

# Runoff simulation with HEC-HMS model and sensitivity analysis of flood hydrograph trending parameters using DE differential evolution algorithm (case study: Merck River catchment)

## ABSTRACT

Simulation of runoff and hydrograph production is widely used in the analysis of basin behavior against precipitation, calculation of flood volume and its peak, amount of casualties and the possibility of designing the dimensions of structures. HEC-HMS is one of the most common simulator models. In this study, with the aim of analyzing the sensitivity of flood hydrograph trending parameters in the Merck River catchment, at first build by the HEC-GHMS plugin in the ARC GIS and the DEM map of the area, physiographic characteristics of the basin and called in the HEC-HMS model then by entering the three flood event data and its corresponding precipitation, computational hydrograph is created and to calibrate, at first by trial and error, the model was placed in a suitable range which can be optimized using differential evolution algorithm. In optimizing the target function to make the average at least of the sum of squares of error, the K and X Muskingum parameters, which are particularly sensitive to hydrograph production, placed the model optimization and its performance in the excellent category so that for the event of November 2015 floods and a stop of 50 iteration (NSE=0.871, PBias=25.52, RMSE=0.4, NRMSE=2.63), in the event of March 2016 floods (NSE=0.731, PBias=28.82, RMSE=0.5, NRMSE=1.01) and in February 2020 (NSE=0.834, PBias=7.96, RMSE=0.4, NRMSE=0.95) It showed that the excellent performance of the model after optimization of the Muskingum coefficients by differential evolution algorithm (DE).

Keyword: HEC-GeoHMS, HEC-HMS, Merck, Muskingum, Sensitivity analysis

## شبیه‌سازی رواناب با مدل HEC-HMS و آنالیز حساسیت پارامترهای روندیابی هیدروگراف سیل با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی DE (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه مرک)

### چکیده:

شبیه‌سازی بارش رواناب و تولید هیدروگراف، کاربرد فراوانی در تحلیل رفتار حوضه در مقابل بارش، محاسبه حجم و پیک سیلاب، میزان تلفات و امکان طراحی ابعاد سازه‌ها دارد. یکی از رایج‌ترین مدل‌های شبیه‌ساز HEC-HMS می‌باشد. در این پژوهش با هدف آنالیز حساسیت پارامترهای روندیابی هیدروگراف سیل در حوضه آبریز رودخانه مرک ابتدا با افزونه HEC-GeoHMS در محیط Arc GIS و نقشه DEM منطقه خصوصیات فیزیوگرافی حوضه ساخته و در مدل HEC-HMS فراخوانی گردید سپس با وارد نمودن داده‌های سه رخداد سیلاب و بارش متناظر آن، هیدروگراف محاسباتی ایجاد و جهت واسنجی ابتدا به‌روش سعی و خطا مدل در محدوده‌ای مطلوب قرار گرفت که بتوان با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی بهینه‌سازی را انجام داد. در بهینه‌سازی با تابع هدف به‌حداقل رساندن میانگین مجموع مربعات خطا، پارامترهای K و X ماسکینگام که حساسیت ویژه‌ای در تولید هیدروگراف دارند بهینه و کارایی مدل را در رده عالی قرار داد بطوریکه برای رخداد سیلاب تاریخ آبان ۱۳۹۴ معادل نوامبر ۲۰۱۵ و با شرط توقف ۵۰ تکرار (NSE=0.871, PBIAS=25.52, RMSE=0.4, NRMSE=2.63)، در رخداد سیلاب فروردین ۱۳۹۵ معادل مارس ۲۰۱۶ (NSE=0.731, PBIAS=28.82, RMSE=0.5, NRMSE=1.01) و در رخداد اسفند ۱۳۹۸ معادل فوریه ۲۰۲۰ (NSE=0.834, PBIAS=7.96, RMSE=0.4, NRMSE=0.95) قرار گرفت که نشان از کارایی عالی مدل بعد از بهینه‌سازی ضرایب ماسکینگام با الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) دارد.

کلمات کلیدی: HEC-GeoHMS، HEC-HMS، آنالیز حساسیت، ماسکینگام، مرک

## مقدمه :

هنگامی که نرخ جریان بیش از ظرفیت عبوری رودخانه شود به علت سرریز به سواحل چپ و راست رودخانه، شاهد واقعه سیل می‌شویم. این افزایش دبی عبوری می‌تواند به علت بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت و یا بارش‌های طولانی و سنگین باشد. عواملی مانند تغییر کاربری و پوشش زمین مانند توسعه شهرنشینی و تبدیل اراضی جنگل و مرتع به اراضی بایر و سکونت‌گاه، باعث تغییر و افزایش شماره منحنی (CN) حوضه و در نهایت باعث افزایش دبی اوج و حجم جریان سطحی و بروز سیل گردد. این واقعه با تجاوز و تغییر کاربری حریم بستر و سیلابی رودخانه می‌تواند فاجعه‌آفرین باشد. بدین منظور مطالعاتی در سطح حوضه‌های آبریز دنیا توسط محققین محلی جهت برآورد و یا پیش‌بینی زمان، دبی اوج و حجم سیلاب توسط مدل‌های شبیه‌ساز انجام و یا در حال انجام می‌باشد. یکی از شبیه‌سازهای معروف HEC-HMS می‌باشد که توسط محققین فراوانی مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش با هدف آنالیز حساسیت پارامترهای روندیابی هیدروگراف سیل و با تغییر مقادیر شماره منحنی و عناصر وابسته به آن مانند زمان تاخیر، زمان تمرکز و میزان تلفات، آیا مدل در واسنجی به روش سعی و خطا از لحاظ آماری در محدود مناسب قرار می‌گیرد؟ بعد از اینکه مدل به روش سعی و خطا واسنجی گردید الگوریتم تکامل تفاضلی در بهینه‌سازی مقادیر  $K$  و  $X$  به چه میزان اختلاف هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی را کاهش خواهد داد و آیا می‌تواند در واسنجی به محققین کمک کند.

## پیشینه پژوهش :

انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی بارش رواناب به عوامل مختلفی مانند محدودیت‌های زمانی و مالی، دسترسی به داده‌ها، اهداف مطالعه، ویژگی‌های حوضه آبریز و... می‌تواند بستگی داشته باشد. مدل‌های مخزنی Clark (1945) اولین تلاش‌ها برای محاسبه رواناب به صورت تجمیعی بود سپس مدل SCS (1956) از اولین مدل‌های مفهومی است که برای شبیه‌سازی رواناب به صورت توزیعی استفاده شد. مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی و یادگیری ماشین اخیراً به توسعه مدل‌ها اضافه شده‌اند. مدل‌های مانند AWBM (توسعه توسط موسسه تحقیقات آب استرالیا)، Sacramento (توسعه توسط ارتش آمریکا)، SimHyd (توسعه توسط دانشگاه ایالتی یوتا)، SMAR (توسعه توسط دانشمندان فرانسوی)، Tank (توسعه توسط دانشمندان روسی)، مدل‌هایی مفهومی هستند که نیاز به داده‌های کمی دارند. و یا مدل‌های مانند مدل SWAT که توسط مرکز تحقیقات آب و خاک وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا توسعه یافته و مدلی توزیعی است که بیشتر برای شبیه‌سازی اثرات تغییرات آب و هوایی بر رواناب و نتایج بلندمدت کاربرد داد از نقاط ضعف این مدل نیاز به داده‌های زیاد و پیچیدگی نسبی می‌باشد. اما HEC-HMS که توسط سپاه مهندسی ارتش آمریکا توسعه یافته، مدلی است که بطور گسترده در سراسر جهان برای شبیه‌سازی سیلاب بکار می‌رود. شبه توزیعی است و کارایی بالا در شبیه‌سازی سیلاب و کاربرد آسانی دارد.

اسدی و همکاران (۱۳۹۸) در حوضه آبریز سد میناب به منظور شبیه‌سازی بارش - رواناب از نرم‌افزار HEC-HMS و برای محاسبه تلفات رواناب از روش SCS، و جهت تبدیل فرآیند بارش مازاد به جریان از روش کلارک، آشنایدر و هیدروگراف واحد SCS استفاده کردند. نتیجه بدست آمده از اعتبار سنجی و ارزیابی مقادیر خطا نشان داد که در برآورد دبی اوج هیدروگراف سیل، روش SCS نسبت به روش‌های کلارک و آشنایدر برتری دارد همچنین مدل شبیه‌ساز HEC-HMS کارایی مناسبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. حیدری بی‌صفر و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی و آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر دبی پیک طراحی سرریز مخزن سد سردشت در برآورد هیدروگراف تولیدی حوضه و روندیابی مخزن با مدل HEC-HMS پرداخته و نتیجه گرفتند سیلاب طراحی بیشترین حساسیت را به مقدار بارش طراحی دارد. سکینه دامادی و همکاران (۱۳۹۹) برای شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب حوضه آبخیز سرباز در سیستان و بلوچستان از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده کردند با استفاده از نقشه هیدرولوژیکی خاک و کاربری اراضی CN حوضه

استخراج گردید. با استفاده از نرم افزار Easy fit مقدار حداکثر بارش روزانه در چهار دوره بازگشت ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال محاسبه و وارد مدل HEC-HMS گردید. پس از کالیبره و صحت سنجی مدل و با استفاده از معیارهای آماری NSE و RMSE به این نتیجه رسیدند که مدل بارش - رواناب HEC-HMS کارایی مطلوبی دارد. سلطانی و همکاران (۱۴۰۰) برای بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر رفتار هیدرولوژیک حوضه آبخیز خرم‌آباد، با استفاده از نقشه‌های کاربری اراضی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای لندست، CN و ضریب رواناب، مدل بارش - رواناب را با HEC-HMS شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان از افزایش دبی اوج و حجم سیلاب و کاهش زمان تمرکز و زمان تاخیر به‌ویژه در نواحی که اراضی پوشش‌دار گیاهی کاهش و اراضی شهری افزایش سطح داشته، دارد. علم‌شاهی و همکاران (۱۳۹۹) با هدف بررسی داده ساعتی بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CCs جهت شبیه‌سازی سیلاب در حوضه اسالم با مدل HEC-HMS و با تعریف سه سناریو (Lumped, Thiessen, Link-Lumped) پرداختند. و در یک جمع‌بندی کلی به این نتیجه رسیدند که داده‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN-CCs نسبت به داده‌های زمینی از عملکرد مناسبی جهت شبیه‌سازی سیلاب و مولفه‌های آن به ویژه در حوضه‌های فاقد آمار برخوردارند. متشرف و همکاران (۱۴۰۲) به ارزیابی تأثیر نحوه‌ی شکل‌گیری الگوی جریان بر هیدروگراف خروجی حوضه‌ی آبریز رود زرد در شبیه‌ساز HEC-HMS پرداختند در کنار روش متعارف شبیه‌سازی بارش - رواناب در مدل HEC-HMS می‌توان الگوی جریان دیگری به‌نام الگوی تأخیری را متصور شد که برخلاف روش متعارف، رواناب حاصله را روی تصویر مرکز ثقل زیرحوضه روی آبراهه‌ی اصلی محاسبه می‌کند که به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد، نزدیکتر است. نعیمی هوشمند و احمدزاده کلیبر (۱۴۰۱) از افزونه‌های HEC-GeoHMS و Arc Hydro در محیط ArcGIS و مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب حوضه آبریز آیدوغموش واقع در شمال غرب ایران استفاده نمودند. برای محاسبه تلفات بارش، تبدیل بارش به رواناب، روندیابی و جریان پایه به‌ترتیب از روش SCS-CN، SCS-UH، ماسکینگام و مدل ثابت ماهانه استفاده شد. با نرم‌افزار SMADA بارش‌های طراحی با دوره‌های بازگشت ۲ تا ۱۰۰۰ برای شبیه‌سازی دبی اوج و حجم سیلاب استخراج گردید. این تحقیق نشان داد افزونه‌های HEC-GeoHMS و Arc Hydro در محیط Arc GIS باعث دقت مطلوب در شبیه‌سازی مدل HEC-HMS می‌گردد.

(Daide et al., 2021) برای تأثیر CN بر مدل بارش - رواناب در حوضه بهت مراکش، ابتدا مشخصات فیزیکی حوضه را از ابزار Hec-GeoHms در محیط GIS محاسبه و سپس از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای مدل‌سازی بارش رواناب با سه CN مرطوب، CN متوسط و CN خشک شبیه‌سازی نمودند. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل را می‌توان از نظر ارزشیابی معتبر ارزیابی کرد. (Fiaz et al., 2021) جهت شبیه‌سازی بارش - رواناب در حوضه کائوسینک تایوان از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده نمودند. ابتدا پارامترهای فیزیکی مانند نقشه DEM، کاربری زمین، در ابزار HEC-GeoHMS محاسبه و پیش پردازش و سپس با استفاده از هیدروگراف واحد SCS و نرم‌افزار HEC-HMS مدل بارش رواناب شبیه‌سازی گردید. نتایج مقایسه‌ای بین حداکثر جریان طراحی و متوسط جریان‌های موسمی شبیه‌سازی شده تأیید کرد که مدل HEC-HMS می‌تواند فرآیندها و پدیده‌های هیدرولوژیکی را برای هر دو فصل مرطوب و خشک تولید کند. (Hamdan et al., 2021) از ابزار HEC-GeoHMS در محیط GIS ابتدا مشخصات فیزیکی حوضه رودخانه العظیم عراق را محاسبه و از SCS-CN و هیدروگراف واحد SCS و روش ماسکینگام برای محاسبه تلفات و روندیابی جریان و در نهایت از مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی بارش رواناب استفاده گردید که مدل HEC-HMS در پیش‌بینی سیل موفق عمل نمود. (Hegazy et al., 2023) با هدف شناسایی روابط بارندگی رواناب حوضه آبخیز هلیوپولیس (Heliopolis) و پیش‌بینی حجم رواناب و دبی اوج جریان‌ها برای فواصل برگشتی مختلف از برنامه‌های مختلف مدل هیدرولوژیکی (WMS, HEC-1, HEC-HMS) با استفاده از هیدروگراف واحد به‌روش SCS-CN استفاده نمودند. از مدل WMS برای استخراج آبراهه‌ها، از HEC-HMS برای حجم و دبی پیک سیلاب و از HEC-1 برای محاسبه هیدروگراف سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف استفاده نمودند نتیجه نشان داد تبدیل اراضی بیابانی که جذب آب را انجام می‌داد به آسفالت، پیاده‌ور، ساختمان و غیره باعث افزایش جریان آب در حوضه می‌گردد. (Janicka and Kanclerz 2023) اثرات شهرنشینی را بر جریان آب و رویدادهای سیل در حوضه آبریز رودخانه Wirynka لهستان با HEC-HMS مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد کاهش مساحت زمین‌های فعال بیولوژیکی و افزایش مناطق مصنوعی (شهرسازی) می‌تواند منجر به

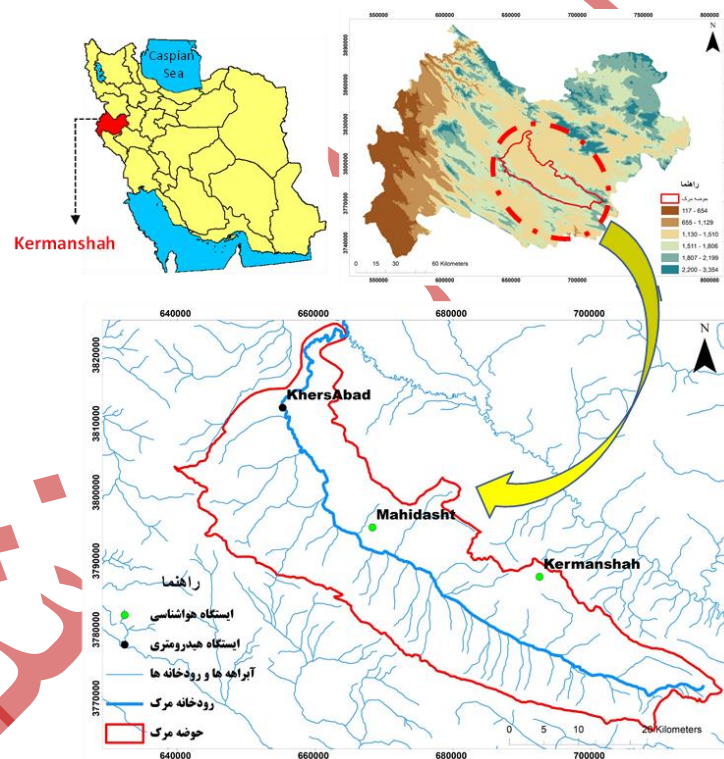
قله‌های بزرگ سیل و افزایش خطر بالقوه به مردم و اموال گردد. بنابراین پیشنهاد نمودند برای محافظت از سیل می‌توان چند مخزن کوچک جمع‌آوری آب باران در حوضه احداث کرد که به عنوان منبع آب نیز عمل می‌کند. (Minh and Linh 2022) به‌منظور شبیه‌سازی دبی سیلاب در سه حوضه واقع در جنوب شرقی آسیا از مدل HEC-HMS و افزونه Hec-GeoHMS استفاده نمودند ویژگی‌های حوضه و رودخانه با استفاده از افزونه Hec-GeoHMS تحلیل، و مدل بارش رواناب با استفاده از HEC-HMS شبیه‌سازی گردید که نشان از سازگاری مدل HEC-HMS با شرایط آب و هوای گرمسیری دارد. (Mohammed Ahmed et al., 2022) جهت استخراج زهکش‌ها و کانال‌ها و ترسیم حوضه در وادی حسیب از نقشه DEM و ابزار HEC-GeoHMS استفاده نموده و نتیجه گرفتند با استفاده از نقشه DEM و استفاده از ARC GIS و HEC-GeoHMS می‌توان نقشه زهکش‌های حوضه را با دقت بالا و کمترین هزینه و زمان ترسیم نمود. (Nadeem et al., 2022) به‌منظور مدیریت ریسک سیل ناگهانی در یک حوزه آبخیز کوچک (هزاره پاکستان) و با هدف بهبود زمان هشدار اولیه، ابتدا برای ترسیم، پیش‌پردازش و پردازش حوضه از ابزار HEC-GeoHMS و سپس از سیستم مدل‌سازی هیدرولوژیک HEC-HMS، برای پیش‌بینی زمان و شرایط آستانه رواناب/مرحله استفاده نمودند. مدل ساخته‌شده دبی پیک، حجم سیلاب و زمان‌بندی رواناب/مرحله را براساس داده‌های تاریخی و مشاهداتی به‌خوبی پیش‌بینی نمود. (Naresh et al., 2023) از سیستم‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی HEC-HMS و شبکه عصبی مصنوعی ANN در یک دوره ساعتی بارش، برای حوضه آبخیز کاکاتاپلی هند و برای داده‌های مشاهداتی جریان از فرستنده سطح اولتراسونیک، و از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا برای استخراج داده‌های کاربری و پوشش زمین LULC استفاده نمودند. ارزیابی عملکرد مدل‌ها نشان داد HEC-HMS به‌طور مناسب برای ارزیابی فرآیند رواناب به‌کار می‌رود و مدل ANN از مدل HEC-HMS به‌عنوان یک برنامه تنظیم دقیق و مقایسه متقابل پشتیبانی می‌کند. (Sagathia et al., 2020) برای ارزیابی خروجی سیل در سورت، ابتدا ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه را با افزونه HEC-GeoHMS استخراج نموده و سپس برای زمان وقوع پیک جریان و تعیین اوج جریان و تجزیه و تحلیل به HEC-HMS وارد و نتیجه گرفتند در صورت رفع عوامل خطا و استفاده از داده‌های مناسب می‌توان از این مدل در پیش‌بینی سیل استفاده نمود.

طبعاً این مدل مانند تمامی شبیه‌سازها نیاز به واسنجی و کالیبره پارامترهای ورودی دارد که به روش‌های سعی و خطا و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌ساز انجام می‌پذیرد. یکی از پارامترهای کالیبره ضرایب  $K$  و  $X$  ماسکینگام می‌باشد. پارامتر  $K$  مشخصه زمان پیمایش می‌باشد که به سرعت جریان و طول رودخانه بستگی دارد و پارامتر  $X$  بیانگر اثر جریان ورودی و خروجی بر حجم ذخیره رودخانه می‌باشد (ظهیری و همکاران ۱۳۹۶). ترکیب تکنیک‌های ریاضی و الگوریتم‌های تکاملی نتایج خوبی را در تخمین پارامترها  $K$  و  $X$  در روندیابی جریان به‌روش ماسکینگام نشان می‌دهد (Wang et al., 2023). برای بهینه‌سازی پارامترهای ماسکینگام استفاده از الگوریتم‌های تکاملی و فراکوشی رایج می‌باشد. در پژوهشی (Farahani et al., 2023) به مقایسه روش‌های بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل، جستجوی الگو (PS)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و جستجوی هارمونی (HS) با الگوریتم Kidney پرداختند. نتیجه نشان داد الگوریتم Kidney بر اساس مدل چهار پارامتری ماسکینگام نسبت به مدل سه پارامتری و مدل دو پارامتری از دقت بیشتری برخوردار است. (Farzin et al., 2018) پارامترهای ماسکینگام را با الگوریتم بهبود یافته خفاش (IBA) بهینه‌سازی نمودند و با الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی ازدحام ذرات الگوریتم (PSO)، الگوریتم جستجوی الگو (PS)، الگوریتم جستجوی هارمونی (HS) و بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبور عسل (HBMO) مقایسه نمودند که مشخص شد الگوریتم بهبود یافته خفاش بطور قابل توجه‌ای نتایج را در افزایش تعداد فواصل در روندیابی جریان بهبود می‌بخشد. ظهیری و همکاران (۱۳۹۶) برای بهینه‌سازی ضرایب ماسکینگام و مقایسه ماسکینگام چند بازه‌ای و تک بازه‌ای (روش معمول) در رودخانه کارون از نرم‌افزار اکسل و ابزار Solver استفاده نمودند. نتیجه مشخص کرد که اکسل سرعت و دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی به‌ویژه در روش چند بازه‌ای دارد. روندیابی سیلاب به دو روش هیدرولوژیکی و هیدرولوژی انجام می‌پذیرد روش هیدرولوژیکی نیازمند داده‌های بیشتر و دارای محاسبات پیچیده‌تر می‌باشد و پروفیل سیلاب را بهتر تحلیل می‌کند اما روش هیدرولوژیکی ساده‌تر و پرکاربرد می‌باشد و فقط به داده‌های ورودی و خروجی نیاز دارد (براتی، رضا و اکبری، غلامحسین (۱۳۹۱)، Hosseini (2009)، Lee (2021)).

در این پژوهش ابتدا با روش سعی و خطا مقادیر CN و پارامترهای وابسته به آن مانند زمان تاخیر و میزان تلفات در محدوده مناسب قرار گرفت سپس جهت بهینه‌سازی پارامترهای K و X از الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده گردید.

## روش‌شناسی پژوهش :

رودخانه مرک در استان کرمانشاه از سراب سرفیروزآباد سرچشمه می‌گیرد این رودخانه پس از عبور از دشت ماهیدشت با اضافه شدن سراب کاشنبه وارد دشت کوزران شده و پس از پیوستن زردآب، در محل کوه ویس به رودخانه قره‌سو یکی از سرشاخه‌های کرخه می‌پیوندد. طول این رودخانه در حوضه آبریز مرک حدود ۸۹ کیلومتر مربع، مساحت حوضه آبریز حدود ۱۴۶۳ کیلومتر مربع و محیط آن ۲۶۲ کیلومتر است. این حوضه بین عرض جغرافیایی ۳۴/۰۱ تا ۳۴/۵۵ و طول جغرافیایی ۴۶/۵۲ تا ۴۷/۳۶ قرار دارد. براساس رابطه هورتون عامل فرم حوضه  $۰/۱۸$  و ضریب گراویلیوس  $۱/۹$  می‌باشد. حداقل ارتفاع ۱۳۰۹ متر و حداکثر ارتفاع ۲۷۸۲ متر از سطح دریا می‌باشد. (شکل ۱)



شکل ۱. نقشه محدوده مطالعاتی

## مدل HEC-HMS و افزونه HEC-GeoHMS

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی و مدل نمودن بارش رواناب حوضه رودخانه مرک، از مدل HEC-HMS و افزونه HEC-GeoHMS در محیط Arc GIS استفاده شده است. مدل HEC-HMS نرم‌افزار مدل‌سازی هیدرولوژیکی از نوع شبیه‌ساز برای تحلیل و پیش‌بینی فرآیندهای بارش رواناب در حوضه‌های آبریز می‌باشد. این مدل در نواحی مختلف جغرافیایی، حوضه‌های بزرگ و کوچک و

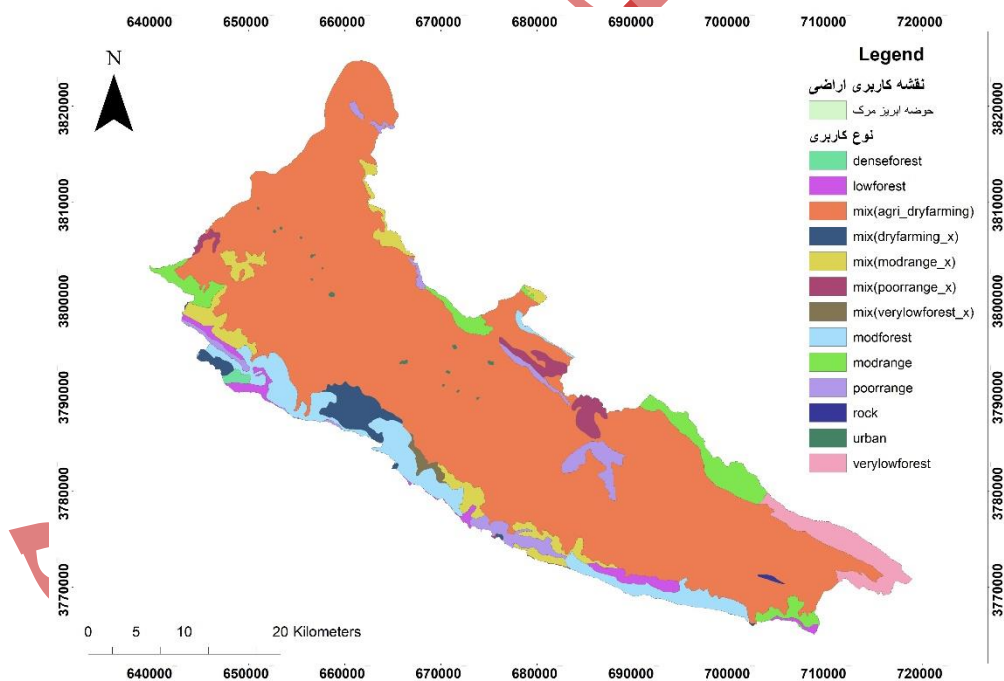


آبریز شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد و برای اهداف مختلفی مانند طراحی سرریز سدها، مطالعات کنترل سیلاب و بهره‌برداری از سیستم مخازن، مطالعات آبرسانی و... به کار می‌رود. ورودی این مدل داده‌های فیزیوگرافی حوضه، داده‌های هواشناسی و ایستگاه‌های آب‌سنجی است. جهت ساخت مدل فیزیوگرافی حوضه از افزونه HEC-GeoHMS برای تهیه نقشه جریان، ایجاد آبراهه‌ها، بلندترین مسیر هیدرولوژیکی جریان، ایجاد و اصلاح زیرحوضه‌ها، مرکز ثقل زیرحوضه‌ها، مساحت، زمان تاخیر و تمرکز زیرحوضه‌ها و ایجاد لایه ایستگاه‌های هواشناسی و در نهایت تهیه مدل آماده ورود به HEC-HMS استفاده گردید.

### تهیه نقشه CN :

قبل از ساخت مدل ابتدا وضعیت کاربری اراضی نقشه Land Use حوضه تهیه و کاربری اراضی کلاس‌بندی گردید. بیشترین کاربری اراضی مربوط به اراضی دیم با حدود ۷۵/۵۹ درصد کل اراضی و کمترین کاربری به ترتیب مربوط به اراضی صخره‌ای با ۰/۰۷ درصد و اراضی شهری و روستایی ۰/۱۱ درصد می‌باشد. (شکل ۲).

همچنین حدود ۴۹٪ مساحت حوضه در گروه هیدرولوژیکی A با نفوذ بالا و پتانسیل رواناب پائین، حدود ۹٪ مساحت حوضه در گروه هیدرولوژیکی B با قابلیت تولید رواناب متوسط، حدود ۱۷٪ در گروه هیدرولوژیکی C با پتانسیل تولید رواناب بالا و ۲۵٪ در گروه هیدرولوژیکی D با قابلیت تولید رواناب خیلی زیاد قرار دارد (پروین ۱۳۹۹). با وجود نقشه کاربری اراضی و مشخصات هیدرولوژیکی خاک، برای هر کاربری حوضه مطالعاتی، محدوده عددی CN از کتاب هیدرولوژی کاربردی دکتر علیزاده استخراج گردید. (جدول ۱)



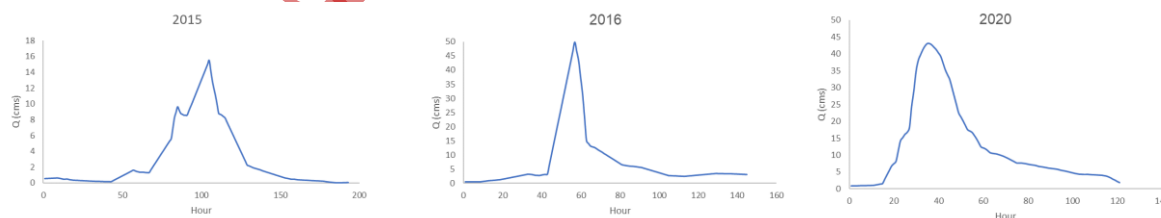
شکل ۲. نقشه کاربری اراضی

جدول ۱. کاربری اراضی و مقادیر CN

Land_Use	کاربری	مساحت (Km <sup>2</sup> )	درصد	CN_A	CN_B	CN_C	CN_D
mix(dryfarming_x)	مخلوط کشاورزی دیم	۲۸/۱۳	۱/۹۲	۶۴	۷۵	۸۲	۸۵
lowforest	جنگل کم تراکم	۲۲/۳	۱/۵۲	۳۶	۶۰	۷۳	۷۹
modrange	مرتع	۵۷/۲۹	۳/۹۲	۴۹	۶۹	۷۹	۸۴
rock	صخره	۰/۹۹	۰/۰۷	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
modforest	جنگل	۸۵/۸۳	۵/۵۸	۳۶	۶۰	۷۳	۷۹
mix(modrange_x)	مخلوط مرتع	۵۴/۱۱	۳/۷	۳۹	۶۱	۷۴	۸۰
mix(poorange_x)	مخلوط مرتع فقیر	۲۱/۷۷	۱/۴۹	۶۸	۷۹	۸۶	۸۹
verylowforest	جنگل خیلی فقیر	۳۸/۴۶	۲/۶۳	۴۵	۶۶	۷۷	۸۳
poorange	مرتع فقیر	۳۸/۷۵	۲/۶۵	۶۸	۷۹	۸۶	۸۹
mix(verylowforest_x)	جنگل خیلی فقیر	۴/۸۹	۰/۳۳	۴۵	۶۶	۷۷	۸۳
urban	شهری-روستایی	۱/۶۴	۰/۱۱	۵۱	۶۸	۷۹	۸۴
denseforest	جنگلهای انبوه	۲/۹۷	۰/۲	۲۵	۵۵	۷۰	۷۷
mix(agri_dryfarming)	کشاورزی دیم	۱۱۰۵/۸۸	۷۵/۵۹	۶۰	۷۳	۸۱	۸۴

### ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری:

جهت داده‌های بارندگی از بارش ۶ ساعته ایستگاه کرمانشاه و بارش روزانه ایستگاه ماهیدشت (واقع در محدوده مطالعاتی) و برای داده‌های جریان از ایستگاه هیدرومتری خرس‌آباد استفاده شد. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل (۱) نمایش داده شده‌است. برای شبیه‌سازی بارش رواناب از سه رخداد سیلاب تاریخ ۶ الی ۱۱ اسفند ۱۳۹۸، سیلاب ۸ الی ۱۲ فروردین ۱۳۹۵ و سیلاب ۱۷ الی ۲۴ آبان ۱۳۹۴ با بارش‌های متناظر آن‌ها استفاده گردید. با استفاده از اکسل هیدروگراف سیلاب‌ها رسم گردید. شکل (۳)



شکل ۳. هیدروگراف سه رخداد بارش-رواناب

ساخت خصوصیات فیزیوگرافی حوضه با استفاده از HEC-GeoHMS:

ابتدا نقشه رقوم ارتفاعی DEM با ابعاد سلولی ۳۰ متر تهیه و برای محدوده مطالعاتی برش داده شد. سپس با استفاده از HEC-GeoHMS مشخصات فیزیکی حوضه تهیه گردید. حوضه به چهار زیر حوضه به نام‌های W180، W240، W260 و W280 تقسیم و مشخصات هر زیر حوضه شامل مساحت، پیرامون، شیب، مرکز ثقل، طول و شیب آبراهه‌ها، طولانی ترین مسیر هیدرولوژیکی تا خروجی حوضه بدست آمد.

### روابط حاکم بر مدل :

برای محاسبه تلفات بارش و تبدیل بارش مازاد به جریان از روش حفاظت خاک آمریکا (SCS)، برای جریان پایه از روش ثابت ماهانه و برای روند جریان از روش ماسکینگام استفاده گردید.

### روش حفاظت خاک آمریکا (SCS) :

در روش SCS ابتدا زمان تاخیر از فرمول زیر محاسبه می گردد. (رابطه ۱)

$$t_{lag} = \frac{L^{0.7} (S+1)^{0.7}}{190 \cdot y^{0.5}} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که در آن  $T_{lag}$  زمان تاخیر حوضه بر حسب ساعت،  $L$  طول رودخانه اصلی بر حسب فوت،  $y$  متوسط شیب حوضه (درصد) که غالباً برابر شیب متوسط رودخانه اصلی است و  $S$  نمایه نگهداشت آب در داخل حوضه (اینچ) که مقدار آن برابر است با : (رابطه ۲)

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در این فرمول CN نمایه خصوصیات حوضه از نظر نفوذپذیری است.

سپس زمان تمرکز حوضه از معادله زیر محاسبه می شود. (رابطه ۳)

$$t_c = 1 / 67 (t_{lag}) \quad \text{(رابطه ۳)}$$

بارش مازاد که تبدیل به رواناب می شود از معادله زیر محاسبه می شود. (رابطه ۴)

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.1S} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$Q$  حجم رواناب،  $P$  بارش و  $s$  نگهداشت سطحی خاک بر حسب میلی متر و یا اینچ می باشد

با توجه به نقشه کاربری اراضی و مشخصات هیدرولوژیکی خاک برای مقدار CN بصورت پیش فرض عدد اولیه ۷۰ وارد شد تا HEC-GeoHMS مقادیر  $t_{lag}$  و زمان تمرکز را محاسبه نماید که بعد در واسنجی مدل به روش سعی و خطا برای هر زیرحوضه بهینه گردید.



## روش ماسکینگام:

در افزونه HEC-GeoHMS برای روندیابی جریان روش ماسکینگام انتخاب گردید. مبنای ماسکینگام معادله پیوستگی می باشد. (رابطه ۵)

$$\frac{ds}{dt} = I - O \quad \text{(رابطه ۵)}$$

S حجم ذخیره آب در رودخانه، I دبی ورودی، O دبی خروجی و t زمان است. در روش ماسکینگام فرض می شود که حجم ذخیره، تابعی خطی از سیلاب ورودی و خروجی است. (رابطه ۶)

$$S = K[XI + (1 - X) \times O] \quad \text{(رابطه ۶)}$$

K برحسب زمان (ساعت) و X ضریب ثابت می باشد

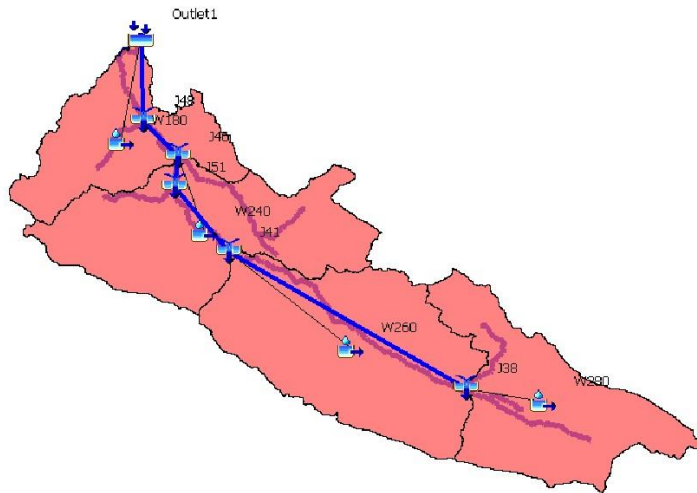
پارامتر k ثابت تناسب که به ضریب ذخیره معروف است زمان پیمایش می باشد و مقدار X ضریب ثابت بین مقادیر صفر و ۰/۵ می باشد در این پژوهش مقدار K از رابطه کلارک، (رابطه ۷) محاسبه گردید

$$K = \frac{C.L}{\sqrt{S}} \quad \text{(رابطه ۷)}$$

K برحسب ساعت، c ضریبی بین ۱/۳ تا ۳/۵ متغیر است، L طول رودخانه اصلی برحسب کیلومتر، S شیب متوسط برحسب درصد مشخصات حوضه در (جدول ۲) و (شکل ۴) آمده است.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی حوضه

زیرحوضه	Reach	طول (کیلومتر)	K کلارک (ساعت)	شیب زیرحوضه	CN	زمان تمرکز (ساعت)	زمان تاخیر (ساعت)	مساحت (کیلومتر مربع)
W180	R10	۱۵	۷/۳	۷/۰۷	۷۰	۷/۷۵	۴/۶۴	۲۲۱/۱۳
	R20	۷/۰۹	۳/۴					
W240	R40	۴/۷۲	۱/۹۰	۱۰/۲۹	۷۰	۱۲/۶۹	۷/۶	۳۶۲/۴۹
	R80	۱۳/۵۵	۵/۵۰					
W260	R120	۳۷/۹۱	۱۵/۸۰	۹/۶۷	۷۰	۱۲/۵	۷/۴۸	۴۲۰/۳۱
W280				۱۴/۴۴	۷۰	۱۰/۰۶	۶/۰۲	۳۰۳/۱



شکل ۴. شماتیک زیر حوضه‌ها در مدل HEC-HMS

### آماره‌های مورد استفاده در ارزیابی:

شبه‌ساز HEC-HMS 4.11 برای ارزیابی مدل از چهار آماره میانگین مجموع مربعات خطا (RMSE)، نش ساتکلیف (NSE) و (Percent Bias) و مجموع مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) استفاده می‌کند.

### میانگین مجموع مربعات خطا RMSE:

تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد. (رابطه ۸)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2} \quad \text{رابطه ۸}$$

### نش - ساتکلیف Nash-Sutcliffe:

یکی از رایج‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی نش-ساتکلیف است که شکلی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطا می‌باشد و نسبت واریانس باقیمانده به واریانس دبی‌ها را نشان می‌دهد. (رابطه ۹)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

مقدار نش-ساتکلیف در دامنه منفی بی‌نهایت تا +۱ قرار می‌گیرد و بهینه‌ترین مقدار آن +۱ می‌باشد. مقدار +۱ نشان دهنده رگرسیون با شیب یک بین داده‌های مشاهداتی و محاسباتی است. اگر NSE بزرگ‌تر از ۰/۷ باشد یعنی کارایی مدل عالی، بین مقادیر ۰/۳ تا ۰/۷ عملکرد خوب و قابل قبول و کوچک‌تر از ۰/۳ غیر قابل پذیرش است.

### : Percent Bias

این آماره میانگین انحراف بین سری زمانی مشاهداتی و محاسباتی را نشان می‌دهد که مقادیر مثبت یعنی بیش‌برآوردی و مقادیر منفی یعنی کم‌برآوردی و مقدار بهینه آن صفر می‌باشد. (رابطه ۱۰)

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{obs})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \times 100 \quad \text{رابطه ۱۰}$$

در رابطه‌های RMSE, NSE, PBIAS:  $Q_{obs}$  دبی مشاهداتی،  $Q_{sim}$  دبی محاسباتی، n تعداد داده‌ها و i شمارنده می‌باشد.

### خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)

مقدار RMSE را به دامنه داده‌های متغیر وابسته تقسیم کرده و آن را RMSE نرمال شده (NRMSE) می‌نامند. این معیار برای مقایسه مدل‌های مختلف مناسب خواهد بود. لازم به ذکر است که NRMSE زیر ۱۰ درصد نشان دهنده دقیق بودن مدل، ۱۰-۲۰ درصد مناسب بودن مدل، ۲۰-۳۰ درصد دقت متوسط و بیش از ۳۰ درصد نشانه ضعیف بودن مدل است. (رابطه ۱۱)

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{MAX} - X_{MIN}} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

### شبیه‌سازی سیلاب:

بعد از اینکه مدل فیزیکی در ابزار HEC-GeoHMS ساخته شد، در شبیه‌ساز HEC-HMS4.11 فراخوانی گردید. در مدل مجدداً ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری معرفی شدند و داده‌های سه رخداد سیل فوق‌الاشاره و بارش‌های متناظر ایستگاه‌های هواشناسی بصورت سری زمانی وارد مدل و بعد از اجراء عملیات واسنجی انجام پذیرفت

### واسنجی:

در این پژوهش برای واسنجی ابتدا مقادیر K محاسباتی از رابطه کلارک و ضریب X که برای مدل تعریف شده بودند بدون تغییر و ثابت ماند و واسنجی به روش سعی و خطا با پارامترهای دیگر انجام گردید.

### روش سعی و خطا:

در روش سعی و خطا با تغییر مداوم مقادیر CN و پارامترهای وابسته به آن شامل زمان تاخیر، زمان تمرکز و تلفات بارش، مدل در محدوده مناسب قرار گرفت. مقدار اولیه برای شماره منحنی در سطح حوضه ۷۰ فرض شد که بعد از واسنجی مقادیر بهینه CN در سطح حوضه بین ۶۲ تا ۷۰ بدست آمد.

## بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی (Differential Evolution)

یکی از بهینه‌سازهای مدل HEC-HMS 4.11 الگوریتم تکامل تفاضلی می‌باشد. این الگوریتم که به اختصار DE نمایش داده می‌شود. الگوریتمی مبتنی بر جمعیت است که در سال ۱۹۹۵ توسط استورن<sup>۱</sup> و پرایس<sup>۲</sup> معرفی گردید. این الگوریتم مانند الگوریتم ژنتیک سه پارامتر جمعیت، جهش و کراس اور دارد اما برخلاف آن ابتدا عملگر mutation و سپس عملگر crossover اعمال می‌شود تا نسل جدید ایجاد گردد.

در این پژوهش بعد از اینکه بهینه‌سازی به روش سعی و خطا انجام پذیرفت و مقدار بهینه CN و زمان تاخیر و تلفات بارش بدست آمد جهت بهینه‌سازی ضرایب K و X ماسکینگام از بهینه‌ساز تکامل تفاضلی استفاده شد. برای استفاده از این بهینه‌ساز ابتدا ماژول Optimization فعال شد سپس ساختمان بهینه‌ساز با تعریف زمان شبیه‌سازی، حداقل و حداکثر تعداد تکرارها، جمعیت اولیه و میزان تلورانس آماده گردید. برای شناسایی پارامترهای K و X به بهینه‌ساز، با توجه به تعداد پنج Reach و با تعریف دو پارامتر به ازاء هر Reach تعداد ۱۰ پارامتر تعریف گردید. برای هر Reach در پارامتر اول مقدار اولیه K و مقادیر حداقل و حداکثر ممکن وارد شد. سپس در پارامتر دوم مقدار اولیه X و مقادیر حداقل و حداکثر وارد گردید. شبیه‌سازی با شرط توقف ۳۰ و ۵۰ تکرار تعریف و اجراء گردید. اگر حد بالا و پائین برای پارامترهای K و X تعریف نشود الگوریتم برای به حداقل رساندن تابع هدف ممکن است اعدادی برای پارامترها تولید کند که با واقعیت روندیابی جریان مطابقت نداشته باشد به همین دلیل بعد از وارد کردن مقدار اولیه پارامتر K محاسباتی از روش کلارک و پارامتر  $X=0.25$ ، حد بالا و پائین برای k بین  $30 \pm$  تا  $50 \pm$  درصد مقدار اولیه وارد شد. و مقدار X بین ۰/۱ به عنوان حد پائین و ۰/۳۵ به عنوان حد بالا تعریف شد.

## نتایج و بحث:

در واسنجی با روش سعی و خطا برای رخدادهای سیلاب تاریخ آبان ۱۳۹۴ (نوامبر ۲۰۱۵)  $(NSE=0.665, PBIAS=26.62)$ ، در رخدادهای سیلاب فروردین ۱۳۹۵ (مارس ۲۰۱۶)  $(RMSE=0.6, NRMSE=3.95)$ ، در رخدادهای سیلاب اسفند ۱۳۹۸ (فوریه ۲۰۲۰)  $(RMSE=0.8, NSE=0.430, PBIAS=29.78, NRMSE=1.62)$  و در رخدادهای سیلاب تاریخ آبان ۱۳۹۴ (نوامبر ۲۰۱۵)  $(RMSE=0.9, NSE=0.235, PBIAS=7.57, NRMSE=2.13)$  بدست آمد.

در بهینه‌سازی ضرایب ماسکینگام با الگوریتم تکامل تفاضلی و با شرط توقف ۳۰ تکرار، برای رخدادهای سیلاب تاریخ آبان ۱۳۹۴ (نوامبر ۲۰۱۵)  $(NSE=0.731, RMSE=0.4, NSE=0.871, PBIAS=25.52, NRMSE=2.63)$ ، در رخدادهای سیلاب فروردین ۱۳۹۵ (مارس ۲۰۱۶)  $(RMSE=0.5, PBIAS=28.82, NRMSE=1.01)$  و در رخدادهای سیلاب اسفند ۱۳۹۸ (فوریه ۲۰۲۰)  $(NSE=0.834, PBIAS=7.96, NRMSE=0.95)$  بدست آمد.

در بهینه‌سازی ضرایب ماسکینگام با الگوریتم تکامل تفاضلی و با شرط توقف ۵۰ تکرار، برای رخدادهای سیلاب تاریخ آبان ۱۳۹۴ (نوامبر ۲۰۱۵)  $(NSE=0.731, RMSE=0.4, NSE=0.871, PBIAS=25.52, NRMSE=2.63)$ ، در رخدادهای سیلاب فروردین ۱۳۹۵ (مارس ۲۰۱۶)  $(RMSE=0.5, PBIAS=28.82, NRMSE=1.01)$  و در رخدادهای سیلاب اسفند ۱۳۹۸ (فوریه ۲۰۲۰)  $(NSE=0.834, PBIAS=7.96, NRMSE=0.95)$  محاسبه گردید. (جدول ۳)

1. Storn

2. Price

جدول ۳. آماره‌های RMSE، NRMSE، NSE و PBIAS-مقادیر محاسباتی و مشاهداتی

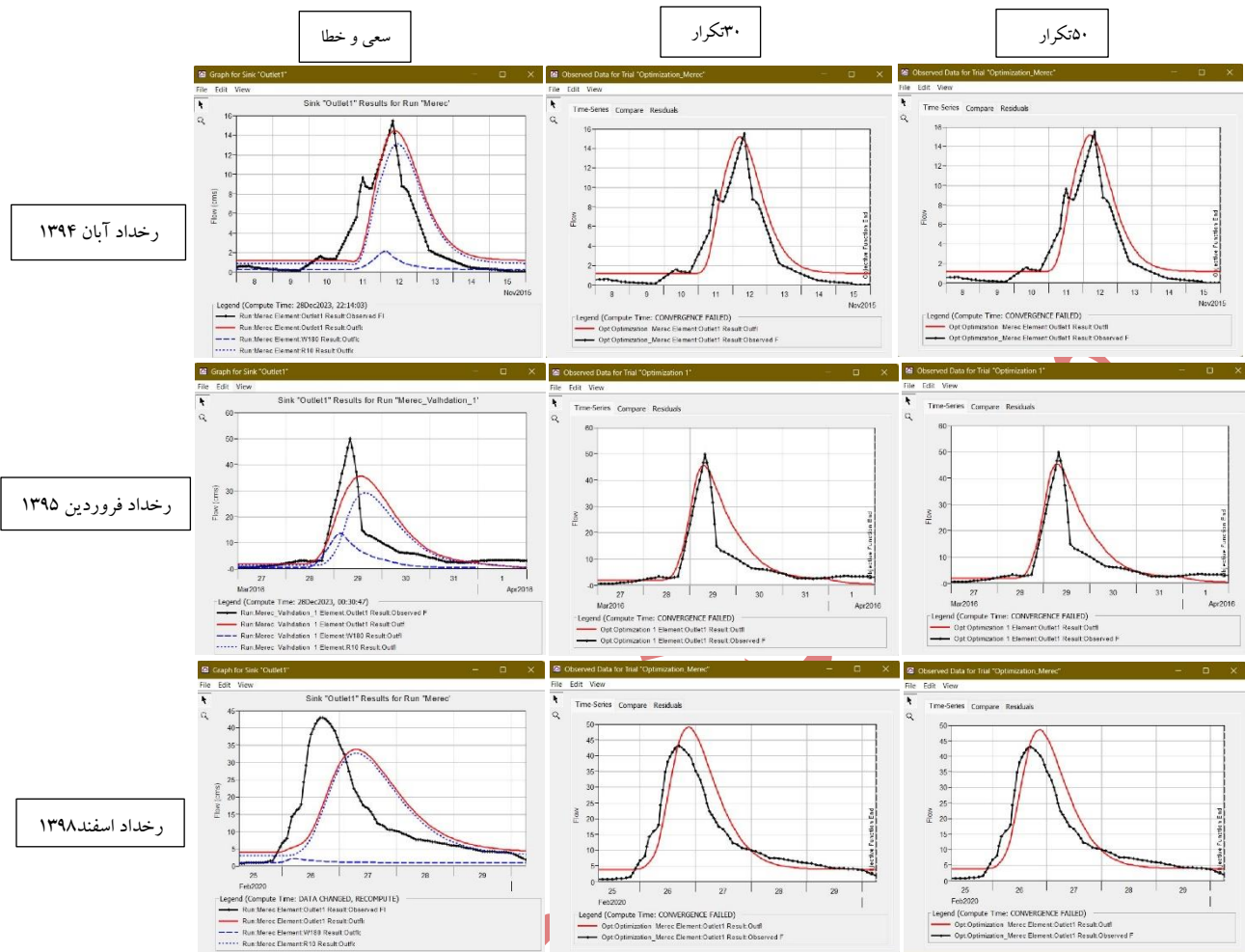
روش	رخداد	دبی پیک M <sup>3</sup> /S		حجم سیلاب MCM		اختلاف		درصد اختلاف		RMSE	NSE	P BIAS %	N RMSE %
		محاسباتی	مشاهداتی	محاسباتی	مشاهداتی	دبی پیک	حجم سیلاب	دبی پیک	حجم سیلاب				
سعی و خطا	آبان ۹۴	۱۴/۵	۱۵/۵	۱/۹۵	۱/۵۶	-۱	-۰/۳۹	-۶	۲۵	۰/۶	۰/۶۶۵	۲۵/۶۲	۳/۹۵
	فروردین ۹۵	۳۵/۷	۴۹/۹	۳/۹	۳	۱۴/۲	۰/۹	-۲۵/۴	۳۰	۰/۸	۰/۴۳	۲۹/۷۸	۱/۶۲
	اسفند ۹۸	۳۳/۸	۴۳	۴/۳۹	۴/۰۹	-۹/۲	۰/۳	-۲۱/۴	۷	۰/۹	۰/۲۳۵	۷/۵۷	۲/۱۳
الگوریتم DE تکرار ۳۰	آبان ۹۴	۱۵/۲	۱۵/۵	۱/۹۵	۱/۵۶	-۰/۳	-۰/۳۹	۲۵/۳۷	۲	۰/۴	۰/۸۶۷	۲۵/۵۲	۲/۶۳
	فروردین ۹۵	۴۵/۶	۴۹/۹	۳/۸۷	۳	-۴/۳	-۰/۸۷	-۵/۸	۲۸/۹۵	۰/۵	۰/۷۳	۲۸/۸۴	۱/۰۱
	اسفند ۹۸	۴۹/۱	۴۳	۴/۴۱	۴/۰۹	۶/۱	-۰/۳۲	۱۴/۱	۷/۷۹	۰/۴	۰/۸۱۴	۷/۹۶	-۰/۹۵
الگوریتم DE تکرار ۵۰	آبان ۹۴	۱۵/۲	۱۵/۵	۱/۹۵	۱/۵۶	-۰/۳	-۰/۳۹	-۲/۱	۲۵/۳۷	۰/۴	۰/۸۷۱	۲۵/۵۲	۲/۶۳
	فروردین ۹۵	۴۵/۵	۴۹/۹	۳/۸۷	۳	-۴/۴	-۰/۸۷	-۸/۸	۲۸/۹۳	۰/۵	۰/۷۳۱	۲۸/۸۲	۱/۰۱
	اسفند ۹۸	۴۸/۵	۴۳	۴/۴۱	۴/۰۹	۵/۵	-۰/۳۲	۱۲/۷	۷/۷۹	۰/۴	۰/۸۳۴	۷/۹۶	-۰/۹۵

الگوریتم DE با توجه به مقادیر اولیه k و x و دامنه تعریف شده، مقادیر بهینه پارامترهای K و X ماسکینگام را در ۳۰ و ۵۰ تکرار الگوریتم محاسبه نمود (جدول ۴)

جدول ۴. پارامترهای K و X ماسکینگام مقادیر اولیه و بعد از بهینه‌سازی

Element	پارامتر	واحد	مقدار اولیه	رخداد آبان ۱۳۹۴		رخداد فروردین ۱۳۹۵		رخداد اسفند ۱۳۹۸	
				تکرار ۳۰	تکرار ۵۰	تکرار ۳۰	تکرار ۵۰	تکرار ۳۰	تکرار ۵۰
				مقدار بهینه	مقدار بهینه	مقدار بهینه	مقدار بهینه	مقدار بهینه	مقدار بهینه
R10	K - ماسکینگام	ساعت	۷/۳	۵/۱۱۷۲	۵/۱۱	۳/۵۶۲۷	۳/۶۵	۳/۶۵	۳/۶۵
R10	x - ماسکینگام		۰/۳۵	۰/۱۰۷۲۲	۰/۱	۰/۱۰۲۰۵	۰/۱۰۰۹۲	۰/۱۴۰۴۲	۰/۱۰۰۲۵
R20	K - ماسکینگام	ساعت	۴/۴	۲/۴۱۸۸	۲/۳۸۱۵	۱/۷	۱/۷۰۰۱	۱/۷۹۷۹	۱/۷
R20	x - ماسکینگام		۰/۳۵	۰/۱	۰/۱	۰/۴	۰/۴	۰/۱	۰/۱۰۰۷۹
R40	K - ماسکینگام	ساعت	۱/۹	۱/۳۳۳۸	۱/۳۳۰۱	۱	۱/۰۰۰۵	۱/۰۲۴۵	۱
R40	x - ماسکینگام		۰/۳۵	۰/۱	۰/۱	۰/۲۰۸۵۹	۰/۱	۰/۱۹۵۴۱	۰/۱
R80	K - ماسکینگام	ساعت	۵/۵	۳/۸۹۶۵	۳/۸۵۰۴	۲/۷۵۵۹	۲/۷۵	۲/۷۵	۲/۷۵
R80	x - ماسکینگام		۰/۳۵	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۱۰۰۰۳	۰/۱۷۲۳۲	۰/۱
R120	K - ماسکینگام	ساعت	۱۵/۸	۱۱/۱۰۱	۱۱/۰۶	۲۳/۷	۲۳/۷	۸/۱۳۱۷	۷/۹۰۰۲
R120	x - ماسکینگام		۰/۳۵	۰/۱	۰/۱۰۰۶۳	۰/۱۰۱۶۲	۰/۱	۰/۱	۰/۱

هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهده‌ای در هر سه رخداد با روش‌های سعی و خطا، بهینه‌سازی با شرط توقف ۳۰ و ۵۰ تکرار مطابقت داده شد. (شکل ۵)

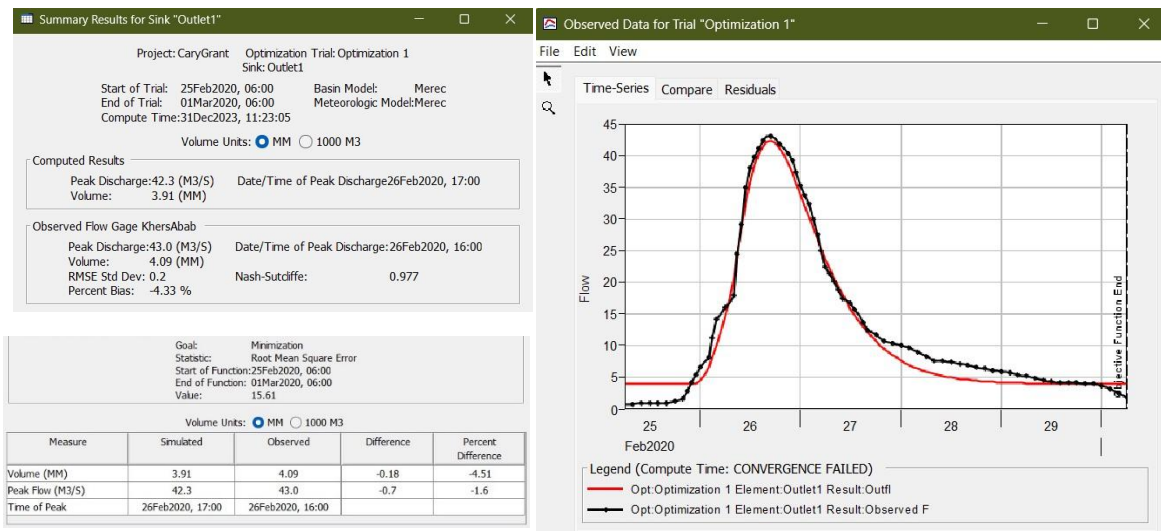


شکل ۵. مقایسه هیدروگراف‌های سه رخداد بعد از بهینه سازی

در دسته‌ای از مطالعات جهت بهینه‌سازی پارامترهای  $K$  و  $X$  آستانه بالا و پائین تعریف نگردیده است و این اقدام موجب شده است بهینه‌ساز حتی مقادیر منفی برای پارامتر  $X$  بدست آورد. اکبری و همکاران (۱۳۹۰) نادیده گرفتن مقادیر منفی در بازه‌های کوچک رودخانه کارون را باعث اختلاف زیاد هیدروگراف محاسباتی با مشاهداتی دانسته و حذف مقادیر منفی را توصیه نکرده‌اند همچنین ظهیری و همکاران (۱۳۹۶) جهت به حداقل رساندن اختلاف بین هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی و به استناد محققین دیگر مانند Dooge (۱۹۷۳)، Singh (۱۹۸۸) و Hosseini (۲۰۰۹) مقادیر منفی جهت پارامتر  $X$  راجاز دانسته‌اند

با توجه به سوابق تحقیقاتی موجود و به منظور بررسی کارایی الگوریتم، با شرط توقف ۳۰ تکرار و تغییر دامنه پارامترهای  $K$  و  $X$  این بار مقدار  $K$  بین ۰/۱ و ۳۰ و مقدار  $X$  در محدوده صفر و ۵/۰ قرار داده شد سپس الگوریتم با مفروضات جدید برای رخداد اسفند ۱۳۹۸ RUN گردید. در این روش مقادیر آماری (NSE= 0.977, PBIAS=-4.33, RMSE=0.2, NRMSE=0.47)، اختلاف حجم محاسباتی با مشاهداتی (-۰/۱۸) میلیون مترمکعب با درصد اختلاف (۴/۵۱) و اختلاف دبی پیک محاسباتی با مشاهداتی (-۰/۷) مترمکعب برثانیه با درصد اختلاف (۱/۶) بدست آمد بنابراین الگوریتم می‌تواند اختلاف هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی را به حداقل ممکن برساند (شکل ۶)





شکل ۶. هیدروگراف و مقادیر دبی پیک و حجم سیلاب

پارامتر K در R10 و R40 برابر ۰/۱ و در R20 معادل ۰/۹۷ و پارامتر X در R80 با مقدار صفر بهینه گردید (جدول ۵)

جدول ۵. پارامترهای K و X ماسکینگام مقادیر اولیه و بعد از بهینه‌سازی

Element	پارامتر	واحد	مقدار اولیه	مقدار بهینه
R10	K - ماسکینگام	ساعت	۷/۳	۰/۱
R10	X - ماسکینگام		-۰/۲۵	-۰/۲۸۸۸۷
R20	K - ماسکینگام	ساعت	۳/۴	-۰/۹۷۳۷۶
R20	X - ماسکینگام		-۰/۲۵	-۰/۰۵۹۷۱۳۸
R40	K - ماسکینگام	ساعت	۱/۹	۰/۱
R40	X - ماسکینگام		-۰/۲۵	-۰/۲۵۱۹۳
R80	K - ماسکینگام	ساعت	۵/۵	۱/۱۹۷۷
R80	X - ماسکینگام		-۰/۲۵	۰
R120	K - ماسکینگام	ساعت	۱۵/۸	۱۳/۳۷۲
R120	X - ماسکینگام		-۰/۲۵	-۰/۳۳۳۵۳

همانگونه که از نتایج پیداست الگوریتم با دامنه وسیع‌تر می‌تواند نتایج بهتری در به حداقل رساندن تفاوت مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بگیرد اما نکته مهم اینجاست این مقادیر برای پارامترها نباید از دایره واقعی فاصله بگیرد. بنابراین همانطور که اشاره شد دامنه تغییرات برای پارامتر K ضرایب مثبت و منفی ۳۰٪ تا ۵۰٪ مقدار اولیه و دامنه تغییرات پارامتر X بین ۰/۱ و ۰/۳۵ قرار گرفت.

نتیجه گیری :

بر اساس تحقیقات پیشین، پژوهشگران زیادی در موضوع شبیه‌سازی بارش رواناب با مدل HEC-HMS کار کرده‌اند همچنین جهت واسنجی مدل و آنالیز حساسیت پارامترها به روش‌های مختلف اقدام نموده‌اند. در این پژوهش برای نخستین بار در حوضه رودخانه مرک که یکی از سرشاخه‌های حوضه بزرگ کرخه می‌باشد شبیه‌سازی بارش رواناب با مدل HEC-HMS و بهره‌گیری از افزونه HEC GeoHMS انجام، و واسنجی و آنالیز حساسیت پارامترهای مدل با روشی متفاوت بصورت سعی و خطا و الگوریتم تکامل تفاضلی انجام گردید. که نتایج ذیل را به همراه داشت.

مقدار آماره نش-ساتکلیف برای بارش رخداد آبان ۱۳۹۴ در واسنجی به روش سعی و خطا ۰/۶۶۵ و در بهینه‌سازی با الگوریتم DE در ۳۰ تکرار برابر ۰/۸۶۷ و در ۵۰ تکرار معادل ۰/۸۷۱ بدست آمد. برای رخداد فروردین ۱۳۹۵ مقدار نش ساتکلیف در واسنجی به روش سعی و خطا ۰/۴۳۰ و در بهینه‌سازی با الگوریتم DE در ۳۰ تکرار برابر ۰/۷۳۰ و در ۵۰ تکرار معادل ۰/۷۳۱ بدست آمد. و در رخداد اسفند ۱۳۹۸ مقدار نش ساتکلیف در واسنجی به روش سعی و خطا ۰/۲۳۵ و در بهینه‌سازی با الگوریتم DE در ۳۰ تکرار برابر ۰/۸۱۴ و در ۵۰ تکرار معادل ۰/۸۳۴ بدست آمد. این مقادیر نشان از کارایی بالای الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) دارد بطوریکه با آنالیز حساسیت پارامترهای روندیابی جریان و بدست آوردن مقادیر بهینه K و X ماسکینگام، و با توجه به بزرگتر بودن آماره نش-ساتکلیف از مقدار ۰/۷ و همچنین کمتر بودن مقدار NRMSE از ۱۰٪ می‌توان اظهار نمود کارایی مدل در حد عالی می‌باشد.

کاربرد این پژوهش با توجه به اینکه پارامترهای ماسکینگام نقش کلیدی در شبیه‌سازی رفتار هیدروگراف سیل در طول یک کانال، آبراهه و یا رودخانه دارند، می‌تواند به تحلیل و پیش‌بینی دقیق‌تر سیل و خطرات آن و همچنین طراحی سیستم‌های زهکشی کارآمدتر، طراحی مخازن و ... اشاره نمود و لذا پیشنهاد می‌گردد با توجه به تغییرات اقلیمی که منجر به تغییر شدت مدت بارش‌ها و وقوع سیلاب‌های ناگهانی می‌گردد در حوضه‌هایی که مناطق حساس و تراکم جمعیت دارند به روش پیش گفته پارامترهای روندیابی جریان واسنجی و بهینه گردند.

## منابع :

- اسدی، معصومه؛ جباری، ایرج و حسادی، همایون (۱۳۹۸). مدل‌سازی سیلاب در مناطق خشک و نیمه خشک با بهره‌گیری از مدل HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد استقلال میناب). *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۸(۳)، ۱۷-۳۳.
- اکبری، غلامحسین؛ براتی، رضا و حسین‌نژاد دوین، علیرضا (۱۳۹۰). بررسی شمایلی مختلف روش ماسکینگام کونژ در آبراهه‌های طبیعی. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۷(۳)، ۶۲-۷۴.
- براتی، رضا و اکبری، غلامحسین (۱۳۹۱). مقایسه مدل‌های هیدرولوژی روندیابی سیل در رودخانه‌ها. *مجله پژوهش آب/ایران*، ۶(۱۱)، ۱۰۵-۱۱۴.
- پروین، منصور (۱۳۹۹). پهنه‌بندی مناطق مستعد تغذیه‌ی آب زیرزمینی حوضه‌ی آبریز ماهیدشت کرمانشاه. *هیدروژئومورفولوژی*، ۷(۲۲)، ۱۲۹-۱۵۳.
- حیدری بی‌صفر، علی؛ حصاری، بهزاد و صمدیان، مرتضی (۱۳۹۹). تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر سیلاب طراحی با استفاده از مدل ریاضی Hec-Hms (مطالعه موردی: سد سردشت). *اکوهیدرولوژی*، ۷(۴)، ۹۶۵-۹۵۱.
- دامادی، سکینه؛ دهواری، عبدالحمید؛ دهمرده قلعه نو، محمدرضا و ابراهیمیان، محبوبه (۱۳۹۹). شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل Hec-Hms در حوزه آبخیز سرباز سیستان و بلوچستان. *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۱(۲۲)، ۲۸۷-۲۹۵.

سلطانی، سعید؛ مختاری، فهیمه؛ محیط، پوریا و کلهر، عاطفه (۱۴۰۰). بررسی اثر تغییر کاربری بر افزایش رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی Hec-HMS در حوضه آبخیز خرم‌آباد. *مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۰(۳۰)، ۹۲-۸۱.

ظهیری، عبدالرضا؛ اصغری، سلیم و دهقانی، امیر احمد (۱۳۹۶). روندیابی سیلاب رودخانه‌ها به روش ماسکینگام چندبازه‌ای. *نشریه آب و توسعه پایدار*، ۴(۱)، ۸۱ - ۸۸.

علم‌شاهی، هاله؛ عزیزیان، اصغر و بروکا، لوکا (۱۳۹۹). تلفیق مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و داده‌های بارش ماهواره‌ای با توان تفکیک زمانی و مکانی بالا جهت شبیه‌سازی سیلاب. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۴(۳)، ۷۳۹-۷۲۴.

متشفع، بهزاد؛ اخوندعلی، علی‌محمد؛ شریفی، محمدرضا و زارعی، حیدر (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر نحوه‌ی شکل‌گیری الگوی جریان بر هیدروگراف خروجی حوضه‌ی آبریز در شبیه‌ساز HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبریز رود زرد). *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۶(۲)، ۱۴-۱.

منصوری، رامین و ترابی، حسن (۱۳۹۴). به‌کارگیری الگوریتم تکامل تفاضلی (DE) برای بهینه‌سازی شبکه توزیع آب (مطالعه موردی: شبکه آبیاری تحت فشار اسماعیل‌آباد). *نشریه دانش آب و خاک*، ۲۵(۴/۲)، ۸۱ - ۹۵.

نعیمی هوشمند، فرهاد و احمدزاده کلپور، فریبرز (۱۴۰۱). شبیه‌سازی هیدروگراف‌های سیلاب طراحی در حوضه آبریز آیدوغموش با استفاده از مدل Hec-Hms. *نشریه علوم آب و خاک*، ۲۶(۳)، ۵۵ - ۶۷.

#### References :

Akbari, Gholamhossein., Barati, Reza and Hosseinnejad Devin, Alireza (2019). Investigation of different methods of Muskingum Conge method in natural waterways. *Iran Water Resources Research*, 7(3), 62-74. (inPersian)

Alamshahi, hale., Azizian, Asghar and Broca, Luca (2020). Integration of HEC-HMS hydrological model and satellite precipitation data with high temporal and spatial resolution for flood simulation. *Iran Irrigation and Drainage Journal*, 14(3), 724-739. (inPersian)

Asadi, Masoumeh., Jabari, Iraj and Hesadi, Hodayun (2019). Flood modeling in arid and semi-arid areas using the HEC-HMS model (case study: Minab Esteghlal Dam catchment area). *Quantitative Geomorphology Research*, 8(3), 17-33. (inPersian)

Barati, Reza and Akbari, Gholamhossein (2013). Comparison of hydrological models for flood trends in rivers. *Iranian Water Research Journal*, 6(11), 105-114. (inPersian)

Daide, F., Afgane, R., Lahrach, A., Chaoui, A., Msaddek, M. and Elhasnaoui, I (2021). Application of the HEC-HMS hydrological model in the Beht watershed (Morocco). *E3S Web of Conferences* 314, 05003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131405003>

Damadi, Sakineh., Dehwari, Abdul Hamid., Dehmarde Qala Nou, Mohammadreza and Ebrahimian, Mehbobeh (2020). Simulation of flood hydrograph using Hec-Hms model in Sarbaz watershed of Sistan and Baluchistan. *Watershed Management Journal*, 11(22), 287-295. (inPersian)

Dooge J.C.I. (1973). *Linear theory of hydrologic systems*. USDA, Agric. Res. Serv., Tech, Bull., No. 1468

Farahani, N., Farzin, S. and Karami, H (2023). Flood routing by Kidney algorithm and Muskingum model. *Natural Hazards*. 119, 2251-2269,

- Farzin, S., Singh, P., Karami, H., Farahani, N., Ehteram, M., Kisi, O., Allawi, M., Mohd, N., and El-Shafie, A. (2018). Flood Routing in River Reaches Using a Three-Parameter Muskingum Model Coupled with an Improved Bat Algorithm. *Journal Water*, 10(9), 11-30; <https://doi.org/10.3390/w10091130>
- Fiaz, H., Wu, R., and Yu, K. (2021). Application of Physically Based Semi-Distributed Hec-Hms Model for Flow Simulation in Tributary Catchments of Kaohsiung Area Taiwan. *Journal of Marine Science and Technology*, 29(1), 42-62. doi:10.51400/2709-6998.1003
- Hamdan, A.N.A., Almuktar, S. and Scholz, M. (2021). Rainfall-Runoff Modeling Using the HEC-HMS Model for the Al-Adhaim River Catchment, Northern Iraq. *Hydrology*, 8(2), 58. <https://doi.org/10.3390/hydrology8020058>.
- Hegazy, M. n., El-Fakharany, M. A., Abdo, A. M. and Mansour, n. m. (2023). Estimation of expected peak discharge and flood volume of the Heliopolis basin, East Cairo, Egypt, using RS and WMS program. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 6(3), 676-690. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.07.010>
- Heydari Besafar, Ali., Hessari, Behzad and Samadian, Morteza (2020). Sensitivity analysis of parameters affecting design flood using Hec-Hms mathematical model (case study: Sardasht Dam). *Ecohydrology*, 7(4), 951-965. (inPersian)
- Hosseini, S. M. (2009). Application of spreadsheets in developing flexible multiple-reach and multiple branch methods of Muskingum flood routing. *Computer Applications in Engineering Education*, 17(4): 448–454.
- Janicka, E. and Kanclerz, J. (2023). Assessing the Effects of Urbanization on Water Flow and Flood Events Using the HEC-HMS Model in the Wiryńka River Catchment, Poland. *Water*, 15(1), 86. <https://doi.org/10.3390/w15010086>.
- Lee, E.H. (2021). Development of a New 8-Parameter Muskingum Flood Routing Model with Modified Inflows. *Journal Water*, 13(22), 3170. <https://doi.org/10.3390/w13223170>
- Linh, N. and Minh, h. (2022). Global Land Surface Data Applications in Flood Hydrologic Modeling Using HEC-GeoHMS and HEC-HMS for Three Watersheds in Southeast Asia. *Vietnam Journal of Hydrometeorology* 3(12), 9-22. DOI:10.36335/VNJHM.2022(12).9-22
- Mansouri, Ramin and Turabi, Hassan (2015). Application of differential evolution (DE) algorithm for optimization of water distribution network (case study: Ismailabad pressurized irrigation network). *Water and Soil Science Journal*, 25(2/4), 81-95. (inPersian)
- Mohammed Ahmed Musa Eisa, B., Saeed, A. B., Dafalla, M. S. and Mohammed Ali Yhia Omer, A. (2022). Delineation of Wadi Haseeb Watershed from Digital Elevation Model Using HEC-Geo-HMS in ArcGIS, East Nile, Sudan. *East African Scholars Journal of Agriculture and Life Sciences*, 5(10), 180-187. DOI:10.36349/easjals.2022.v05i10.001
- Motshefa, Behzad., Akhund Ali, Ali Mohammad., Sharifi, Mohammad Reza and Zarei, Haider (2023). Evaluation of the effect of the formation of the flow pattern on the outlet hydrograph of the watershed in the HEC-HMS simulator (case study: Yellow River watershed). *Irrigation Science and Engineering*, 46(2), 1-14. (inPersian)
- Nadeem, M., u., Waheed, Z., Ghaffar, M., M., J., Hamza, Z., A., Nawaz, W., W., Hameed, M., F., Zeeshan, A., Qamar, S. and Masood, K. (2022). Application of HEC-HMS for flood forecasting in hazara catchment Pakistan, south Asia. *International Journal of Hydrology*. 6(1), 7-12. doi:10.15406/ijh.2022.06.00296

Naimi Houshmand, Farhad and Ahmadzadeh Kaliber, Fariborz (2022). Simulation of design flood hydrographs in Idogmush catchment using Hec-Hms model. *Journal of Water and Soil Sciences*, 26(3), 55-67. (inPersian)

Naresh, A. and Gopal Naik, M. (2023). Urban Rainfall-Runoff Modeling Using HEC-HMS and Artificial Neural Networks: A Case Study. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 8(3), 403-423. doi:10.33889/IJMEMS.2023.8.3.023

Parveen, Mansour (2019). Zoning of areas susceptible to underground water feeding in Mahidasht Kermanshah watershed. *Hydrogeomorphology*, 7(22), 129-153. (inPersian)

Sagathia, J., Kotecha, N., Patel, H. and Patel, A. (2020, February 21-22,2020). *Impact Assessment of Urban Flood in Surat City using HEC-HMS and GIS*. International Conference on Innovative Advancement in Engineering and Technology. Jaipur National University, Jaipur, India.

Singh, V. P. (1988). *Hydrologic Systems: Rainfall-Runoff Modeling*. Prentice Hall, N.J. Pearson College Div (January 1, 1988).

Soltani, Saeed., Mokhtari, Fahima., Mohit, Puria and Kalhar, Atefe (2021). Investigating the effect of change of use on the increase of runoff using Hec-HMS hydrological model in Khorram Abad watershed. *Scientific Research Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 10(30), 81-92. (inPersian)

Wang, W., Tian, W., Xu, D., Chau, K., Ma, Q. and Liu, C. (2023). Muskingum Models' Development and their Parameter Estimation: A State-of-the-art Review. *Water Resources Management*. 37, 3129–3150.

Zahiri, Abdul Reza., Asghari, Salim and Dehghani, Amir Ahmad (2017). Trending of river floods by multi-interval Muskingum method. *Journal of water and sustainable development*, 4(1), 81-88. (inPersian)

## **EXTRACTED ABSTRACT**

### **Background and purpose**

When the flow rate exceeds the throughput capacity of the river, due to the overflow on the left and right banks of the river, we see a flood event. This increase in flow rate can be due to heavy and short-term rains or long and heavy rains. Simulation of runoff and hydrograph production is widely used in the analysis of basin behavior against precipitation, calculation of flood volume and its peak, amount of casualties and the possibility of designing the dimensions of structures. The HEC-HMS model is very capable of simulating runoff and hydrograph production. But hydrograph production requires calibration and sensitivity analysis of parameters that dependent on the model.

### **Materials and methods**

In this study, to simulate and calibrate the runoff precipitation of the Merck. HEC-HMS model and HEC-GeoHMS extension have been used in Arc GIS. To prepare CN from land use and soil hydrological map, And for rainfall data from 6-hour rainfall at Kermanshah station, and daily rainfall of Mahidasht station, and for flow data from Khersabad, hydrometric station was used. to simulate runoff from three flood events used from February 25 to March 1, 27-31 March 2016 and 8-15 November 2015. Then, to calculate rainfall losses and convert the surplus rainfall to flow, the American soil protection method (SCS) was used, Monthly fixed method was used for base flow, For the flow process of the method Muskingum was used. After the physical model was built in the HEC-GHMS tool, In the HEC-HMS4.11 simulator, the recall and data of three extreme flood events and the corresponding precipitations of meteorological stations were entered into the model as a time series and after execution, the calibration operation was performed. In this research, for calibration, K was first calculated from Clark's relationship and X coefficient, which remained unchanged for the defined model and the calibration was done by trial and error by other methods. In the trial and error method, by the constant change of CN and the links related to that limited time, concentration time and precipitation losses, the model was placed in the appropriate range. The initial value for the curve at the basin level was assumed to be 70, which reached between 62 and 70 from the optimal CN calibration at the basin level. After the optimization is done by trial and error method and the optimal



value of CN, lag time and precipitation losses are obtained, To Optimizing of Muskingum's K and X coefficients, Differential Evolutionu was used.

## Findings:

In the calibration by trial and error method for the November 2015 flood event (NSE=0.665, PBias=26.62, RMSE=0.6, NRMSE=3.59) in March 2016 (NSE=0.430, PBias=29.78, RMSE=0.8, NRMSE=1.62) and in February 2020 (NSE=0.235, PBias=7.57, RMSE=0.9, NRMSE=2.13) were obtained. In optimizing the muskingum coefficients by differential evolution algorithm and a 50 replication stop, for the November 2015 flood event (NSE=0.871, PBias=25.52, RMSE=0.4, NRMSE=2.63) in the March 2016 event (NSE=0.731, PBias=28.82, RMSE=0.5, NRMSE=1.01) and in February 2020 (NSE=0.834, PBias=7.96, RMSE=0.4, NRMSE=0.95) were calculated. In calibration by the algorithm of differential evolution of the range of changes for parameter K, the positive and negative coefficients were 30% to 50% of the initial value and the range of changes of the X parameter was between 0.1 and 0.35. If the upper and lower limit is not defined for the K and X values, the algorithm will be able to adapt the most computational and observations, So that in the event of February 2020, statistical results (NSE=0.977, PBIAS=-4.33, RMSE=0.2, NRMSE=0.47) will be obtained.

## Conclusion:

In this study, precipitation simulation was performed by the HEC-HMS model and the use of the HEC GEOHMS plugin, by a different method, first calibration by trial and error, and then by differential evolution algorithm, the sensitivity analysis of the parameters involved in the simulation process was performed. By analyzing the sensitivity of flow trending parameters and obtaining optimal values of K and X, Muskingum showed the ability of differential evolution (DE) algorithm in calibration.

Keyword: HEC-GeoHMS, HEC-HMS, Merck, Muskingum, Sensitivity analysis

پیوست :



خلاصه مقادیر بهینه‌سازی