برای ضریب کارایی نش-ساتکلیف بسیار مطلوب‌تر از واسنجی‌های HEC-HMS در دیگر حوضه‌های نیمه‌مرطوب [۲۳] بود. ال‌حسن و همکارانش [۲۳] پس از واسنجی مدل، مقادیر حجم کل رواناب و دبی اوج را به ترتیب با اختلاف‌هایی در حدود ۲۷ تا ۳۰ درصد گزارش دادند که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. سیدزیک و هوگو [۲۴] حدود ۵۰ درصد اختلاف بین مقادیر حجم رواناب پیش‌بینی‌شده و مقادیر نظیر مشاهداتی گزارش کرده‌اند که بیشتر از مقدار نظیر در پژوهش فعلی است. همچنین، جین و همکارانش [۱۶] موفق شدند بهره‌وری بیش از ۰/۷۰ را با مدل HEC-HMS در منطقه‌ای نیمه‌مرطوب در شمال چین به دست آورند که با یافته‌های پژوهش فعلی تا حدود زیادی مطابقت دارد.

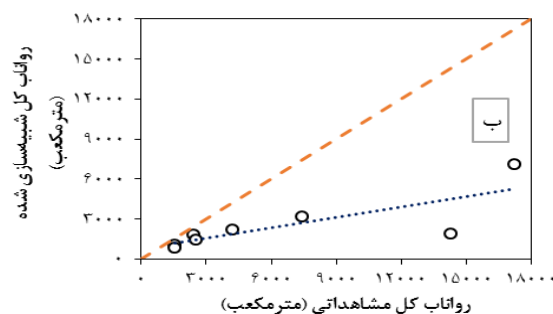
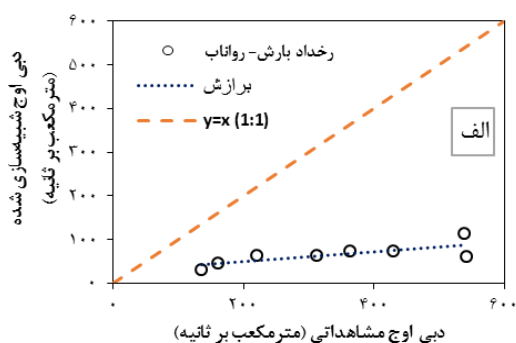
شکل ۵ نقاط پراکنش داده‌های محاسباتی و مشاهداتی را با کاربرد روش گرین-آمپت در مدل استفاده‌شده نشان می‌دهد. به طوری که از این شکل می‌توان دریافت، روش گرین-آمپت در HEC-HMS در برآورد هر دو متغیر هیدرولوژیکی (رواناب کل و دبی اوج) رضایت‌بخش نیست و بیشترین اختلاف مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای رواناب کل و دبی اوج به ترتیب، ۶۴/۹ درصد و ۸۳/۸ درصد به دست آمد. جدول ۵ معیارهای ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS با کاربرد روش گرین-آمپت در خروجی حوضه قره‌سو در کرمانشاه را نشان می‌دهد.

با این حال، برای رخداد ثبت‌شده در ۲۰-۲۲ اسفند ۱۳۹۲، مقدار جریان اوج شبیه‌سازی‌شده با مدل، از مقدار نظیر مشاهداتی بسیار متفاوت بود. برای این رخداد، شدت بارش حدود ۱۰/۱ میلی‌متر بر ساعت بود که رواناب سطحی درخور توجهی را در سطح خاک ایجاد کرده بود. برای این رویداد، با اعمال شرایط رطوبت پیشین خشک در مدل، فرض شده است که خاک قبل از بارندگی خشک و در نتیجه ظرفیت نفوذ آب در خاک زیاد است. در حالی که در عمل به دلیل شدت زیاد بارش ظرفیت رواناب شبیه‌سازی‌شده کمتر از مقدار واقعی حاصل شده است. در کل، فرایند واسنجی چهار نتیجه کاهش تمایل مدل به تخمین کم رواناب (۰/۷۰- CRM=۰/۰۶) برای مدل پیش‌فرض، نزدیکی آمار بین حجم رواناب کل و دبی اوج مشاهداتی و مقادیر پیش‌بینی‌شده متناظر با آنها (اختلاف‌های متوسط و بیشینه کمتر از ۳ درصد) کاهش درخور توجه ۱۴- درصدی RMSE و بهره‌وری زیاد مدل (جدول ۴) به دست آمد. جدول ۴ مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS را با استفاده از روش CN نشان می‌دهد.

به طوری که از جدول ۴ می‌توان استنباط کرد، میانگین پیش‌بینی مدل با مقادیر پیش‌فرض برای پارامترها، مقدار حجم رواناب کل ۱۴ درصد و مقدار دبی اوج ۱۰ درصد کمتر از مقدار مشاهداتی تخمین زده شده بود. بیشینه اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده برای رواناب و دبی به ترتیب ۱۶/۸ درصد و ۱۱/۳ درصد بود. در مرحله واسنجی، مقادیر شماره منحنی به طور متوسط ۲۰ درصد افزایش یافت و با این عمل پس از واسنجی، مقادیر متغیرهای شبیه‌سازی‌شده (توسط HEC-HMS) به طور درخور توجهی به مقادیر مشاهداتی مربوطه نزدیک شدند، به طوری که اختلاف مقادیر نهایی مشاهداتی برای هر دو

جدول ۴. مقادیر معیارهای ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS (روش SCS-CN) در خروجی حوضه قره‌سو در کرمانشاه

CRM	RMSE	E	R <sup>2</sup>	بیشینه	کمینه	انحراف معیار	میانگین	متغیرهای هیدرولوژیکی
-	-	-	-	۱۷۲۱۷	۱۵۴۸/۵	۵۷۲۰/۶	۶۴۱۱/۱	مشاهداتی
۰/۱۱	۱۴۲	۰/۴۳	۰/۷۸	۱۴۴۰۷	۱۲۳۶/۵	۵۴۹۶/۸	۶۰۵۱/۹	پیش‌فرض
۰/۰۶	۱۲۸/۱	۰/۸۱	۰/۸۴	۱۶۶۹۹	۱۵۵۵/۳	۵۷۰۸/۲	۶۳۷۹/۷	واسنجی
-	-	-	-	۵۴۳/۴	۱۳۵	۱۴۹/۷	۳۳۸/۳	مشاهداتی
۰/۱۰	۲۳/۴	۰/۷۴	۰/۷۵	۵۵۱/۵	۱۲۰/۹	۱۶۰/۴	۳۱۷/۶	پیش‌فرض
۰/۰۷	۲۱/۲	۰/۸۳	۰/۸۳	۵۴۹	۱۳۳	۱۵۳/۱	۳۲۹/۳	واسنجی



شکل ۵. مقایسه الف) دبی اوج و ب) رواناب کل شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-HMS (روش گرین- آمپت) و مقادیر مشاهداتی در خروجی حوضه قره‌سو

جدول ۵. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS با کاربرد روش گرین- آمپت در خروجی حوضه قره‌سو در کرمانشاه

متغیرهای هیدرولوژیکی	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	R <sup>2</sup>	E	RMSE	CRM
رواناب کل مشاهداتی	۶۴۱۱/۱	۵۷۲۰/۶	۱۵۴۸/۵	۱۷۲۱۷	-	-	-	-
رواناب کل شبیه‌سازی شده	۲۴۴۱/۴	۲۰۰۹/۸	۸۹۵/۵	۷۰۷۸	۰/۵۳	-۰/۰۷	۸۴/۱۳	۰/۱۶۱۹
دبی اوج مشاهداتی	۳۳۸/۳	۱۴۹/۷	۱۳۵	۵۴۳/۴	-	-	-	-
دبی اوج شبیه‌سازی شده	۶۵/۱	۲۴/۳	۳۰	۱۱۴/۲	۰/۵۵	-۳/۱۲	۱۰/۶۸	۰/۱۸۰۷

بهره‌وری بسیار کم مدل با توجه به مقادیر منفی E (۰/۰۷- برای رواناب کل و ۳/۱۲- برای دبی اوج) به اثبات رسید (جدول ۵). به نظر می‌رسد کم بودن دقت مدل با کاربرد روش گرین- آمپت می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد. نخست آنکه، معادله گرین- آمپت به مقدار هدایت هیدرولیکی خاک (از مفروضات مدل) حساس است. در این پژوهش، به دلیل عدم اندازه‌گیری‌های مربوط به مشخصات هیدرولیکی از معادلات رگرسیونی پیشنهادشده در راهنمای HEC-HMS استفاده شد. دوم اینکه مدل گرین- آمپت رواناب سطحی را فقط زمانی که شدت بارش بیشتر از سرعت نفوذ آب در خاک باشد، تخمین می‌زند. در حالی که در پژوهش حاضر هشت

رخداد بارش برای ارزیابی مدل با مدت زمان طولانی و شدت نسبتاً کم (به‌طور متوسط ۰/۹۷ تا ۳/۰۶ میلی‌متر بر ساعت) استفاده شد (جدول ۱)، که این مقادیر بسیار کمتر از ظرفیت نفوذ خاک در حوضه پژوهش شده بودند. یافته‌های فیکلین و ژانگ [۲۵]، که مدل‌های CN و گرین- آمپت را در مدل‌سازی یک حوضه کشاورزی مقایسه کرده بودند، نیز همین واقعیت را تأیید می‌کند. لین و همکارانش [۲۶] گفته‌اند که در مدل یادشده فرض این است که بارش به‌طور یکنواخت در سراسر حوضه نازل می‌شود در حالی که بخش مهمی از رواناب ممکن است ناشی از بارش‌های شدیدی باشد که در بخش کوچکی از حوضه نازل شده است.

جدول ۶. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل HEC-HMS با کاربرد روش ابتدایی- ثابت در خروجی حوضه قره‌سو در کرمانشاه

متغیرهای هیدرولوژیکی	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	R <sup>2</sup>	E	RMSE	CRM
مشاهداتی	۶۴۱۱/۱	۵۷۲۰/۶	۱۵۴۸/۵	۱۷۲۱۷	-	-	-	-
رواناب کل پیش‌فرض	۴۶۸۸/۴	۳۱۲۳/۶	۱۱۰۸	۱۳۹۷۸	۰/۶۹	۰/۳۸	۲۱۹/۱	۰/۳۸
رواناب کل شبیه‌سازی شده	۵۲۹۷/۹	۴۷۷۷/۷	۱۴۸۶/۴	۱۴۲۵۷	۰/۹۷	۰/۸۵	۱۱۹/۴	۰/۱۷
رواناب کل شبیه‌سازی شده	۵۰۲۹	۴۹۵۰/۴	۱۳۴۹/۳	۱۴۶۲۶	۰/۹۴	۰/۸۰	۱۳۴	۰/۱۹
مشاهداتی	۳۳۸/۳	۱۴۹/۷	۱۳۵	۵۴۳/۴	-	-	-	-
دبی اوج پیش‌فرض	۳۱۷/۴	۱۳۶	۱۴۱/۷	۵۵۶	۰/۷۴	۰/۸۸	۴۵/۴	۰/۰۴
دبی اوج شبیه‌سازی شده	۳۳۷/۴	۱۶۱/۳	۱۳۶/۳	۵۴۷/۱	۰/۹۶	۰/۹۵	۲۳/۶	۰/۰۱
دبی اوج شبیه‌سازی شده	۳۳۳	۱۳۹/۲	۱۳۹	۵۵۲/۳	۰/۹۴	۰/۹۴	۲۹/۶	۰/۰۳

\* برآوردشده توسط روش SCS-CN

\* برآوردشده توسط راهنمای HEC-HMS

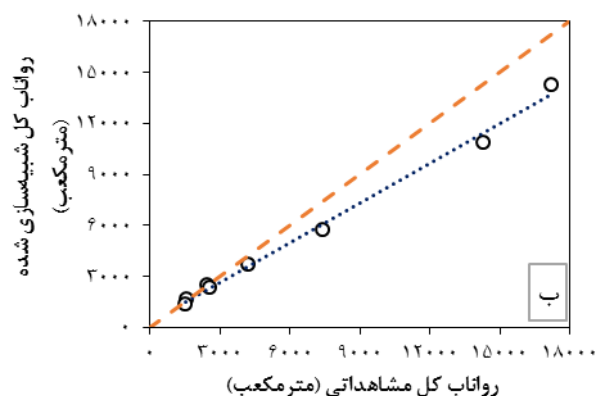
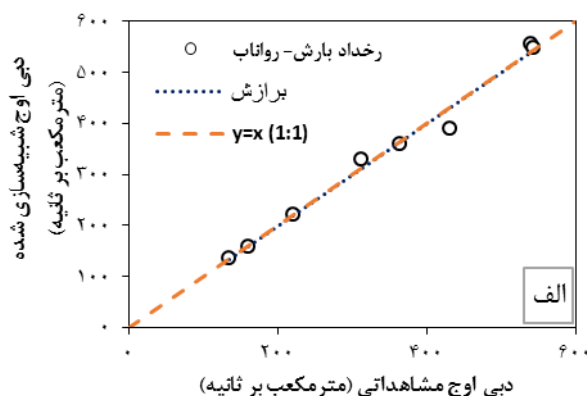
(۳)  $CR = 0.753I - 0.132$   
 دقت پیش‌بینی رواناب کل اندکی کمتر از استراتژی واسنجی پیشین (برآورد تلفات اولیه توسط راهنمای مدل) بود. برای جریان اوج، اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بسیار کم بود (نزدیک به دو درصد) و بهره‌وری مدل بسیار عالی (مقادیر E برابر با ۰/۹۴) گزارش شد (جدول ۶ و شکل ۷). بنابراین، تحت چنین شرایطی، این روش می‌تواند در برنامه‌های کاربردی HEC-HMS، که به قابلیت پیش‌بینی زیادی در پیش‌بینی جریان اوج نیاز دارد، مناسب باشد.

ارزیابی‌های مدل متناسب با نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش جین و همکارانش [۱۶] است، که عملکرد روش شماره منحنی را بهتر از روش ابتدایی - ثابت در برآورد رواناب تولیدی در مناطق نیمه‌مرطوب در شمال چین گزارش کردند. در مقابل، هالواتورا و ناجیم [۲۸]، مدل HEC-HMS را برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه گرمسیری در کشور سریلانکا آزمایش کردند، که بیان‌کننده بهتر بودن عملکرد روش ابتدایی - ثابت در مقایسه با روش شماره منحنی بود. این محققان دریافتند که روش SCS-CN استفاده‌شده برای به‌دست‌آوردن میانگین شماره منحنی در حوضه‌ها، قادر به برآورد صحیح بارش مازاد نیست و در نتیجه خطای غیرقابل قبولی در پیش‌بینی جریان اوج رخ داده است.

جدول ۶ معیارهای ارزیابی عملکرد مدل را با کاربرد روش تلفات نفوذ اولیه - ثابت در حوضه قره‌سو در کرمانشاه نشان می‌دهد. براساس جدول ۶، استفاده از روش ابتدایی - ثابت، برای پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی (با پارامترهای ورودی پیش‌فرض)، نتایج ضعیفی ارائه کرد و بنابراین، مدل واسنجی شد [۲۷].

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در فرایند واسنجی/صحت‌سنجی، تلفات اولیه توسط دو روش برآورد شد. با استفاده از مقادیر تلفات اولیه به‌دست‌آمده از راهنمای HEC-HMS، می‌توان دریافت که ضریب همبستگی مناسبی ( $R^2 = 0.824$ ) بین میزان ثابت (CR) و بیشینه شدت بارش (I) رخداد باران استفاده‌شده در مرحله واسنجی وجود دارد (رابطه ۲).

(۲)  $CR = 0.795I - 0.302$   
 در اینجا CR میزان ثابت بر حسب (میلی‌متر بر ساعت) و I بیشینه شدت بارش بر حسب (میلی‌متر بر ساعت) است. با محاسبه میزان ثابت توسط رابطه ۱، عملکرد مدل به‌طور درخور توجهی بهبود یافت. پیش‌بینی رواناب کل با توجه به ضریب بهره‌وری نش - ساتکلیف برابر با ۰/۸۵ رضایت‌بخش بود. عملکرد مدل HEC-HMS برای پیش‌بینی جریان اوج بهتر بود، به‌طوری که اختلاف بسیار کمی (کمتر از یک درصد) بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود داشت (جدول ۶ و شکل ۶).  
 با برآورد تلفات اولیه توسط روش SCS-CN، مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) در رابطه ۳ تا ۰/۸۶۷ افزایش یافت.

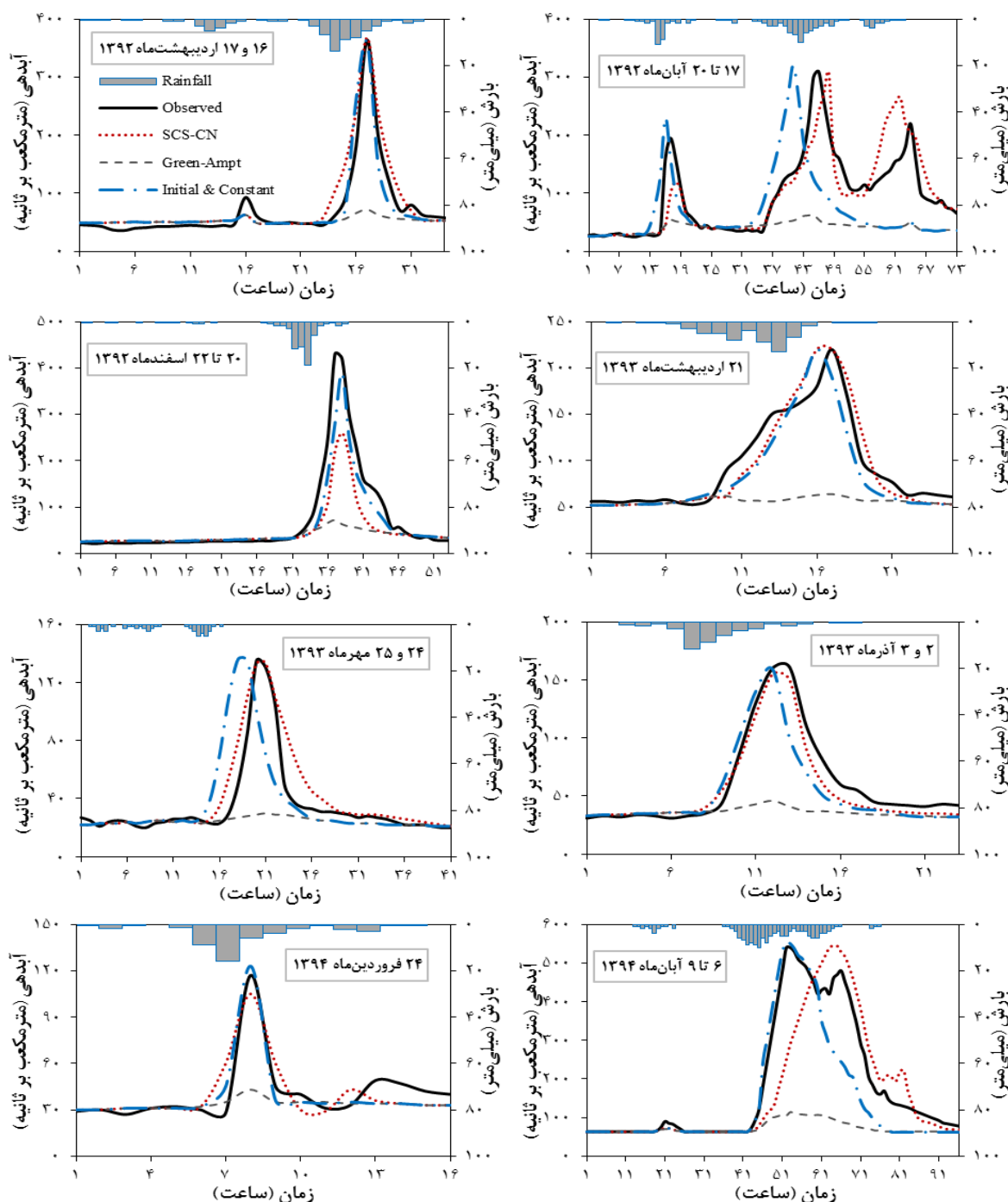


شکل ۶. مقایسه الف) دبی اوج و ب) رواناب کل شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-HMS (روش ابتدایی - ثابت) و مقادیر مشاهداتی در خروجی حوضه قره‌سو در کرمانشاه

مشاهداتی به دنبال داشت. همچنین، واسنجی دقت قابل قبولی را به شبیه سازی زمان جریان اوج برای رخدادهای بارش بخشید (شکل های ۵ و ۷)؛ اگرچه برخی از مقادیر بیشینه نسبی جریان اوج توسط مدل HEC-HMS به اندازه کافی بازتولید نشدند (شکل ۷).

### تحلیل آب نمودهای شبیه سازی شده

در پژوهش حاضر، آب نمودهای شبیه سازی شده بسیار نزدیک به آب نمودهای مشاهداتی در هر دو روش شماره منحنی و ابتدایی- ثابت بود (شکل ۷). در مقابل، برآورد نفوذ صورت گرفته توسط روش گرین- آمپت، اختلاف های درخور توجهی در شکل آب نمودهای شبیه سازی شده و



شکل ۷. آب نمودهای شبیه سازی شده توسط مدل HEC-HMS (روش های نفوذ مختلف) و مشاهداتی در خروجی حوضه قره سو

۱۷/۲۹ درصد بودند (جدول ۷). بیشترین اختلاف زمان، بین زمان رسیدن به اوج سیلاب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، برای روش‌های شماره منحنی، گرین-آمپت و روش ابتدایی- ثابت به ترتیب برابر با هشت، پنج و سه ساعت بود (جدول ۷ و شکل ۸). اختلاف در شبیه‌سازی زمان اوج سیلاب، در یافته‌های دیگر محققان نیز مشهود بود، به طوری که سیدزیک و هوگو [۲۴] بیشترین اختلاف بین زمان رسیدن به اوج سیلاب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را ۱۴/۶ ساعت پیش‌بینی کردند.

**ارزیابی مدل در برآورد زمان اوج سیلاب**  
برآورد زمان اوج قابل اعتماد در مواقع سیلابی، و به‌منظور هشدار به مردم درباره وقوع رخداد‌های شدید امری ضروری برای برنامه‌ریزان است. به‌کارگیری سه روش نفوذ پژوهش شده به‌منظور برآورد زمان به اوج رسیدن سیلاب، بیشترین اطمینان‌پذیری را برای روش شماره منحنی نشان داد به طوری که متوسط اختلاف بین زمان اوج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی ۶/۳۶ درصد و ضریب بهره‌وری ۰/۸۱ بود. با استفاده از روش‌های گرین-آمپت و ابتدایی- ثابت، متوسط اختلاف به ترتیب برابر با ۱۱/۰۸ و

جدول ۷. مقایسه زمان اوج سیلاب شبیه‌سازی شده با روش‌های مختلف توسط مدل HEC-HMS با مقادیر مشاهداتی در خروجی حوضه قره‌سو

شماره رخداد	تاریخ رخداد	زمان تا اوج (ساعت)						
		شبیه‌سازی شده			مشاهداتی			
		شماره منحنی	گرین آمپت	ابتدایی ثابت	شماره منحنی	گرین آمپت	ابتدایی ثابت	
۱	۱۶ و ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۲	۴	۴	۲	۰	۰	۵۰	
۲	۱۷ تا ۲۰ آبان ۱۳۹۲	۱۳	۱۴	۸	-۷/۹۶	۷/۶۹	۳۸/۴۶	
۳	۲۰ تا ۲۲ اسفند ۱۳۹۲	۵	۵	۴	۰	۴۰	۲۰	
۴	۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳	۸	۶	۵	۲۵	۵۰	۳۷/۵	
۵	۲۴ و ۲۵ مهر ۱۳۹۳	۲	۳	۴	-۵۰	-۵۰	-۱۰۰	
۶	۲ و ۳ آذر ۱۳۹۳	۳	۳	۲	۰	۰	۳۳/۳۳	
۷	۲۴ فروردین ۱۳۹۴	۲	۲	۱	۰	۵۰	۵۰	
۸	۶ تا ۹ آبان ۱۳۹۴	۱۱	۱۳	۱۰	-۱۸/۱۷	-۹/۰۹	۹/۰۹	
		میانگین				-۶/۳۶	۱۱/۰۸	۱۷/۲۹

ارزیابی شد، و آب‌نمود رخداد‌های بارش- رواناب در حوضه قره‌سو واقع در غرب ایران شبیه‌سازی شد. مقایسه سه روش نفوذ موجود در مدل HEC-HMS (CN)، گرین-آمپت و ابتدایی- ثابت) در حوضه قره‌سو نشان داد پس از واسنجی، دقت شبیه‌سازی رواناب کل و جریان اوج با روش‌های CN و ابتدایی- ثابت رضایت‌بخش بود. در مقابل، عملکرد مدل HEC-HMS با استفاده از معادلات گرین-آمپت برای شبیه‌سازی نفوذ، نامناسب بود. همچنین، برآورد زمان رسیدن به اوج سیلاب در برخی موارد اختلاف‌های معناداری را نشان داد، در نتیجه به‌نظر می‌رسد که مدل HEC-HMS برای برنامه‌ریزی‌های مهم و اساسی در پیش‌بینی زمان دقیق سیلاب در رخداد‌های بحرانی، مناسب نباشد. یافته‌های این پژوهش نشان داد انتقال‌پذیری مدل HEC-HMS به‌عنوان ابزار کاربردی در

بنابراین، در برنامه‌ریزی‌ها هنگام وقوع سیلاب‌های شدید، که نیاز به دقت زیادی در پیش‌بینی زمان اوج سیلاب دارد، لازم است دقت زیادی در تعیین مدل نفوذ استفاده شده به‌عمل آید، زیرا برآوردها همیشه متناسب نیستند. نتایج صحت‌سنجی مدل HEC-HMS در حوضه قره‌سو نشان می‌دهد تبدیل بارش- رواناب با دقت رضایت‌بخشی در این حوضه انجام شد. به‌لطف واسنجی مدل، شبیه‌سازی رواناب کل اعتماد‌پذیری زیادی داشت و برآورد جریان اوج بهبود یافت. این نتایج نشان می‌دهد HEC-HMS می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیزی برای پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی به‌کار گرفته شود.

### نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، توانایی مدل HEC-HMS در پیش‌بینی حجم رواناب، جریان اوج و زمان رسیدن به اوج سیلاب

- catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2016; Parts A/B/C.
- [5]. Gao Y, Yuan Y, Wang H, Arthur R, Schmidt R, Wang K, Liu Y. Examining the effects of urban agglomeration polders on flood events in Qinhuai River basin, China with HEC-HMS model. *Water Science & Technology*, 2017; in press.
- [6]. Rahman KU, Balkhair KS, Almazroui M Masood A. Sub-catchments flow losses computation using Muskingum-Cunge routing method and HEC-HMS GIS based techniques, case study of Wadi Al-Lith, Saudi Arabia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2017; 3(1):p4.
- [7]. Garnei R, Faridhosseini, AR, Hasheminia, SM, Hojjati, A. Comparing PSO Algorithm Automatic Calibration and Nelder&Mead Algorithm on the HEC-HMS Hydrologic Model (Case Study: Kardeh Watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*. 2016; 22(5): 247-260 (In Persian).
- [8]. Kaboosi K, Jelini R. Investigation of performance indices and the rule of detention reservoir on flood control (case study: Jafarabad watershed in Golestan province). 2016; 5(4):35-46 (In Persian).
- [9]. Taheri Tizro A, Pakdel Khasmakhi H, Marofi S, Vazifedoust, M. Integrated HEC-HMS and GLDAS models to runoff estimate of ungauged area. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2016; 23(4):101-118 (In Persian).
- [10]. Dariane AB, Javadianzadeh MM, James LD. Developing an efficient auto-calibration algorithm for HEC-HMS program. *Water Resources Management*, 2016; 30(6):1923-1937.
- [11]. Oleyiblo JO, Li ZJ. Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. *Water Science and Engineering*, 2010; 3(1):14-22.
- [12]. Feldman AD. Hydrologic modelling system HEC-HMS, technical reference manual. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, 2000; Davis, CA, USA.
- [13]. Verma AK, Jha MK, Mahana RK. Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Paddy and Water Environment*, 2010; 8:131-144.
- [14]. Song XM, Kong FZ, Zhu ZX. Application of Muskingum routing method with variable parameters in ungauged basin. *Water Science and Engineering*, 2011; 4(1):1-12.
- شبیه‌سازی رواناب، تحلیل و برنامه‌ریزی کاربری اراضی می‌تواند استفاده شود. مقایسه دقت سه روش نفوذ (موجود در مدل HEC-HMS) نشان داد روش CN برای شبیه‌سازی حجم رواناب سطحی در اولویت قرار دارد، در حالی که روش ابتدایی - ثابت برای برآورد جریان اوج پیشنهاد می‌شود. پیش‌بینی تلفات نفوذ با استفاده از روش گرین-آمپت (در رخدادهایی با مدت زمان طولانی و شدت کم)، برای رخدادهای مدل‌سازی شده عموماً ضعیف بود. همچنین، این یافته‌ها می‌تواند در مدل‌سازی حوضه‌هایی با شرایط زیست‌محیطی مشابه توسط دیگر مدل‌های پیش‌بینی برای شبیه‌سازی رواناب سطحی استفاده شود. با توجه به یافته‌های مدل‌سازی در این پژوهش و به‌منظور افزایش اعتمادپذیری در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی، پیشنهادهایی در زیر آورده شده است:
- واسنجی مدل با تغییر شماره منحنی در زیرحوضه‌ها به‌منظور افزایش تمایل برای ایجاد رواناب و همچنین به‌کارگیری شرایط رطوبت پیشین خشک برای مدل، در روش شماره منحنی؛
  - تغییر پارامترهای پیش‌فرض خواص خاک در دستورالعمل‌ها، به‌منظور بهبود قابلیت پیش‌بینی رواناب روش گرین-آمپت؛
  - به‌کارگیری معادلات رگرسیون در برآزش میزان ثابت و بیشینه شدت بارش در روش ابتدایی - ثابت.

#### منابع

- [1]. Zhang Y, Wei H, Nearing MA. Effects of antecedent soil moisture on runoff modelling in small semiarid watersheds of southeastern Arizona. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011; 15:3171-3179.
- [2]. Gessesse B, Bewket W, Bräuning A. Model-based characterization and monitoring of runoff and soil erosion in response to land use/land cover changes in the Modjo watershed, Ethiopia. *Land Degradation & Development*, 2015; 26:711-724.
- [3]. Shokri S, Behnia AA, Radmanesh F, Akhond Ali AM. Watershed flood hydrograph estimation using HEC-HMS and geographic information system (Case study: Idanak watershed). *Journal of Watershed Management Research*. 2012; 3(5): 63-80 (In Persian).
- [4]. Gumindoga W, Rwasoka DT, Nhapi I, Dube T. Ungauged runoff simulation in Upper Manyame

- [15]. Wischmeier WH, Smith DD. Prediction rainfall erosion losses. 1978; Handbook No. 537 USDA:Washington D.C.
- [16]. Jin H, Liang R, Wang Y, Tumula P. Flood-runoff in semi-arid and sub-humid regions, a case study: a simulation of Jianghe watershed in Northern China. *Journal of Water*, 2015; 7:5155–5172.
- [17]. USDA-SCS. National engineering handbook Section 4: Hydrology. US Government Printing Office: 1972; Washington, DC, USA.
- [18]. Tukey JW. The problem of multiple comparisons. Unpublished manuscript. In *The Collected Works of John W. Tukey VIII. Multiple Comparisons*, 1953; 1948–1983.
- [19]. Kamali B, Jamshidi SM, Abbaspour KC. Automatic calibration of HEC-HMS using single-objective and multi-objective PSO algorithms. *Hydrological Processes*, 2013; 27:4028–4042.
- [20]. Shrestha S, Mukand SB, Das Gupta A, Kazama F. Evaluation of annualized agricultural nonpoint source model for a watershed in the Siwalik Hills of Nepal. *Environmental Modelling and Software*, 2006; 21:961–975.
- [21]. Baginska B, Milne-Home W, Cornish PS. Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW, with Ann-AGNPS and PEST. *Environmental Modelling and Software*, 2003; 18:801–808.
- [22]. Van Liew MW, Garbrecht J. Hydrologic simulation of the little Washita torrent experimental watershed using SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003; 39:413–426.
- [23]. El Hassan AA, Sharif HO, Jackson T, Chintalapudi S. Performance of a conceptual and physically based model in simulating the response of a semi-urbanized watershed in San Antonio, Texas. *Hydrological Processes*, 2013; 27:3394–3408.
- [24]. Cydzik K, Hogue TS. Modelling postfire response and recovery using the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modelling System (HEC-HMS). *Journal of the American Water Resources Association*, 2009; 45:702–714. Ficklin DL, Zhang M. A comparison of the curve number and GreenAmpt models in an agricultural watershed. *Transactions of the ASABE*, 2013; 56: 61–69.
- [25]. Lane LJ, Diskin MH, Wallace DE, Dixon RM. Partial area response on small semiarid watersheds. *Water Resources Bulletin*, 1978; 14:1143–1158.
- [26]. Saxton KE, Rawls WJ, Romberger JS, Papendick RI. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 1986; 50:1031–1036.
- [27]. Halwatura D, Najim M. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling and Software*, 2013; 46:155–162.