

ساخت، ارزیابی و پیش‌بینی مدل سیلاب حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم با کمک مدل ریاضی HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه نازلوچای، ارومیه)

بهناز علیزاده کشتیبان^۱، بهزاد حصاری^{۲*} و مرتضی صمدیان^۳

۱. کارشناسی ارشد مهندسی آب، گرایش مهندسی منابع آب. ارومیه، ایران.
۲. دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه ارومیه، گروه مهندسی آب و پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دکتری هیدرولوژی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۳. دکتری علوم و مهندسی آب، منابع آب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، ارومیه، ایران.

چکیده

در مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبریز محاسبه‌ی دبی اوج برای شناسایی کامل اثرات سیل و کاهش میزان خسارات امری ضروری 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 ایجادکننده رواناب به راحتی ساده کرد. ساخت مدل حوضه نیاز به جوابگویی مدل در دبی‌های کم و دبی‌های بزرگ (دوره بازگشت بالا) دارد که برای هر دو باید مدل جوابگویی نیازها باشد. در این تحقیق نظر به عدم وجود باران‌سنج ثبات در حوضه مورد مطالعه؛ بر اساس شش رویداد رگبار متناظر مربوط به ایستگاه کمپ ارومیه به منظور شبیه‌سازی و اعتبارسنجی داده‌های سیلاب استفاده شد. بدین‌سان چهار واقعه رگبار جهت شبیه‌سازی و واسنجی و دو واقعه رگبار جهت صحت کار گرفته شد. ضمناً واسنجی برای پارامترهای شماره منحنی، زمان تأخیر و تلفات اولیه انجام شد. پس از واسنجی مدل، برای اطمینان از دقت مدل شبیه‌سازی‌شده و مقادیر واسنجی شده، اعتبارسنجی مدل با داده‌های جدید انجام گرفت. نتایج نشان داد هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده تطبیق قابل قبولی با هیدروگراف مشاهداتی دارد. شاخص‌های ارزیابی R^2 و $RSME$ در این حالت به ترتیب برابر $0/90$ و $0/67$ در ایستگاه آباجالوسفلی و $0/86$ و $0/34$ در ایستگاه تپیک می‌باشند. مقدار R^2 در همه موارد، در زیر سطح 5% معنی‌دار است. متوسط شاخص ناش-ساتکلیف در حد عالی است و به‌طور کلی متوسط درصد خطای دبی پیک، زیر 10% و خطای نسبی زمان پیک، زیر 3% درصد است. برای ساخت مدل برای سیلاب‌های بزرگ، رگبار بارش با دوره بازگشت‌های مختلف حوضه وارد مدل شده و دبی اوج هر دوره بازگشت در محل ایستگاه انتهایی آباجالو سفلی در رودخانه نازلو چای شبیه‌سازی گردید. نتایج مقایسه برآورد سیلاب مقادیر مشاهداتی سیلاب رودخانه (Q1) و محاسبه شده با مدل HEC-HMS (Q2) در دوره بازگشت ۲۵ سال به ترتیب برابر $196/1$ و $198/9$ مترمکعب بر ثانیه و در دوره بازگشت ۵۰ سال به ترتیب برابر $235/2$ و $255/1$ مترمکعب بر ثانیه برآورد گردید و خطا در دوره بازگشت‌های پائین تا 10000 ساله بین ۳ تا ۷ درصد بوده است که نشان از تطابق بالای مقادیر شبیه‌سازی‌شده با مشاهداتی می‌باشد. همچنین با بررسی درصد تغییرات بارش نسبت به شرایط فعلی و مقایسه با سناریوهای تغییر اقلیم نتایج مؤید آن است که در سناریوی خوش‌بینانه ($RCP_{2.6}$) در دوره بازگشت‌های ۱۰ سال، ۱۰۰ سال و ۱۰۰۰ سال؛ به ترتیب 9% ، 42% و 95% بوده که همین مقایسه در سناریوی ($RCP_{4.5}$) و در دوره بازگشت‌های فوق به ترتیب 12% ، 46% و 98% و در سناریوی ($RCP_{8.5}$) در دوره بازگشت‌های ۱۰ سال، ۱۰۰ سال و ۱۰۰۰ سال؛ به ترتیب 6% ، 27% و 53% مشاهده گردید. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه سیلاب‌های تاریخی رودخانه با سیلاب‌های آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم با دوره بازگشت‌های مختلف به کمک مدل LARS-WG نشان‌دهنده افزایش گسترده‌ی میزان این سیلاب‌ها در سال‌های آتی است.

کلیدواژه‌ها: بارش - رواناب، سیلاب، HEC-HMS، گزارش ششم تغییر اقلیم، دریاچه ارومیه.

محدودیت منابع آب و اثرات مخرب ناشی از وقوع سیل، کارشناسان منابع آب را در پی آن داشته‌اند تا بتوانند روابطی را بین مقادیر بارش و رواناب حاصل از آن در حوضه‌های آبریز و در شرایط مختلف زمانی و مکانی بیابند. سیلاب‌ها جزو فراوان‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی هستند که همه‌ساله موجب آسیب جانی و مالی سنگینی می‌شوند. آسیب‌های سیلاب به دلیل دست‌کاری انسان در سازه‌های رودخانه‌ای و ساخت‌وساز در حریم رودخانه‌ها دارای روند صعودی است (Afifi, 2019). مدل‌سازی بارش-رواناب یکی از راه‌حل‌های کلیدی در هیدرولوژی برای دستیابی به خصوصیات سیلاب، مانند میزان دبی اوج و زمان رسیدن به اوج به شمار می‌رود. مدل هیدرولوژیکی یک نمایش ساده از یک سیستم هیدرولوژیکی موجود است که به درک، پیش‌بینی و مدیریت منابع آب کمک می‌کند. مدل‌های هیدرولوژیکی یک جزء حیاتی و ابزار ضروری برای منابع آب، برنامه‌ریزی و مدیریت زیست‌محیطی هستند. شهرنشینی و صنعتی شدن به طور قابل توجهی بر فرآیندهای هیدرولوژیکی در سطح محلی و جهانی به دلیل گسترش سریع جمعیت در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، برنامه‌ریزی توسعه و مدیریت منابع مختلف آب باید نیازهای آبی متعدد را برآورده کند. با این حال، به دست آوردن داده‌های هیدرومتری به دلیل این‌که نمی‌توان در هر نقطه اندازه‌گیری نمود همیشه دشوار بوده است (Sahu et al., 2023)؛ بنابراین اهمیت استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و روش‌های مصنوعی دوچندان می‌شود. نرم‌افزار HEC-HMS یک مدل هیدرولوژیکی از نوع شبیه‌سازی (با قابلیت بهینه‌سازی پارامترها) است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژیکی ارتش آمریکا تولید شده است. همچنین این مرکز مهندسی در راستای افزایش دقت اطلاعات ورودی به نرم‌افزار HEC-HMS، الحاقیه‌ای را به‌عنوان HEC-GeoHMS ایجاد کرده است (Jahanbakhsh Assal et al., 2015). به منظور بررسی پژوهش‌های مختلف صورت گرفته در خصوص مدل‌سازی بارش و رواناب به کمک مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS می‌توان به مطالعاتی من‌جمله Ren & Cao (2023) اشاره نمود. در این تحقیق به کمک فناوری‌های سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی روند تغییرات کاربری اراضی در شنیانگ را از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۸ بررسی و با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS مشخصات سیلاب حوضه رودخانه Xiuhui را استخراج نمودند. نتایج نشان داد مدل HEC-HMS مقادیر شبیه‌سازی خوبی در حوضه رودخانه Xiushui داشته که می‌تواند پیش‌بینی سیل را در این منطقه انجام دهد. (Din et al., 2019) با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، رودخانه براندو در ناحیه Buner شبیه‌سازی نمودند. مدل واسنجی شده (دوره ۱۹۸۶-۱۹۸۸) با مجموعه داده‌های دوره (۲۰۰۹-۲۰۱۳) اعتبارسنجی شد. نتایج حاکی از آن بود که مدل می‌تواند به‌عنوان ابزار پشتیبانی تصمیم در طراحی و بهره‌برداری استفاده شود. (Gebre (2015) به پیش‌بینی جریان حوضه رودخانه آبی نیل فوقانی با کمک مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS پرداخت. در این بررسی برای واسنجی از داده‌های (۱۹۸۸-۲۰۰۰) و برای اعتبارسنجی از داده‌های (۲۰۰۱-۲۰۰۵) و برای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص‌های ناش-ساتکلیف (ENS) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد. طبق اظهارات ایشان نتایج به‌دست‌آمده رضایت‌بخش بوده و مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای شبیه‌سازی رواناب قابل قبول است. (El-Bagoury & Gad (2024) در تحقیقی؛ سیل‌های ناگهانی حوضه "النویه و الرشرش" در جنوب شرقی قاهره مصر (سمت غربی رود نیل با مساحت حوضه ۹۸۵/۵ کیلومتر مربع) که اخیراً با چندین سیل مخرب مواجه شده است که با استفاده از نرم‌افزار سیستم تجزیه و تحلیل مرکز مهندسی هیدرولوژیکی رودخانه و سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی (HEC-RAS و HEC-HMS) ارزیابی و پیش‌بینی کردند. سطوح خطر سیل، به‌عنوان بالا (۳۵/۶۰٪)، شدید (۲۱/۹۰٪) و متوسط (۲۱/۱۲٪) در مناطق کم‌خطر و بسیار کم‌خطر طبقه‌بندی شد. این مطالعه نشان داد که مناطق نزدیک به دهانه رودخانه نیل با تأثیرات سیل بیشتر ناشی از باران‌های سیل‌آسا مواجه شده‌اند. نتایج این مطالعه ساخت پنج سد به ارتفاع ۱۰ متر را برای ایجاد دریاچه‌های ذخیره توصیه می‌کند. این رویکرد یکپارچه می‌تواند برای ارزیابی خطر سیل و کاهش آن در مناطق قابل‌مقایسه اعمال شود. (Sahu et al (2023) در تحقیقی روش‌های مختلف شبیه‌سازی تلفات هیدرولوژیکی شامل (SCS-CN)، (SMA)، (G.A) و (D.C) به کمک ترم‌های مختلف را بر اساس روش ارزیابی Nexus مورد بررسی قرار دادند. بررسی

نتایج نشان داد که مدل HEC-HMS به خوبی برای الگوهای زهکشی حوضه عمل نموده و روش SCS-CN و روش SMA گسترده‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی مبتنی بر رویداد و پیوسته هستند. در مقایسه با سایر مدل‌ها، رویکرد اتلاف D.C در HEC-HMS کمترین استفاده را دارد، اما به نظر ساده است و نتایج دقیقی را ارائه می‌دهد. (Shahedi & Nabidhendi (2023) در پژوهشی با استفاده از نقشه سیل خیزی و مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، رفتار زیر حوضه‌های صفارود را در دوره بازگشت مختلف مورد بررسی قرار دادند. با حذف اثر هیدرولوژیکی زیر حوضه‌های یادشده در هر سطح هم‌پیمایش، هیدروگراف سیلاب خروجی شبیه‌سازی گردید. بررسی نتایج نشان می‌دهد زیر حوضه‌های سطح هم‌پیمایش ۱ و ۲ واقع در خروجی حوضه صفا رود با شاخص ۰/۶۷ و ۰/۷۸ دارای کمترین تأثیر و در مقابل زیر حوضه‌های واقع در سطح ۴ با شاخص ۱/۱۰ دارای بیشترین تأثیر بر دبی اوج سیلاب خروجی از حوضه می‌باشند. (Heydari Bi Safar et al. (2020) در تحقیقی عوامل شناسایی شده و آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر دبی پیک طراحی مخزن سد سردشت را با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS بررسی نمودند. نتایج نشان داد سیلاب طراحی بیشترین حساسیت را به مقدار بارش طراحی دارد، به طوری که با ۳۰ درصد تغییر در بارش، مقادیر CN، زمان تأخیر آبراهه و سیلاب طراحی به طور خطی به ترتیب ۴۰، ۲۵ و ۸ درصد تغییر می‌کند، ولی در $\pm 30\%$ درصد زمان تأخیر حوضه، تغییرات سیلاب به طور غیرخطی ۵ درصد در تخمین بالا و ۱۶ درصد در تخمین پایین را سبب می‌شود. در این تحقیق استخراج الگوهای تبدیل بارش روزانه به رگبارهای کوتاه‌مدت و ارائه‌ی مدل بارش-رواناب HEC-HMS جهت برآورد حجم و دبی ساعتی سیلاب در حوضه نازلو چای مورد بررسی قرار گرفته است. (Pakdel et al. (2018) مدل بارش-رواناب حوضه‌ی سد دوستی را با استفاده از مدل HEC-HMS شبیه‌سازی کردند. بدین منظور داده‌های مشاهداتی بارش و رواناب، دوره آماری ۲۰۰۹-۲۰۰۴ برای واسنجی و سال‌های ۲۰۱۳-۲۰۱۰ برای صحت‌سنجی انتخاب و برای تعیین عملکرد مدل HEC-HMS، از معیارهای ضریب تعیین (R^2)، ضریب ناش-ساتکلیف (NSE)، خطای Bias و RMSE استفاده شد. آنان به این نتیجه رسیدند که مدل، در سال ۲۰۱۱ (دوره صحت‌سنجی)، با ضریب تعیین ۰/۸۹، ضریب ناش-ساتکلیف ۰/۸۸، معیارهای خطای ۰/۱۶ و ۰/۵ بهترین عملکرد را دارد. به‌طورکلی نتایج مدل HEC-HMS، رضایت‌بخش و قابل‌قبول بوده است. (Dimri et al. (2022) در تحقیقی به شبیه‌سازی جریان در حوضه رودخانه باگیراتی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS پرداختند. این زیر حوضه بخشی از حوضه گانگا است و در ایالت هیمالیا اوتاراکنند هند واقع شده است. مخزن سد تهری یک مخزن تنظیم فصلی است و تغییر در رژیم هیدرولوژیکی حوضه رودخانه ایجاب می‌کند که استراتژی‌های عملیاتی آن تغییر کند. مدل HEC-HMS برای پنجره‌های زمانی یک و سه‌ساله از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ شبیه‌سازی شده است که شامل واسنجی و اعتبارسنجی مدل می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده تطابق نزدیک‌بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده است. کارایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی جریان‌های جریان در خروجی تهران در این تحقیق به وضوح نشان داده شده است. سابقه‌ی تحلیل برآورد سیل با استفاده از مدل‌های ریاضی مثل HEC-HMS از اعتبار خوبی برخوردار است. سابقه‌ی تحلیل روش‌های انتخاب بارش، تبدیل بارش به بارش جریان ساز (رواناب مستقیم) و تبدیل بارش جریان ساز به هیدروگراف و جداسازی دبی پایه و روش‌های روندیابی سیل در HEC-HMS به‌وفور در منابع وجود دارد. محققان مختلف من‌جمله (Oleyblo (2012)، (Majidi (2012)، (Halwatura (2013) به برآورد سیلاب با روش‌های هیدرولوژیکی و نویسندگانی همچون (Ratod, Asadi (2013)، (Sampot (2015)، (Haibo, Visweshwaran (2017)، (Darji (2019)، (Azamat (2017)، (Bihovian (2017) روش‌های مختلف مدل‌سازی را برای به دست آوردن بهترین مدل مناسب در شرایط گوناگون هیدرولوژیکی و مقایسه آن‌ها با هم پرداختند و نهایتاً HEC-HMS به عنوان یک مدل ریاضی خوب به منظور تحلیل رویدادهای هیدرولوژی معرفی نمودند. ساخت مدل با دوره بازگشت‌های مختلف و صحت‌سنجی آن با سیلاب مشاهداتی دوره بازگشت‌های بزرگ کمترین بررسی را داشته است و این تحقیق سعی در پرسش این موارد دارد. حوضه مورد مطالعه معروف به نازلو چای یکی از رودخانه‌های اصلی ۱۴ گانه است که به دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد. سیلاب‌ها اثر

شگفت‌انگیزی در احیا تالاب‌ها و دریاچه‌ها دارند و نازلو چای به‌عنوان یکی از حوضه‌های بااهمیت حوضه دریاچه ارومیه و یک نمونه شاخص از این حوضه می‌تواند در احیا دریاچه ارومیه نقش بسزایی داشته باشد. استخراج الگوهای تبدیل بارش روزانه به رگبارهای کوتاه‌مدت و ارائه‌ی مدل بارش-رواناب HEC-HMS جهت برآورد حجم و دبی ساعتی سیلاب برای اولین بار در محدوده مطالعاتی مورد مطالعه قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه معروف به نازلو چای یکی از رودخانه‌های اصلی ۱۳ گانه است که به دریاچه ارومیه تخلیه می‌گردد. این حوضه در استان آذربایجان غربی و در غرب دریاچه ارومیه، در شمال غربی شهرستان ارومیه و ۳۰ کیلومتری آن واقع شده است. این حوضه، از ارتفاعات مرزی جاری شده، به‌طوری‌که قسمتی از آن در حوضه مارمیشو و مرز سرو از کشور ترکیه سرچشمه می‌گیرد. این حوضه با کشور ترکیه دارای مرز مشترک بوده و مساحت آن بالغ بر ۲۰۳۰ کیلومترمربع هست، که حدود ۵۵۰ کیلومترمربع آن در کشور ترکیه واقع شده است. بیشینه ارتفاع این حوضه ۳۷۴۲،۱ متر و کمترین ارتفاع آن ۱۲۹۱،۵ متر و میانگین ارتفاع آن ۲۵۱۶،۷۷ متر از سطح دریا است. به منظور معرفی حوضه مورد مطالعه به نرم‌افزار HEC HMS محدوده مورد مطالعه به ۱۲ زیر حوضه تقسیم‌بندی شد؛ که بیشترین مساحت مربوط به زیر حوضه شماره ۵ و کمترین مقدار مربوط به زیر حوضه شماره ۱۰ می‌باشد. در شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور، استان و جانمایی زیر حوضه‌ها نشان داده شده است. در این تحقیق، ایستگاه‌های هیدرومتری تپیک به عنوان ایستگاه بالادست حوضه و آباجالوسفلی به عنوان ایستگاه پائین‌دست به ترتیب به عنوان ایستگاه‌های مبنا ورود به دشت و خروجی دشت نازلو انتخاب شده‌اند. ضمناً ایستگاه‌های تبخیر سنجی تپیک، آباجالوسفلی و باران‌سنجی کریم‌آباد به عنوان ایستگاه‌های معرف بارش منطقه انتخاب شدند.

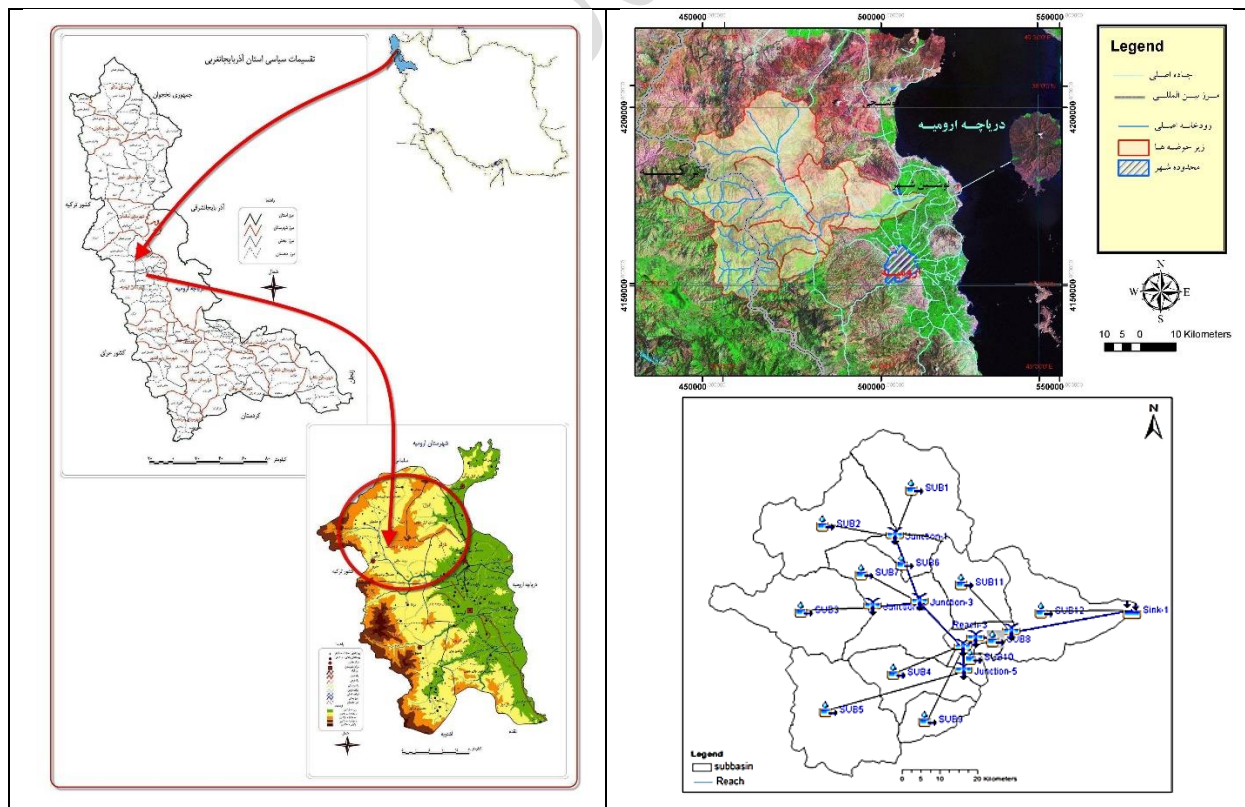


Figure 1. The Location of the studied area in the country, province and location of sub-basins

ساختار مدل بارش-رواناب

پیش‌بینی رواناب یک کار ضروری در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. از آنجایی که عوامل و پارامترهای مؤثر بر فرآیند بارندگی-رواناب دارای تغییرات مکانی و زمانی هستند، با عدم قطعیت و پیچیدگی قابل توجهی درگیر هستند که منجر به برخی خطاها در فرآیند مدل‌سازی می‌شود و آن را به یک کار بسیار دشوار تبدیل می‌کند. مدل‌سازی سیلاب برای تجزیه و تحلیل سیل و درک تأثیر بارندگی بر رواناب بسیار مهم است. در این بررسی قبل از ورود به بحث روند یابی سیلاب طراحی، پیش‌فرایند بارش رواناب منطقه مورد آزمون و بررسی قرار گرفت، ابتدا سعی گردید چند واقعه بارش رواناب شبیه‌سازی شده و پارامترهای مدل بهینه گردیدند. مدل هیدرولوژیکی مورد استفاده در این تحقیق، مدل ریاضی HEC-HMS (مرکز مهندسی هیدرولوژیکی سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیکی) است. این مدل دارای سه بخش اصلی به نام‌های مدل حوضه، مدل اقلیمی و شاخص‌های کنترلی است. همچنین این مدل قابلیت واسنجی و تخمین پارامترهای مورد نیاز در حوضه را نیز دارا هست. این مدل پس از اعتبارسنجی می‌تواند برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوضه و پیش‌بینی اثر تغییر پارامترها به کار رود. فرآیند مورد استفاده به منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل مطابق شکل ۲ ارائه شده است. توزیع تیپ رگبارهای منطقه بر اساس مقایسه متوسط چندین رگبار با نمودار استاندارد SCS به صورت نوع رگبار SCS-I تعیین گردید.

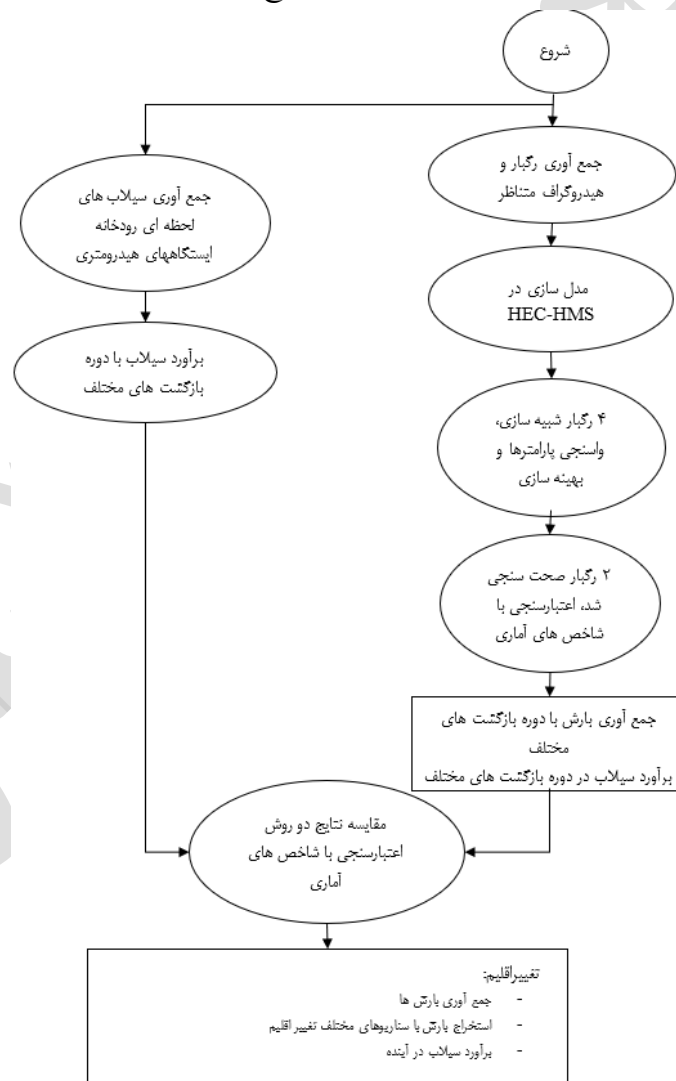


Figure 2. Flowchart used to simulate rainfall-runoff

روش محاسبه تلفات بارش از روش شماره منحنی CN و برای روند یابی سیلاب رودخانه از روش تأخیر یا lag (در این روش جریان ورودی به آبراه بدون تغییر و فقط به اندازه زمان تأخیر تبدیل به جریان خروجی از آبراه می‌شود) استفاده شد. طبق

توضیحات صدرالاشاره برای واسنجی مدل بارش- رواناب، از دبی سیلاب و رگبار متناظر ایستگاه‌های هیدرومتری "تپیک" و "آباجالوسفلی" که از نظر کمیت و کیفیت اطلاعات داده‌های پایه نسبتاً کامل بودند انتخاب و استفاده شد. ضمناً در این تحقیق نظر به عدم وجود باران‌سنج ثابت در حوضه مورد مطالعه؛ بر اساس شش رویداد رگبار متناظر مربوط به ایستگاه "کمپ ارومیه" (نزدیک‌ترین ایستگاه به حوضه) به منظور شبیه‌سازی و اعتبارسنجی داده‌های سیلاب استفاده شد. بدین‌سان چهار واقعه رگبار جهت شبیه‌سازی، واسنجی و دو واقعه رگبار جهت صحت‌سنجی در دوره برگشت‌های مختلف به کار گرفته شد. در جدول ۱، مشخصات دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی ایستگاه‌های مذکور ارائه شده است. ناگفته نماند که الگوهای رگبارها بر اساس داده‌های ایستگاه کمپ ارومیه استخراج شد، ولی مقدار رگبار با مقدار باران همان روز در ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه تصحیح گردید. اطلاعات زیر حوضه‌ها و اتصال شبکه رودخانه‌ها از مدول حوضه وارد شد و ورود آمار سیلاب و رگبارهای متناظر از طریق مدول بارش انجام شده و برای گام زمانی محاسبات از مشخصه کنترل استفاده شد. در نهایت با استفاده از بحث بهینه‌سازی، ضرایب مؤثر در رفتار هیدرولوژیک حوضه شامل زمان تمرکز و CN و زمان تأخیر آبراهه تثبیت گردید. در شکل ۳، نقشه خاکشناسی (a) و کاربری اراضی و پوشش گیاهی (b) منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

Table 1. Specifications of calibration and validation courses of Abajalu station and Tepik stations

Row	Term	Station	The date of the storm and the corresponding hydrograph	storm depth-mm	Base time hydrograph	Peak discharge (Cms)
1	calibration	Abajalu	2011-06-11	29.8	9	12.6
2		Abajalu	2011-05-07	6.60	11	9.90
3		Tepik	2009-09-17	10.9	9	24.3
4		Tepik	2012-04-11	2.00	11	8.90
5	validation	Tepik	2011-04-05	18.3	11	24.0
6		Abajalu	2015-05-07	3.80	11	23.2

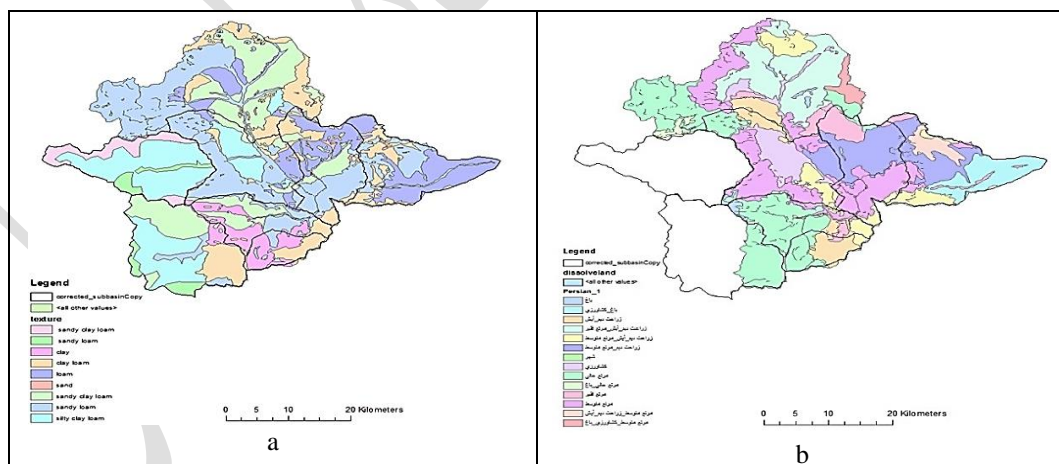


Figure 3. Geological map (a) and land use and vegetation (b) of the studied area

تغییر اقلیم و سناریوهای انتشار

از آن‌جای که مهم‌ترین ورودی مدل‌های گردش عمومی جو، مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی بوده و از طرفی محاسبه و تعیین انتشار این گازها در دوره‌های آتی و در مقیاس‌های منطقه‌ای به طور قطعی امکان‌پذیر نبوده و پیش‌بینی وضعیت اقلیم منطقه‌ای تحت پدیده تغییر اقلیم مشکل می‌باشد، از این‌رو سناریوهای انتشار مختلفی من‌جمله سناریوهای انتشار برای آن‌ها ارائه شده است؛ اما باید توجه داشت که یک سناریوی اقلیمی؛ پیش‌بینی کننده آب و هوا نیست و یک بحث مدیریتی است. سناریوهای RCP با احتمال تغییرات وسیع در فعالیت‌های انسانی و انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده همراه

می‌باشند. سناریوی RCP2.6 (خوش‌بینانه) توسط گروه مدل‌سازی IMAGE¹ از موسسه ارزیابی محیط‌زیست کشور هلند طراحی شده که در این سناریو میزان غلظت گاز دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ را در حدود ۴۹۰ ppm و همچنین جمعیت جهان را حدوداً ۷ میلیارد نفر و همچنین اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را تا حدود ۲/۶W/m² اعلام نمودند. در سناریوی RCP2.6 رشد فناوری افزایش خواهد یافت و میزان استفاده از انرژی‌های نو به‌جای انرژی و سوخت فسیلی افزایش خواهد داشت و در نهایت میزان تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای با کاهش روبرو خواهد گردید. سناریوی RCP4.5 (بینابینی) توسط گروه مدل‌سازی MiniCAM طراحی شده که در این سناریو میزان غلظت گاز دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ در حدود ۶۵۰ ppm و همچنین نرخ رشد جمعیت کمتر از سناریوی RCP2.6 خواهد شد و همچنین اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را تا حدود ۴/۵W/m² اعلام نمودند. در سناریوی RCP4.5 رشد فناوری نسبت به سناریوی RCP2.6 کاهش خواهد یافت و میزان استفاده از انرژی‌های نو به‌جای انرژی و سوخت فسیلی نیز کاهش خواهد داشت و در نهایت میزان تولید و انتشار گازهای گلخانه‌ای با افزایش روبرو خواهد گردید. سناریوی RCP8.5 (بدبینانه) توسط گروه مدل‌سازی MESSAGE^۲ و موسسه بین‌المللی تحلیل سیستم‌های کاربردی در کشور اتریش طراحی شده که در این سناریو میزان غلظت دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ در حدود ۱۹۶۰ ppm و همچنین رشد جمعیت در حدود ۱۲ میلیارد نفر خواهد شد و همچنین اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را تا حدود ۸/۵W/m² اعلام نمودند. در سناریوی RCP8.5 رشد فناوری به دلیل افزایش تولید ناخالصی داخل کشور نسبت به سناریوی RCP2.6 کاهش خواهد یافت (Samadian et al., 2023).

شاخص‌های ارزیابی

در این مطالعه، از شاخص‌های ارزیابی جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) و ضریب تعیین R²، درصد خطای زمان پیک (PETP) و درصد خطای دبی پیک (PEP) و به شرح روابط ۱، ۲ و ۳ استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n-1}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$R^2 = \left[\frac{n(\sum_{i=1}^n (S_i O_i)) - (\sum_{i=1}^n (S_i))(\sum_{i=1}^n (O_i))}{\sqrt{[n\sum_{i=1}^n (S_i^2) - (\sum_{i=1}^n S_i)^2][n\sum_{i=1}^n (O_i^2) - (\sum_{i=1}^n O_i)^2]}} \right]^2 \quad \text{رابطه (۳)}$$

رابطه (۴)

$$PeTp = \left(1 - \frac{Tpc}{Tpo}\right) * 100 \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$PeQp = \left(1 - \frac{Qpc}{Qpo}\right) * 100$$

که در آن، S_i برابر با مقادیر محاسباتی، O_i برابر با مقادیر مشاهداتی، \bar{O}_i برابر با متوسط مقادیر مشاهداتی و n نیز برابر با تعداد سری زمانی، Tpo، Tpc، Qpo، Qpc، دبی و زمان پیک محاسباتی و مشاهداتی هستند (Adib et al., 2010, Nash and). از آنجایی که هدف بررسی همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و برآوردی، برآورد میزان خطا و بررسی کارایی مدل منتخب است به ترتیب از آماره‌های ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب کارایی نش ساتکلیف استفاده شد. ضریب ناش از -∞ تا ۱ تغییر می‌کند. اگر مقدار NSE برابر یک باشد، تناسب کاملی بین داده‌های

¹ Integrated Assessment Modeling Framework Fescribing Global Environmental Change

² Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their GeneralEnvironmental

مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد. دامنه شاخص‌های آماری شامل، اگر $0.75 < NSE < 1$ باشد، وضعیت اعتبارسنجی مدل، خیلی خوب، اگر $0.75 < NSE < 0.65$ باشد، وضعیت اعتبارسنجی مدل، خوب، اگر $0.65 < NSE < 0.50$ باشد، وضعیت اعتبارسنجی مدل، رضایت‌بخش، اگر $0.50 < NSE$ باشد، وضعیت اعتبارسنجی مدل، غیرقابل قبول است.

نتایج و بحث

همان‌طور که قبلاً بدان اشاره شد در این تحقیق نظر به عدم وجود باران‌سنج ثبات در حوضه مورد مطالعه؛ بر اساس شش رویداد رگبار متناظر مربوط به ایستگاه کمپ ارومیه به منظور شبیه‌سازی و اعتبارسنجی داده‌های سیلاب استفاده شد. بدین‌سان چهار واقعه رگبار جهت شبیه‌سازی و واسنجی و دو واقعه رگبار جهت صحت‌سنجی در دوره برگشت‌های مختلف به کار گرفته شد. ضمناً واسنجی برای پارامترهای شماره منحنی، زمان تأخیر و تلفات اولیه انجام شد. پس از واسنجی مدل، برای اطمینان از دقت مدل شبیه‌سازی شده و مقادیر واسنجی شده، اعتبارسنجی مدل با داده‌های جدید انجام گرفت. در جدول ۲ مشخصات محاسبه‌شده برای هر یک از زیر حوضه‌ها ارائه شده است.

Table 2. Values of calculated parameters of calculated characteristics for sub-basins in HEC-GeoHMS

sub-basins	Area (km ²)	Initial delay time values (hr)	Optimized delay time (hr)	Initial values of the curve number(CN)	Optimized curve number
1	240.61	60	88	75	70
2	230.11	60	112	80	70
3	245.02	65	95	80	70
4	125.78	25	25	85	85
5	488.43	40	33	80	75
6	77.80	20	20	85	80
7	138.33	18	18	85	80
8	22.66	10	10	75	70
9	100.33	20	20	85	80
10	5.00	8	8	85	80
11	41.90	15	15	70	65
12	208.00	40	27	80	75

در شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب نتایج آنالیز سیل‌ها در ایستگاه آباجالوسفلی و ایستگاه تپیک بعد از واسنجی و در شکل (۶) نتایج آنالیز سیل‌ها در همان ایستگاه‌ها در مرحله اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. جدول ۳ مقادیر خطای محاسبه‌شده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد.

بر اساس اشکال ذیل؛ در شکل (b) هیدروگراف شبیه‌سازی شده (نمودار قرمز) تطابق خوبی با هیدروگراف مشاهداتی (نمودار آبی) داشته است. شاخص‌های ارزیابی R^2 و RSME به ترتیب برابر 0.95 و 0.23 می‌باشند. این در حالی است که در شکل (a) هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی تا حدودی بیشتر برآورد داشته که در آن شاخص‌های ارزیابی R^2 و RSME به ترتیب برابر 0.82 و 0.37 می‌باشند.

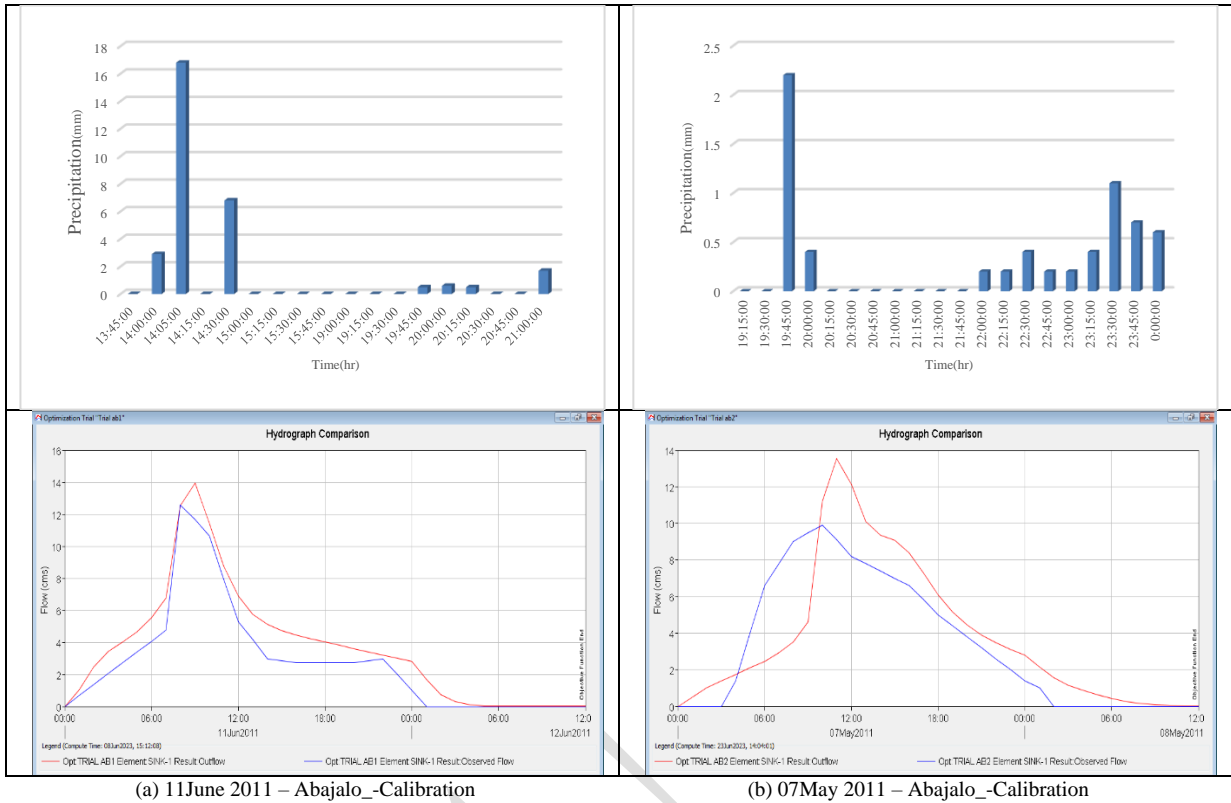


Figure 4. The simulated hydrograph compared to the observations for "Abajalu station" in daily and hourly intervals (in the calibration stage)

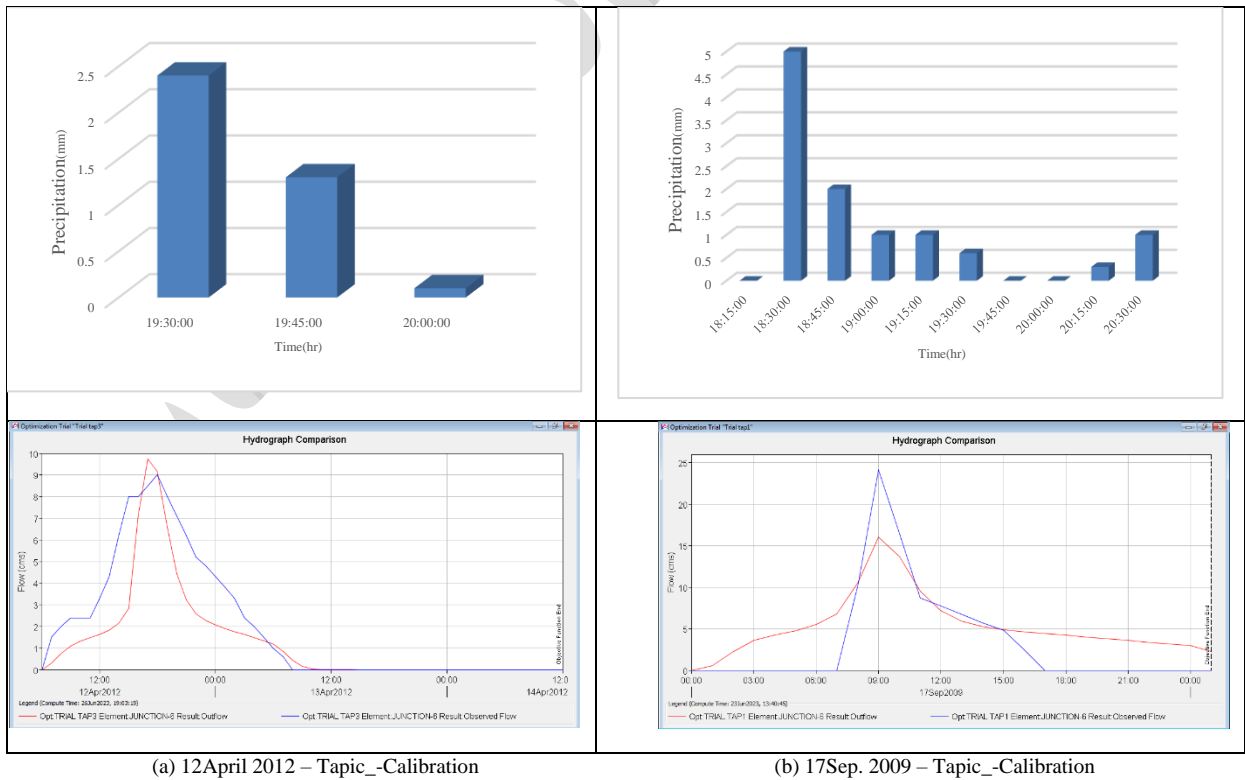
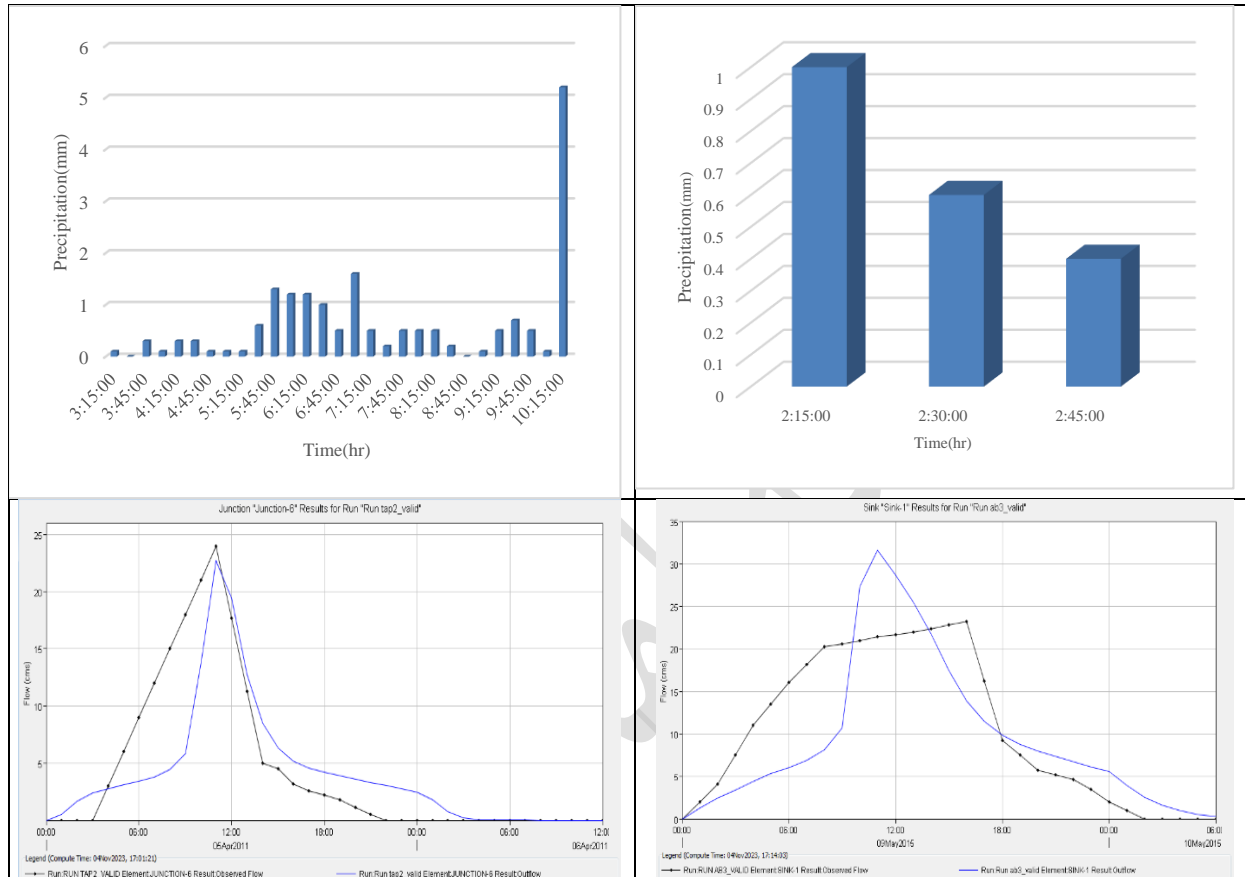


Figure 5. The simulated hydrograph compared to the observations for "Tepik station" in daily and hourly intervals (in the calibration stage)

در شکل (a) بر اساس هیدروگراف شبیه‌سازی شده تطبیق قابل قبولی با هیدروگراف مشاهداتی را نشان می‌دهد. شاخص‌های ارزیابی R^2 و RSME در این حالت به ترتیب برابر 0.90 و 0.67 می‌باشند. در شکل (b) نیز هیدروگراف شبیه‌سازی شده تطبیق خوبی با هیدروگراف مشاهداتی داشته که در آن مقادیر شاخص‌های ارزیابی R^2 و RSME در این حالت به ترتیب برابر 0.86 و 0.34 می‌باشند.



(a) 09May 2015 – Tapic -Validation
 (b) 05Apr. 2011 – Abajalo - Validation
 Figure 6. The simulated hydrograph (blue curve) compared to observations (black curve)

جدول ۳ نشان‌دهنده نتایج واسنجی و صحت سنجی با استفاده از شاخص‌های آماری است. با اینکه گام زمانی شبیه‌سازی سیلاب به صورت روزانه است و خطای درصد نسبی زمان پیک، بالا است ولی در کل در اکثر موارد شاخص‌ها نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی و بهینه‌سازی است. مقدار R^2 در همه موارد، در زیر سطح 0.5% معنی‌دار است. متوسط شاخص ناش در حد عالی است و بطور کلی متوسط درصد خطای دبی پیک، زیر 10% و درصد خطای نسبی زمان پیک، زیر 3% درصد است.

Table 3. The statistical criterias in the calibration and validation stage

stage	Station	date	QpO	QpC	TpO	TpC	RMSE m ³ /sec	PeQp %	PeTp %	NASH	R^2
Calibration	Abajalo	11June 2011	12.6	13.9	8	9	0.23	10.32	12.50	0.85	0.95
Calibration	Abajalo	07May 2011	9.9	13.5	10	11	0.37	36.36	10.00	0.60	0.82
Calibration	Tapic	17Sep. 2009	24.1	16	9	9	0.67	-33.61	0.00	0.63	0.90
Calibration	Tapic	12April 2012	9	9.7	12	11	0.34	7.78	-8.33	0.57	0.86
Validation	Tapic	09May 2015	23.2	31.6	16	11	0.98	36.21	-31.25	0.59	0.80
Validation	Abajalo	05Apr. 2011	24	22.7	11	11	0.77	-5.42	0.00	0.65	0.81
Average							0.56	8.61	-2.85	0.65	0.86

مدل سازی سیلاب در دوره بازگشت های مختلف

الف) بر اساس داده های تاریخی رودخانه

در این مرحله مقادیر بارش ها و رگبارها بر اساس دوره بازگشت های مختلف ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ در HEC-HMS محاسبه شد. برای محاسبه دبی اوج از الگوی SCS و تیپ الگوی رگبار "تیپ یک"، با بی بعد سازی رگبارهای منطقه و با شرایط بارش منطقه و آزمون و خطا استفاده شد. پس از انتخاب توزیع مناسب برای بیشینه بارش برای هر ایستگاه و با استفاده از روابط ریاضی مربوط به آن، بارش با دوره بازگشت های مذکور محاسبه و نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است.

Table 4. The amount of precipitation calculated for each station for different return periods in mm

station	return periods(yr)									
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000	10000
Abajalu	29.77	39.72	46.18	54.24	60.17	66.07	71.96	79.82	85.83	106.47
Tepik	31.15	43.43	54.16	71.66	88.23	108.51	133.37	175.15	215.24	427.04
Karimabad	35.49	44.49	49.92	56.29	60.76	65.03	69.14	74.42	78.30	90.81

جهت مقایسه نتایج برآورد سیلاب محاسبه شده با مدل HEC-HMS و مقادیر مشاهداتی سیلاب رودخانه در دوره بازگشت های مختلف، مقادیر سیلاب های لحظه ای در ایستگاه آجاجالوسفلی (به عنوان ایستگاه خروجی حوضه) طی ۳۰ سال جمع آوری با روش های توزیع آماری برازش نسبت به برآورد سیلاب های رودخانه اقدام گردید. پس از انتخاب توزیع مناسب، دبی اوج با دوره بازگشت های مختلف محاسبه شد. در جدول ۵ نتایج دبی اوج محاسبه شده در خروجی رودخانه نازلو چای (Q1) (ایستگاه آجاجالوسفلی) با توزیع Lognormal و دبی اوج شبیه سازی شده HEC-HMS (Q2) ارائه شده است. در شکل ۵ مقایسه نتایج به صورت گرافیکی انجام شده است.

Table 5. The results of peak discharge calculated with Lognormal distribution (Q1) and HEC-HMS simulated peak discharge (Q2) in m3/sec

station	Return Period(Years)									
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000	10000
Q1	68.7	113.7	148.1	196.1	235.2	276.9	321.6	385.5	437.7	638.1
Q2	70.7	118.9	158.7	198.9	255.1	278	371.3	408.1	485.1	684.2

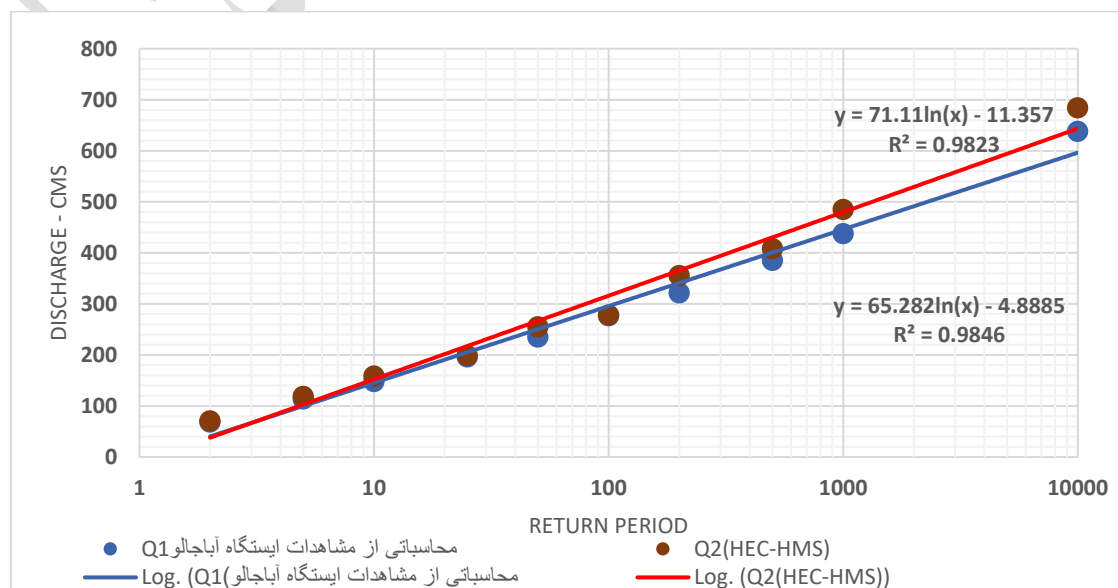


Figure 7. The comparison of peak discharge calculated with Lognormal distribution (Q1) and HEC-HMS simulated peak discharge (Q2) at Abajalu station in Different Return periods

همچنان که در شکل ۷ مشخص است نتایج شبیه‌سازی سیلاب‌های دوره بازگشت بالا با مقادیر نتایج داده‌های مشاهداتی ثبت‌شده در همان دوره برگشت تطابق خوبی را نشان می‌دهد. اگر چه در دوره بازگشت‌های بالا مدل یک مقداری بیش برآورد دارد، مقدار خطای دو دوره در دبی‌های کوچک و دوره برگشت‌های پائین حدود ۳ درصد و در دوره برگشت ۱۰۰۰ سال حدود ۷ درصد می‌باشد. این مورد را می‌توان به ارتباط غیرخطی تبدیل بارش به رواناب و ضرایب بهینه‌شده در دبی‌های کوچک مرتبط دانست. در هر صورت هر دوی نتایج در زیر یک درصد معنی‌دار هستند و این عملکرد قابل‌قبول مدل در دوره‌های بزرگ‌تر را نشان می‌دهد.

(ب) بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم

در این قسمت به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سیلاب‌های آتی؛ بیشترین داده‌های بارش با مدل LARS-WG تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP4.5 و RCP8.5 برای سال‌های (2021-2040) و (2041-2060) و (2061-2080) به دست آمد. ماکزیمم بارش سالانه هر سناریو برای سه دوره ۲۰ ساله استخراج شد. سپس با کمک نرم‌افزار Easyfit بارش با دوره بازگشت‌های مختلف با توزیع غالب Gen.Extream Value استخراج و مدل HEC-HMS برای این داده‌ها اجرا شد. در نهایت بر اساس داده‌های حاصل؛ هیدروگراف‌ها در نقطه خروجی حوضه استخراج و دبی‌های پیک هر هیدروگراف برآورد گردید. در شکل (۸)، یک نمونه از هیدروگراف سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف و در شکل (۹) نتیجه مدل HeCHMS تحت سناریوهای خوش‌بینانه، بینابینی و بدبینانه تغییر اقلیم برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۸۰ ارائه شده است.

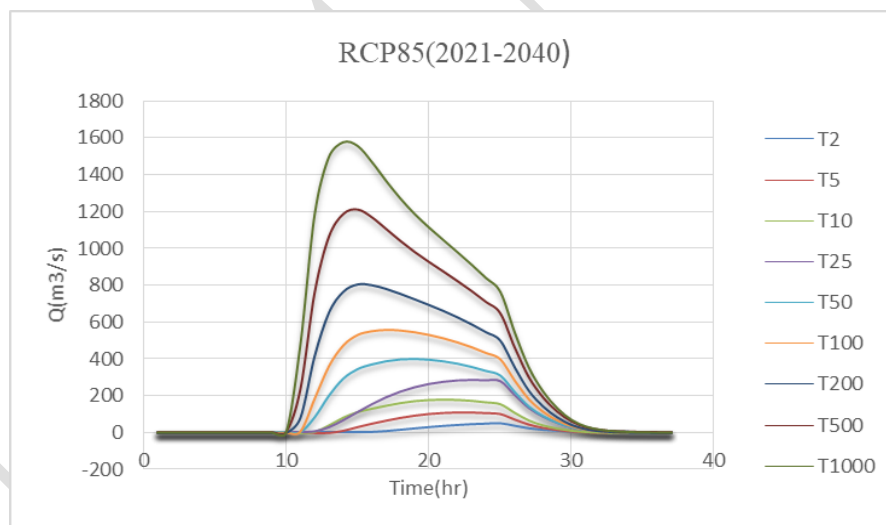


Figure (8): A sample HEC-HMS model output hydrographs in different return periods of 2,5,10,....,1000 years under RCP8.5 climate scenario (2021-2040) for Whole Nazlu basin

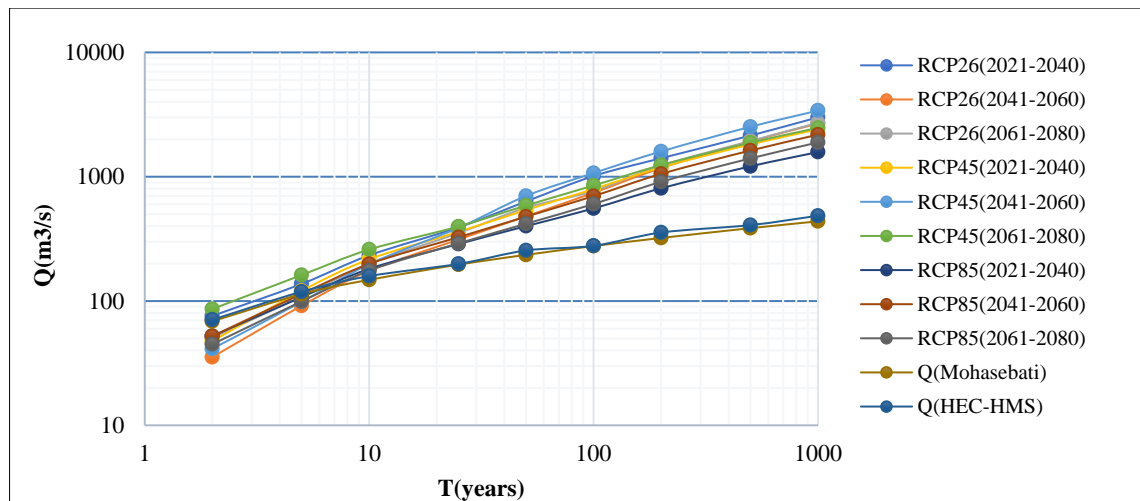


Figure (9): Flood estimated in different return periods under climate change scenarios (2021-2080) for Whole Nazlu basin in comparison with historical recorded and modeled results

با بررسی درصد تغییرات بارش نسبت به شرایط فعلی و مقایسه با سناریوهای تغییر اقلیم نتایج مؤید آن است که درصد رشد روند تغییرات بارش در سناریوی خوش بینانه (RCP2.6) در دوره بازگشت‌های ۱۰ سال، ۱۰۰ سال و ۱۰۰۰ سال؛ به ترتیب ۰.۹٪، ۴.۲٪ و ۹.۵٪ بوده که همین مقایسه در سناریوی بینابینی (RCP4.5) و در دوره بازگشت‌های فوق به ترتیب ۱.۲٪، ۶٪ و ۹.۸٪ و در سناریوی بدبینانه (RCP8.5) در دوره بازگشت‌های ۱۰ سال، ۱۰۰ سال و ۱۰۰۰ سال؛ به ترتیب ۰.۶٪، ۲.۷٪ و ۵۳٪ مشاهده گردید. همچنین می‌توان اذعان نمود در حالت بدبینانه و افزایش روند خشک‌سالی‌ها به نسبت دو سناریوی دیگر درصد تغییرات سیلاب کاهش خواهد داشت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه سیلاب‌های تاریخی رودخانه با سیلاب‌های آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم با دوره بازگشت‌های مختلف به کمک مدل LARS-WG نشان‌دهنده افزایش گسترده‌ی میزان این سیلاب‌ها در سال‌های آتی است. بر اساس یافته‌های صدرالاشاره، می‌توان به مقایسه نتایج مشترک با مطالعات دیگر من‌جمله تحقیقات آشفته و مساح بوانی (۱۳۸۸) و مرتضایی پویا و همکاران (۱۴۰۰) بر روی حوضه آیدوغومش در استان آذربایجان شرقی اشاره نمود که ایشان به این نتیجه رسیدند که روند تغییرات بارش‌های حدی و به تبع آن سیلاب، در سال‌های آتی افزایشی خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در حال حاضر با توجه به تغییرات اقلیمی، انجام مدل‌سازی هیدرولوژیکی بسیار ضروری است. نرم‌افزار HEC-HMS یکی از ابزارهای مهم مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. در این مطالعه مدل‌سازی هیدرولوژیکی پیوسته با استفاده از ابزار مدل‌سازی HEC-HMS انجام شد. ابتدا مقادیر شماره منحنی با استفاده از تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی و خاک برای حوضه موردنظر محاسبه شد و سپس با استفاده از مدل HEC-HMS مدل حوضه موردنظر شبیه‌سازی شد. از الگوی SCS تیپ الگوی رگبار "تیپ یک"، با بی‌بعد سازی رگبارهای منطقه و آزمون و خطا، استفاده شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و پایین بودن درصد خطا RMSE، مدل HEC-HMS در حوضه‌های دارای کمبود آمار می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و با دقت بالایی دبی اوج سیلاب را محاسبه کند. با داشتن این مدل پیش‌بینی‌های سیلاب برای وقایع بهنگام و سناریوهای سیلاب تحت تغییر اقلیم قابل ارزیابی است. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه سیلاب‌های رودخانه با سیلاب‌های آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم به کمک مدل LARS-WG نشان‌دهنده افزایش میزان این سیلاب‌ها در سال‌های آتی است. ضرایب نفوذپذیری و شماره منحنی می‌تواند در زمان متغیر باشد که در این مقاله به‌عنوان محدودیت اصلی برای آینده ثابت فرض شده‌اند و لازم است نتایج با مدل‌های پیش‌بینی کاربری اراضی تلفیق و مدل‌سازی گردد.

- Adib, A., Salarijazi, M., Vaghefi, M., SHOOSHTARI, M. M., & AKHONDALI, A. M. (2010). Comparison between GcIUH-Clark, GIUH-Nash, Clark-IUH, and Nash-IUH models. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 34(2), 91-104.
- Afifi, M.A. (2019). *Simulation of runoff precipitation and flood potential using the HEC-HMS model and fuzzy logic, a case study of Bal river catchment in Fars province*. *Natural Geography Quarterly*, 46: 111-127. (In Persian)
- Asadi, A. and Boostani, F. (2013). *Application of HEC-HMS for flood forecasting in Kabkian basin and Delibajak subbasin in Iran*. *Journal of Engineering*, 3(9): 10-16.
- Azmat, M. Qamar, M.U. Ahmed, S. Hussain, E. and Umair, M. (2017). *Application of HEC-HMS for the event and continuous simulation in high altitude scarcely-gauged catchment under changing climate*. *European water* 5(7):77-84
- Ashfete, P., and Masah Boani, A. (2018). *The effect of uncertainty of climate change on temperature and precipitation of Aydogmush basin in the period of 2040-2069*, *Water and Soil Science Quarterly*, Volume 19(2). (In Persian)
- Bhuiyan, H.A. McNairn, H. Powers, J. and Merzouki, A. (2017). *Application of HEC-HMS in a cold region watershed and use of RADARSAT-2 soil moisture in initializing the model*. *Hydrology*, 4(1): 9-28.
- Din,S.Ud., Khan,N.M., Israr,M., Nabi,H., Khan,M. (2019). RUNOFF MODELLING USING HEC HMS FOR RURAL WATERSHED. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 5.71.
- Darji, K. Khokhani, V. Prakash, I. Mehmood, K. Pham, B.T. and Final, M.E. (2019). Rainfall-runoff modelling using HEC-HMS model: an application of regression analysis. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 6(5):225-234.
- Dimri, T., Ahmad, S., & Sharif, M. (2022). *Hydrological modelling of Bhagirathi River basin using HEC-HMS*. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 11(2), 249–261. <https://doi.org/10.1080/23249676.2022.2099471>
- El-Bagoury, Heba, and Ahmed Gad. (2024). *Integrated Hydrological Modeling for Watershed Analysis, Flood Prediction, and Mitigation Using Meteorological and Morphometric Data, SCS-CN, HEC-HMS/RAS, and QGIS*. *Water*. 16(2):356. <https://doi.org/10.3390/w16020356>
- Jahanbakhsh Assal, S., and Dinpajoh, Y., and Aali Nejad, M.M. (2015). *Comparison of SRM and HEC-HMS Models in Simulation of Runoff from Snowmelt in Shahrchay River Basin, Urmia*. *Hydrogeopharmology*, 5: 101-117. (In Persian)
- Sahu, M.K., Shwetha, H.R. & Dwarakish, G.S.(2023). *State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review*. *Model. Earth Syst. Environ*. 9, 3029–3051. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01704-7>
- Shahidi, M., and Nabi Bid Handi, G.(2023). The role of spatial distribution of basin hydrological units on changes in peak flood discharge using HEC-HMS hydrological model, (case study: Safa Roud watershed), *remote sensing and geographic information system in natural resources*, 14(4):17-20. (In Persian)
- Sampath, D.S. Weerakoon, S.B. and Herath, S. (2015). *HECHMS model for runoff simulation in a tropical catchment with intrabasin diversions – case study of the Deduru Oya river basin, Sri Lanka*. *Engineer - Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka XLVIII(01, ISSN 1800-1122)*. 11(1): 1-9
- Samadian, M., Asadi, E., Ghorbani, M. A., & Ahmadi, F. (2023). Investigating Precipitation Changes and Meteorological Drought Characteristics with Climate Change Scenarios (Case Study: Sari-Qamish Sub-basin of Zarinehrood). *Water Harvesting Research*, 6(1), 38-54. doi: 10.22077/jwhr.2023.6786.1106
- Heydari Bi Safar, Ali, Hessari, Behzad, & Samadian, Morteza. (2020). Sensitivity analysis of effective parameters in flood design using HEC-HMS (case study: Sardasht Dam). *Ecohydrology*, 7(4), 951-965. (In Persian)
- Halwatura, D. Najim, M.M.M. (2013). *Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment*. *Environ. Model. Softw*. 1(46): 155–162.
- Haibo, M. Xin, D. and Wenjuan, C. (2018). *Application of Synthetic Unit Hydrograph on HEC-HMS Model for flood forecasting*. In *MATEC Web of Conferences* 246 (01076): 1-8.

- Legesse Gebre,S. (2015). Application of the HEC-HMS Model for Runoff Simulation of Upper Blue Nile River Basin. *Journal of Waste Water Treatment & Analysis*.6:2.
- Mortezai Pouya, S., and Ashfete, P., and Gulfam, P. (2021). *Comparison of hydroclimate changes in the watershed caused by climate change under the third and fifth IPCC reports*. The first national conference on water quality management and the third national conference on water consumption management.
- Ren,D.F., Cao,A.H. (2023). Precipitation-runoff simulation Xiushi river basin using HEC-HMS hydrological model. *Modeling Earth System and Environment*,9:2845-2856.
- Rathod, P. Borse, K. and Manekar, V.L. (2015). *Simulation of rainfall-runoff process using HEC-HMS (case study: Tapi river, India)*. In 20th International Conference on Hydraulics. Water Resources and River Engineering. 9(8): 3440-3449
- Majidi, A. and Shahedi, K. (2012). *Simulation of rainfallrunoff process using Green-Ampt method and HEC-HMS model (Case study: Abnama Watershed, Iran)*. International Journal of Hydraulic Engineering, 1:15-9 (In Persian)
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part IA discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3): 282-290.
- Oleyiblo, J.O. and Li, Z.J. (2010). *Application of HECHMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China*. Water Science and Engineering. 3(1): 14-22.
- Visweshwaran, R. (2017). *Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in the Krishna basin. Master's thesis*. National Institute of Technology Karnataka. Surathkal. India, 19 pages.

Construction, evaluation and prediction of flood models under climate change scenarios using the HEC-HMS mathematical model (A case study: Nazlochai basin, Urmia)

Behnaz Alizadeh Kashtiban¹, Behzad Hessari^{2*}, Morteza Samadian³

1. MS in Water Resources Engineering, Water Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran.

2. Associate Professor, Department of Water Engineering and Urmia Lake Research Institute, PhD in Hydrology, Urmia University, Urmia, Iran.

3. Phd in Water science and engineering, water resources, West Azarbaijan Regional Water Joint Stock Company, Urmia, Iran.

Abstract

In integrated watershed management, calculating peak flow for full identification of flood effects and reducing damage is essential. Activities related to estimating runoff volume and flood peak can be easily simplified by adopting a modeling concept and understanding rainfall configuration and the main factors creating runoff. Building a basin model requires the model to respond to low flows and high flows (high return period), which for both, the model must meet the needs. In this study, due to the lack of a data logger or short term recording rainfall gauge (tipping rain gauge) in the study basin; based on six corresponding rainfall events related to nearest UrmiaCamp station for simulation and validation of flood data was used. Thus, four rainfall events for simulation and calibration and two rainfall events for validation were used. Also, calibration was performed for curve number, lag time, and initial losses parameters. After calibrating the model, to ensure the accuracy of the simulated model and calibrated values, the model was validated with new data. The results showed that the simulated hydrograph has an acceptable match with the observed hydrograph. The evaluation indices R^2 and RSME in this case are 0.90 and 0.67 at Abajalu station and 0.86 and 0.34 at Tepik station, respectively. The R^2 value is significant in all cases, below the 5% level. The average Nash index is excellent, and overall, the average percentage error of peak discharge is below 10%, while the percentage error of peak time is below 3%. To build a model for large floods, rainfall with different return periods of the basin entered the model and the peak flow of each return period at the final station of lower Abajalu in Nazlu Chay river was simulated. The results of comparing the estimated flood, observed river flood values (Q1) and calculated with the HEC-HMS model (Q2) in the 25-year return period were 196.1 and 198.9 cubic meters per second, respectively, and in the 50-year return period were 235.2 and 255.1 cubic meters per second, respectively, and the error in the lower return periods up to 10,000 years was between 3 to 7 percent, which indicates a high agreement of the simulated values with the observed ones. Also, by examining the percentage of precipitation changes compared to current conditions and comparing with climate change scenarios, the results confirm that in the optimistic scenario (RCP2.6) in the return period of 10 years, 100 years and 1000 years; It was 9%, 42% and 95%, respectively, and the same comparison in the scenario (RCP4.5) and in the above return period was 12%, 46% and 98%, respectively, and in the scenario (RCP8.5) in the return period of 10 years, 100 years and 1000 years; 6%, 27% and 53% were observed respectively. It can also be acknowledged that in the pessimistic scenario and the increase in droughts, the percentage of flood changes will decrease compared to the other two scenarios. According to the results obtained from the comparison of historical river floods with future floods under climate change scenarios with different return periods with the help of the LARS-WG model, it indicates a large increase in the amount of these floods in the coming years.

Keywords: Rainfall-runoff, floods, HEC-HMS, 6 th Climate change report, Urmia Lake

* Corresponding Email Address: b.hessari@yahoo.com b.hessari@urmia.ac.ir