

ارزیابی روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با استفاده از بسته نرم افزاری HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهل‌گزی)

مریم کریمی^{۱*}، حسین ملکی نژاد^۲، هیراد عبقری^۳ و محمد صادق عزیزیان^۴

چکیده

مدل‌های هیدرولوژیکی بارش- رواناب برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل از روش‌های مناسب در مدیریت بهتر سیلاب بویژه در مناطق فاقد آمار است. در این تحقیق کارایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب بررسی و مشخصات آنمود سیل شامل دبی اوج، حجم رواناب و زمان اوج با استفاده از سه روش هیدروگراف واحد مصنوعی SCS، اشنایدر و کلارک در حوضه آبخیز چهل‌گزی مورد مقایسه و تحلیل آماری قرار گرفت. در این ارتباط ۷ واقعه بارش- رواناب استخراج و سپس پارامترهای مدل بر اساس پنج هیدروگراف مشاهده‌ای مورد واسنجی و بر اساس دو هیدروگراف مشاهده‌ای دیگر ارزیابی شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای هیدروگراف سیل با استفاده از دو آماره ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) نشان داد که روش SCS نسبت به روش‌های کلارک و اشنایدر کارایی بهتری دارد. مقادیر RMSE دبی اوج شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای از سه روش SCS، کلارک و اشنایدر به ترتیب ۱/۱، ۱/۴ و ۱/۵ به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: HEC-HMS، شبیه‌سازی هیدروگراف سیل، اشنایدر، کلارک، SCS، حوضه آبخیز چهل‌گزی

ارجاع: کریمی م.، ملکی‌نژاد ح.، عبقری ه. و عزیزیان م.ص. ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با استفاده از بسته نرم افزاری HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز چهل‌گزی). مجله پژوهش آب ایران. ۲۹(۹): ۳۸-۲۹.

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد

۲- دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی، دانشگاه یزد

۳- استادیار، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

۴- مربی مرکز علمی کاربردی و صنایع دستی استان کردستان

* نویسنده مسئول: Marvam.hchnd@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۴/۰۶

مقدمه

می‌باشد. قیتو (۱۹۹۱) در تحقیقی نشان داد که در حوضه‌های بزرگ دبی سیلابی حاصل از روش SCS به مقادیر مشاهده‌ای نزدیک‌تر است. رینتجس و ماتیسوس (۲۰۰۶) برای تهیه و بررسی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی در کشور ویتنام اقدام نمودند و به این نتیجه رسیدند که این روش نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده از کارایی بیشتری برخوردار است. سارانگی و همکاران (۲۰۰۸) با مقایسه روش‌های ژئومورفولوژی و شماره منحنی (CN) در حوضه‌های فاقد آمار برای محاسبه هیدروگراف رواناب مستقیم دریافتند که در حوضه‌های آبخیز کوچک با خصوصیات ژئومورفولوژی مشابه، روش ژئومورفولوژی صحیح‌تر است.

در مطالعه دیگری واسنجی و ارزیابی مدل HEC-HMS در حوضه آبخیز رود زرد توسط راد منش و همکاران (۱۳۸۵) صورت گرفت. در این ارتباط مقایسه آبدی شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای در روش‌های مختلف نشان داد که روش SCS بهترین نتیجه را در بر داشته است، همین نتیجه نیز توسط میرمهدی و جهانگیر (۱۳۸۷) در حوضه آبریز مارون به‌دست آمده است. در دانشگاه برکلی تحقیقی توسط کریک و ویلیام (۲۰۰۳) انجام شد. در این بررسی جریان‌های حوضه تامسون کریک در شرایط کنونی، برای آینده و قبل از گسترش شهر با استفاده از مدل HEC-HMS شبیه‌سازی شد. یکی از نتایج این تحقیق این بود که اگر چه ترجیح می‌دهند که این مدل واسنجی شود اما مدل‌های واسنجی نشده آن نیز می‌تواند در ارزیابی نتایج نسبی برای کاربری‌های مختلف اراضی بکار برده شود. امرسون و همکاران (۲۰۰۳) به مدل‌سازی بارش- رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS پرداختند. نتایج حاصل از اجرای مدل نشان داد که سطوح ذخیره مقدار پیک جریان را برای واقعه رگبار کاهش می‌دهند. کتول و همکاران (۲۰۰۳) هم، به منظور تعیین دبی اوج و حجم رواناب در دو حوضه کشاورزی در جنوب شرق ایالت داکوتای جنوبی با استفاده از مدل HEC-HMS به این نتیجه رسیدند که مقدار شماره منحنی دارای حساسیت بالایی است، در صورتی‌که مقدار تلفات اولیه دارای حساسیت کمتری نسبت به تغییر مقدار تابع هدف در مدل HEC-HMS است. فودی و همکاران (۲۰۰۴) به منظور شناسایی مناطق حساس به سیل آبی در منطقه‌ای

کارشناسان و متخصصان منابع آب همواره در پی آن بوده‌اند که بتوانند معادله بین مقادیر بارندگی و رواناب را در حوضه‌های آبخیز و در شرایط مختلف زمانی و مکانی بیابند. تا امروز مدل‌های بارش- رواناب فراوانی با قابلیت‌ها و پیچیدگی‌های متفاوتی جهت پیش‌بینی سیلاب ساخته و به‌کار برده شده‌اند. اطلاع از خصوصیات مانند حداکثر دبی سیل برای طراحی سازه‌های آبی، مانند سدها، سرریزها، پل‌ها و زیرگذرها در جهت کاهش خسارات احتمالی و هم-چنین پیش‌بینی زمان رسیدن به دبی اوج در بازه‌های پایین‌دست در بحث هشدار سیل ضروری است. بهادری خسرو شاهی (۱۳۷۰) در تحقیق خود در حوضه آبخیز رودخانه جاجرود با وسعت حدود ۱۷۷۴ کیلومتر مربع و تیپ کوهستانی نتیجه گرفته است که به‌کارگیری هیدروگراف واحد اشنایدر در تعیین سیلاب‌ها در مقایسه با SCS و سایر موارد تجربی از هماهنگی مطلوبی برخوردار و قابل استفاده است. موسوی و همکاران (۱۳۷۷) نشان دادند روش‌های هیدروگراف واحد مثلثی و SCS در ساخت هیدروگراف واحد در حوضه آبخیز زاینده رود دارای تطابق بهتری هستند. رعیت پیشه (۱۳۸۲) روش‌های هیدروگراف واحد مصنوعی را از نظر کمی و کیفی در برآورد دبی‌های سیلابی رودخانه مارون مناسب ارزیابی نمود. غیائی و روغنی (۱۳۸۵) به بررسی کارایی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی و مقایسه آن با هیدروگراف‌های مصنوعی اشنایدر، مثلثی و SCS در حوضه آبخیز کسلیان پرداختند. نتایج نشان داد بر اساس تحلیل‌های آماری بین روش‌های مختلف اختلاف قابل ملاحظه‌ای وجود نداشته است. برخوردار و همکاران (۱۳۸۵) در ارزیابی روش‌های تهیه هیدروگراف واحد مصنوعی در حوضه آبخیز سیخوران استان هرمزگان به این نتیجه رسیدند که روش اشنایدر در حوضه‌های کوهستانی پرشیب و روش‌های SCS و مثلثی در حوضه‌های دشتی و کم‌شیب برآورد بهتری را ارائه می‌نماید. خالقی و همکاران (۱۳۸۹) کارایی روش‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی را در برآورد دبی اوج سیلاب در حوضه کسلیان بررسی کردند. بر طبق نتایج این تحقیق روش ژئومورفولوژیک نسبت به روش‌های اشنایدر، SCS، مثلثی، Rosso و ژئومورفوکلیماتیک از کارایی بالاتری برخوردار

این حوضه بین طول جغرافیایی ۲۳°، ۴۶° تا ۲۹°، ۵۹°، ۴۶° شرقی و عرض جغرافیایی ۱۱°، ۲۵° تا ۳۵°، ۳۷°، ۵۸° شمالی در شمال شهر سنندج واقع شده است. شیب متوسط حوضه ۱۷/۵۷ درصد و حداقل، حداکثر و متوسط ارتفاع آن به ترتیب ۱۵۵۰، ۲۸۵۰ و ۲۲۰۰ متر بالاتر از سطح آب‌های آزاد است.

روند مدل‌سازی بارش- رواناب در نرم افزار-HEC-HMS

مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی بارش- رواناب، حوضه آبخیز را با مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نمایش می‌دهد. اجرای تمامی پروژه‌ها با ایجاد حداقل یک مدل حوضه، یک مدل هواشناسی و یک مشخصه کنترل امکان‌پذیر است. در مدل حوضه پس از معرفی المان‌های هیدرولوژیکی، در هر زیرحوضه سه بخش تلفات، رواناب مستقیم و آب پایه تعیین گردید. بدین ترتیب برای محاسبه میزان تلفات و آب پایه به ترتیب از روش شماره منحنی و روش خشکیدگی یا فروکش استفاده شد. مقدار رواناب مستقیم نیز بر اساس سه روش هیدروگراف واحد مصنوعی SCS، اشنایدر و کلارک مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفت و برای روندیابی سیلاب در مقاطع مختلف رودخانه از روش روندیابی هیدرولوژیکی ماسکینگام استفاده شد. داده‌های هواشناسی با مؤلفه مدل هواشناسی تحلیل می‌شود و این مؤلفه شامل اطلاعات بارندگی و تبخیر-تعرق و ذوب برف است. با توجه به اینکه داده‌های بارش - رواناب انتخاب شده برای مدل به صورت رگبارهای کوتاه مدت است، لذا میزان تبخیر و تعرق در محدوده مطالعاتی نقش چندانی در شبیه‌سازی بارش - رواناب ندارد. همچنین سیلاب‌های انتخاب شده هیدروگراف با تاج کامل دارند و با توجه به اینکه سیلاب‌های با تاج پهن نشان‌دهنده تأثیر ذوب برف می‌باشد، بنابراین به‌منظور ساده کردن مدل از مقدار تبخیر-تعرق و ذوب برف آن صرف‌نظر شده است.

هیدروگراف واحد SCS

هیدروگراف واحد SCS، بی بعد و تک اوجی می‌باشد. این هیدروگراف نسبت بین دبی‌های هیدروگراف واحد در هر زمان و دبی هیدروگراف واحد، Up ، در زمان رسیدن به اوج، Tp ، نشان می‌دهد. ارتباط بین این دو عامل در معادله زیر تعیین شده است:

در غرب مصر از مدل HEC-HMS به منظور شبیه‌سازی سیلاب استفاده کردند، که منجر به شناسایی دو منطقه حساس شد. شیعه و همکاران (۲۰۰۷) از نرم افزارهای HEC-HMS و HEC-RAS به منظور شبیه‌سازی جریان و بررسی اثر احداث بند تنظیمی، در آبخیز تسنگون تایوان استفاده کردند. نتایج نشان داد که تأثیر احداث سازه بر خصوصیات جریان، در سطح $(P<0.05)$ معنی‌دار بوده است.

هدف از این تحقیق بررسی کارایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب و همچنین تعیین و مقایسه مشخصات آبنمودهای سیل شامل دبی اوج، حجم رواناب و زمان اوج با استفاده از سه روش هیدروگراف واحد مصنوعی SCS، اشنایدر و کلارک در حوضه آبخیز چهل‌گزی واقع در استان کردستان است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز چهل‌گزی با وسعتی معادل ۲۷۰/۰۲۵ کیلومتر مربع یکی از سه زیر حوضه اصلی سد قشلاق سنندج، در حدود ده کیلومتری شمال غربی شهرستان سنندج واقع شده است، این حوضه به لحاظ داشتن شرایط خاص اقلیمی و توپوگرافی همواره در معرض وقوع سیل‌های مخرب و خسارت‌های سنگین ناشی از آن می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در شمال غرب ایران

مدل هیدروگراف واحد کلارک

کلارک، هیدروگراف واحد یک حوضه آبخیز را به صورت صریح با دو فرایند اصلی در تبدیل بارش مازاد به رواناب شامل انتقال یا حرکت بارش اضافی از نقطه اصلی تا نقطه خروجی حوضه آبخیز و میرایی یا کاهش مقدار دبی به منزله ذخیره مازاد در سراسر حوضه آبخیز معرفی می‌کند. به کارگیری مدل کلارک نیازمند خواص هیستوگرام زمان - مساحت و ضریب ذخیره (R) است. معادله بین زمان - مساحت که در HEC-HMS درج شده است، به صورت زیر است:

$$\frac{A^2}{A} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن A_r : مساحت تجمعی است در زمان t ، A : مساحت کل حوضه آبخیز و t_c : زمان تمرکز حوضه آبخیز می‌باشد.

در استفاده از این روش در مدل HEC-HMS فقط معرفی پارامتر t_c ضرورت دارد. که مقدار آن با استفاده از روش‌های برآورد زمان تمرکز به دست می‌آید. ضریب ذخیره حوضه (R) شاخص ذخیره زمانی بارش مازاد است که در حوضه آبخیز زهکشی می‌شود. هم‌چنین با توجه به داده‌های بارش - رواناب، می‌تواند از طریق واسنجی نیز برآورد شود. (گروه مهندسی ارتش امریکا، ۲۰۰۰).

واسنجی، تحلیل خطا و ارزیابی مدل

در این تحقیق از اطلاعات حوضه آبخیز، بارندگی، سیلاب و تجزیه و تحلیل آن‌ها استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا تعداد هفت مورد هیدروگراف سیلاب مشاهده شده و هیتوگراف‌های مولد آن انتخاب و داده‌های آن‌ها از روی نمودار استخراج شد. جهت شبیه‌سازی رواناب ابتدا پارامترهای مورد نیاز ورودی از جمله شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تأخیر، ضریب اوج شناپدر، ضریب ذخیره کلارک و سایر پارامترها آماده شد، بعد از پایان مرحله شبیه‌سازی جهت تعیین مقدار بهینه این پارامترها عملیات واسنجی مدل برای پنج رویداد بارش - رواناب انجام گرفت. طی فرایند واسنجی مدل، تصحیح مکرر پارامترها و محاسبه بهترین برازش بین هیدروگراف

$$Up = C \frac{A}{Tp} \quad (1)$$

در معادله فوق، مساحت حوضه: A و C: مقدار ثابتی است که در سیستم SI، ۲/۰۸ و در سیستم انگلیسی ۴۸۴ می‌باشد. زمان رسیدن به اوج هیدروگراف هم با معادله ۲ مشخص می‌شود:

$$Tp = \frac{\Delta t}{2} + t_{lag} \quad (2)$$

که در آن Δt : تداوم بارندگی مازاد و t_{lag} : زمان تأخیر حوضه است. (گروه مهندسی ارتش امریکا، ۲۰۰۰). سازمان حفاظت خاک با توجه به خصوصیات فیزیوگرافی حوضه دسترسی به مقادیر اولیه بعضی از پارامترهای را میسر نموده است. در این ارتباط معادله ۳ بین زمان تمرکز و زمان تأخیر پیشنهاد شده است. که در آن t_c : زمان تمرکز و t_{lag} : زمان تأخیر حوضه می‌باشند. ورودی مدل HEC-HMS در این روش پارامتر زمان تأخیر t_{lag} است.

$$t_{lag} = 0.6t_c \quad (3)$$

مدل هیدروگراف واحد شناپدر

شناپدر زمان تأخیر، دبی اوج و زمان پایه هیدروگراف را به عنوان مشخصات اصلی یک هیدروگراف واحد معرفی کرد. وی یک هیدروگراف واحد استاندارد برای بارندگی با تداوم t_r ارائه داد که در آن زمان تأخیر t_{lag} با استفاده از معادله ۴ محاسبه می‌شود (گروه مهندسی ارتش امریکا، ۲۰۰۰).

$$t_{lag} = 5.5t_r \quad (4)$$

در هیدروگراف استاندارد شناپدر، زمان تأخیر هر واحد بارش مازاد در واحد سطح حوضه آبخیز طبق معادله ۵ محاسبه می‌شود. که در آن U_p : دبی اوج هیدروگراف واحد استاندارد، A: مساحت حوضه آبخیز، C_p : ضریب اوج هیدروگراف واحد استاندارد و C: ثابت تبدیل (۲/۷۵) برای سیستم بین‌المللی و ۶۴۰ برای سیستم انگلیسی) است.

$$\frac{U_p}{A} = C \frac{C_p}{T_p} \quad (5)$$

به ترتیب در روابط زیر نمایش داده شده است. در نهایت بهترین شبیه‌سازی‌ها متعلق به رگباری است که ماکزیمم کارایی را داشته باشد و یا مقادیر کوچکتری از RMSE را ارائه نماید.

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(O_i) - (P_i)]^2 \right)} \quad (8)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})}} \quad (9)$$

در معادله اخیر O_i و P_i : به ترتیب مقادیر مربوط به داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است، \bar{O} : میانگین داده‌های مشاهداتی و n : تعداد داده‌هاست.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت مدل نسبت به دو پارامتر تلفات اولیه و زمان تأخیر در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. شکل ۲ منحنی تغییرات نتایج مدل به ازای تغییر در دو پارامتر یاد شده را نشان می‌دهد. هر چه شیب خط بیشتر باشد، یک تغییر کوچک در پارامتر مورد نظر، باعث تغییرات زیادی در مدل می‌شود و در این صورت، مدل را نسبت به آن پارامتر حساس گویند، بر عکس اگر شیب منحنی کم باشد، تغییرات زیاد در مقدار پارامتر مربوطه، اثر کمی روی مقدار جواب مدل خواهد داشت و مدل را نسبت به آن پارامتر غیرحساس می‌گویند (تلوری ۱۳۷۵).

همان‌طور که دیده می‌شود مدل حساسیت بیشتری را نسبت به تغییرات تلفات اولیه (Ia) نمایان ساخته و لذا عملیات واسنجی بر اساس این پارامتر انجام می‌شود. در مرحله واسنجی به لحاظ اهمیت دبی اوج در وقایع سیل، بهتر است مقادیر حداکثر دبی به عنوان شاخص واسنجی مد نظر قرار گیرد. جدول ۳ مقایسه بین آبدهی اوج و زمان رسیدن به نقطه اوج برای هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسبه شده مربوط به رگبارهای استفاده شده در بهینه‌سازی مدل با استفاده از سه روش SCS، اشناپدر و کلارک را نشان می‌دهد.

محاسبه شده و مشاهده شده تحت تابع هدف انحراف معیار وزنی دبی اوج و روش جستجوی نلدر و مید انجام گرفت. کمترین مقدار تابع هدف، زمانی حاصل می‌شود که مقادیر پارامترهای به کار رفته در مدل، بهترین و نزدیکترین هیدروگراف را به هیدروگراف مشاهده شده تولید کند. در صورت مناسب بودن برازش، مقدار پارامتر به دست آمده از واسنجی مدل قابل قبول تشخیص داده شد در غیر این صورت عملیات شبیه‌سازی برای دست‌یابی به نتایج بهتر از سر گرفته شد. سپس اعتبارسنجی مدل از طریق اجرای مدل با پارامترهای بهینه‌شده برای دو رویداد دیگر بارش - رواناب انجام شد.

آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترها

نتایج واسنجی مدل و بهینه‌سازی پارامترها و مشاهده تغییرات هیدروگراف شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای نشان داد که پارامترهای شماره منحنی، تلفات اولیه و زمان تأخیر بیشترین حساسیت را نسبت به تغییر مقدار تابع هدف دارند. به‌منظور آشکارسازی بیشتر تأثیر دو پارامتر تلفات اولیه و زمان تأخیر بر مقدار تابع هدف، عملیات آنالیز حساسیت بر روی این دو پارامتر انجام گرفت. برای این منظور تلفات اولیه (Ia) و زمان تأخیر در هر یک از زیرحوضه‌ها به روش آزمون و خطا تغییر داده شد و نتایج در خروجی حوضه بررسی شد. بدین صورت مقدار این دو پارامتر از -20% تا $+20\%$ با فواصل 5% تغییر داده شد و اثر آن بر دبی اوج سیل تعیین گردید. برای تعیین حساسیت مدل به تغییر پارامترها از معادله ۷ استفاده گردید (خلیقی سیگارودی، ۱۳۸۳). که در آن، SEN: مقدار حساسیت تابع هدف حاصل از تغییر در اندازه پارامتر، New: مقدار جدید خروجی مدل حاصل از پارامتر جدید، Old: خروجی اولیه مدل و PC: قدر مطلق درصد تغییرات در پارامتر است.

$$SEN = 100 \frac{New - Old}{Old | PC|} \quad (7)$$

ارزیابی کارایی نتایج

در این تحقیق به‌منظور بررسی و ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدروگراف سیل پس از بهینه‌سازی از دو آماره ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده گردید. فرمول کلی این دو آماره

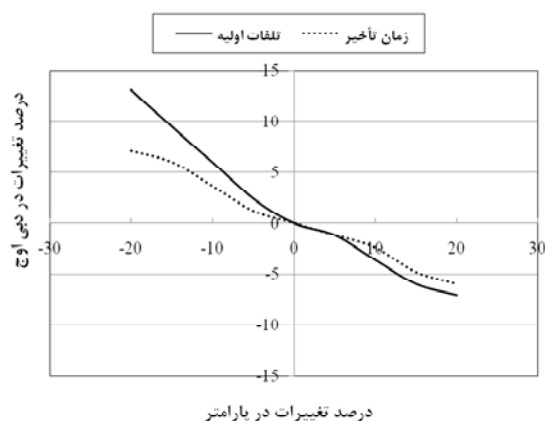
جدول ۱- نتایج حساسیت مدل به تغییر در پارامتر تلفات اولیه

| درصد تغییرات پارامتر | تلفات اولیه هر زیر حوضه (mm) | | | دبی اوج (CMS) | درصد تغییرات دبی اوج | حساسیت |
|----------------------|------------------------------|-------|-------|---------------|----------------------|--------|
| | C3 | C1 | C2 | | | |
| -۲۰ | ۹/۷۶ | ۸/۴ | ۷/۱۲ | ۹/۵ | ۱۳/۱ | ۰/۶۵ |
| -۱۵ | ۱۰/۳۷ | ۸/۹۳ | ۷/۵۷ | ۹/۲ | ۹/۵ | ۰/۴۸ |
| -۱۰ | ۱۰/۹۸ | ۹/۴۵ | ۸/۰۱ | ۸/۹ | ۶ | ۰/۳۰ |
| -۵ | ۱۱/۵۹ | ۹/۹۸ | ۸/۴۶ | ۸/۶ | ۲/۴ | ۰/۱۲ |
| ۰ | ۱۲/۲۰ | ۱۰/۵۰ | ۸/۹۰ | ۸/۴ | ۰/۰ | ۰/۰ |
| ۵ | ۱۲/۸۱ | ۱۱/۰۳ | ۹/۳۵ | ۸/۳ | -۱/۲ | -۰/۰۶ |
| ۱۰ | ۱۳/۴۲ | ۱۱/۵۵ | ۹/۷۹ | ۸/۱ | -۳/۶ | -۰/۱۸ |
| ۱۵ | ۱۴/۰۳ | ۱۲/۰۸ | ۱۰/۲۴ | ۷/۹ | -۶ | -۰/۳۰ |
| ۲۰ | ۱۴/۶۴ | ۱۲/۶۰ | ۱۰/۶۸ | ۷/۸ | -۷/۱ | -۰/۳۶ |

جدول ۲- نتایج حساسیت مدل به تغییر در پارامتر زمان تأخیر

| درصد تغییرات پارامتر | زمان تأخیر هر زیر حوضه (min) | | | دبی اوج (CMS) | درصد تغییرات دبی اوج | حساسیت |
|----------------------|------------------------------|-----|-------|---------------|----------------------|--------|
| | C3 | C1 | C2 | | | |
| -۲۰ | ۷۶ | ۸۰ | ۳۲/۳۲ | ۹ | ۷/۱ | ۰/۳۶ |
| -۱۵ | ۸۰/۷۵ | ۸۵ | ۳۴/۳۴ | ۸/۹ | ۶/۰ | ۰/۳۰ |
| -۱۰ | ۸۵/۵ | ۹۰ | ۳۶/۳۶ | ۸/۷ | ۳/۶ | ۰/۱۸ |
| -۵ | ۹۰/۲۵ | ۹۵ | ۳۸/۳۸ | ۸/۵ | ۱/۲ | ۰/۰۶ |
| ۰ | ۹۵ | ۱۰۰ | ۴۰/۴ | ۸/۴ | ۰/۰ | ۰/۰ |
| ۵ | ۹۹/۷۵ | ۱۰۵ | ۴۲/۴۲ | ۸/۳ | -۱/۲ | -۰/۰۶ |
| ۱۰ | ۱۰۴/۵ | ۱۱۰ | ۴۴/۴۴ | ۸/۲ | -۲/۴ | -۰/۱۲ |
| ۱۵ | ۱۰۹/۲۵ | ۱۱۵ | ۴۶/۴۶ | ۸ | -۴/۸ | -۰/۲۴ |
| ۲۰ | ۱۱۴ | ۱۲۰ | ۴۸/۴۸ | ۷/۹ | -۶/۰ | -۰/۳۰ |

بودند. این رگبارها شامل رگبارهای ۷ آذر ۱۳۸۵ و ۲۱ فروردین ۱۳۸۶ بودند. جدول ۴ مقایسه بین دبی اوج و زمان رسیدن به این دبی را برای هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسبه شده در ارزیابی مدل نشان می‌دهد. همچنین ارزیابی نتایج پیش‌بینی شده و مشاهداتی هیدروگراف سیل به سه روش SCS، اشنايدر و کلارک در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به اینکه نتایج حاصل از آنالیز حساسیت بیانگر این است که پارامتر تلفات اولیه دارای حساسیت بالایی نسبت به تغییر مقدار تابع هدف می‌باشد، لذا عملیات واسنجی بر اساس این پارامتر برای رویدادهای مختلف در حوضه چهل‌گزی انجام گرفت که نتایج مدل به صورت هیدروگراف‌های سیلاب مشاهداتی و محاسباتی به صورت زیر ارائه شده است. نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲- منحنی تغییرات نتایج مدل به ازای تغییر در تلفات اولیه و زمان تأخیر

برای بررسی نتایج به‌دست آمده از واسنجی مدل و ارزیابی آن از دو رگباری استفاده شد که در واسنجی لحاظ نشده

جدول ۳- شبیه‌سازی هیدروگراف سیل و بهینه‌سازی مدل در روش‌های مختلف

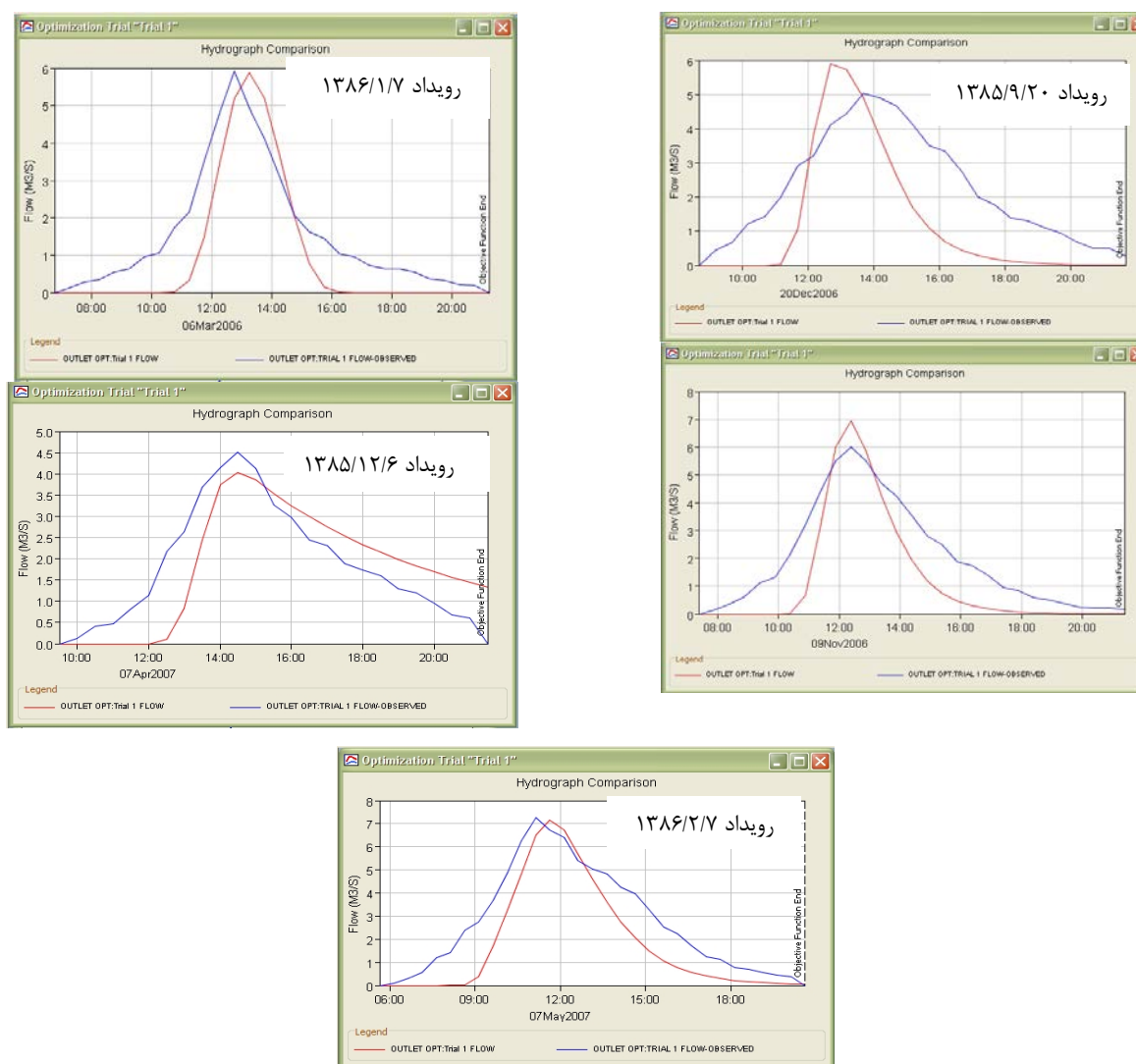
| اختلاف زمان تا اوج (h) | دبی محاسبه شده (CMS) | دبی مشاهده‌ای (CMS) | رواناب شبیه‌سازی شده (mm) | رواناب مشاهده‌ای (mm) | زمان تمرکز (min) | زمان تأخیر (min) | شماره منحنی | تلفات اولیه (mm) | تاریخ وقوع رگبار | روش مورد استفاده |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|------------------------|----------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| ۰ | ۵/۶ | ۶ | ۰/۲۳ | ۰/۳۸ | - | ۱۵۰ | ۸۱ | ۱۱/۹ | ۸۵/۸/۹ | SCS |
| ۰/۵ | ۶/۹ | ۶ | ۰/۱۹ | ۰/۳۸ | - | ۱۸۲ | ۸۱ | ۱۱/۹ | ۸۵/۸/۹ | کلارک |
| ۰ | ۷/۱ | ۶ | ۰/۴۵ | ۰/۳۸ | ۱۱۹ | - | ۸۱ | ۱۱/۹ | ۸۵/۸/۹ | اشنایدر |
| ۰/۵ | ۶/۲ | ۵ | ۰/۲۳ | ۰/۴ | - | ۱۴۷ | ۷۶/۴ | ۱۵/۹ | ۸۵/۹/۲۰ | SCS |
| ۰/۵ | ۴ | ۵/۵ | ۰/۱۷ | ۰/۴ | - | ۱۵۱ | ۷۶/۴ | ۱۵/۹ | ۸۵/۹/۲۰ | کلارک |
| ۰ | ۶/۲ | ۵/۵ | ۰/۳۲ | ۰/۴ | ۱۳۸ | - | ۷۶/۴ | ۱۵/۹ | ۸۵/۹/۲۰ | اشنایدر |
| ۰/۵ | ۵/۷ | ۵/۹ | ۰/۱۹ | ۰/۳ | - | ۱۸۵/۶ | ۸۰ | ۱۲/۷ | ۸۵/۱۲/۶ | SCS |
| ۱ | ۴/۲ | ۵/۹ | ۰/۱۵ | ۰/۳ | - | ۱۷۲ | ۸۰ | ۱۲/۷ | ۸۵/۱۲/۶ | کلارک |
| ۰/۵ | ۵/۳ | ۵/۹ | ۰/۲۴ | ۰/۳ | ۱۴۵ | - | ۸۰ | ۱۲/۷ | ۸۵/۱۲/۶ | اشنایدر |
| ۰ | ۴ | ۴/۵ | ۰/۲۱ | ۰/۳ | - | ۱۷۸ | ۷۷ | ۱۵/۲ | ۸۶/۱/۷ | SCS |
| ۰ | ۳/۶ | ۴/۵ | ۰/۱۳ | ۰/۳ | - | ۱۷۸ | ۷۷ | ۱۵/۲ | ۸۶/۱/۷ | کلارک |
| ۰ | ۴ | ۴/۵ | ۰/۲۹ | ۰/۳ | ۱۱۸ | - | ۷۷ | ۱۵/۲ | ۸۶/۱/۷ | اشنایدر |
| ۰/۵ | ۷/۱ | ۷/۳ | ۰/۳۶ | ۰/۵۵ | - | ۱۴۴/۷ | ۷۶/۴ | ۱۵/۹ | ۸۶/۲/۷ | SCS |
| ۱ | ۸/۴ | ۷/۳ | ۰/۳۱ | ۰/۵۵ | - | ۱۴۵ | ۷۶/۴ | ۱۵/۹ | ۸۶/۲/۷ | کلارک |
| ۰/۵ | ۶/۷ | ۷/۳ | ۰/۵۷ | ۰/۵۵ | ۱۲۸ | - | ۷۶/۴ | ۱۵/۹ | ۸۶/۲/۷ | اشنایدر |

جدول ۴- مقایسه هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسبه شده در اعتبار سنجی مدل - روش SCS

| اختلاف زمان تا اوج (h) | دبی محاسبه شده (CMS) | دبی مشاهده‌ای (CMS) | رواناب شبیه‌سازی شده (mm) | رواناب مشاهده‌ای (mm) | زمان تأخیر (min) | شماره منحنی | تلفات اولیه (mm) | تاریخ وقوع رگبار |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|----------------|------------------------|---------------------|
| ۰/۵ | ۴/۳ | ۵ | ۰/۲۷ | ۰/۴۵ | ۱۷۸ | ۷۷ | ۱۵/۲ | ۸۶/۱/۲۱ |
| ۰/۵ | ۶/۲ | ۵ | ۰/۲۳ | ۰/۳۹ | ۱۴۷ | ۷۶/۴ | ۱۵/۹ | ۸۵/۹/۷ |

نتایج واسنجی و بهینه‌سازی در خصوص مقایسه روش‌های SCS اشنایدر و کلارک نشان داد که روش SCS در مرتبه اول و سپس روش کلارک و بعد از آن مدل اشنایدر دارای کمترین اختلاف در دبی اوج سیلاب در هیدروگراف مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده هستند، که با نتایج به‌دست آمده توسط میرمهدی و جهانگیر (۱۳۸۷) در حوضه آبریز مارون شبیه است. بررسی درصد اختلاف بین مقادیر رواناب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، نشان داد که روش اشنایدر با ۱۳ درصد دقت بیشتر و تطابق بهتری با شرایط واقعی دارد. در مدل HEC-HMS برای محاسبه رواناب مستقیم به روش SCS نیاز به دو پارامتر شماره منحنی و تلفات اولیه می‌باشد و همان‌طور که از نتایج بخش واسنجی مدل و آنالیز حساسیت به‌دست آمد، پارامترهای

تلفات اولیه و شماره منحنی دارای حساسیت بالایی نسبت به تغییر مقدار تابع هدف می‌باشند، در نتیجه بهینه‌سازی این پارامترها می‌تواند تأثیر بسزایی بر نتایج حاصل از واسنجی داشته باشد. در این راستا پرهت و صدقی (۱۳۷۸) در زیر حوضه بازفت در کارون و رادمنش و همکاران در حوضه آبخیز رود زرد در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل به روش‌های مختلف، نیز به نتایج مشابه با این تحقیق دست یافتند در صورتی که نتایج بهادری خسروشاهی حاکی از عملکرد بهتر روش اشنایدر است. با بررسی این نتایج و بررسی منابع انجام شده در این خصوص به نظر می‌رسد که روش SCS در حوضه‌های کم‌شیب‌تر و روش اشنایدر در حوضه‌های کوهستانی و پرشیب‌تر برآورد بهتری را ارائه می‌کند.



شکل ۳- هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در رویدادهای مختلف

صورتی که سایر پارامترها دارای حساسیت کمتری نسبت به تغییر مقدار تابع هدف در مدل HEC-HMS است. در مواردی که از تابع انحراف معیار وزنی دبی اوج برای مقایسه دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج در هیدروگراف مشاهده‌ای و هیدروگراف محاسبه‌ای استفاده شد نتایج بهتری به دست آمد. با توجه به اینکه درصد اختلاف بین پیش‌بینی زمان وقوع و اندازه حداکثر سیلاب اتفاق افتاده و روندیابی شده توسط نرم افزار HEC-HMS کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد لذا این مدل به‌ویژه در خصوص پیش‌بینی دبی اوج و زمان مربوط به آن می‌تواند نتایج قابل قبولی را ارائه کند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از واسنجی و بهینه‌سازی در این حوضه نشان داد که روش SCS در خصوص برآورد دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج هیدروگراف سیل نسبت به روش‌های شنايدر و کلارک برتری دارد. از لحاظ برآورد ارتفاع رواناب کمترین اختلاف بین مقدار رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای مربوط به روش شنايدر می‌باشد. اختلاف زمان رسیدن دبی اوج هیدروگراف مشاهده‌ای و هیدروگراف شبیه‌سازی شده هم در تمام موارد مورد مطالعه مساوی و یا کمتر از یک ساعت بوده است. بررسی بر روی پارامترهای مدل نشان داد که پارامتر شماره منحنی و مقدار تلفات اولیه دارای حساسیت بالایی می‌باشد در

جدول ۵- مقادیر مربوط به ارزیابی نتایج پیش‌بینی شده و مشاهداتی در روش‌های مختلف

| روش مورد استفاده | تاریخ وقوع رگبار | R ² | R | RMSE |
|------------------|------------------|----------------|------|------|
| SCS | ۸۵/۸/۹ | ۰/۸۸ | ۰/۹۴ | ۱/۳۵ |
| کلارک | ۸۵/۸/۹ | ۰/۸۴ | ۰/۹۲ | ۲/۳۵ |
| اشنایدر | ۸۵/۸/۹ | ۰/۸۳ | ۰/۹۱ | ۲/۴۵ |
| SCS | ۸۵/۹/۲۰ | ۰/۸۹ | ۰/۹۴ | ۱/۳ |
| کلارک | ۸۵/۹/۲۰ | ۰/۸۳ | ۰/۹۱ | ۱/۵۹ |
| اشنایدر | ۸۵/۹/۲۰ | ۰/۸۳ | ۰/۹۱ | ۱/۸ |
| SCS | ۸۵/۱۲/۶ | ۰/۹۸ | ۰/۹۹ | ۰/۵۶ |
| کلارک | ۸۵/۱۲/۶ | ۰/۹۶ | ۰/۹۸ | ۰/۸۶ |
| اشنایدر | ۸۵/۱۲/۶ | ۰/۹۱ | ۰/۹۵ | ۰/۵۶ |
| SCS | ۸۶/۱/۷ | ۰/۹۲ | ۰/۹۶ | ۰/۴۲ |
| کلارک | ۸۶/۱/۷ | ۰/۹۰ | ۰/۹۵ | ۰/۷۲ |
| اشنایدر | ۸۶/۱/۷ | ۰/۸۹ | ۰/۹۴ | ۱/۲ |
| SCS | ۸۶/۲/۷ | ۰/۸۵ | ۰/۹۲ | ۲/۲ |
| کلارک | ۸۶/۲/۷ | ۰/۸۴ | ۰/۹۲ | ۲/۴۵ |
| اشنایدر | ۸۶/۲/۷ | ۰/۸۰ | ۰/۸۹ | ۲/۶ |

منابع

- ۱- برخورداری ج.، تلوری ع.، غیائی ن. و رستگار ح. ۱۳۸۵. بررسی قابلیت بکارگیری و ارزیابی روش‌های تهیه هیدروگراف واحد مصنوعی در برآورد سیلاب در حوضه آبخیز سیخوران استان هرمزگان. مجله پژوهش و سازندگی. ۷۱: ۵۷-۶۵.
- ۲- بهادری خسروشاهی ف. ۱۳۷۰. بررسی قابلیت به کارگیری هیدروگراف واحد در تعیین سیلاب‌ها. مجموعه مقالات اولین کنفرانس هیدرولوژی ایران. مهاباد، تهران. ص ۲۰۶ - ۲۹۹.
- ۳- تلوری ع. ۱۳۷۵. مدل‌های هیدرولوژی به زبان ساده. انتشارات مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور.
- ۴- خالقی م.ر.، قدوسی ج.، احمدی ح. و کامیار م. ۱۳۸۹. بررسی کارایی روش‌های هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی در برآورد دبی اوج سیلاب. فصلنامه علوم و فنون منابع طبیعی. ۵ (۲): ۸۹-۱۰۰.
- ۵- خلیقی سیگارودی ش. ۱۳۸۳. بررسی میزان تغییر کاربری اراضی بر مشخصات هیدرولوژیک آب‌های سطحی. رساله دکتری. دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران.
- ۶- رادمنش ف.، پرهت ج.، بهنیا ع. و آخوند علی ع. ۱۳۸۵. واسنجی و ارزیابی مدل HEC-HMS در حوضه آبخیز رود زرد. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران. اهواز.
- ۷- رعیت پیشه ا. ۱۳۸۲. مقایسه شاخص‌های هیدروگراف‌های واحد طبیعی و مصنوعی در برآورد دبی سیلاب‌های رودخانه مارون. مجموعه مقالات ششمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران، اهواز. ص ۱۲۲۶-۱۲۲۱.
- ۸- غیائی ن. و روغنی م. ۱۳۸۵. کارایی هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژی و مقایسه آن با هیدروگراف‌های مصنوعی اشنایدر، مثلثی و SCS در حوضه آبخیز کسلیان. مجله پژوهش و سازندگی. ۷۰: ۳۲-۲۳.
- ۹- موسوی س.ف.، نکوئی مهر م. و مهدوی م. ۱۳۷۷. بررسی و آزمون تطابق هیدروگراف‌های واحد مصنوعی و طبیعی در حوضه آبخیز سد زاینده رود (زیرحوضه پلاسجان). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان. ۲(۲): ۹۳-۱۰۵.
- ۱۰- میر مهدی م. و جهانگیر ع. ۱۳۸۷. واسنجی مدل ریاضی HEC-HMS و ارزیابی این مدل در پاسخگویی به سیلاب حوضه آبریز مارون. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران.

- 16- Kathol J.P. Werner H.D. and Trooien T.P. 2003. Predicting Runoff for Frequency based Storm using a Prediction Runoff Model. A.S.A.E. South Dakota. U.S.A.
- 17- Sarangi D. Singh Kand Singh A. K. 2008. Evaluation of curve number and geomorphology-based models for surface runoff predication from ungauged watersheds. Water Technology Centre, Indian Agricultural Research Institute, New Delhi 110 012, India, Current science, 94(12):
- 18- Shieh Ch. L. Guh Y.R. and Wang Sh. O. 2007. The application of range of variability approach to the assessment of a check dam on riverine habitat alteration. Environ Geol. 52:427-435.
- 19- US Army Corps of Engineers, 2000. Hydrologic Modeling System HEC_HMS: Technical Reference Manual, USA.
- 11- Creek W. and Williams P. 2003. Hydromodification Management Plan ,Draft Report. Chapter 4-6. Berkeley College. USA
- 12- Emerson C.H. Welty C. and Traver R.G. 2003. Application of HEC-HMS to model the additive effects of multiple detention basins over a range of measured storm volumes. Civil Engineering Database. Part of world water & Environmental Resources Congress 2003 and Related Symposia.
- 13- Foody G.M. Ghoneim E.M. and Arnell W.N. 2004. Predicting Location Sensitive to Flash Flooding in Arid Environment. Journal of Hydrology. 292: 48-58.
- 14- Ghitoto R.D. 1991. Runoff hydrograph computation method. A Designer Course at Clarion Palaz hotel.
- 15- H.Q. Rientjes T and Maathuis, B. 2006. Geomorphologic Instantaneous Unit Hydrograph. Nguyen.