

شبیه‌سازی هیدروگراف‌های سیلاب طراحی در حوضه آبریز آیدوغموش با استفاده از مدل HEC-HMS

فرهاد نعیمی هوشمند و فریبرز احمدزاده کلپیر^{*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۴/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۸/۱۸)

چکیده

مدل‌های هیدرولوژیک برای ارزیابی و پیش‌بینی میزان آب قابل استحصال حوضه‌ها، تحلیل فراوانی سیل و تدوین استراتژی‌های مقابله با سیلاب‌ها روز به روز در حال گسترش است. در این مطالعه از مدل HEC-HMS و الحاقیه‌های HEC-GeoHMS و Arc Hydro در محیط ArcGIS برای شبیه‌سازی هیدروگراف‌های سیلاب طراحی در حوضه آبریز آیدوغموش واقع در شمال غرب ایران استفاده شد. برای محاسبه تلفات بارش، تبدیل بارش به رواناب، روندیابی و جریان پایه به ترتیب از روش SCS-CN، SCS-UH، ماسکینگ‌ها و مدل ثابت ماهانه استفاده شد. در واسنجی مدل با دو رخداد واقعی سیل، میانگین مقادیر قدر مطلق باقیمانده‌ها، مجموع مربع باقیمانده‌ها و مجذور پیک وزنی میانگین مربعات خطا، برای حجم سیلاب به ترتیب برابر ۲/۷۵، ۵/۹۱ و ۵/۳۲ و برای دبی اوج به ترتیب برابر ۸/۹، ۸/۰ و ۸/۰ به دست آمد. صحت‌سنجی مدل نیز با مقدار یک درصد خطا در دبی اوج و ۱۹ درصد خطا در حجم سیلاب مناسب ارزیابی شد. برای بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته، توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ به عنوان مناسب‌ترین توزیع در نرم‌افزار SMADA تعیین و بارش‌های طراحی با دوره‌های بازگشت مختلف استخراج شد. به این ترتیب برای دوره بازگشت ۲ تا ۱۰۰۰ سال دبی اوج و حجم سیلاب طراحی به ترتیب برابر ۱۸/۸ تا ۴۱۵/۶ مترمکعب بر ثانیه و ۵/۷ تا ۸۷/۹ میلیون مترمکعب شبیه‌سازی شد.

واژه‌های کلیدی: آیدوغموش، تحلیل فراوانی سیل، سیلاب طراحی، هیدروگراف، Arc Hydro، HEC-GeoHMS، SMADA.

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: f.ahmadzadeh@iaut.ac.ir

مقدمه

امروزه مطالعات هیدرولوژیک روی روانابها به طور گسترده در سراسر جهان برای تحقق نیازهای مختلف و با هدف برنامه ریزی و مدیریت مؤثر منابع آب برای مصارف فعلی و آینده صورت می‌گیرد. مدل‌سازی بارش- رواناب یکی از مهم‌ترین مدل‌سازی‌های هیدرولوژیک است که برای بررسی رابطه بین میزان بارندگی و رواناب ایجاد شده تحت تأثیر پارامترهای مختلف فیزیکی حوضه استفاده می‌شود و مدل HEC-HMS یکی از قدرتمندترین مدل‌های کامپیوتری در این زمینه است (۱۲ و ۲۵). از میان تکنیک‌های مدل‌سازی فراوانی که برای شبیه‌سازی حوادث سیل در دسترس است نرم‌افزار HEC-HMS با الحاقیه HEC-GeoHMS در GIS به دلیل دقت و دسترسی آسان برای این مطالعه انتخاب شده است. این نرم افزار توسعه یافته مدل‌های قبلی HEC است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا ارائه شده و بر پایه سرویس حفاظت خاک آمریکا (SCS) قادر است فرایند بارش رواناب را به خوبی تحلیل کند (۱۷). کمبود ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی با پراکنش کافی و تجهیزات مناسب در حوضه‌ها و به تبع آن نبود آمار کافی در این زمینه و محدودیت‌های نرم افزاری، کار با این مدل را مشکل می‌کند، با این حال این مدل به سبب پاسخگویی مناسب و قابلیت اصلاح پارامترهای آن، توسط محققین در حوضه‌های مختلف جهان اجرا شده و هم اکنون در مباحث هیدرولوژیک استفاده فراوانی دارد (۲۴).

مصطفی‌زاده و همکاران (۱۸) به مقایسه پارامترهای هیدرولوژیکی جریان در زمان قبل و بعد از احداث سدهای اصلاحی با استفاده از مدل HEC HMS در آبخیز جعفرآباد گلستان پرداختند. بر اساس نتایج، درصد تغییر معیارهای ارزیابی نشان داد که تأثیر سازه‌ها بر کلیه معیارها در دوره بازگشت‌های متفاوت کمتر از ۱/۵ درصد بوده است. از طرفی با افزایش دوره بازگشت سیلاب، تأثیر سازه‌ها بر کاهش دبی اوج و حجم سیلاب کاهش یافته و بیشترین تأثیر سازه‌ها بر معیارهای هیدرولوژیک در دوره بازگشت‌های پایین ۲ تا ۱۵ ساله بوده

است. مجیدی و شاهدی (۱۴) از مدل هیدرولوژیک HEC-HMS برای شبیه‌سازی رواناب باران در حوضه آبنما استفاده کردند. آنها برای محاسبه تلفات نفوذ، تبدیل مازاد بارندگی به رواناب و مسیریابی جریان، از روش‌های SCS-CN، هیدروگراف واحد SCS و ماسکینگام استفاده و ضریب همبستگی (R^2) بین هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را ۰/۹۵ به دست آوردند. مصطفی و همکاران (۱۸) در مطالعه‌ای به تجزیه و تحلیل هیدرولوژیک در دره حضرموت یمن پرداختند. آنها حوضه مورد مطالعه را به هشت زیرحوضه تقسیم و از مدل HEC-HMS برای برآورد سیل استفاده کردند. نتایج نشان داد فقط دو زیرحوضه نیاز به ایجاد سازه برای جلوگیری از خطر سیل دارد. حسین‌زاده و ایمنی (۹) در پژوهشی با عنوان مدل‌سازی هیدرولوژیک حوضه آبریز قوچک- رودک با استفاده از الحاقیه HEC-GeoHMS به این نتیجه رسیدند که نتایج مدل حوضه از کارایی بالایی برخوردار نیست زیرا اختلاف بین دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی بیش از ۲۰ درصد است. پروینی و همکاران (۲۳) به شبیه‌سازی اثر عملیات اصلاحی بر مؤلفه‌های رواناب با مدل HEC HMS در حوضه میخوران پرداختند. نتایج نشان داد که مدل برای دوره پایه (سناریو اول) از دقت قابل قبولی در پیش‌بینی رواناب برخوردار است پس از اجرای طرح‌های حفاظتی (سناریوی دوم)، مقدار دبی اوج و حجم رواناب به ترتیب ۸/۸۵ و ۷/۷۴ درصد کاهش داشته و این مقادیر برای عملیات پیشنهادی به ترتیب ۱۲/۸۴ و ۶/۳۳ درصد برآورد شد. عزیزیان و همکاران (۴) با ارزیابی اثر مقیاس نقشه‌های مبتنی بر سنجش از دور و برداشت‌های زمینی بر عملکرد مدل HEC-HMS در دو حوضه کسلیان و کارده دریافتند که دبی اوج هیدروگراف سیلاب به دست آمده از DEM های SRTM همواره بالاتر از نتایج نقشه های زمینی (نقشه های ۱/۲۵۰۰۰) است. همچنین با افزایش ابعاد سلول DEM، عملکرد دو منبع در شبیه‌سازی سیلاب به علت یکسان شدن محتوای اطلاعاتی آنها اختلاف اندکی را نشان می‌دهد. عبدالصمد و همکاران (۱) با به‌کارگیری مدل

HEC-HMS و الحاقیه‌های HEC-GeoHMS و Arc Hydro در محیط GIS حوضه آبریز آیدوغموش به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قزل‌اوزن است. برای این منظور بارش‌های طراحی با کمک نرم‌افزار SMADA در دوره‌های بازگشت مختلف استخراج شده است.

مواد و روش‌ها

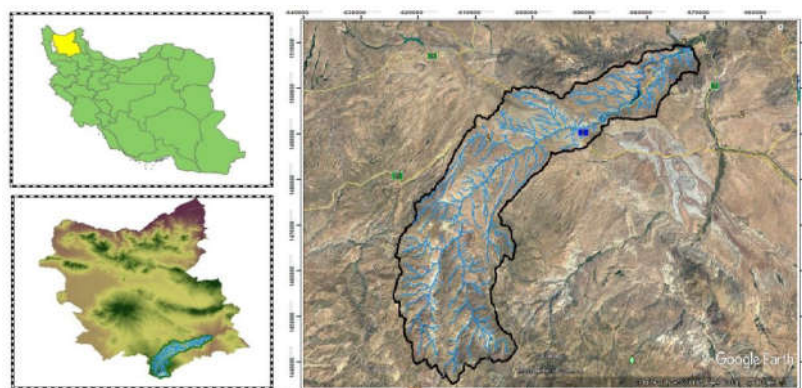
معرفی حوضه مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه آیدوغموش با مساحتی در حدود ۱۵۸۰ کیلومتر مربع، در استان آذربایجان شرقی و در موقعیت جغرافیایی ۳۶°۵۳' تا ۴۷°۴۴' طول شرقی و ۳۶°۱۴' تا ۳۷°۳۰' عرض شمالی قرار دارد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و آبراهه‌های حوضه را در کشور و استان آذربایجان شرقی نشان می‌دهد. رودخانه آیدوغموش از بلندی‌های جنوب غربی شهرستان میانه سرچشمه گرفته به رودخانه قرنقو و سپس قزل‌اوزن می‌پیوندد. ارتفاع این حوضه از ۱۱۰۰ تا ۳۰۰۰ متر متغیر است. همچنین آبدهی سالانه آن ۱۷۰ میلیون مترمکعب و متوسط بارش سالانه ۳۷۸ میلی‌متر است. سد آیدوغموش، حوضه این رودخانه را به دو قسمت بالادست سد و پایین دست سد تقسیم کرده که فقط ۱۲ درصد از آن در پایین دست قرار گرفته است (۳۰).

روش تحقیق

الحاقیه مدل‌سازی HEC-GeoHMS به‌عنوان یک مجموعه ابزار هیدرولوژیک مکانی برای مهندسان و متخصصان هیدرولوژی با تجربه محدود GIS ساخته شده است. HEC-GeoHMS از ArcGIS برای ساختن ورودی‌های مدل‌سازی هیدرولوژیک مدل HEC-HMS استفاده می‌کند. همچنین Arc Hydro Tools ابزارهای توسعه یافته ArcGIS هستند که برای پردازش داده‌های مکانی و ایجاد فایل ورودی برای مدل HEC-HMS مفید است. در این تحقیق ابتدا نقشه رقوم ارتفاعی (DEM) حوضه، از سامانه Earth Explorer در سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده (USGS) با سنجنده ASTER با وضوح ۵۰ متر

HEC-HMS، در منطقه نیمه‌خشک حوضه آبن سفا در الجزایر و استفاده از شماره منحنی (SCS-CN) و هیدروگراف واحد (SCS-UH) برای مدل‌سازی بارش - رواناب ضریب ناش ساتکلیف ۰/۹۵ را به‌دست آوردند. بای و همکاران (۵) با استفاده از مدل‌های HEC-HMS و CMIP5 به تأثیر تغییر اقلیم بر وقایع سیل حوضه نیبرسینک در ایالات متحده پرداخته و دریافتند که افزایش ۱۱۰ درصدی سیل ۱۰۰ ساله برای RCP8.5 نشان می‌دهد که سناریوی انتشار زیاد می‌تواند خطر سیل غیرقابل قبول را برای حوضه ایجاد کند. بیتو و همکاران (۶) HEC-HMS را برای شبیه‌سازی جریان حوضه دریاچه تانا در قسمت بالادست نیل در اتیوپی استفاده کردند که نتایج اعتبارسنجی مدل تفاوت معقولی در جریان پیک (خطای نسبی در پیک برابر ۱/۴۹ درصد) و حجم کل سیل (خطای نسبی در حجم، برابر ۲/۳۸ درصد) نشان داد. طالبی و همکاران (۲۷) به مقایسه سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها با مدل HEC-HMS در حوضه آبخیز اسکندری پرداختند و نتیجه گرفتند که اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در دوره‌های بازگشت مختلف از روند خاصی تبعیت می‌کند بنابراین مدل کارایی بیشتری برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها نسبت به روش‌های تجربی دارد. کیانی سلمی و همکاران (۱۱) در مقایسه روش‌های برآورد آب پایه در حوضه آبخیز بهشت آباد با مدل HEC-HMS نشان دادند روش ثابت ماهانه و روش افت محدود با مقدار ضریب کارایی ناش ساتکلیف به ترتیب ۰/۶۹ در مرحله واسنجی و ۰/۶۴ در مرحله صحت‌سنجی بهترین روش هستند. چو (۷) به مقایسه دو روش مبتنی بر ArcGIS با داده‌های راداری بارش (NEXRAD) در مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی ۳ رویداد سیل در حوضه‌های رود سیدار و فورک جنوبی در ایالات متحده با روش‌های ModClark و SCS-UH پرداخته و نتیجه گرفت با اینکه هر دو روش از نظر آماری مورد قبول هستند (شاخص ناش ساتکلیف ۰/۵۵ تا ۰/۹۸ برای ModClark و ۰/۶۵ تا ۰/۹۳ برای SCS-UH) ولی مدل مبتنی بر داده‌های مکانی ModClark تناسب بهتری با سیل‌های مشاهده‌ای دارد. هدف از تحقیق حاضر شبیه‌سازی هیدروگراف‌های سیلاب طراحی با استفاده از مدل هیدرولوژیک



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و آبراهه‌های حوزه آبریز آیدوغموش در کشور

بر اساس گروه‌بندی، خاک حوزه در ۳ گروه هیدرولوژیک B (سیلت و سیلت لومی)، C (لوم و لومی رسی) و D (رسی و رسی لومی) قرار گرفت که بیشترین آن مربوط به گروه C با دربرگرفتن حدود ۶۸/۵ درصد از خاک حوزه است. بر اساس نقشه کاربری اراضی ۳۸/۸ درصد از کل حوزه را اراضی با کشت دیم، ۲۹/۱ درصد مراتع متوسط، ۱۷/۱ درصد مراتع ضعیف و ۱/۲ درصد باغ تشکیل می‌دهد. کمترین مقدار شماره منحنی در بستر و حریم رودخانه آیدوغموش با مقادیر ۵۸-۶۰ و بیشترین مقدار آن در بخش‌های مرکزی حوزه با مقادیر ۸۶-۹۰ قرار دارد. برای به دست آوردن CN حوزه در این تحقیق از جدول‌های استاندارد با استفاده از کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیک خاک و پوشش گیاهی استفاده شد (۲۶) و CN میانگین وزنی کل حوزه، ۸۱ به دست آمد. برای جمع‌آوری آمار و اطلاعات مربوط به بارش و دبی سیلاب حوزه از ایستگاه‌های موجود استفاده شد (جدول ۱).

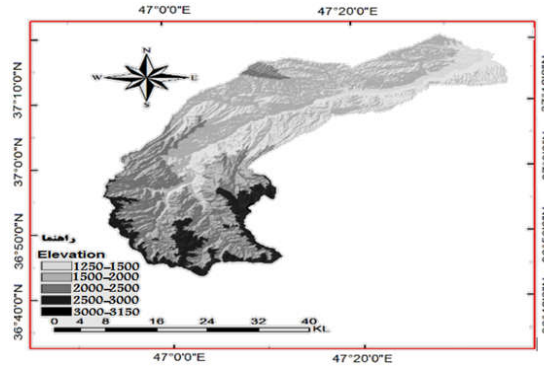
در مدل HEC-HMS چندین روش برای محاسبه تلفات بارش حوزه وجود دارد که روش SCS-CN به دلیل دقت بالا استفاده شده است. روابط (۱) تا (۳) نحوه محاسبه بارش مازاد در این روش را بیان می‌کنند:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (1)$$

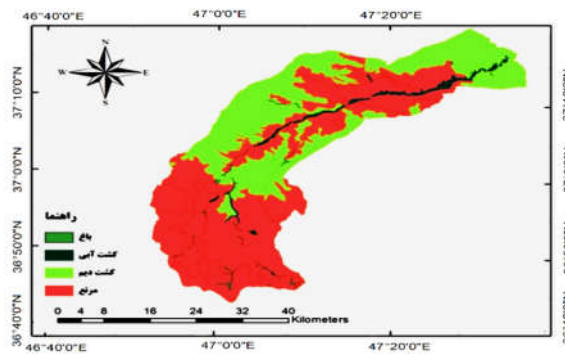
$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (3)$$

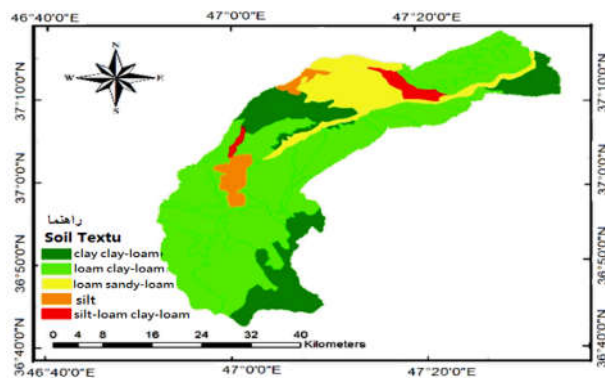
بارگیری شد همچنین پیش پردازش تصویر از جمله لایه‌بندی و موزاییک تصاویر و بهبود باند و ترکیب رنگ انجام شد. نقشه کاربری اراضی حوزه با چهار کلاس باغ، کشت آبی، کشت دیم و مرتع و با طبقه‌بندی تحت نظارت و حداکثر احتمال ایجاد شد و با استفاده از روش نقشه واقعیت زمینی نمونه‌ای که روشی با شدت و سرعت مناسب نسبت به نقشه واقعیت زمینی صددرصد است (۲۹) صحت‌سنجی شد. شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب نقشه DEM و کاربری اراضی حوزه آیدوغموش را نمایش می‌دهند. نقشه بافت خاک حوزه نیز از لایه تنوع خاک کشور برش داده شد (شکل ۴) و در نهایت از روی لایه‌های کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیک خاک، لایه شماره منحنی نفوذ (CN) حوزه ایجاد شد (شکل ۵). برای انجام عملیات فوق از الحاقیه‌های HEC-GeoHMS و Arc Hydro در بسته نرم‌افزاری ArcMap 10.2.2 و جداول استاندارد SCS استفاده شد. طول آبراهه اصلی، بیشترین طول جریان و شیب برای زیرحوضه‌ها مشخص شد. گروه‌های هیدرولوژیک در هر زیرحوضه مشخص شد و یک خروجی در HEC-GeoHMS ایجاد شد. ورودی‌های HEC-HMS منطقه مورد مطالعه با شش زیرحوضه با عنوان W110، W100، W90، W140، W130، W120 و سه گره با عنوان J26، J31، J36 و آبراهه‌های R10، R40، R50 ایجاد شده است. در این تحقیق از HEC-HMS 4.6 به دلیل سازگاری با نسخه Arc-GIS 10.2 استفاده شد. شکل ۶ طرح نمادین مدل حوزه و زیرحوضه‌ها در محیط HEC-HMS را نمایش می‌دهد.



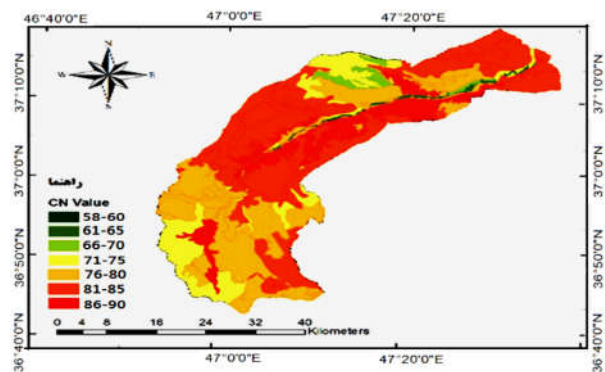
شکل ۲. نقشه مدل ارتفاعی حوضه آبریز آیدوغموش



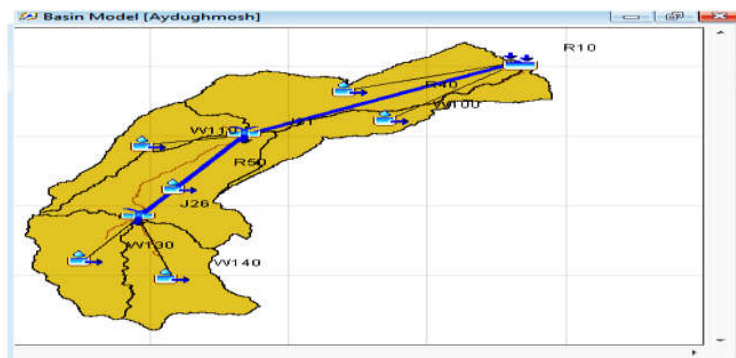
شکل ۳. نقشه کاربری اراضی حوضه آیدوغموش (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۴. نقشه بافت خاک حوضه آیدوغموش (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۵. نقشه شماره منحنی (CN) حوضه آیدوغموش (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۶. طرح نمادین حوضه آبخیز آیدوغموش در مدل HEC-HMS

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی حوضه آیدوغموش

سال تأسیس	ارتفاع	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)	نوع ایستگاه	نام ایستگاه
۱۳۷۷	۱۳۶۵	۴۱۲۳۲۲۵	۷۲۱۴۷۹	هیدرومتری	بوداق بیگ
۱۳۷۷	۱۴۰۱	۴۱۲۹۹۶۴	۷۲۷۷۴۷	تبخیرسنجی	سد آیدوغموش
۱۳۶۶	۱۱۱۰	۴۱۳۴۸۳۲	۷۳۳۵۱۹	سینوپتیک	میانه
۱۳۷۳	۱۶۰۶	۴۱۳۵۸۲۲	۷۲۱۳۹۴	باران‌سنجی معمولی	دوزنان
۱۳۸۳	۱۴۴۶	۴۱۲۱۹۲۶	۷۱۶۵۳۶	باران‌سنجی معمولی	طوق
۱۳۸۱	۲۰۵۰	۴۱۲۷۳۰۹	۶۹۷۸۴۷	باران‌سنجی معمولی	نصیرآباد
۱۳۸۱	۱۶۰۰	۴۱۱۵۴۲۲	۶۸۶۷۸۴	باران‌سنجی معمولی	شیویار

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (۷)$$

$$t_c = \frac{5}{3} T_{lag} \quad (۸)$$

در این روابط U_p دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)، T_p زمان دبی اوج (ساعت)، A مساحت حوضه (کیلومترمربع)، D تداوم بارندگی (ساعت)، T_{lag} زمان تأخیر (ساعت)، L طول رودخانه اصلی (فوت)، Y متوسط شیب حوضه (درصد)، S نمایه نگهداشت آب در داخل حوضه (اینچ) و t_c زمان تمرکز (ساعت) است. همچنین برای محاسبه جریان پایه از روش جریان پایه ثابت با مقادیر متغیر ماهانه و برای محاسبه جریان آب در آبراهه‌های باز از روش روندیابی ماسکینگام استفاده شد. بر اساس پیشنهاد راهنمای مدل HEC-HMS مقدار K و X برای حوضه‌های با شیب متوسط (سرعت موج ۱/۵ برابر

که در این روابط P_e : بارش مازاد به میلی‌متر، P : بارش تجمعی به میلی‌متر، I_a : جذب اولیه (تلفات اولیه) به میلی‌متر، S : حداکثر پتانسیل ذخیره حوضه به میلی‌متر و CN شماره منحنی حوضه است. با توجه به اینکه S براساس شماره منحنی محاسبه می‌شود و شماره منحنی خود تابعی از گروه‌های هیدرولوژیک خاک، نوع کاربری اراضی، بارش پیشین و وضعیت هیدرولوژیک است، بنابراین موارد مذکور در I_a در نظر گرفته شده است (۲۰). برای تبدیل فرایند بارش مازاد به جریان سطحی نیز از روش هیدروگراف واحد SCS مطابق با روابط (۴) تا (۸) استفاده می‌شود:

$$U_p = 2.08 \frac{A}{T_p} \quad (۴)$$

$$T_p = \frac{D}{2} + t_{lag} \quad (۵)$$

$$T_{lag} = \frac{(S+1)^{0.7} L^{0.8}}{1900Y^{0.5}} \quad (۶)$$

شده و مشاهده شده مورد بررسی قرار گرفت.

محاسبه بارش طراحی با نرم‌افزار SMADA

طبق روش SCS از حداکثر بارش ۲۴ ساعته در تعیین سیلاب طراحی حوضه آیدوغموش استفاده شد برای این منظور از آمار بارش ۲۰ ساله موجود (۱۳۷۷-۱۳۹۷) ایستگاه‌های حوضه استفاده شد. در محیط نرم‌افزار SMADA، توزیع‌های فراوانی نرمال، لوگ نرمال ۲ پارامتره، لوگ نرمال ۳ پارامتره، پیرسون تیپ ۳، لوگ پیرسون تیپ ۳ و گمبل به داده‌ها برازش داده شد. برای ارزیابی هر یک از توزیع‌ها از معیار مجموع مربعات باقیمانده (RSS) که از رابطه (۹) محاسبه می‌شود استفاده شد (۳ و ۲۸):

$$RSS = \left(\sum_{i=1}^n \frac{(Q_e - Q_o)^2}{n-m} \right)^{0.5} \quad (9)$$

که در آن Q_e مقدار برآورد شده، Q_o مقدار مشاهده شده، n تعداد داده‌ها و m تعداد پارامتر توزیع مورد استفاده است. پس از انتخاب بهترین توزیع آماری، مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته حوضه برای دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰۰ ساله محاسبه و به‌عنوان بارش‌های طرح حوضه معرفی شدند. همچنین برای شناسایی الگوی توزیع زمانی بارش‌ها که از مهم‌ترین گام‌ها در تعیین سیلاب طراحی حوضه است (۲) از الگوی پیشنهادی SCS، استفاده شد.

نتایج و بحث

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS در حوضه آبریز آیدوغموش از روش بهینه‌یابی سیستماتیک مدل استفاده شد. مقادیر اولیه و بهینه تلفات اولیه برای سیلاب ۹۱/۱/۱۵ به ترتیب ۲۹/۳۱ و ۲۳/۴۳ میلی‌متر و برای سیلاب ۹۲/۲/۱۵ به ترتیب ۲۹/۳۱ و ۲۲/۹۸ میلی‌متر به دست آمد همچنین مقادیر اولیه و بهینه زمان تأخیر برای سیلاب ۹۱/۱/۱۵ به ترتیب ۳۶۴ و ۳۹۰ دقیقه و برای سیلاب ۹۲/۲/۱۵ به ترتیب ۳۶۴ و ۳۹۸ دقیقه حاصل شد. شکل‌های ۷ و ۸ هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بعد از واسنجی مدل را به ترتیب برای سیلاب‌های

سرعت متوسط جریان) مقدار K برابر یک ساعت و مقدار X (از صفر تا ۰/۵ برای شیب‌های ملایم تا تند) برابر ۰/۲ برای حوضه آیدوغموش فرض شده است. برخی خصوصیات فیزیوگرافی و نتایج محاسبات فوق برای حوضه آیدوغموش در جدول ۲ نشان داده شده است. در این تحقیق برای تحلیل داده‌های بارندگی و تبخیر از روش هیئوگراف کاربر و میانگین ماهانه استفاده شد. اجرای مدل با گام‌های زمانی روزانه انجام یافت و چون تمام رویدادهای مشاهده شده در شرایط رطوبت پیشین خاک خشک روی داده بودند، مدل نیز در شرایط خاک خشک اجرا شد.

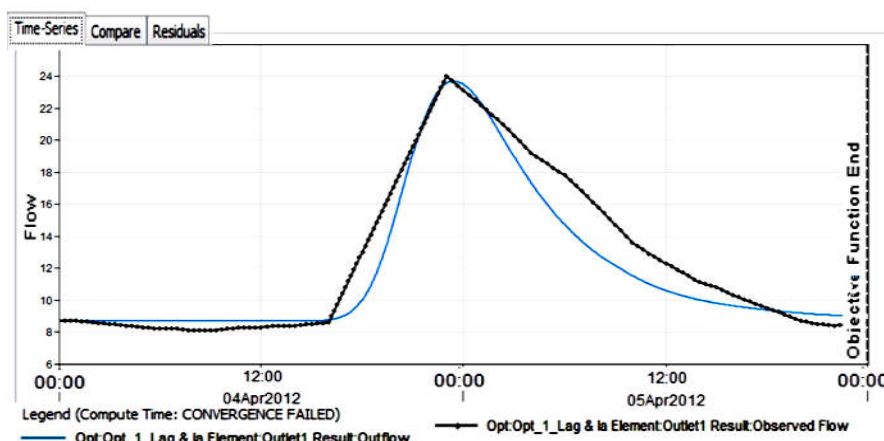
واسنجی و صحت‌سنجی مدل

واسنجی مدل HEC-HMS در یک فرایند سیستماتیک، پارامترهای مدل‌سازی را طوری تعیین می‌کند که بهترین برازش بین داده‌های مشاهده شده و نتایج شبیه‌سازی شده به دست آید به طوری که اگر برازش اولیه رضایت‌بخش نبود مدل به‌طور سیستماتیک پارامترها را اصلاح می‌کند و کار دوباره تکرار می‌شود. توابع هدفی در مدل به‌عنوان شاخص‌های نکویی برازش برای واسنجی مدل تعریف شده‌اند که عبارتند از: مجموع قدرمطلق باقیماندها (SAR)، مجموع مربع باقیماندها (SSR)، مجذور پیک وزنی میانگین مربعات خطا (RMSE PW)، درصد خطای حجمی (PEV) و درصد خطای دبی اوج (PE PF) (۲۹).

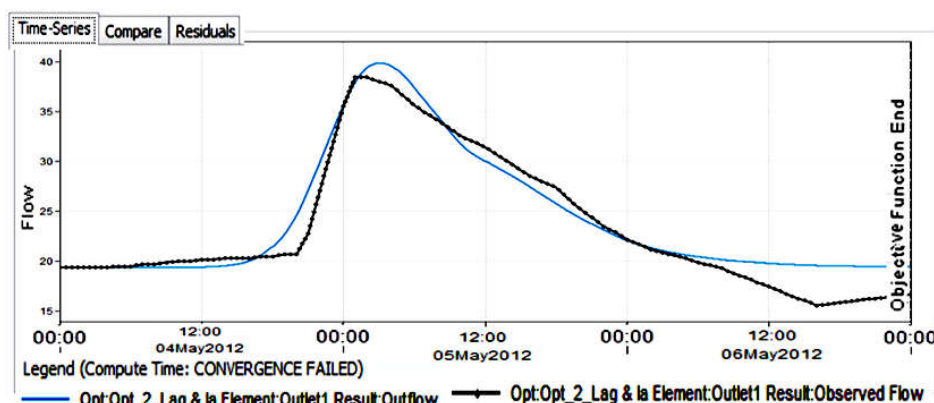
در این تحقیق سیلاب‌های مشاهده‌ای منتخب به دو گروه تقسیم شدند به طوری که دو رویداد سیل حوضه در تاریخ‌های ۹۱/۱/۱۵ و ۹۱/۲/۱۵ در واسنجی مدل و یک رویداد سیل در تاریخ ۹۲/۲/۲۲ که از ایستگاه هیدرومتری بوداق بیگ در خروجی حوضه اندازه‌گیری شده بودند در صحت‌سنجی مدل به کار گرفته شد. به این ترتیب پارامترهای تلفات اولیه (I_a) و زمان تأخیر (T_{lag}) با دامنه تغییرات، $\pm 30\%$ درصد مقادیر محاسباتی برای حوضه آیدوغموش واسنجی شدند. برای واسنجی و صحت‌سنجی، دبی اوج سیل، زمان اوج سیل و حجم سیل شبیه‌سازی

جدول ۲. خصوصیات فیزیوگرافی و هیدرولوژیک حوضه آبریز آیدوغموش

طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	مساحت (کیلومتر مربع)	محیط (کیلومتر)	ارتفاع متوسط (متر)	میانگین CN	شیب متوسط حوضه (درصد)	زمان تأخیر (ساعت)	زمان تمرکز (ساعت)
۸۸/۷۲	۱۵۸۰	۳۳۹	۱۹۸۳	۸۱	۲۲/۱۱	۲۲/۷۴	۱۳/۶۵



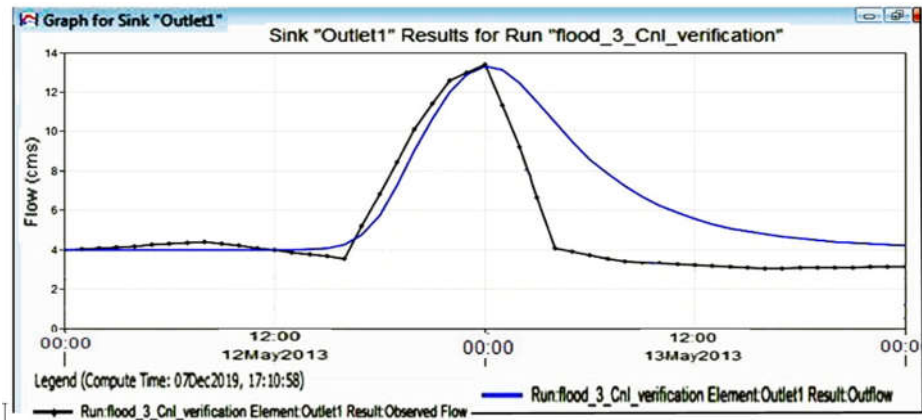
شکل ۶. هیدروگراف مشاهده شده و شبیه‌سازی شده پس از واسنجی مدل برای رویداد سیلاب ۹۱/۱/۱۵



شکل ۷. هیدروگراف مشاهده شده و شبیه‌سازی شده پس از واسنجی مدل برای رویداد سیلاب ۹۱/۲/۱۵

در مرحله بعد با سیلاب مشاهده‌ای ۹۲/۲/۲۲ کارایی مدل صحت‌سنجی شد که نتایج آن در شکل ۹ قابل مشاهده است. در فاز صحت‌سنجی اختلاف در دبی اوج یک درصد و در حجم سیلاب ۱۹ درصد و در زمان رسیدن به اوج تقریباً صفر بود. شکل ۹ از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی شاخه صعودی هیدروگراف سیل حکایت دارد در حالی که مدل شاخه نزولی سیل را با دقت کمتری شبیه‌سازی کرده است به طوری که اختلاف موجود در حجم سیلاب نیز ناشی از اختلاف در شاخه نزولی

۹۱/۱/۱۵ و ۹۱/۲/۱۵ نشان می‌دهند. میانگین مقادیر قدر مطلق باقیمانده‌ها، مجموع مربع باقیمانده‌ها و مجذور بیک وزنی میانگین مربعات خطا، برای حجم سیلاب به ترتیب برابر ۲/۷۵، ۵/۹۱ و ۵/۳۲ و برای دبی اوج به ترتیب برابر ۸/۹، ۸/۰ و ۸/۰ به دست آمد. درصد خطای حجم سیلاب ۳/۸۵ درصد و درصد خطا در دبی اوج ۲/۵ درصد محاسبه شد. خطای زمان رسیدن به اوج هیدروگراف نیز برای سیلاب اول و دوم به ترتیب ۲۰ و ۹۰ دقیقه بود.



شکل ۹. صحت‌سنجی مدل HEC-HMS در حوضه آیدوغموش برای رویداد سیلاب ۹۲/۲/۲۲

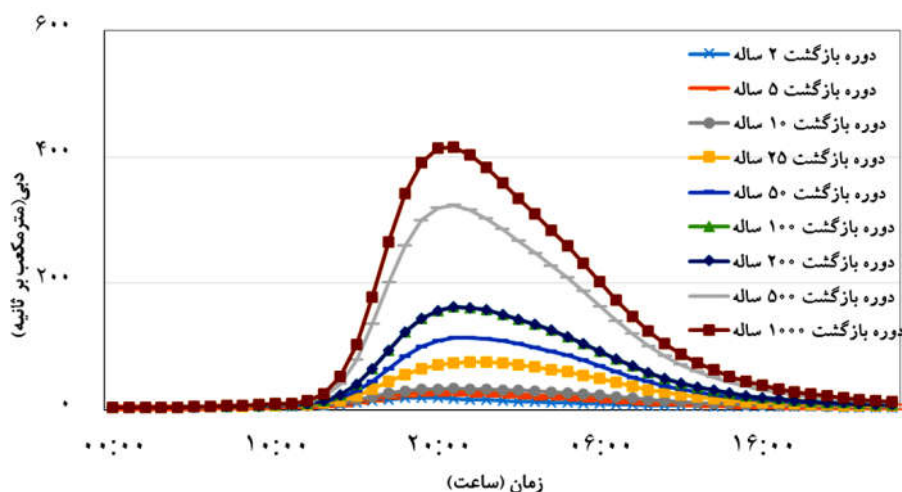
پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، توزیع لوگ پیرسون تیپ ۳ با کمترین مقدار مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) به میزان ۷/۳ در محیط نرم‌افزاری SMADA برای بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته حوضه آیدوغموش به‌عنوان مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی تعیین شد. سپس با استفاده از این توزیع مقادیر حداکثر بارش روزانه با دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله به‌عنوان بارش‌های طراحی محاسبه شد که در جدول ۳ نشان داده شده است. در مقایسه مقدار RSS به‌دست آمده با تحقیق تیموری مقدم و همکاران (۲۸) و اعظمی بابانی و همکاران (۳) در برازش داده‌های بارندگی حداکثر ۲۴ ساعته حوضه ماهیدشت و حوضه پل شاه که به‌ترتیب با توزیع لوگ نرمال دوپارامتری و توزیع پیرسون تیپ ۳ مقدار RSS را ۲۲/۶ و ۲/۵۸ به‌دست آورده‌اند برازش بهتر بارش‌ها در حوضه آیدوغموش نسبت به حوضه ماهیدشت و برازش کمتر نسبت به حوضه پل شاه استنتاج می‌شود.

در ادامه با مدل واسنجی شده HEC-HMS برای حوضه آبریز آیدوغموش، هیدروگراف‌های سیلاب متناظر با بارش هر دوره بازگشت شبیه‌سازی شده است (شکل ۱۰). دبی اوج و حجم سیلاب طراحی در دوره بازگشت ۲ سال ۱۸/۸ مترمکعب در ثانیه و ۵/۶۸ میلیون مترمکعب پیش‌بینی شده است که با افزایش دوره بازگشت هر دو به‌صورت نمایی افزایش پیدا کرده و در دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال به ۴۱۵/۶ مترمکعب در ثانیه و ۸۷/۹۲ میلیون مترمکعب می‌رسد.

هیدروگراف بوده و شاخه نزولی مدل بالاتر از هیدروگراف مشاهده‌ای است. از آنجا که شاخه نزولی هیدروگراف بیانگر خصوصیات زهکشی و فرایندهای تخلیه حوضه است، لذا این اختلاف را می‌توان ناشی از خطای مدل در محاسبه این خصوصیات دانست. با مقایسه نتایج این تحقیق و تحقیقات اعظمی بابانی و همکاران (۳) و حکیمی و ملکی (۸) که به ترتیب برای حوضه پل شاه و حوضه اندبیل خطای دبی اوج را ۸ درصد و ۷/۲۳ درصد با HEC-HMS به‌دست آورده‌اند، می‌توان دریافت که استفاده از الحاقیه‌های HEC-GeoHMS و Arc Hydro دقت مدل در برآورد دبی اوج در این حوضه را افزایش داده است اما نتایج مرادیانی و همکاران (۱۶) با استفاده از این الحاقیه‌ها، در دبی اوج، خطای یک درصد و در حجم سیلاب خطای ۱۰ درصد را نشان داده است لذا نتایج تحقیق حاضر ضعیف‌تر است. همچنین نتایج این تحقیق توصیه جهانبخش اصل و همکاران (۱۰) و اولاینکا و ایریوگبه (۲۲) برای استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در HEC-HMS را برای بالا بردن دقت تأیید کرده و با نتایج نبل و همکاران (۱۳) مبنی بر امکان واسنجی دقیق با تغییر در مقادیر حساس مدل مطابقت دارد. تحقیق حاضر، نتیجه به‌تراستفاده از روش تلفات اولیه- ثابت توسط مرادی و همکاران (۱۵) و نامارا و همکاران (۲۱) به‌ترتیب برای حوضه آبریز قره‌سو و Awash Bello در شبیه‌سازی دبی اوج نسبت به حجم سیلاب را تأیید می‌کند.

جدول ۳. حداکثر بارش ۲۴ ساعته حوضه آیدوغموش در دوره بازگشت‌های مختلف با توزیع لوگ پیرسون تپ ۳

دوره بازگشت (سال)	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
مقدار بارش (میلی‌متر)	۲۱/۷	۲۹/۰	۳۲/۲	۴۱/۱	۴۶/۶	۵۲/۲	۵۸/۲	۶۶/۶	۷۳/۴



شکل ۱۰. هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده سیلاب طراحی حوضه آیدوغموش با دوره بازگشت‌های مختلف (رنگی در نسخه الکترونیکی)

نتیجه‌گیری

درصد و درصد خطا در دبی اوج $2/5$ درصد محاسبه شد. در فاز صحت‌سنجی نیز اختلاف در دبی اوج یک درصد، در حجم سیلاب ۱۹ درصد و در زمان رسیدن به اوج تقریباً صفر بود. در ادامه با کمک نرم‌افزار SMADA بارندگی‌های حداکثر ۲۴ ساعته حوضه برای دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰۰ سال برابر ۲۱/۷ تا ۷۳/۴ میلی‌متر به دست آمد و برای این مقادیر بارش، دبی اوج و حجم سیلاب طراحی به ترتیب $18/8$ تا $415/6$ مترمکعب بر ثانیه و $5/7$ تا $87/9$ میلیون مترمکعب شبیه‌سازی شد.

در این پژوهش هیدروگراف‌های سیلاب طراحی حوضه آیدوغموش با مدل HEC-HMS و الحاقیه‌های HEC-GeoHMS و ArcHydro در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.2.2 شبیه‌سازی شد. نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل با تغییر پارامترهای تلفات اولیه و زمان تأخیر با سه رویداد سیل منتخب و بارش‌های متناظر نشان داد مدل در برآورد دبی اوج و حجم سیلاب‌ها در حوضه مورد مطالعه توانمند است به طوری که در فاز واسنجی، درصد خطای حجم سیلاب $3/85$

منابع مورد استفاده

1. Abdessamed, D., B. Abderrazak and B. Kamila. 2018. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region: Case study in Ain Sefra watershed, Ksour mountains (SW Algeria). *Journal of Water and Land Development, Polish Academy* 36(3): 45-55.
2. Ahmadzadeh, F., A. Fakheri Fard, Y. Dinpajoo, D. Farsadizadeh and A. Hosseinzadeh Dalir. 2010. Determination of time distributed regression model for intense rainfalls of Tabriz. *Water and Soil Science-University of Tabriz* 19(2): 1-9. (In Farsi).

3. Azami Babani, B., M. Mumipour and A. Azari. 2019. Prioritization flood risk of hydrologic units (Case Study: Pole Shah catchment). *Geography and Development (Iranian Journal)* 16(53): 69-84. (In Farsi).
4. Azizian, A., A. R. Shokoohi and F. Zamani. 2018. Evaluating the scale effect of maps derived via remote sensing and ground surveying on the performance of HEC-HMS. *Modares Civil Engineering Journal* 18(1): 157-170. (In Farsi).
5. Bai Y., Z. Zhang and W. Zhao. 2019. Assessing the impact of climate change on flood events using HEC-HMS and CMIP5. *Water Air Soil Pollution* 230(119): 1-15. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4159-0>.
6. Bitew, G. T., A. B. Mulugeta and K. Miegel. 2019. Application of HEC-HMS model for flow simulation in the lake Tana basin: The case of Gilgel Abay catchment, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Hydrology* 6(21): 1-17. doi:10.3390/hydrology6010021.
7. Cho Y. 2020. Application of NEXRAD radar-based quantitative precipitation estimations for hydrologic simulation using ArcPy and HEC software. *Water* 12(273). doi:10.3390/w12010273.
8. Hakimi, K. and M. Maleki. 2017. Evaluating the HEC_HMS model for estimating flood hydrograph (Case Study: Andebil Basin). In: Proceeding of 5th Conference on Rainwater Catchment Systems, Gilan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Rasht, IRAN. (In Farsi).
9. Hoseinzadeh, M. M. and S. Emeni. 2016. Hydrological modeling of Guchak-Rudak watershed using HEC- HMS model. *Journal of Researches in Earth Sciences* 7(25): 31-43. (In Farsi).
10. Jahanbakhsh Asl, S., Y. Dinpajouh, and M. H. Alinejad. 2017. Comparison of SRM and HEC-HMS models in simulation of runoff from snowmelt in Shahrchay river basin, Urmia. *Journal of Hydrogeomorphology* 2(5): 101-117. (In Farsi).
11. Kianisalmi, E., A. Khodayar and A. Honarbakhsh. 2019. Comparison of methods for estimating base-flow in relation to total river flows of Behesht-Abad basin. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 10(37): 82-93. (In Farsi).
12. Kishor, C., P. Balram and C. Jagadish. 2014. Simulation of rainfall-runoff process using HEC-HMS model for Balijore Nala watershed, Odisha, India. *International Journal of Geomatics and Geosciences* 5(2): 253-265.
13. Knebl, M. R., Z. L. Yang, K. Hutchison and D. R. Maidment. 2005. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS\VRAS: A case study for the San Antonio river basin summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management* 75(4): 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>.
14. Majidi, A. and K. Shahedi. 2012. Simulation of rainfall-runoff process using Green-Ampt method and HEC-HMS model (Case Study: Abnama watershed, Iran). *International Journal of Hydraulic Engineering* 1(1): 5-9. DOI: 10.5923/j.ijhe.20120101.02.
15. Moradi, M., Y. Dinpazhouh and S. Azizi. 2018. Comparison of the three different abstraction estimation methods of rainfall in HEC-HMS model in runoff simulation (Case Study: Kermanshah Gharasoo watershed). *Iranian Journal of Eco Hydrology* 5(2): 433-447. (In Farsi).
16. Moradiani, E., A. Akhtari and A. Azari. 2017. Rainfall-runoff simulation of Qarasu watershed in Kermanshah province using HEC-GeoHMS and HEC-HMS hydrological models. In: Proceedings of International Conference on Recent Progresses in Civil Engineering (2017), Amol, Iran.
17. Moradnezehadi, M., M. Jourgholami and A. Malekian. 2015. Evaluating the HEC-HMS hydrologic model in order to simulating flood hydrograph in forest basin (Case study: Kheyroud forest). *Journal of Forest and Wood Product (Iranian Journal of Natural Resources)* 68(3): 625-639. (In Farsi).
18. Mostafa, M. S., A. H. El Tahan, A. Taher and W. Khadr. 2015. Hydrological analysis and flood mitigation at Wadi Hadramawt, Yemen. *Arabian Journal of Geosciences* 8(11): 1-12. DOI: 10.1007/s12517-015-1859-7.
19. Mostafazadeh, R., A. Sadoddin, A. Bahremand, V. Sheikh and H. Nazarnejad. 2010. Assessing hydrological effects of Jafar-Abad watershed management project in Golestan province using HEC-HMS model. *Journal of Watershed Engineering and Management* 2(2): 83-93. (In Farsi).
20. Mostafazadeh, R., Sh. Mirzaei and P. Nadiri. 2018. Curve number determination using rainfall and runoff data and its variations with rainfall components in a forested watershed. *Journal of Water and Soil Sciences* 21(4): 15-28. (In Farsi).
21. Namara, W. G., T. A. Damise and F. G. Tufa. 2020. Rainfall runoff modeling using HEC-HMS: The case of Awash Bello sub-catchment, upper Awash basin, Ethiopia. *International Journal of Environment* 9(1): 68-86. doi.org/10.3126/ije.v9i1.27588.
22. Olayinka, D. N. and H. E. Iribogbe. 2017. Estimation of hydrological outputs using HEC-HMS and GIS. *Nigerian Journal of Environmental Sciences and Technology (NIJEST)* 1(2): 390-402.
23. Parvini, S., Z. Jafarian and A. Kavian. 2018. Simulation effects of soil and water conservation in rangelands on runoff characteristics using HEC-HMS model (A Case Study: Rangelands of Meikhoran watershed, Kermanshah Province). *Journal of Water and Soil Science* 22(2): 81-95. (In Farsi).
24. Rahimzadeh, Z. and M. Habibi. 2018. Simulation of hydrograph of the flood with hydrological model HEC-HMS and prediction of return period in Kermanshah Ravansar basin. *Geography and Development (Iranian Journal)* 16(53): 175-194. (In Farsi).

25. Salwa, R. and T. Wardah. Application of HEC-Geo HMS and HEC-HMS as rainfall-runoff model for flood simulation. In: Proceedings of the International 2015 Symposium on Flood Research and Management (ISFRAM). University of Technology MARA, Selangor, Malaysia. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0500-8>.
26. Shataee, Sh. and A. Abdi. 2007. Land use mapping preparation in Zagros mountain region using ETM⁺ satellite images data (A Case Study: Sarkan Watershed of Lorestan). *Natural Resources and Agricultural Sciences Journal* 1(4): 129-138. (In Farsi).
27. Talebi, A., Z. Eslami and A. Abbasi. 2019. Comparing prioritization from flooding of sub-basins using HEC-HMS model and experimental methods in Eskandari Watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management* 11(2): 336-343. (In Farsi).
28. Teymouri Moghadam, A., B. Rahnama and M. Ahmadian. 2010. Calibration of HEC-HMS hydrological model in rainfall-runoff simulation of Mahidasht catchment. In: Proceedings of National Conference on Water Crisis Management (2010), Marvdasht, Iran.
29. USACE. 2000. HEC-HMS User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
30. Yekom Consulting Engineers. 2007. Meteorological Report of Aydoogh mush Agricultural Design Studies. (In Farsi).

Simulation of Design Flood Hydrographs in Aydooghmush Basin with HEC-HMS Model

F. Naeimi Hoshmand and F. Ahmadzadeh Kaleybar^{1*}

(Received: July 19-2021; Accepted: November 9-2021)

Abstract

Hydrological models for evaluating and predicting the amount of available water in basins, flood frequency analysis, and developing strategies to deal with destructive floods are expanding daily. In this study, HEC-GeoHMS and Arc Hydro extensions in ArcGIS software and the HEC-HMS model were used to simulate design flood hydrographs in the Aydooghmush basin in the northwest of Iran. SCS-CN, SCS-UH, Maskingham, and monthly fixed methods were used to calculate rainfall losses, rainfall-runoff transformation, flood routing, and base flow, respectively. In model calibration with two real flood events, the average of absolute values of the residuals, the sum of the remaining squares, and the weight of the peak mean the error squares for the flood volume were 2.75, 5.91, and 5.32, respectively and for peak discharge were 8.9, 8.0, and 8.0, respectively. Model validation was evaluated as acceptable with a one percent error rate in the peak of discharge and a 19 percent in the flood volume. For maximum 24-hour precipitation, the log-Pearson type 3 was determined as the most suitable distribution in the SMADA model and design precipitation was extracted in different return periods. Thus, for the return period of 2 to 1000 years, the peak discharge and volume of the design flood were simulated equally to 18.8 to 415.6 m³ s⁻¹ and 5.7 to 87.9 MCM, respectively.

Keywords: Aydooghmush basin, Flood frequency analysis, Design flood, Hydrograph, Arc Hydro, HEC-GeoHMS, SMADA

1. Department of Water Sciences and Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

*: Corresponding author, f.ahmadzadeh.iaut.ac.ir