**اکوهیدرولوژی**

**دورهٔ ۷، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۹، ص ۹۶۵-۹۵۱**

# تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر سیلاب طراحی با استفاده از مدل ریاضی HEC- HMS (مطالعهٔ موردی: سد سردشت)

**علی حیدری بی‌صفر[۱]، بهزاد حصاری[۲*]، مرتضی صمدیان[۳]**

۱. کارشناس ارشد عمران آب، شرکت توسعهٔ منابع آب و نیروی ایران

۲. عضو هیئت‌علمی دانشگاه ارومیه، گروه مهندسی آب

۳. دانشجوی دکترای علوم و مهندسی منابع آب، دانشگاه تبریز و مدرس گروه عمران، مؤسسهٔ آموزش عالی علم و فن ارومیه

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۲/۰۲، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۵/۲۷)

## چکیده

عوامل متعددی بر فرایند روندیابی سیلاب تأثیرگذار هستند که هریک وزن خاصی در کاهش پیک سیلاب عبوری از سرریز دارند. در تحقیق حاضر، این عوامل شناسایی شده و آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر دبی پیک طراحی مخزن سد سردشت بررسی شد. همچنین، تأثیرگذاری این عوامل و حساسیت آن‌ها در برآورد هیدروگراف تولیدی حوضه و روندیابی مخزن مشخص شد. در مرحلهٔ نخست پس از ساخت مدل حوضه با تمام المان‌های مؤثر در HEC-HMS، یک رگبار بارش و رواناب متناظر شبیه‌سازی و پارامترهای مؤثر بر ایستگاه‌های مختلف واسنجی شد. در مرحلهٔ دوم با تبدیل حداکثر بارش محتمل (PMP) به حداکثر سیل محتمل (PMF) در مخزن سد روندیابی شد. در مرحلهٔ آخر، حساسیت پارامترهای CN، مقدار بارش طراحی، مقدار زمان تأخیر آبراهه و زمان تأخیر حوضهٔ بالادست سد و پارامترهای روندیابی دبی پیک طراحی انجام شد. نتایج نشان داد سیلاب طراحی بیشترین حساسیت را به مقدار بارش طراحی دارد، به‌طوری که با ۳۰ درصد تغییر در بارش، مقادیر CN، زمان تأخیر آبراهه و سیلاب طراحی به‌طور خطی به‌ترتیب ۴۰، ۲۵ و ۸ درصد تغییر می‌کند، ولی در ۳۰± درصد زمان تأخیر حوضه، تغییرات سیلاب به‌طور غیرخطی ۵ درصد در تخمین بالا و ۱۶ درصد در تخمین پایین را سبب می‌شود.

**کلیدواژگان:** روندیابی مخزن، سد سردشت، سرریز، مدل بارش رواناب، هیدروگراف.

* نویسندهٔ مسئول

Email: b.hessari@urmia.ac.ir

**مقدمه**

شناخت و دانش کافی از فرایندهای رواناب بارش برای برآورد میزان رواناب تولیدشده در یک حوضهٔ آبریز معین به منظور دانستن میزان رواناب در یک حوضهٔ خاص برای برنامه‌ریزی و مدیریت پروژهٔ پایدار منابع آب ضروری و مهم است. فعالیت‌های مربوط به تخمین حجم رواناب و پیک سیلاب را می‌توان با اتخاذ یک مفهوم مدل‌سازی و با درک پیکربندی بارندگی و عوامل اصلی ایجادکنندهٔ رواناب به‌راحتی ساده کرد [۱]. نوع رویکرد مدل‌سازی به‌طور معمول به هدف، در دسترس بودن داده‌ها و سهولت استفاده بستگی دارد [۲]. شناخت روابط پیچیده بین فرایندهای بارندگی و رواناب برای برآورد مناسب از میزان رواناب حاصل از تولید در یک حوضهٔ آبریز ضروری است. سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی HEC-HMS، نوعی نرم‌افزار مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژیک مهندسان ارتش آمریکا (HEC) تهیه شده و نوعی ابزار مدل‌سازی یکپارچه برای کلیهٔ فرایندهای هیدرولوژیکی سیستم‌های آبخیز است. این مدل به دلیل توانایی آن در شبیه‌سازی رواناب هم در حوادث کوتاه‌مدت و هم در طولانی‌مدت، سادگی کار کردن آن و استفاده از روش‌های متداول بسیار مورد توجه قرار گرفته و از آن استفاده شده است [۳]. هیدروگراف‌های ایجادشده توسط HEC-HMS به‌صورت مستقیم یا همراه با سایر نرم‌افزارها برای مطالعات در مورد زهکشی شهری، در دسترس بودن آب، تأثیر شهرنشینی بر آینده، پیش‌بینی جریان، کاهش خسارت سیل، تنظیم سیلاب و عملکرد سیستم‌ها استفاده می‌شوند [۴]. هدف از انتخاب حوضهٔ سد سردشت در تحقیق حاضر، به این علت بوده که حوضهٔ گلاس به‌عنوان یکی از حوضه‌های مرزی در استان آذربایجان غربی است. رودخانهٔ گلاس یکی از رودخانه‌های پرآب استان است و سالانه حدود ۲/۲ میلیارد مترمکعب آب از طریق این رودخانه از کشور خارج می‌شود و به مخزن سد دوکان عراق می‌ریزد. در حالی که تنش‌های آبی حوضه‌های مجاور با این حوضه و به‌خصوص ضرورت تأمین نیاز محیط زیستی دریاچهٔ ارومیه و قابلیت انتقال آب از این حوضه در کنار داشتن پتانسیل تولید انرژی برق‌آبی و نیز احداث چندین سد روی رودخانهٔ گلاس سبب شد که برای طراحی و اجرای سازه‌های هیدرولیکی سد در حال احداث سردشت روندیابی مخزن صورت گیرد تا با به دست آوردن هیدروگراف خروجی، ابعاد سازه‌های هیدرولیکی سد بهینه شده و بحرانی‌ترین سازهٔ سرریز بر اساس آن انتخاب شود. در این صورت، ریسک خطرات احتمالی تخریب سد و سازه‌های هیدرولیکی کاهش می‌یابد.

آنالیز حساسیت ابزار مناسبی برای نمایش اختلاف خروجی‌ها درنتیجهٔ تغییر در پارامترهای مدل است. از کاربردهای این نوع تحلیل، یافتن پارامترهای حساس برای کالیبره کردن و شناسایی ورودی‌های مهم در سیستم است. بررسی رفتار هیدرولوژیک طبیعت، پیچیدگی‌های فراوانی دارد و انسان همیشه سعی در شناخت آن داشته است. برآورد سیل‌خیزی یک حوضه و انتخاب سازه‌های متناسب با بزرگی آن از قدیم جزء آرزوهای بشر بوده است. در قرن بیست‌ویکم و با ظهور و گسترش رایانه، مدل‌های شبیه‌ساز سیلاب، به عنوان ابزاری به‌صرفه، برای بشر تولید شد که دست‌آوردهای زیادی به ارمغان آورد. هر مدلی اگرچه ارزان و قابل دسترس، باید برای عوامل هر منطقهٔ خاص واسنجی و ارزیابی شود. مدل HEC- HMS نوعی ابزار یکپارچه برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های منطقه بوده و موضوع مستقیم این تحقیق است.

تا کنون پژوهش‌های زیادی برای بارش-رواناب و روندیابی سیل انجام گرفته که نمونه‌هایی از این تحقیقات به شرح ذیل ارائه شده است.

در تحقیقی عباسی و همکاران (۱۳۸۹) به ارزیابی تأثیر فعالیت‌های آبخیزداری اجراشده روی زمان تمرکز و شمارهٔ منحنی در حوضهٔ آبخیز کن به مساحت ۱۹۷ کیلومترمربع در استان تهران با استفاده از مدل HEC-HMS پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد فعالیت‌های مکانیکی در افزایش زمان تمرکز حوضه تأثیر کمی داشته و فعالیت‌های زیستی سبب کاهش شمارهٔ منحنی به‌طور میانگین به میزان ۳/۱ در حوضه شده است. در ضمن، بررسی‌های صورت‌گرفته نشان داد این تأثیرات سبب کاهش دبی اوج و حجم سیلاب به‌ترتیب به میزان میانگین ۲۱ و ۱۱ درصد در حوضه می‌شود [۵]. در پژوهشی که توسط کریمی (۱۳۹۰) در حوضهٔ آبخیز چهل‌گزی صورت گرفت، کارایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب بررسی و مشخصات آبنمود سیل شامل دبی اوج، حجم رواناب و زمان اوج با استفاده از سه روش هیدروگراف واحد مصنوعی SCS، اشنایدر و کلارک مقایسه و تحلیل آماری شد. در این ارتباط ۷ واقعهٔ بارش-

رواناب استخراج شد. سپس، پارامترهای مدل بر اساس پنج هیدروگراف مشاهده‌ای واسنجی شده و بر اساس دو هیدروگراف مشاهده‌ای دیگر ارزیابی شد. مقایسهٔ نتایج شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای هیدروگراف سیل با استفاده از دو آمار، ضریب تبیین ($R^2$) و ریشهٔ میانگین مربعات خطا (RMSE)نشان داد روش SCS نسبت به روش‌های کلارک و اشنایدر کارایی بهتری دارد. مقادیر RMSE دبی اوج شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌ای از سه روش SCS، کلارک و اشنایدر به‌ترتیب ۱/۱، ۱/۴ و ۱/۵ به دست آمد [۶]. شیری (۱۳۹۴) به‌منظور واسنجی سه روش هیدروگراف واحد SCS، کلارک و اشنایدر به شبیه‌سازی بارش- رواناب با مدل HEC-HMS پرداخت. نتایج تحقیق ایشان نشان داد با بررسی ۶ رویداد در مرحلهٔ واسنجی، با توجه به متفاوت بودن شرایط رطوبتی در هر رویداد و متفاوت بودن مشخصات هر سیلاب، روش اشنایدر در برآورد مشخصات سیلاب مانند حجم سیلاب و زمان رسیدن به دبی اوج سیلاب موفق است. روش کلارک نیز در مورد حجم سیلاب بیش از SCS برآورد دبی اوج سیلاب و حجم سیلاب در برخی سیلاب‌ها موفق عمل می‌کند و روش برآورد است، اما در مورد زمان رسیدن به دبی اوج و دبی اوج کم‌برآورد و موفق است [۷]. در تحقیق صورت‌گرفته توسط حسینی (۱۳۹۵) برای بررسی و شبیه‌سازی میزان رواناب حاصل از بارش حوضهٔ آبریز رودخانهٔ کشکان واقع در استان لرستان با کمک مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS توسط داده‌های ثبت‌شده بارش- رواناب روزانه؛ نتایج به‌دست‌آمده نشان داد مدل HEC-HMS دارای کارایی زیادی در شبیه‌سازی رواناب روزانه طی دورهٔ ترسالی و همچنین، در حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به ازای دورهٔ بازگشت‌های کمتر از ۳۰۰ سال را دارد. بنابراین، به‌خوبی می‌توان از این مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی رواناب روزانه و حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به ازای دورهٔ بازگشت‌های کوچک در حوضهٔ مطالعه‌شده استفاده کرد؛ اما به ازای دورهٔ بازگشت‌های بیشتر از ۳۰۰ سال، فاصلهٔ بین دبی‌های سیلاب پیش‌بینی‌شده توسط مدل با مقادیر به‌دست‌آمده از تحلیل فراوانی بیشتر می‌شود. بنابراین، برای پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی بزرگ توسط مدل HEC-HMS، باید ضریب اطمینان لازم را منظور و یا با توجه به عوارض ژئومورفولوژیک که شواهد عینی شرایط هیدرولوژیک حاکم بر رودخانه طی دوران متمادی هستند، ضریب اصلاحی لازم را برای افزایش دقت مدل اعمال کرد [۸]. کیانی سلمی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی ضمن واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS(SMA)، حساسیت دستی و خودکار پارامترهای مدل در حوضهٔ آبخیز بهشت‌آباد را تحلیل نمودند. برای شبیه‌سازی از آمار دبی، بارش، دما و تبخیر و تعرق ایستگاه بهشت‌آباد طی دورهٔ آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۵ به‌صورت آمار روزانه استفاده شد، از داده‌های ۱۳ سال این بازهٔ زمانی برای واسنجی و از چهار سال آخر برای اعتبارسنجی استفاده شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی داده‌ها به‌ترتیب مقدار ضریب راندمان و ریشهٔ میانگین مربعات خطا ۰/۶۹۶ و ۲/۱۳ مترمکعب بر ثانیه برای واسنجی و مقدار ضریب راندمان و ریشهٔ میانگین مربعات خطا ۰/۶۳۰، ۷ مترمکعب بر ثانیه برای اعتبارسنجی به دست آمد. تحلیل حساسیت خودکار با نرم‌افزار HEC-HMS صورت گرفت. طبق نتایج پارامترهای ذخیرهٔ خاک، ذخیرهٔ کششی و ثابت افت بیشترین حساسیت را در واسنجی مدل داشتند که اهمیت این عوامل را در فرایند مدل‌سازی پیوسته در حوضهٔ مد نظر نشان می‌دهد [۹]. صمدیان و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعهٔ صورت‌گرفته در حوضهٔ آبخیز خاکمردان خوی؛ به ارزیابی تأثیر اقدامات آبخیزداری روی زمان تمرکز و شمارهٔ منحنی به‌عنوان بخشی از شاخص دبی اوج سیلاب پرداختند. برای کمی کردن تأثیر این اقدامات از شبیه‌سازی جریان با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای تعیین پاسخ حوضه در برابر رگبارهای طرح با اعمال تغییرات ایجادشده در ورودی‌های مدل اقدام به همانندسازی رفتار سیلاب برای بارش با دورهٔ بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله در چهار سناریوی قبل از عملیات آبخیزداری (S1) و بعد از عملیات آبخیزداری (S2) و همچنین، بررسی در دو اولویت اجرایی (S3 و S4) در سطح حوضه شد. نتایج نشان داد انجام عملیات بیولوژیکی و مکانیکی، به‌طور میانگین سبب کاهش مقدار دبی اوج سیلاب حدود ۳۴/۲۴ درصد در دورهٔ بازگشت‌های مختلف شده و در دو اولویت بررسی‌شده برای اجرا نیز میزان کاهش مقدار دبی اوج سیلاب به‌طور میانگین ۱۶/۲۶ درصد (اولویت اول) و ۲۱ درصد (اولویت دوم) به دست آمد. همچنین، مشاهده شد با افزایش دورهٔ بازگشت، تأثیر اقدامات آبخیزداری بر دبی اوج سیلاب کاهش‌یافته که کاملاً مؤید تأثیر اقدامات بیولوژیکی بیشتر بر دبی‌های با دورهٔ بازگشت کمتر بوده و از طرفی، در دبی‌های بالا پوشش گیاهی نقش بازدارندگی کمتری داشته و اقدامات مکانیکی و سازه‌ای

نیز تا دبی‌های ۲۵ و ۵۰ ساله مؤثر است [۱۰]. اسدی و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی در حوضهٔ آبریز سد میناب به‌عنوان نمونه‌ای از مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل داشتن داده‌ها، برای شبیه‌سازی بارش – رواناب با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS پرداختند. در فرایند محاسبات مدل برای محاسبهٔ تلفات رواناب حوضه از روش SCS، به منظور تبدیل فرایند بارش مازاد به جریان سطحی از روش هیدروگراف واحد SCS، کلارک و اشنایدر و از مدل ثابت ماهانه برای محاسبهٔ جریان پایه بهره گرفته شد. پارامترهای مدل بر اساس پنج هیدروگراف مشاهده‌ای واسنجی شده و بر اساس دو هیدروگراف مشاهده‌ای دیگر اعتبارسنجی شد، که به تنظیم پارامترهای حوضهٔ آبریز انجامید. تحلیل حساسیت مدل، نسبت به پارامترهای مختلف روش SCS نیز بررسی شد. با توجه به درصد اختلاف کمتر بین دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی روش هیدروگراف واحد SCS به‌عنوان روش مناسب برای حوضهٔ مطالعه‌شده تعیین شد. مقادیر RMSE برای هر سه مدل SCS، کلارک و اشنایدر به‌ترتیب برابر با ۰/۳۵۳، ۱۱۷/۷۵ و ۷۹/۶۲۰ است. همچنین، تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف نشان داد تأثیرگذارترین عامل بر مدل به‌ترتیب CN با مقدار ۱/۵۹۱، تلفات اولیه با مقدار حساسیت ۱/۳۳۵ و زمان تأخیر با مقدار ۰/۸۱۳ هستند [۱۱]. کاتول و همکاران (۲۰۰۳) به‌منظور تعیین دبی اوج و حجم رواناب در دو حوضهٔ کشاورزی در جنوب شرق ایالت داکوتای جنوبی با استفاده از مدل HEC-HMS به این نتیجه رسیدند که مقدار شمارهٔ منحنی حساسیت زیادی دارد، در صورتی که مقدار تلفات اولیه دارای حساسیت کمتری نسبت به تغییر مقدار تابع هدف در مدل HEC-HMS است [۱۲]. کلارک و همکاران (۲۰۰۴) برای ارزیابی مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی برای پیش‌بینی زمان واقعی سیلاب در حوضهٔ آبریز رودخانهٔ یانگ‌تسه کیانگ از مدل هیدرولوژیکی بارش- رواناب استفاده کردند که پس از کالیبراسیون مدل با استفاده از داده‌های عمومی از دو حوضهٔ آبریز کاملاً مختلف و بالادست یانگ‌تسه و مدل بارش- رواناب برای به دست آوردن پیش‌بینی زمان وقوع سیلاب در یانگ‌تسه مناسب بود و با استاندارد ملی چین مطابقت داشت [۱۳]. حصاری (۲۰۱۱) در بررسی روندیابی مخزن سد برده‌سور در عراق به مساحتی حدود ۲۰ هزار کیلومترمربع توسط نرم‌افزار بارش - رواناب با شبیه‌سازی شرایط هیدرولوژیکی بالادست گزارش کرد که وجود سدهای بالادست اثر بسیار معنی‌داری در سیلاب طراحی سرریز دارد، به‌طوری که سیلاب طراحی سرریز با احتساب سدهای بالادست ۷ هزار مترمکعب بر ثانیه و بدون آنها ۱۱۴۰۰ مترمکعب بر ثانیه است [۱۴]. کونتیوچای (۲۰۱۴) در تحقیقی که در حوضهٔ رودخانهٔ چی به مساحت ۴۹۴۷۷ هکتار انجام داد ،به ارزیابی تأثیر مخازن احداث‌شده در کاهش دبی سیل در پایین‌دست حوضه با استفاده از مدل HEC-HMS پرداخت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد مخازن موجود می‌توانند میزان دبی اوج را تا ۲۶/۶ درصد کاهش دهند [۱۵]. سیلوا و همکارانش (۲۰۱۴) مدل‌سازی هیدرولوژیکی در رودخانهٔ کلانی در سریلانکا را با استفاده از داده‌های بارندگی انجام دادند. کالیبراسیون مدل نشان داد مدل HEC-HMS شبیه‌سازی را به‌خوبی انجام داده است و می‌توان از آن در کنترل سیل و مدیریت منابع آب استفاده کرد [۱۶]. در فرایند بررسی مدل بارش رواناب حوضهٔ بالجور نالا هندوستان، به کمک مدل ریاضی HEC-HMS، توسط چودیهاری (۲۰۱۴)؛ نتایج پژوهش آنها بیانگر آن است که مقادیر MARE ارتفاع رواناب و دبی اوج به‌ترتیب بین ۰/۲۰ و ۰/۲۵ است. همچنین، به‌طور مشابه مقادیر RMSE داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده ارتفاع رواناب و اوج تخلیه به‌ترتیب بین ۲/۳۰ میلی‌متر و ۰/۲۸مترمکعب بر ثانیه به دست آمد. با این‌حال، پس از بهینه‌سازی پارامترها مدل کالیبره و اعتبارسنجی شد و نتایج با مقادیر کم اختلاف از توابع خطای آماری رضایت‌بخش بود [۱۷]. هوجین (۲۰۱۵) در حوضهٔ جیانگ در کشور چین، دو حالت مدل‌سازی با استفاده از مدل زیرمکانیسم توصیفی مختلف ارائه‌شده توسط مدل HEC-HMS برای حجم رواناب، شامل رواناب مستقیم و روندیابی جریان را بررسی کرد. مدل‌سازی نتایج با داده‌های مشاهدهٔ تاریخی مقایسه شدند. این کار نشان می‌دهد مدل HEC-HMS می‌تواند ابزار مدل‌سازی مناسبی برای موقعیت‌های خاص در چین با انتخاب مناسب از مدل‌های زیرمکانیسم در شرایط نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب معمولی در شمال چین استفاده شود [۱۸]. اسخاخفا و اورداچی (۲۰۱۶) در مطالعهٔ واقع در حوضهٔ آبخیز ال بردا، شمال شرقی الجزایر به تخمین مدل سیلابی به کمک نرم‌افزار HEC-HMS بعد از طی فرایندهای اعتبارسنجی و کالیبراسیون روی وقایع رخداده پرداختند. در این بررسی درصد اختلاف بین مقادیر

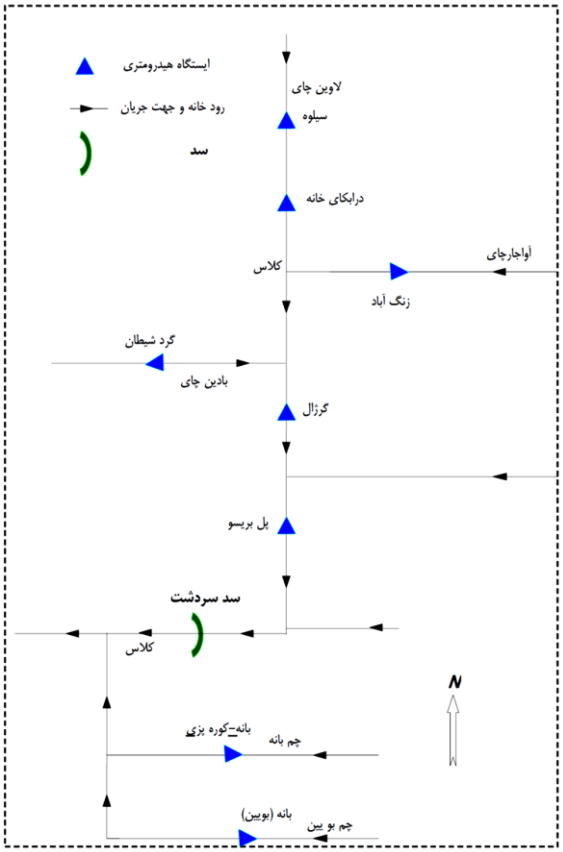
مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده به ازای شاخص ضریب تبیین و نش ساتکلیف به‌ترتیب برابر ۰/۸۷ و ۰/۹۹ است [۱۹]. رومالی و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی کاربرد سامانه‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی ایجادشده توسط مرکز مهندسی هیدرولوژیک (HEC-HMS) روی رودخانهٔ سگامات در کشور مالزی پرداختند. قابلیت مدل با مقایسهٔ داده‌های مشاهده‌شدهٔ تاریخی با نتایج شبیه‌سازی حوادث انتخاب‌شده سیل سال ۲۰۱۱ بررسی شد. با استفاده از ضریب نش-ساتکلیف مدل کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل تأیید شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد برای ارزیابی ریسک سیل و شبیه‌سازی اوج جریان با داده‌های مشاهده‌شدهٔ تاریخی نشان می‌دهد بازده کالیبراسیون و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۷۶ بوده و قابل قبول است [۲۰]. آندوچ و همکاران (۲۰۱۸) در تحقیقی برای پیش‌بینی سیلاب حوضهٔ آبریز پری کانادا به ارزیابی چهار مدل هیدرولوژیکی WATFLOOD, HBV-EC، HSPF و HEC-HMS پرداختند تا از بازده و دقت آن‌ها به‌عنوان ابزار پیش‌بینی سیل استفاده شود. عملکرد مدل‌ها با استفاده از روش‌های آماری استاندارد ضریب کارایی نش-ساتکلیف، ضریب همبستگی، خطای میانگین مربعات ریشه، میانگین خطای نسبی مطلق و انحراف حجم رواناب بررسی شد. نتایج پژوهش آنها بیانگر است که هر چهار مدل قادر به شبیه‌سازی جریان‌ها با دقت هستند و می‌توانند برای پیش‌بینی سیل استفاده شوند. مدل‌های HSPF و WATFLOOD برای کل دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی بهتر عمل کردند. با این‌حال، مدل‌های HEC-HMS و HSPF در شبیه‌سازی رواناب بهاره عملکرد بهتری داشتند [۲۱]. زوانخین و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی به شبیه‌سازی سیلاب آنی در ۱۴ حوضهٔ معمولی و کوچک در مناطق مرتفع در سراسر چین به کمک پنج مدل هیدرولوژیکی پرکاربرد ازجمله سه مدل هیدرولوژیکی توده‌ای، یک مدل هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی و یک مدل هیدرولوژیکی توزیع‌شده پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل هیدرولوژیکی توزیع‌شده HEC-HMS نسبت به سایر مدل‌ها بهتر بوده و برای شبیه‌سازی سیل‌های آنی ناشی از بارندگی بسیار شدید مناسب است [۲۲]. بیتوو و همکاران (۲۰۱۹) در تحقیقی به بررسی و شبیه‌سازی جریان در حوضهٔ آبریز دریاچهٔ تانا در اتیوپی به کمک نرم‌افزار HEC-HMS پرداختند. شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از ۶ رویداد حدی روزانه انجام شد. نتایج اولیهٔ پژوهش یادشده نشان داد بین جریان‌های اوج مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و میزان کل تفاوت وجود دارد. پس از آن، کالیبراسیون مدل با یک روش بهینه‌سازی و تجزیه‌وتحلیل حساسیت انجام شد. نتیجهٔ تحلیل حساسیت نشان داد پارامتر عدد منحنی حساسیت زیادی دارد. علاوه بر این، نتایج اعتبارسنجی مدل اختلاف معقولی را در جریان اوج (خطای نسبی در اوج، REP = 1.49٪) و حجم کل (خطای نسبی در حجم، REV = 2.38٪) نشان داد. مقایسهٔ هیدروگراف‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده و عملکرد مدل (NSE = ۰/۸۸۴) و همبستگی آنها (R2 = 0.925) نشان داد این مدل برای شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی در حوضهٔ آبریز مربوطه مناسب است [۲۳]. بلاینه و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی بر اساس داده‌های بارش ماهواره‌ای با وضوح زیاد به شبیه‌سازی رواناب روزانه در حوضهٔ آبخیز دابوس اتیوپی به کمک مدل ریاضی HEC-HMS پرداختند. عملکرد بارندگی ماهواره‌ای و مدل هیدرولوژیکی با استفاده از کارایی نش-ساتکلیف (ENS)، ضریب تعیین (R2)، خطای حجم نسبی (RVE) و درصد خطای عملکردهای هدف اوج جریان بررسی شد. نتیجهٔ عملکرد مدل HEC-HMS نشان داد R2= 0.78، ENS= 0.69 برای CHIRPS_2 و R2= 0.79، ENS= 0.76 برای TMPA_3B42v7 محصولات بارندگی ماهواره‌ای در دورهٔ کالیبراسیون است. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل HEC-HMS به‌خوبی رواناب حوضه را برای هر دو محصول بارش ماهواره پیش‌بینی می‌کند. به‌طور کلی، شبیه‌سازی مبتنی بر داده‌های باران‌سنجی از لحاظ عملکردهای عینی در منطقهٔ مطالعه شده از ماهواره فراتر است [۲۴].

با این اوصاف، امروزه بهره‌گیری از قابلیت مدل‌های هیدرولوژیکی به‌منظور همانندسازی اثرگذاری‌های فعالیت‌های مدیریتی، در فرایند تصمیم‌گیری نقش تعیین‌کننده‌ای به خود گرفته است. در این تحقیق آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در روندیابی سیل در مخزن سد در حال اجرای سردشت مد نظر است. عدد منحنی به‌عنوان نمایندهٔ تغییر کاربری اراضی، مقدار بارش طراحی نمایندهٔ تغییر اقلیم در حوضه، مقدار زمان تأخیر آبراهه و زمان تأخیر حوضهٔ بالادست سد به‌عنوان نمایندهٔ تخمین سرعت سیلاب با استفاده از نرم‌افزار بارش-رواناب HEC-HMS روندیابی شده تا با به دست آوردن هیدروگراف خروجی؛ ابعاد سازه‌های هیدرولیکی سد بهینه شود و بحرانی‌ترین و اقتصادی‌ترین

سازهٔ سرریز بر اساس آن انتخاب شود. بدیهی است در این صورت ریسک خطرات احتمالی تخریب سد و سازه‌های هیدرولیکی کاهش خواهد یافت. جنبهٔ نوآوری مقاله در این است که هم‌زمان حوضه‌ها، رودخانه‌ها و سدهای یک حوضهٔ آبریز بزرگ روندیابی شده است. در مورد تعیین حساسیت عوامل مؤثر در بحث روندیابی مخزن سد و کل سیستم آبی بالادست سد به‌صورت یکپارچه تحقیقات زیادی در ایران انجام نشده است، در حالی که این مبحث اثر مستقیمی بر مباحث توجیه اقتصادی سدها دارد که می‌تواند در موارد مشابه مورد استفادهٔ طراحان و مشاوران قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

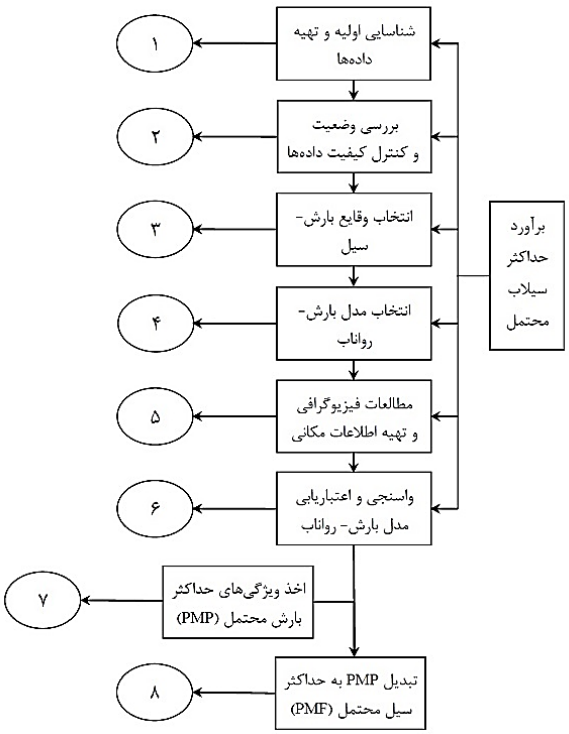
سد سردشت بر روی رودخانهٔ گلاس در استان آذربایجان غربی و در شمال غرب کشور که از رودخانه‌های مرزی ایران و عراق به شمار می‌رود، قرار گرفته است. این رودخانه از نظر موقعیت جغرافیایی بخش عمدهٔ رودخانهٔ گلاس در استان آذربایجان غربی و شهرستان‌های پیرانشهر و سردشت قرار گرفته است و بخش بسیار کوچکی در جنوب غربی حوضه، یعنی سرشاخه‌های بوئین و بانه در استان کردستان واقع شده است. شرایط فیزیوگرافی حوضهٔ آبریز سد سردشت عبارت‌اند از: مساحت ۲۹۳۴ کیلومترمربع و محیط ۳۹۷/۵ کیلومتر، طول شاخهٔ اصلی ۱۶۷/۶ کیلومتر، ضریب گراویلیوس ۱/۲ و ضریب شکل ۰/۱، ضریب دایره‌ای ۰/۲، مستطیل معادل (طول ۱۸۲/۷ کیلومتر و عرض ۱۶/۱کیلومتر)، ارتفاع حوضه (حداکثر ۳۶۳۰ متر، متوسط ۱۷۷۲ متر، حداقل ۹۲۶ متر) و شیب متوسط حوضه از روش آلورد ۱۸/۸ درصد و از روش هورتن ۱۸/۷ درصد، ارتفاع رودخانه (حداکثر ۲۶۰۰ متر، حداقل ۹۲۶ متر)، شیب متوسط رودخانه (۱ درصد ناخالص و ۰/۴درصد خالص)، زمان تمرکز به روش کرپیچ ۲۰ ساعت و به روش برانسی ویلیامز ۲۵/۳ ساعت می‌باشد. در شکل ۱، نمایی شماتیک از شبکهٔ رودخانه‌ای حوضهٔ مطالعاتی و ایستگاه‌های آب‌سنجی سد سردشت در منطقهٔ مطالعه‌شده نشان داده شده است.




شکل ۱. شماتیک شبکهٔ رودخانه‌ای حوضهٔ مطالعاتی و ایستگاه‌های آب‌سنجی سد سردشت

**ساختار مدل بارش- رواناب**

**الف) شبیه‌سازی بارش رواناب:** قبل از ورود به بحث روندیابی سیلاب طراحی، پیش‌فرایند بارش رواناب منطق آزمایش و بررسی شد. ابتدا سعی شد چند واقعهٔ بارش رواناب شبیه‌سازی‌شده و پارامترهای مدل بهینه شوند. مدل هیدرولوژیک استفاده‌شده در این تحقیق، مدل ریاضی HEC-HMS است. این مدل سه بخش اصلی به نام‌های مدل حوضه، مدل اقلیمی و شاخص‌های کنترلی دارد. همچنین، این مدل قابلیت واسنجی و تخمین پارامترهای مورد نیاز در حوضه را نیز دارد. این مدل پس از اعتبارسنجی می‌تواند برای شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در حوضه و پیش‌بینی اثر تغییر پارامترها به کار رود. فرایند استفاده‌شده به‌منظور شبیه‌سازی بارش- رواناب در مدل مطابق شکل ۲ است [۲۵].




**شکل ۲. جریان کار شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل HEC-HMS**

در این مرحله بر اساس اطلاعات آماری مورد نیاز حوضه از جمله رگبار، بارش‌ها و سیلاب‌ها و... گردآوری و تجزیه‌وتحلیل آماری شد. سپس، هیدروگراف‌های ساعتی سیلاب‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه بررسی شده و ایستگاه‌های مورد نظر انتخاب شدند. متأسفانه، به علت گستردگی حوضه، یافتن هیدروگراف‌های هم‌زمان و رگبارهای متناظر آن‌ها زمانی که سدی وجود نداشت، فراوانی کمی دارد. بنابراین، برای کنترل و تثبیت ضرایب CN، زمان تأخیر حوضه و زمان تأخیر رودخانه تنها نمونهٔ رگبار و سیلاب متناظر قابل دسترس در تمام ایستگاه‌ها برای مدل بارش- رواناب در این حوضه شبیه‌سازی شد. همچنین، در این گام اطلاعات فیزیوگرافی حوضهٔ بالادست سد سردشت در محیط GIS تهیه و مشخصات هندسی حوضه‌ها و آبراهه‌ها وارد مدل ریاضی شد. زمان تأخیر از فرمول تجربی scs و کرپیچ محاسبه شد. زمان تأخیر رودخانه از روش زمان پیمایش آب در آبراهه به روش اسکرول (Scroll) محاسبه شده است. مقدار متوسط بارش سه ایستگاه باران‌سنجی درابکا با ۸۰/۵؛ زنگ‌آباد، با ۶۱ و بریسو، با ۳۹ میلی‌متر بوده و برای متوسط رگبار از روش پلیگون تیسین استفاده شد. توزیع تیپ رگبارهای منطقه بر اساس مقایسهٔ متوسط چندین رگبار با نمودار استاندارد scs به‌صورت نوع رگبار SCSII تعیین شد. روش محاسبهٔ تلفات بارش از روش شمارهٔ منحنی CN و برای روندیابی رودخانه به دلیل دره‌ای بودن منطقه روش تأخیر یا lag استفاده شد. برای واسنجی مدل بارش- رواناب، از دبی سیلاب و رگبار

متناظر ایستگاه‌های هیدرومتری بریسو، درابکا و زنگ‌آباد که از نظر کمیت و کیفیت اطلاعات داده‌های پایه، نسبتاً کامل بودند، انتخاب شد. اطلاعات زیرحوضه‌ها و اتصال شبکهٔ رودخانه‌ها از مدول حوضه وارد شد و ورود آمار سیلاب و رگبارهای متناظر از طریق مدول بارش انجام‌شده و برای گام زمانی محاسبات از مشخصه کنترل استفاده شد. درنهایت، با استفاده از بحث بهینه‌سازی، ضرایب مؤثر در رفتار هیدرولوژیک حوضه شامل زمان تمرکز و CN و زمان تأخیر آبراهه تثبیت شد. در شکل ۳ نقشهٔ شماتیک مدل بارش-رواناب حوضه در مدل ریاضی HEC- HMS نشان داده شده است. در جدول ۱ اجزای مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب و پارامترهای مدل ارائه شده است. همچنین، در شکل ۴ نمودارهای کالیبراسیون مدل بارش- رواناب حوضهٔ گلاس ارائه شده است.

**شکل ۳. مدل بارش - رواناب سد سردشت**

**جدول ۱. اجزای مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب و پارامترهای مدل در مرحلهٔ اول**

| اجزای مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب | | | پارامترهای مدل | | |
|---|---|---|---|---|---|
| زیرحوضهٔ درابکا | مساحت ($km^2$) | ۲۸۵ | الگوی بارش | SCS II | متوسط وزنی بارش از تیسن (mm) | ۵۵ |
| | | | روش محاسبهٔ تلفات بارش | scs | CN میانگین وزنی دشت پیرانشهر | ۶۳ |
| | | | روش بارش- رواناب | SCS UH | زمان تأخیر (min) | ۱۵۰۰ |
| زیرحوضهٔ زنگ‌آباد | مساحت ($km^2$) | ۴۶۹ | الگوی بارش | SCS II | متوسط وزنی بارش از تیسن (mm) | ۵۵* |
| | | | روش محاسبهٔ تلفات بارش | SCS | CN میانگین وزنی (کوهستانی، بایر و عمدتاً، مراتع متوسط) | ۸۰ |
| | | | روش بارش- رواناب | SCS UH | زمان تأخیر (min) | ۱۶۰۰ |
| میان‌حوضهٔ بریسو | مساحت ($km^2$) | ۱۷۱۶ | الگوی بارش | SCS II | متوسط وزنی بارش از تیسن (mm) | ۵۵ |
| | | | روش محاسبهٔ تلفات بارش | SCS | CN میانگین وزنی (عمدتاً، پهنه سیلابی زاب و در غرب کوه‌های مرزی) | ۷۵ |
| | | | روش بارش- رواناب | SCS UH | زمان تأخیر (min) | ۱۶۰۰ |
| **تقاطع ۱: تقاطع زنگ‌آباد و درابکا** | | | | | | |
| آبراهه یا ریچ تقاطع درابکا و زنگ‌آباد تا ایستگاه بریسو | | | روش روندیابی | Lag | زمان تأخیر (min) | ۱۳۰۰ |
| **تقاطع ۲: ایستگاه بریسو** | | | | | | |

*مقدار متوسط بارش از روی وزن چندضلعی تیسن سه ایستگاه باران‌سنجی درابکا با ۸۰/۵، زنگ‌آباد با ۶۱ و بریسو با ۳۹ میلی‌متر حاصل‌شده است.

در پژوهش حاضر برای ارزیابی کارایی مدل در پیش‌بینی هیدروگراف‌های خروجی از معیارهای اعتبارسنجی آماری نش- ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) به شرح معادلهٔ ۱ استفاده شده است [۲۲].

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (Q_{i.obs} - Q_{i.est})^2}{\sum_i (Q_{i.obs} - \overline{Q}_{obs})^2} \quad (۱)$$

که در آن، $Q_i$ دبی‌های مشاهده‌شده برای دورهٔ i ام و $Q_{est}$ و $Q_{obs}$ به‌ترتیب میانگین دبی محاسبه‌شده و مشاهده‌شده در دورهٔ بررسی‌شده است. ضریب نش از ∞- تا ۱ تغییر می‌کند. اگر مقدار NSE برابر یک باشد، تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده وجود دارد. دامنهٔ شاخص‌های آماری شامل اگر ۱<NSE>۰/۷۵باشد، وضعیت اعتبارسنجی مدل، خیلی خوب؛ اگر ۰/۷۵>NSE >۰/۶۵ باشد، وضعیت اعتبارسنجی مدل، خوب؛ اگر ۰/۶۵>NSE>۰/۵۰ باشد، وضعیت اعتبارسنجی مدل، رضایت‌بخش؛ اگر ۰/۵۰ >NSEباشد، وضعیت اعتبارسنجی مدل، غیرقابل‌قبول است. نتایج صحت‌سنجی با شاخص کمی و توصیفی نش در فرایند شبیه‌سازی بارش – رواناب با مقایسهٔ سیلاب مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در سه ایستگاه درابکا، زنگ‌آباد و بریسو در جدول ۲ ارائه شده است.

**جدول ۲. نتایج صحت‌سنجی با شاخص نش**

| ایستگاه | شاخص کمی نش | شاخص توصیفی |
|---|---|---|
| درابکا | ۰/۵۶ | رضایت‌بخش |
| زنگ‌آباد | ۰/۸۰۲ | خوب |
| بریسو | ۰/۵۵ | رضایت‌بخش |
| بریسو | ۰/۸۰۳ | خوب |

**ب) شبیه‌سازی سیلاب طراحی باوجود سدهای بالادست:** در مرحلهٔ دوم سیلاب طراحی با وجود سدهای منطقه شبیه‌سازی و روندیابی شد. در این مرحله بیشترین بارش محتمل (PMP) هر ایستگاه تعیین و از روش چندضلعی تیسن به حوضه‌ها تعمیم داده شد. این مقدار با روش آماری هرشفیلد با ضریب فراوانی برابر ۱۹ برابر ۳۱۲ میلی‌متر تعیین شد. بقیهٔ المان‌ها مثل مرحلهٔ اول تنظیم شد. ضرایب بهینه‌شدهٔ حوضه شامل (CN، زمان تأخیر حوضه و زمان پیمایش رودخانه) از مرحلهٔ اول، استفاده شد. در روندیابی سدهای منطقه از پالس اصلاح‌شده استفاده شد. این مرحله تحت چهار سناریو انجام گرفت که در ادامه تشریح می‌شود.

**سناریوهای سیلاب طراحی و روندیابی مخزن**

پس از ساخت، اجرا، اعتبارسنجی و واسنجی نتایج مدل بارش رواناب، مدل سیلاب طراحی حوضه بر اساس پارامترهای بهینه‌شده، تحت چهار سناریوی زیر شبیه‌سازی شد.

- سناریوی نخست: روندیابی مخزن سد سردشت با مخزن پر و سرریز بدون تخلیه‌کنندهٔ تحتانی و بدون سد بالادست (سد سیلوه).
- سناریوی دوم: روندیابی مخزن سد سردشت با مخزن پر و سرریز بدون تخلیه‌کنندهٔ تحتانی با در نظر گرفتن سد بالادست.
- سناریوی سوم: روندیابی مخزن سد سردشت با مخزن پر و سرریز و تخلیه‌کنندهٔ تحتانی با در نظر گرفتن سد بالادست.
- سناریوی چهارم: روندیابی مخزن سد سردشت با مخزن خالی و سرریز و بدون تخلیه‌کنندهٔ تحتانی و بدون در نظر گرفتن سد بالادست.
- سناریوی پنجم: روندیابی مخزن سد سردشت با مخزن خالی و سرریز و بدون تخلیه‌کنندهٔ تحتانی با سد بالادست.

در جدول ۳، خلاصهٔ مشخصات سناریوهای مختلف برای محدودهٔ طرح ارائه شده است.

**جدول ۳. خلاصه مشخصات سناریوهای مختلف**

| سناریو | هیدروگراف ورودی به مخزن (مترمکعب بر ثانیه) | هیدروگراف خروجی از سرریز (مترمکعب بر ثانیه) | ذخیرهٔ آب در حالت پیک ($Mm^3$) | ارتفاع پیک مخزن (متر) |
|---|---|---|---|---|
| اول | ۴۲۴۶/۳ | ۲۵۵۷/۳ | ۸۰۴ | ۱۰۴۳ |
| دوم | ۴۰۲۱/۵ | ۲۴۶۹/۲ | ۷۹۳ | ۱۰۴۲/۷ |
| سوم | ۴۰۲۱/۵ | ۹۳۶/۸ | ۴۴۱ | ۱۰۲۶/۵ |
| چهارم | ۴۲۴۶/۳ | ۲۱۱۵/۹ | ۷۵۱ | ۱۰۴۱/۱ |
| پنجم | ۴۰۲۱/۵ | ۲۰۴۵/۳ | ۷۴۲ | ۱۰۴۰/۸ |

**یافته‌ها و بحث**

هر طرح آبی برای پاسخ به نیازهای طراحی ازجمله تأمین اهداف طرح، اقتصادی بودن، واکنش مناسب در مقابل وقایع طبیعی (سیلاب و...) به طور مستقیم در گروی عوامل هیدرولوژیک است. بنابراین، شناخت عوامل و منابع آب‌های سطحی در برنامه‌ریزی، طراحی و مدیریت طرح‌های آبی و مهندسی ضرورت خواهد داشت. با شناخت و تعیین این عوامل، باید رابطهٔ متقابل آنها نسبت به هم و نسبت به اهداف طرح و با در نظر گرفتن وقایع طبیعی آینده به‌صورت کمی بیان شود.

**-تحلیل حساسیت مدل سیلاب طراحی**

در این تحقیق علاوه بر سناریوهایی که در مدل می‌توانند تغییر یک گزینه‌ای داشته باشند، بحث تحلیل حساسیت پارامترها در شبیه‌سازی سیلاب تک وقایع توسط مدل HEC-HMS در حوضهٔ گلاس انجام شد. با تغییر پارامترها (کاهش ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد و افزایش ۵، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد مقدار کمی عوامل ورودی CN به‌عنوان نمایندهٔ تغییر کاربری اراضی، مقدار بارش طراحی نمایندهٔ تغییر اقلیم در حوضه، مقدار زمان تأخیر آبراهه و زمان تأخیر حوضهٔ بالادست سد به‌عنوان نماینده تخمین سرعت سیلاب و روش‌های تجربی تخمین این پارامتر)، حساسیت مدل و دبی پیک طراحی نسبت به این تغییرات تعیین شده است. برای بررسی حساسیت عوامل با ثابت نگه داشتن همهٔ عوامل، یک عامل بین مثبت ۳۰ تا منفی ۳۰ درصد تغییر داده شد. مدل سیلاب طراحی بیشترین حساسیت را به مقدار بارش طراحی دارد. به گونه‌ای که مطابق جدول ۴، با ۳۰ درصد تغییر در آن، مقادیر سیلاب ۴۰ درصد تغییر می‌کند. این مورد که نشان‌دهندهٔ تغییر اقلیم و پتانسیل بارش حداکثر در حوضه است. تابع پراکنش ایستگاه‌های ثبات، نوع بارش (بارندگی و آب معادل برف)، نوع الگوی رگبار، روش تبدیل بارش به بارش جریان‌ساز، الگوی تلفات، نوع توزیع آماری منتخب، روش میانگین‌گیری، شدت بارش و منحنی‌های مدت- عمق و سطح (نمایندهٔ مرکز رگبارها، یکنواختی پخش در حوضه)، نوع بزرگی سد و دورهٔ بازگشت طراحی سرریز و... است. با توجه به حساسیت و اینکه این عامل به طور مستقیم در هزینهٔ سد تأثیر میلیاردی دارد، نیاز به بیشترین دقت در تعیین آن است.

دومین عامل مقدار شمارهٔ منحنی (CN) است که نمایندهٔ تلفات بارش و بارش مازاد جریان‌ساز حوضه، نفوذپذیری خاک، پوشش گیاهی، گروه هیدرولوژیک خاک، تغییر کاربری اراضی است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، با ۳۰ درصد تغییر در آن، سیلاب ۲۵ درصد تغییر می‌کند.

عامل زمان تمرکز و زمان تأخیر، تابع خصوصیات فیزیکی حوضه است و در مراحل بعدی حساسیت قرار دارند، به‌طوری که با ۳۰ درصد تغییر در آن، سیلاب حدود ۸ درصد تغییر می‌کند.

شایان ذکر است که زمان تأخیر آبراهه رفتار خطی و زمان تأخیر حوضه رفتار غیرخطی نشان می‌دهند. در زمان تأخیر حوضه در برآورد پایین (تخمین کمتر از حد واقعی) خطای زیادی حدود ۱۶ درصد ایجاد می‌کند، در حالی که مقدار برآورد بیشتر، این مقدار برابر ۵ درصد است، به این معنا که اگر مقدار زمان تمرکز حوضه کمتر برآورد شود، مقدار خطا در سیلاب طراحی خیلی بیشتر خواهد بود. این عامل نمایندهٔ مشخصات فیزیکی حوضه‌ها به‌عنوان معیارهای کامل حصول از وضعیت حوضه‌ها، می‌تواند پارامترهای مهمی را برای نیازهای طراحی در اختیار ما قرار دهد. خصوصیات فیزیکی حوضه روی ضرایب رواناب و شدت و ضعف دبی سیلاب‌ها و بیلان آبی یک حوضه تأثیر فراوانی دارد. مشخصات فیزیکی اندازه‌گیری و استخراج‌شده در راستای نیاز طرح، مساحت، محیط، شکل حوضه، طول و شیب آبراههٔ اصلی، شیب متوسط حوضه، منحنی هیپسومتری، ارتفاع متوسط حوضه مقادیر زمان تأخیر و زمان تمرکز حوضه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. سرعت حرکت آب روی سطح خاک، سرعت حرکت شیاری و سرعت حرکت آبراهه‌ای عوامل مستقیم تعیین زمان تأخیر و تمرکز حوضه و آبراهه هستند که اهمیت زیادی در مقدار سیلاب طراحی دارند.

جدول ۴. مقادیر آنالیز حساسیت سیلاب طراحی سد سردشت

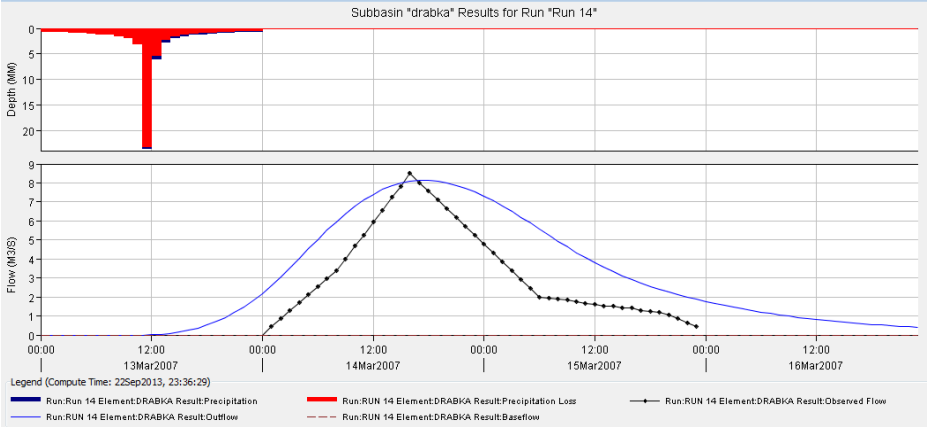
| درصد تغییر پارامترها | CN حوضه | دبی پیک طراحی سرریز (مترمکعب بر ثانیه) | زمان تأخیر رودخانه (دقیقه) | دبی پیک طراحی سرریز (مترمکعب بر ثانیه) | زمان تأخیر حوضهٔ بریسو – (دقیقه) | دبی پیک طراحی سرریز (مترمکعب بر ثانیه) | بارش طراحی (میلی‌متر) | دبی پیک طراحی سرریز (مترمکعب بر ثانیه) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۳۰ | ۸۷/۱ | ۵۲۸۹ | ۱۲۹۹ | ۳۸۵۲ | ۲۰۵۳ | ۴۰۴۰ | ۴۰۶ | ۵۹۰۸ |
| ۲۰ | ۸۰/۴ | ۴۹۵۶ | ۱۱۹۹ | ۳۹۸۶ | ۱۸۹۵ | ۴۱۲۶ | ۳۷۴ | ۵۳۴۱ |
| ۱۰ | ۷۳/۷ | ۴۶۰۷ | ۱۰۹۹ | ۴۱۲۰ | ۱۷۳۷ | ۴۱۹۳ | ۳۴۳ | ۴۷۹۴ |
| ۵ | ۷۰/۳۵ | ۴۴۲۸ | ۱۰۴۹ | ۴۱۸۴ | ۱۶۵۸ | ۴۲۲۴ | ۳۲۸ | ۴۵۱۹ |
| **۰** | **۶۷** | **۴۲۴۶** | **۹۹۹** | **۴۲۴۶** | **۱۵۷۹** | **۴۲۴۶** | **۳۱۲** | **۴۲۴۶** |
| -۵ | ۶۳/۶۵ | ۴۰۸۲ | ۹۴۹ | ۴۳۰۷ | ۱۵۰۰ | ۴۲۷۳ | ۲۹۶ | ۳۹۶۸ |
| -۱۰ | ۶۰/۳ | ۳۹۱۴ | ۸۹۹ | ۴۳۶۶ | ۱۴۲۱ | ۴۳۰۷ | ۲۸۱ | ۳۶۹۲ |
| -۲۰ | ۵۳/۶ | ۳۵۱۴ | ۷۹۹ | ۴۴۷۴ | ۱۲۶۳ | ۴۵۲۸ | ۲۵۰ | ۳۱۸۳ |
| -۳۰ | ۴۶/۹ | ۳۱۱۰ | ۶۹۹ | ۴۵۷۱ | ۱۱۰۵ | ۴۹۲۳ | ۲۱۸ | ۲۶۵۲ |

## نتیجه‌گیری

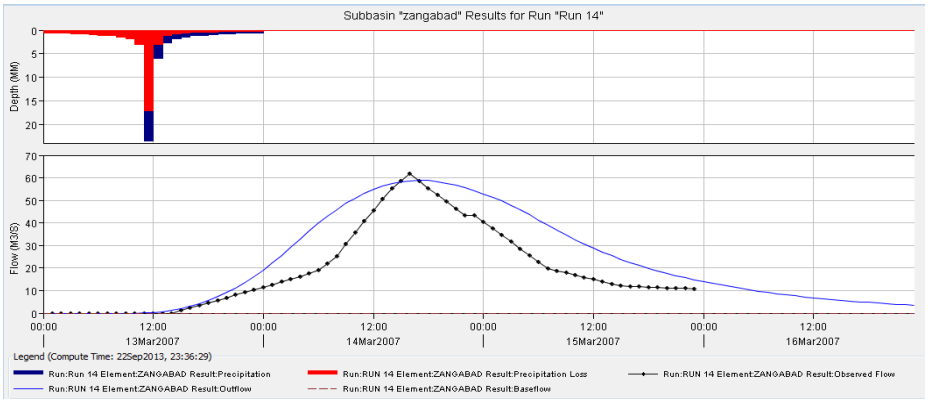
عوامل متعددی در فرایند روندیابی سیلاب تأثیرگذار است که هریک وزن خاصی در کاهش پیک سیلاب عبوری از سرریز دارند. در تحقیق حاضر سعی شد این عوامل شناسایی و آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر روندیابی سیل در مخزن سد سردشت بررسی شود. تأثیرگذاری این عوامل و حساسیت آن در هیدروگراف عبوری سؤال اصلی تحقیق حاضر بود که سعی شد با توجه به اطلاعات در دسترس جواب قابل قبولی به هریک داده شود. در شکل ۵، هیدروگراف مشاهداتی و برآوردشده در مدل بارش-رواناب حوضهٔ گلاس ارائه شده است.

- مقایسهٔ نتایج به‌دست‌آمده از روندیابی مخزن سد سردشت با سناریوهای مختلف نشان داد وجود سدهای بالادست و نیز پر و خالی بودن مخزن سد، همچنین باز و بسته بودن تخلیه‌کنندهٔ تحتانی اثر بسیار معناداری در هیدروگراف خروجی سرریز دارند.
- نتایج شبیه‌سازی در زنگ‌آباد با ضریب نش برابر ۰/۸ خوب ولی در درابکا و بریسو با ضریب نش حدود ۰/۵۵ در حد قابل قبول است. برای ارتقای کیفی شبیه‌سازی، سه عامل CN و زمان تأخیر میان حوضهٔ بریسو و زمان حرکت سیلاب در آبراههٔ گلاس بهینه‌سازی شده و این مقادیر واسنجی شدند. تغییر پارامترهای درابکا به دلیل کوچکی هیدروگراف تأثیر ناچیزی داشته و چشم‌پوشی شد.
- شمارهٔ منحنی یا CN، نمایندهٔ تغییر کاربری اراضی از جنگلی و مرتع به کشاورزی در منطقه است، با ۳۰ درصد تغییر در مقدار آن سیلاب ۲۵ درصد تغییر می‌کند. این عامل اگرچه در آورد و برداشت‌های رودخانه می‌تواند تأثیر زیادی داشته باشد، ولی در سیلاب‌های بزرگ رابطهٔ تقریباً خطی دارد.
- وجود سد سیلوه در بالادست حوضه مقدار دبی هیدروگراف خروجی سد سردشت را از ۲۵۵۷ مترمکعب بر ثانیه (سناریوی اول) به ۲۴۶۹ مترمکعب بر ثانیه (سناریوی دوم) یعنی حدود ۳/۵ درصد کاهش داد و نیز پر و خالی بودن مخزن سد مقدار دبی خروجی سد را از ۲۴۶۹ مترمکعب بر ثانیه (سناریوی دوم) به ۲۰۴۵ مترمکعب بر ثانیه (سناریوی پنجم) یعنی حدود ۱۷ درصد کاهش داد و نیز باز بودن تخلیه‌کنندهٔ تحتانی مقدار هیدروگراف خروجی از سرریز را از ۲۴۶۹ مترمکعب بر ثانیه (سناریوی دوم) به ۹۳۷ مترمکعب بر ثانیه (سناریوی سوم) کاهش می‌دهد.
- پیشنهاد می‌شود در تمامی سدها قبل از احداث

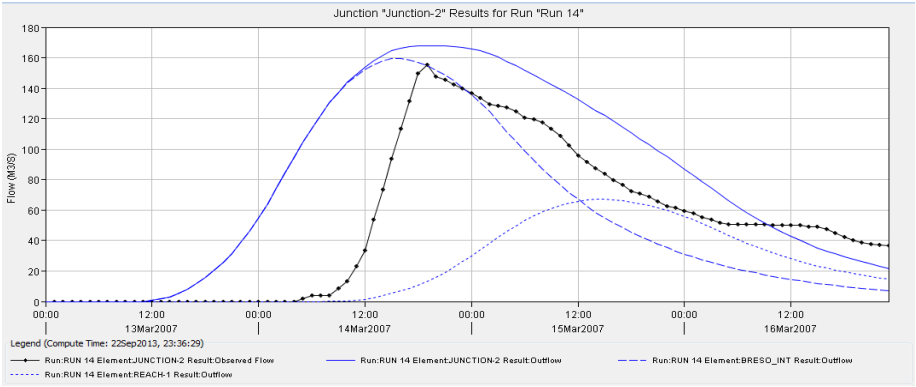
سد در مطالعات، آنالیز حساسیت روی پارامترهای مؤثر ازجمله مقدار بارش طراحی، CN حوضه و زمان تمرکز و زمان تأخیر حوضه و... صورت گرفته و نیز روندیابی مخزن سد با وجود سدهای بالادست و بدون سدهای بالا و نیز با مخزن پر و مخزن خالی و با تخلیه‌کنندهٔ تحتانی و بدون تخلیه‌کنندهٔ تحتانی صورت بگیرد تا با به دست آوردن هیدروگراف خروجی واقعی ابعاد سازه‌های هیدرولیکی سد بهینه شود. بحرانی‌ترین و اقتصادی‌ترین سازه‌ها بر اساس آن انتخاب شود. در این صورت، ریسک خطرهای احتمالی تخریب سد و سازه‌های هیدرولیکی کاهش می‌یابد.




**ایستگاه درابکا**

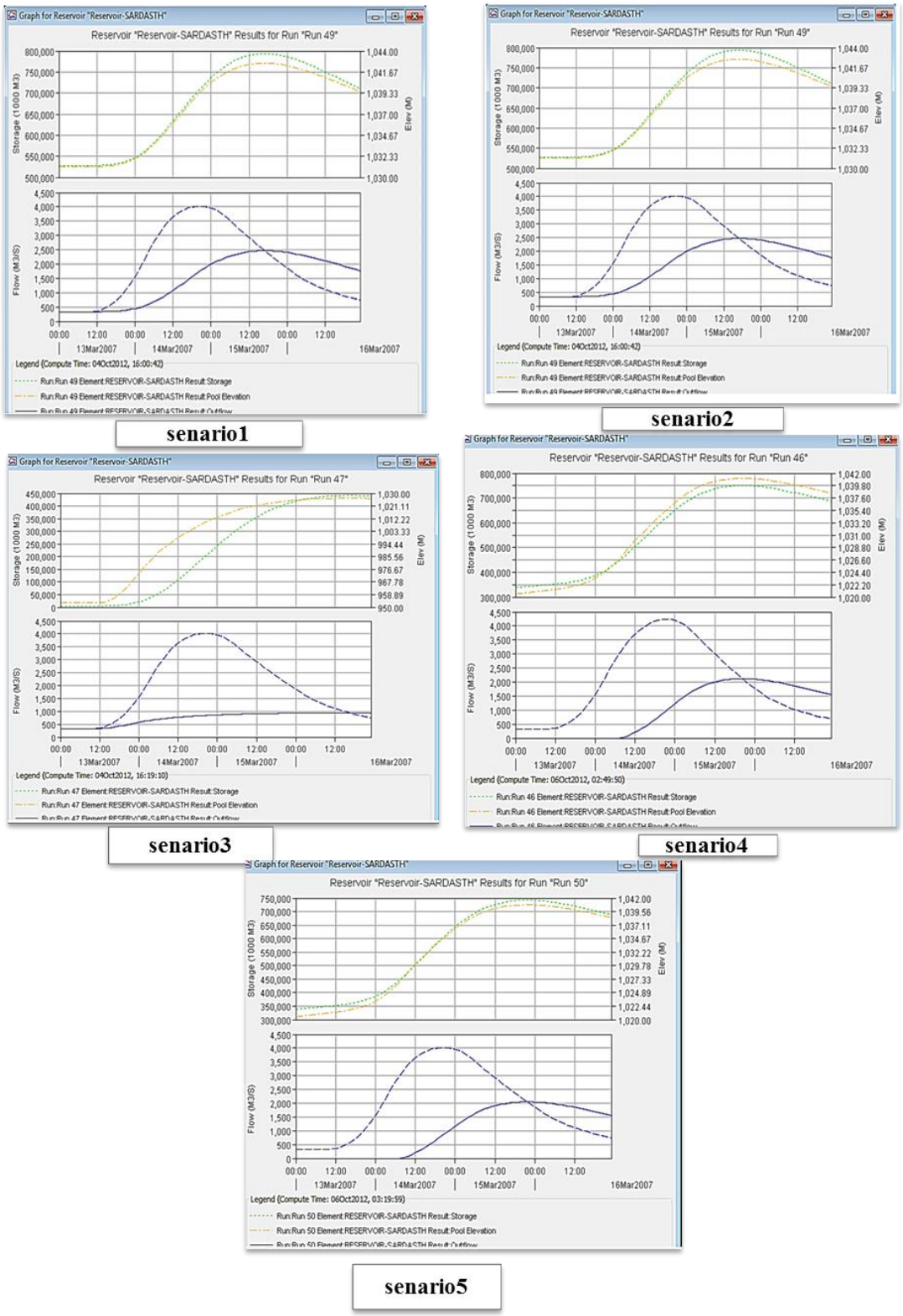



**ایستگاه زنگ‌آباد**

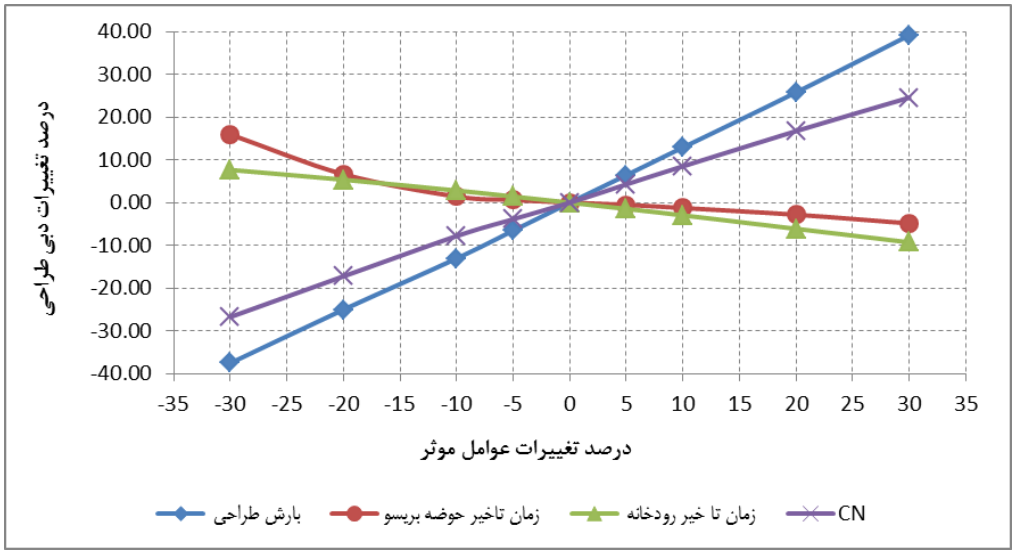



**ایستگاه بریسو**

**شکل ۴. نمودارهای کالیبراسیون بارش- رواناب حوضهٔ گلاس در ایستگاه‌های هیدرومتری در مرحلهٔ اول**




**شکل ۵. هیدروگراف مشاهداتی و برآوردشده در مدل بارش – رواناب حوضه در مرحلهٔ دوم**




**شکل ۶. درصد حساسیت سیلاب طراحی سد سردشت به عوامل مؤثر**

## منابع


[1].Zhang, Q.J, Zhang, Y.H, Effects of land-use pattern change on rainfall-runoff and runoff-sediment relations: A case study in Zichang watershed of the Loess Plateau of China. J. Environ. Sci.2004, 16, 436–442.

[2].Beven K.J., Rainfall-Runoff Modelling: The Primer. John Wiley & Sons: Chichester, UK; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2012.

[3].Halwatura D, Najim M, Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. Environ. Modell. Softw. 2013, 46, 155–162.

[4].USACE, U.A.C.O. Hydrologic Modeling System, HEC-HMS. Quick Start Guide; US Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2015.

[5]. Abbasi M, Mohseni Sarvi M, Khairkhah M, Khaliqi Sigarudi Sh, Rostamizadeh Q. and Hosseini M. Investigating the effect of watershed management activities at the time of concentration and curve of the basin using HEC-HMS model (Case study: Tehran watershed watershed), Range and Watershed Management Magazine (Iranian Journal of Natural Resources), 2010: 63 (13): 385 - 375.[ Persian]

[6]. Karimi N.Evaluation of different methods of flood hydrograph simulation using the software package HEC-HMS (Case Study: Watershed Chehelgazi). Journal of Water Research Iran. Fifth year / Number Nine / Winter. 2011؛ (38-29. [Persian]

[7]. Shiri K. Three methods of calibration unit hydrograph SCS; Clark and Schneider with HEC-HMS rainfall-runoff simulation case study: watershed Shapur. Second National Conference on Climate Change and Sustainable Development of Agriculture and Natural Resources Engineering, 26 August, Beheshti University, Tehran. 2015؛ COI Code article: CCASD02_072 Resources Republic.Of Iraq, Ashenab Consulting Engineers.[ Persian]

[8]. Hosseini M. The historic river flood forecasting hydrological model HEC-HMS, Journal of Research of quantitative geomorphology, fourth year, Issue 1, Summer.2016؛ 18 p. 133. [Persian]

[9].Kiani Salmi E, Honarbakhsh A and Abdollahi KH. Sensitivity analysis of soil moisture calculation model for continuous simulation in Beheshtabad basin, IRANIAN JOURNAL OF ECOHYDROLOGY, 2017: 4 (4): 1117 - 1127. [Persian]

[10].Samadian M, Nabipour Y, Mohammadi M and Akbarian H. Prioritizing the construction of mechanical watershed management structures and its impact on Debit's peak flood characteristics, 3rd National Hydrology Conference of Iran, 17-19 Sep. 2019- University of Tabriz.[ Persian]

[11].Asadi M, Jabbari I and Hesadi H. Flood modeling in arid and semi-arid regions using HEC-HMS model (Case study: Esteghlal catchment area of Esteghlal Minab Dam), Journal of Quantitative Geomorphology Research, 2019: 4 (4): 17 - 33.[ Persian]

[12]. Kathol J.P, Werner H.D, Trooien T.P. Predicting Runoff for Frequency based Storm using a Prediction Runoff Model.A.S.A.E. South Dakota. U.S.A.2003.

[13]. Celark S , Zheng J. Hydraulic and hydrological models to predict real-time assessment of the flood on the Yangtze River. JOURNAL OF THE AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION.2004؛Vol. 45, No. 3.

[14]. Hessari B.Hydrological Study Report Bardasur Dam Project, Ministry Of Water.2011.

[15]. Kuntiyawichai K. Effectiveness of Ubol Ratana and Lam Pao Reservoirs for Flood Mitigation in the Downstream Area of the Chi River Basin Using HEC-HMS Model. Advanced Materials Research,2014: 931-932: 785-790.

[16]. Silva D, Weerak O. and Srikantha H. Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC–HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka. Journal of Hydrology.2014:19:800-806.

[17].Choudhari K.Simulation of rainfall-runoff process using HEC-HMS model for Balijore Nala watershed, Odisha, India, INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMATICS AND GEOSCIENCES. 2014: Volume 5, No 2.

[18].Hua J. Flood-Runoff in Semi-Arid and Sub-Humid Regions, a Case Study: A Simulation of Jianghe Watershed in Northern China. Journal of Water.2015: ISSN 2073-4441 7, 5155-5172; doi:10.3390/w7095155

[19].Hydrological modelling of wadi Ressoul watershed, Algeria, by HEC-HMS model Imene Diabi SKHAKHFA ABCDEF, Lahbaci OUERDACHI AF.

[20].Romali N.S, Yusop Z, Ismail A.Z.Hydrological Modelling using HEC-HMS for Flood Risk Assessment of Segamat Town, Malaysia. Materials Science and Engineering.2018. 012029.

[21].Unduche F, Tolossa H, Senbeta D , Zhu E. Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a Canadian Prairie watershed. Hydrological Sciences Journal. 2018. ISSN: 0262-6667 (Print) 2150-3435.

[22].Xin Z, Shi S, Wu C , Wang L, Ye L. Applicability of Hydrological Models for Flash Flood Simulation in Small Catchments of Hilly Area in China. Open Geosciences Journal. 2019. Volume 11: Issue 1.

[23].Bitew G, TassewS, Mulugeta A , Belete K, Miegel L. 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 Journal. 2019. 6(1):21

[24].Belayneh A, Sintayehu G, Gedam K , Muluken T. Evaluation of satellite precipitation products using HEC‑HMS model. Modeling Earth Systems and Environment Journal. 2020.https://doi.org/10.1007/s40808-020-00792-z.

[25]. Hydrologic Engineering Center, Hydrologic Modeling System, HEC-HMS, User's Manual/Version 2.1,U.S. Army Corps Of Engineering, Davis, Ca. 2011.