



Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil
Resources Conservation
(WSRCJ)

Web site:

<https://wsrcj.srbiau.ac.ir>

Email:

iawwsrj@srbiau.ac.ir
iawwsrj@gmail.com

**Vol. 13
No. 2 (50)**

**Received:
2023-04-12**

**Accepted:
2023-07-09**

Pages: 39-52



Evaluation of Rainfall-Runoff Model in the Simulation of Flood Hydrograph in April 2018; a Case Study of Karkheh Basin

Najmeh Fooladi¹, Ahmad Sharafati^{2*} and Tayeb Raziei³

- 1) Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2) Associate Professor, Civil Engineering Department, Science and Research Branch, Islamic Azad. University, Tehran, Iran.
3) Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran
*Corresponding author email: asharafati@srbiau.ac.ir

Abstract:

Background and Aim: Heavy and consecutive rains at early April of 2018 led to severe floods in large parts of Iran, especially in the Karkheh basin, which was accompanied by huge damages. The average rainfall in the Karkheh dam basin for the event of April 4-7, 2018 was about 87 mm, and for the event of April 11-17, 2018, it was nearly 108 mm. For the flood management by the reservoir, estimation of the peak discharge and flood hydrograph is essential in order to predict the hydrological behavior of the basin. Rainfall-runoff models that are used to simulate flood hydrographs are one of the methods of estimating runoff and a suitable tool for investigating and evaluating hydrological processes, water resources, and flood management.

Method: Since the estimation of peak discharge and flood hydrograph has great important to predict the hydrological behavior of the basin and also to take the necessary measures to reduce the flood risk, the present study was conducted by using HEC-HMS model to simulate the rainfall-runoff events during 2007-2018 in the Karkheh Basin. By using this model capabilities and the data from some hydrometric and meteorological stations in the basin, the volume and peak discharge of floods in that period were estimated. Because Seymareh dam impoundment has started since 2013; two separate basin models were developed and for running the model, 11 flood events were obtained then, the basin parameters were calibrated based on six events and the others were used for validation. In the process of developing the basin model, the SCS Curve Number method is used to calculate basin runoff losses and convert rainfall to runoff, the Clark Unit Hydrograph method and the Return flow method to calculate the base flow, the Muskingum method for hydrological routing, and the Weighted average method for spatial data analysis of rainfall. The Outlet Structure method was used for routing the reservoirs of Karkheh and Seymareh dams.

Results: Comparing the initial simulation results of the model with the observed values at the outlet of the basin and some hydrometric stations of the basin showed that the hydrograph model overestimates the flow. Therefore, using the residual squared sum objective function, basin parameters (CN, time concentration, storage coefficient, initial absorption, and recession constant) were calibrated. After calibration of parameters, the results showed that the calculated hydrographs were in good agreement with the Observational hydrographs in the Karkheh and Seymareh dams. Next, to check the accuracy and confirm the results, the model was validated by the five new rainfall events and to evaluate the efficiency of the model used in this stage, the Nash-Sutcliffe indices and the simulated variance coefficient were used.

Conclusion: Comparing the calculated results with the flood observational values (peak discharge) using the correlation coefficient (R^2) showed that there is a relatively good agreement between simulation and observation in sub-basins 5, 2, 7, and 1 (0.92, 0.73, 0.73 and 0.70, respectively). Also, the model efficiency index values in the validation period for the Nash-Sutcliffe index (0.33-0.99) and simulation variance coefficient (0-0.73) for the outlet of sub-basins 9, 6, 5, 1, and 8 are favorable and the HEC-HMS model approximately can provide an acceptable estimation of the flood hydrograph. So, it can be well-analyzed how the way flood events are formed in the Karkheh basin. Also, the sensitivity analysis of the model parameters showed that the curve number parameter (CN) has a greater effect on the changes in the objective function than other basin parameters.

Keywords: hydrologic modelling, HEC-HMS model, Curve Number, flood hydrograph, Karkheh basin



ارزیابی عملکرد مدل بارش رواناب در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب فروردین ماه

۱۳۹۸؛ مطالعه موردی حوضه آبریز کرخه^۱نجمه فولادی^۱، احمد شرافتی^{۲*} و طیب رضیعی^۳

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی عمران - مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
(۲) دانشیار گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
(۳) استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
*ایمیل نویسنده مسئول: asharafati@srbiau.ac.ir

چکیده:

زمینه و هدف: بارش‌های سنگین و پیاپی در ابتدای سال ۱۳۹۸ به بروز سیلاب‌های شدید در بخش‌های وسیعی از کشور به ویژه در حوضه کرخه منجر شد که با خسارت‌های بسیاری همراه بود. میانگین بارش در حوضه سد کرخه در رویداد بارش ۴ تا ۷ فروردین ۱۳۹۸ در حدود ۸۷ میلی‌متر و در رویداد بارش ۱۱ تا ۱۷ فروردین ماه ۱۳۹۸ نزدیک به ۱۰۸ میلی‌متر گزارش شده است. در مدیریت سیلاب توسط مخزن، برآورد دبی پیک و هیدروگراف سیل به منظور پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک حوضه اجتناب‌ناپذیر است. مدل‌های بارش-رواناب که برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب به کار برده می‌شوند یکی از روش‌های برآورد رواناب و ابزار مناسبی برای بررسی و ارزیابی فرایندهای هیدرولوژیک، منابع آب و مدیریت سیلاب به شمار می‌روند.

روش پژوهش: از آنجایی که برآورد دبی پیک و هیدروگراف سیل به منظور پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک حوضه و اخذ تدابیر لازم برای کاهش خطر سیلاب از اهمیت زیادی برخوردار است؛ در این پژوهش، ضمن استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) از مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب رویدادهای بارشی دوره زمانی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۸ در حوضه آبریز کرخه استفاده شده است. برای این منظور، با استفاده از توانمندی مدل HEC-HMS و داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری و آب و هواشناسی پراکنده در سطح حوضه به برآورد حجم و دبی پیک سیلاب‌ها در دوره زمانی یاد شده اقدام گردید. به دلیل شروع آگیری سد سیمره در حوضه مذکور از سال ۱۳۹۲، دو مدل حوضه مجزا توسعه داده شده و برای اجرای مدل، ۱۱ رویداد سیلاب استخراج و سپس پارامترهای مدل براساس ۶ هیدروگراف مشاهداتی واسنجی و براساس ۵ هیدروگراف دیگر ارزیابی شد. در فرایند ساخت مدل حوضه از روش شماره منحنی SCS برای محاسبه تلفات رواناب حوضه و تبدیل بارش به رواناب، از روش هیدروگراف واحد کلارک و روش جریان بازگشتی برای محاسبه جریان پایه، از روش ماسکینگام برای روندیابی هیدرولوژیک و از روش میانگین وزنی برای تحلیل مکانی داده‌های بارندگی استفاده شد.

یافته‌ها: مقایسه نتایج اولیه شبیه‌سازی مدل یاد شده با مقادیر مشاهداتی در خروجی حوضه و برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب حوضه (۹ زیرحوضه) مذکور نشان داد که مدل هیدروگراف جریان را بیشتر برآورد می‌کند. از این رو، با استفاده از تابع هدف مجموع مجذور باقی مانده، پارامترهای حوضه (CN)، زمان تمرکز، ضریب ذخیره، جذب اولیه و ثابت بازگشتی) مورد واسنجی قرار گرفتند. پس از واسنجی پارامترها، نتایج حاکی از انطباق مناسب هیدروگراف‌های محاسباتی با مشاهداتی در سدهای کرخه و سیمره و برخی از ایستگاه‌های منتخب بودند؛ اما در برخی از نقاط مد نظر هیدروگراف‌های محاسباتی کمتر برآورد شدند. در ادامه، برای بررسی صحت و تایید نتایج، مدل به کمک ۵ واقعه بارش جدید اعتبارسنجی شد. همچنین برای ارزیابی کارایی مدل مورد استفاده در این مرحله از آماره‌های ضریب همبستگی، ناش - ساتکلیف و ضریب واریانس شبیه‌سازی شده استفاده شد.

نتایج: مقایسه نتایج مدل با مقادیر مشاهداتی سیلاب (دبی اوج) با استفاده از ضریب همبستگی (R^2) نشان داد که برای زیر حوضه‌های ۵، ۲، ۷ و ۱ تطابق نسبتاً خوبی برقرار است (به ترتیب، ۰/۹۲، ۰/۷۳، ۰/۷۳ و ۰/۷۰). همچنین، مقادیر شاخص کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی برای شاخص‌های ناش- ساتکلیف (۰/۹۹-۰/۳۳) و ضریب واریانس شبیه‌سازی (۰/۷۳-۰) برای نقاط منتخب زیرحوضه‌های ۹، ۶، ۵، ۱ و ۸ مطلوب بوده و مدل HEC-HMS به طور نسبی می‌تواند برآورد قابل پذیرشی از هیدروگراف سیلاب ارائه دهد و از این رو می‌توان نحوه شکل‌گیری رویدادهای سیلابی حوضه آبریز کرخه را به خوبی تحلیل نمود. همچنین، تحلیل حساسیت پارامترهای مدل نشان داد که پارامتر شماره منحنی (CN) نسبت به سایر پارامترهای حوضه تاثیر بیشتری بر تغییرات تابع هدف دارند. کلید واژه‌ها: مدل‌سازی هیدرولوژیک، HEC-HMS، Curve Number، هیدروگراف سیلاب، حوضه کرخه



مقدمه

ورود دو سامانه بارشی در فروردین ماه سال ۱۳۹۸ موجب سیلاب‌های ویران‌گری در مناطق گسترده‌ای در غرب و جنوب غرب کشور شد. بر اساس گزارش‌های رسمی، در حدود ۴۵۰۰ شهر و روستا تحت تاثیر سیلاب قرار گرفتند. در نتیجه آن ۸۰ نفر از هموطنان جان خود را از دست دادند. همچنین، زیرساخت‌های مختلفی نظیر پل‌ها، جاده‌ها، شبکه‌های توزیع آب و برق، تاسیسات شهری و روستایی و زیرساخت‌های کشاورزی صدمات جدی دیدند (Special Reporting Committee on Iran Floods, 2019).

از آنجایی که ساخت سدها یک استراتژی برای کاهش اثرات سیلاب محسوب می‌شود؛ برآورد دبی پیک و هیدروگراف سیلاب به منظور پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک حوضه اجتناب‌ناپذیر است (Moradnezehadi, Jourgholami, & Malekian, 2015). مدل‌های بارش- رواناب که برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل به کار برده می‌شوند یکی از روش‌های برآورد رواناب و ابزار مناسبی برای بررسی فرایندهای هیدرولوژیک و ارزیابی منابع آب و مدیریت سیلاب به شمار می‌روند (Ghafoori et al., 2009; Rostamizad et al., 2013; Azizian et al., 2018; Khademi et al., 2018). اگرچه مدل‌های زیادی به منظور شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب وجود دارند، اما نکته قابل توجه، نمایش نتایج در هر نقطه از حوضه می‌باشد که با این قابلیت، عناصر هیدرولوژیک ایجاد کننده خطا مشخص خواهند شد (Ghafoori et al., 2009). از این رو، HEC-HMS مدلی با قابلیت‌های خوب بوده که می‌تواند در پروژه‌های آبی به ویژه هشدار سیل کارایی مناسبی داشته باشد (Rahimzadeh & Habibi, 2018).

در میان مطالعات گسترده‌ای که طی سال‌های اخیر به طور مشخص به کاربرد این مدل در مدیریت سیلاب و موضوعات مرتبط با آن در ایران و سایر کشورها پرداخته‌اند، می‌توان به مطالعات زیر اشاره نمود. شارو^۱ (۲۰۲۱) در تحقیقی از نرم افزار HEC-HMS برای شبیه‌سازی جریان رودخانه دانگان در مالزی استفاده نمود. وی به ترتیب از روش تلفات اولیه و ثابت، روش انتقال هیدروگراف واحد کلارک، و روش روندیابی لاگ برای پیش‌بینی عمق رواناب، رواناب مستقیم و روندیابی کانال استفاده کرد. نتایج اولیه نشان داد که تفاوت معنی داری میان پیک جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی وجود دارد. او برای برطرف نمودن این اختلاف و به دست آوردن پارامترهای بهینه، واسنجی مدل را با فرایند بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت آن انجام داد. خاددور^۲ و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی تاثیر احداث سد بر مدیریت سیلاب را بررسی نمودند. در این پژوهش دو محور اصلی شامل تحلیل فراوانی سیلاب‌ها و برآورد جریان

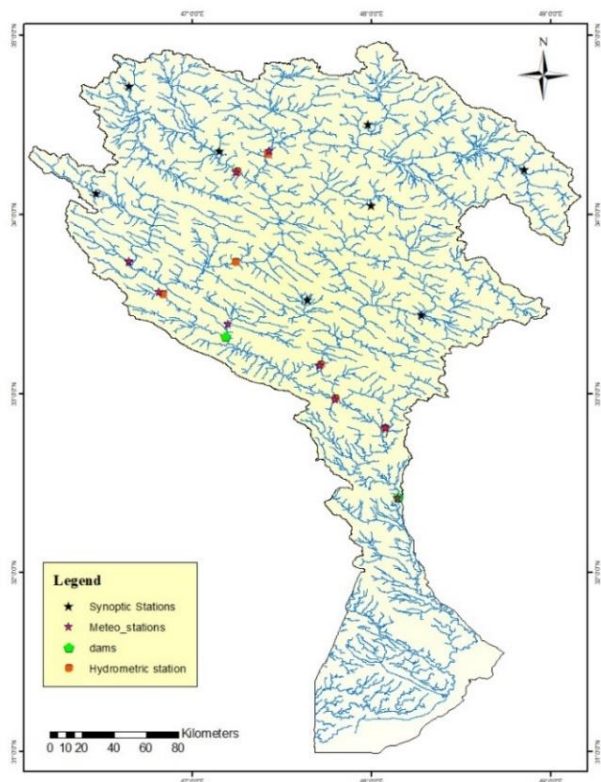
خروجی سیلاب در پایاب سد مد نظر بوده است. نتایج نشان داد که توزیع گامبل بهترین برازش را با داده‌های مقادیر جریان بیشینه در حوضه مورد مطالعه دارد. همچنین، روش روندیابی مخزن با استفاده از مدل HEC-HMS تحت دو سناریو: (۱) شبیه‌سازی با فرض نبود مخزن و (۲) شبیه‌سازی با فرض داشتن مخزن سد برای دوره بازگشت‌های مختلف ۲ تا ۲۰۰ سال، صورت پذیرفت. مقایسه دو سناریو با یکدیگر نشان داد که با افزایش دوره بازگشت، حجم سیلاب و دبی پیک به طرز چشم‌گیری کاهش یافته و بیان‌کننده عملکرد خوب مدل در برآورد دبی پیک خروجی سد می‌باشد.

در ایران نیز در طی یک دهه گذشته پژوهش‌های مختلفی در خصوص توانایی مدل HEC-HMS صورت پذیرفته است. رحیم‌زاده و حبیبی (۱۳۹۷)، با بهره‌مندی از مدل HEC-HMS هیدروگراف سیل حوضه روانسر کرمانشاه را شبیه‌سازی و با استفاده از نرم افزار Hyfa دوره بازگشت حداکثر دبی سیلاب لحظه‌ای را محاسبه نمودند. آنها برای این منظور ۵ رویداد بارش - رواناب را انتخاب نمودند. به دلیل تفاوت زیاد مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر مشاهداتی، درصد خطای دبی اوج پارامترهای متغیر مدل مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج حاصل از اعتبارسنجی با دو رویداد، صحت پارامترهای واسنجی شده را تایید نمود. همچنین، نتایج نرم افزار Hyfa نیز نشان داد که توزیع گامای دو پارامتری با حداقل خطای محاسباتی، مناسب‌ترین توزیع آماری است که داده‌ها با آن برازش شدند. داوطلب^۳ و همکاران (۲۰۱۷)، رویکردی ویژه برای واسنجی مدل HEC-HMS در حالت شبیه‌سازی پیوسته جریان برای حوضه کرخه ارایه نمودند. از آنجایی که واسنجی دستی نیازمند تغییر تعداد زیادی پارامتر بهم وابسته می‌باشد، بسیار زمان‌بر بوده و برای غلبه بر این مشکل، روش واسنجی رویداد محور (EBCT) را اجرا نمودند. بدین گونه پارامترهای حاکم بر رویدادهای زمستانی، بهاری و پاییزی را که قبل از مرحله واسنجی محاسبه شده بودند را به عنوان ورودی برای تسهیل واسنجی مدل هیدرولوژیک پیوسته استفاده نمودند. سپس، عملکرد مدل بر اساس معیار نکویی برازش مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق حاکی از آن بود که برآورد پارامتر رویداد محور با استفاده از شاخص‌های فصلی، کارایی و دقت مدل پیوسته HEC-HMS را افزایش می‌دهد.

به منظور مدیریت بهتر مخازن سدها به ویژه در زمان سیلاب، محققان برای پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب، روندیابی آن و اتخاذ راه‌حل‌های مناسب مدیریت مخزن سد در تلاش هستند. از آنجایی که رودخانه کرخه سومین رودخانه بزرگ ایران از منظر آبدی بوده و رودخانه‌ای با رژیم سیلابی محسوب می‌شود و تاکنون روندیابی مخازن سدها و کل سیستم بالادست

برآورد هیدروگراف سیلاب حوضه آبریز کرخه (بالادست سد کرخه) است که برای نخستین بار در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است.

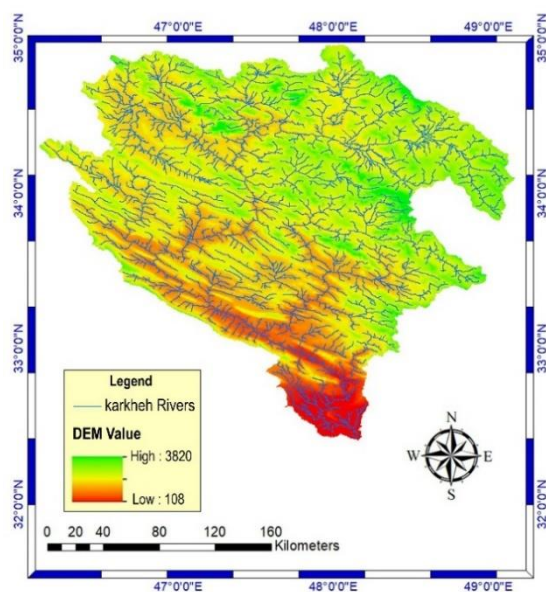
سد کرخه به صورت یکپارچه توسط مدل HEC-HMS در ایران مورد بررسی قرار نگرفته است؛ هدف از این پژوهش عبارتند از (۱) شبیه سازی رویدادهای بارشی شدید دوره ترسالی ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۸ و (۲) ارزیابی توانایی مدل HEC-HMS



(b)



(a)



(c)

شکل ۱.۱. موقعیت حوضه آبریز کرخه در کشور،

(b) ایستگاه‌های هیدرومتری، باران سنجی و سینوپتیک مورد استفاده در این پژوهش و (c) نقشه رقمی ارتفاعی حوضه آبریز کرخه با دقت ۵۰ متر (بالادست سد کرخه)

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کرخه در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه‌های زاگرس قرار داشته و جزیی از حوضه آبریز خلیج فارس به شمار می‌رود. این حوضه آبریز که در شکل ۱ نشان داده شده است با مساحتی حدود ۵۱۶۰۴ کیلومتر مربع که در محدوده جغرافیایی ۳۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۰۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۰۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است، به عنوان سومین حوضه پرآب کشور قلمداد می‌شود. همچنین، بلندترین نقطه ارتفاعی آن حدود ۳۶۰۰ متر و حداقل ارتفاع آن ۳ متر است (Iran Water & Power Resources Development CO, 2008). میانگین بارندگی در حوضه آبریز کرخه از حدود ۱۵۰ میلی متر در سال در مناطق جنوبی تا فراتر از ۱۰۰۰ میلی متر در سال در ارتفاعات شمالی و مناطق شرقی کرخه تغییر می‌نماید (Zohrabi et al., 2016; Salajegheh et al., 2011). بخش مولد رواناب حوضه مذکور تقریباً تا محل سد کرخه است که وسعت آن حدود ۴۳۰۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد (Iran

National Oil Company, 2018) و به عنوان منطقه مورد

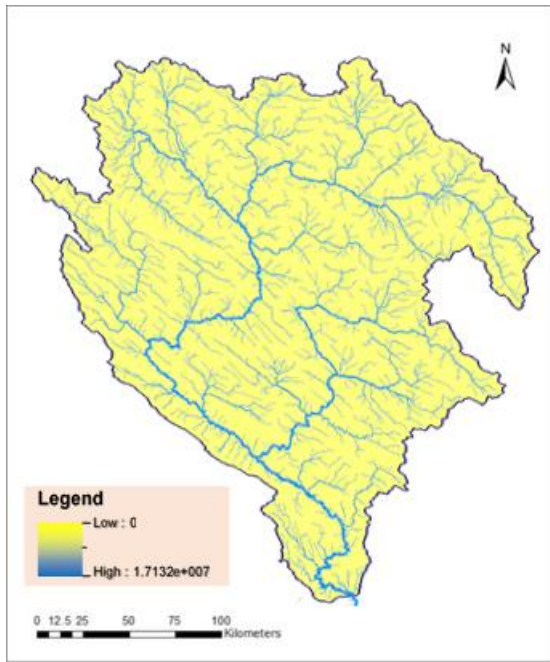
بررسی در این پژوهش انتخاب شده است. (شکل ۱)

خصوصیات فیزیوگرافی حوضه

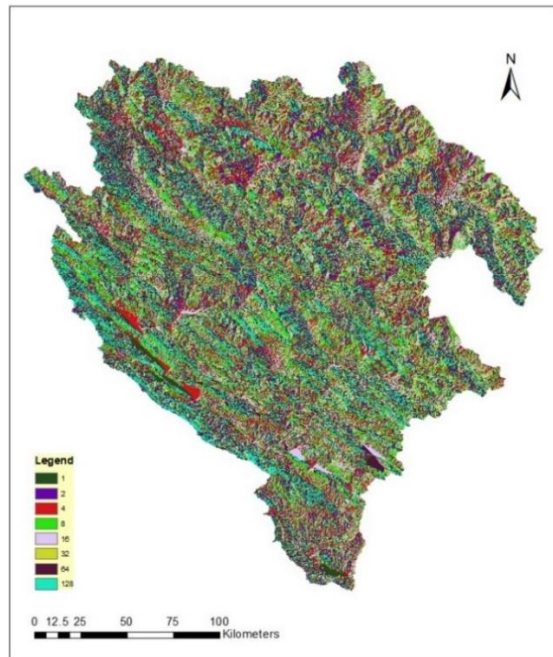
در این پژوهش، ابتدا با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی DEM50m، به ترتیب لایه‌های جهت جریان، جریان تجمعی، شیب و شبکه آبراهه‌های حوضه مذکور ترسیم شدند (Saghafian & Farazjou, 2007; Sabzevari et al., 2009). شکل لایه جهت جریان و جریان تجمعی به ترتیب در شکل‌های ۲-a و ۲-b نشان داده شده است. سپس، برخی از خصوصیات فیزیکی حوضه نظیر مساحت، محیط، شیب، طول آبراهه اصلی، ارتفاع حداقل و حداکثر حوضه و زمان تمرکز محاسبه شدند که در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین، نقشه شماره منحنی حوضه نیز از ترکیب نقشه گروه هیدرولوژیک خاک و کاربری اراضی و پوشش گیاهی حوضه برای شرایط رطوبتی متوسط تهیه شد که در شکل‌های ۲-c و ۲-d و ۳-a نشان داده شده است. با استفاده از الحاقیه HEC-GeoHMS در محیط ArcGIS نقشه زیرحوضه‌ها به همراه بازه‌ها و محل‌های اتصال آبراهه‌های اصلی ایجاد و سپس، حوضه‌بندی مطابق با شکل ۳-b انجام شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آبریز کرخه

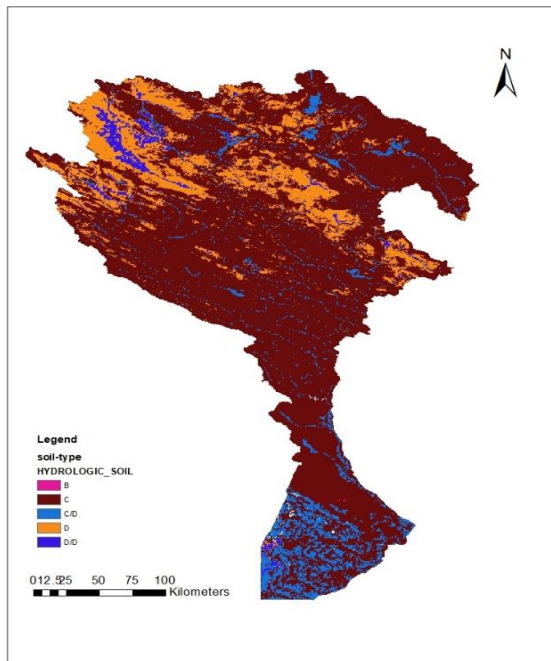
ردیف	نام ایستگاه	کد ایستگاه	UTMX	UTMY	ارتفاع از سطح دریا (متر)	نوع ایستگاه
۱	قورباغستان	۱۴۳-۲۱	۷۰۶۷۲۵	۳۷۹۰۰۹۱	۱۲۶۸	باران سنجی
۲	پل چهر	۱۲۷-۲۱	۷۲۳۲۱۱	۳۸۰۲۰۳۰	۱۲۷۵	تبخیر سنجی
۳	دارتوت	۱۵۷-۲۱	۶۵۴۴۷۲	۳۷۳۴۱۷۷	۹۰۷	تبخیر سنجی
۴	ورگج	۱۶۱-۲۱	۶۷۰۸۵۳	۳۷۱۴۹۸۱	۷۰۳	باران سنجی
۵	تنگ سیاب	۱۶۳-۲۱	۷۰۴۶۴۹	۳۶۹۵۵۷۷	۹۴۰	باران سنجی
۶	پل دختر کشکان	۱۸۳-۲۱	۷۵۸۱۸۲	۳۶۷۱۳۲۸	۷۰۰	باران سنجی
۷	چم گز	۱۸۷-۲۱	۷۶۳۳۱۳	۳۶۵۰۱۹۶	۳۸۵	تبخیر سنجی
۸	پل زال	۱۸۹-۲۱	۲۲۶۲۸۳	۳۶۳۳۴۱۱	۳۰۰	باران سنجی
۹	پای پل	۱۹۱-۲۱	۲۳۱۱۱۴	۳۵۸۸۹۳۹	۹۰	تبخیرسنجی
۱۰	اسلام آباد غرب	-	۶۳۴۶۵۹.۲۴۷	۳۷۷۵۳۱۴.۸۹۷	۱۳۴۸	سینوپتیک
۱۱	کرمانشاه	-	۶۹۷۷۴۶.۸۱۸	۳۸۰۳۰۵۸.۴۳۵	۱۳۸۱	سینوپتیک
۱۲	کنگاور	-	۷۷۳۶۱۸.۲۳۱	۳۸۲۱۶۲۹.۷۰۳	۱۴۶۸	سینوپتیک
۱۳	خرم آباد	-	۲۴۷۱۴۰.۰۳۵	۳۷۰۳۳۷۶.۰۷۵	۱۱۴۸	سینوپتیک
۱۴	کوهدهشت	-	۷۴۶۱۲۴.۱۲۲	۳۷۱۲۰۸۱.۱۰۴	۱۱۹۸	سینوپتیک
۱۵	نورآباد	-	۲۲۳۰۷۱.۳۶۶	۳۷۷۱۷۶۱.۴۸	۱۸۵۹	سینوپتیک
۱۶	ملایر	-	۲۰۱۹۹۵.۱۰۴	۳۷۹۰۸۵۸.۰۹۱	۱۷۷۶/۵	سینوپتیک
۱۷	روانسر	-	۶۵۱۱۰۱.۹۱	۳۸۴۲۱۲۳.۰۳۴	1380	سینوپتیک



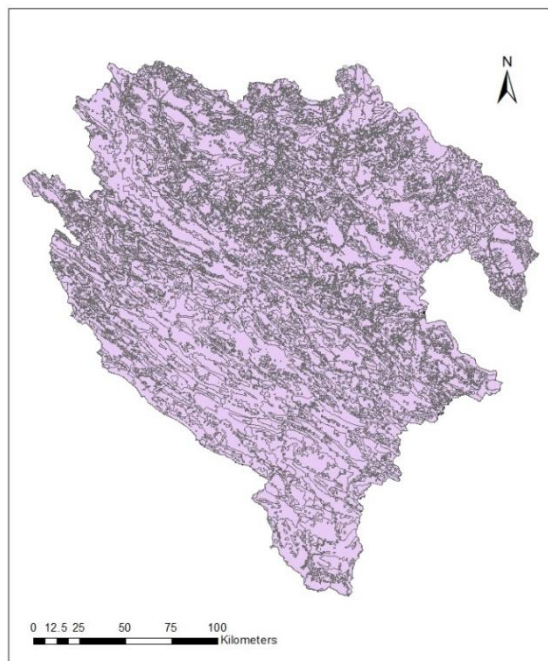
(b)



(a)

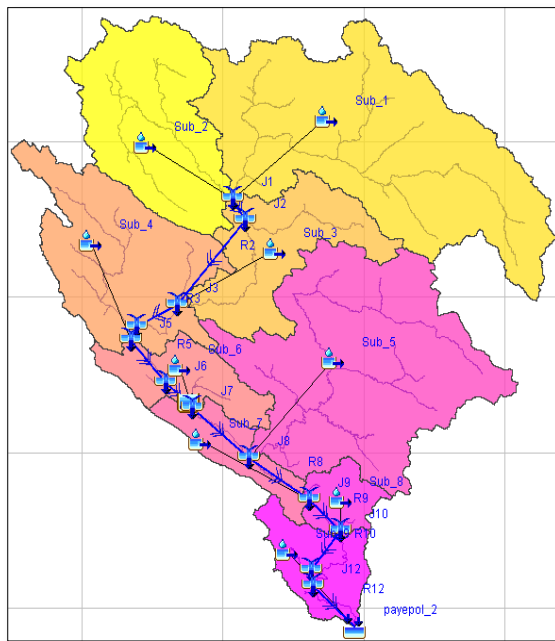


(d)

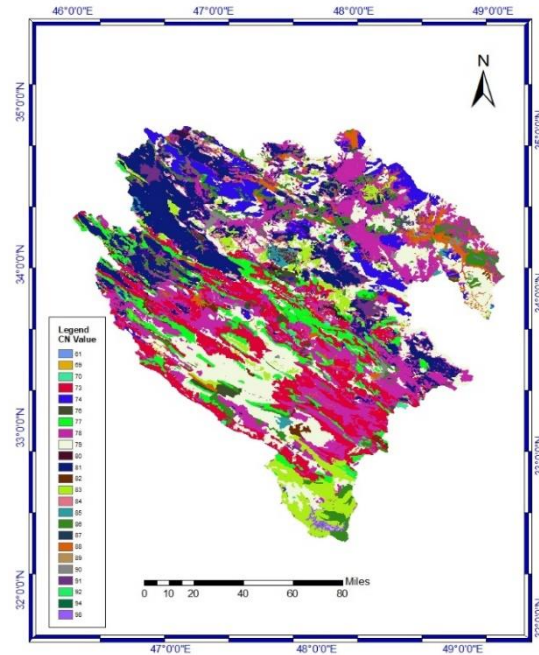


(c)

شکل ۲. (a) نقشه جهت جریان، (b) نقشه جریان تجمعی، (c) نقشه کاربری اراضی، (d) نقشه گروه هیدرولوژیک خاک (ORNL DAAC (NASA), 2018)



(b)



(a)

شکل ۳. (a) نقشه CN حوضه در شرایط رطوبتی متوسط؛ (b) تقسیم‌بندی زیر حوضه‌ها در محیط نرم افزار HEC-HMS

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبریز کرخه

ردیف	ایستگاه هیدرومتری	کد ایستگاه	UTMX	UTMY	ارتفاع از سطح دریا (متر)	نوع ایستگاه
۱	قورباغستان	۱۴۳-۲۱	۷۰۷۲۳۲۰۴۸۳	۳۷۹۰۳۱۷۰۷۸	۱۲۳۰	درجه ۱
۲	پل چهر	۱۲۷-۲۱	۷۲۳۲۴۶	۳۸۰۲۱۱۲	۱۲۸۰	درجه ۱
۳	هلیلان سیمه	۱۴۷-۲۱	۷۰۸۴۱۰	۳۷۳۶۷۱۱	۹۷۵	درجه ۱
۴	تنگ سازین	۱۵۹-۲۱	۶۷۰۸۵۷	۳۷۱۶۱۸۳	۷۰۰	درجه ۱
۵	تنگ سیاب	۱۶۳-۲۱	۷۰۵۲۲۰	۳۶۹۶۷۳۰	۹۴۰	درجه ۲
۶	جولوگیر ماژین	۱۸۵-۲۱	۷۶۴۹۲۱	۳۶۷۷۴۵۹	۳۷۰	درجه ۱
۷	پل دختر کشکان	۱۸۳-۲۱	۷۵۳۴۵۷	۳۶۷۲۵۳۰	۷۰۰	درجه ۱
۸	پل زال	۱۸۹-۲۱	۲۲۶۲۸۳	۳۶۳۳۴۱۱	۳۲۶	درجه ۲
۹	پای پل	۱۹۱-۲۱	۲۳۱۹۱۳	۳۵۸۹۷۵۸	۹۲	درجه ۱

جدول ۳. پارامترهای فیزیوگرافی بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب زیر حوضه‌های ۱ تا ۹

نام ایستگاه هیدرومتری	مساحت (کیلومتر مربع)	ارتفاع حداکثر محیط (کیلومتر)	ارتفاع حداقل (کیلومتر)	شیب متوسط (درصد)	طول آبراهه (کیلومتر)	مقدار CN برای شرایط رطوبتی متوسط	زمان تمرکز به روش SCS (ساعت)
پل چهر	۱۱۵۰۰/۶۶۵	۹۶۵/۳	۲۵۳۶	۱۲۵۱	۱۷/۵۹	۸۰/۲۵	۲۹/۳۱
قورباغستان	۵۴۸۷/۴۹	۵۴۴	۲۵۲۵	۱۲۵۱	۱۴/۱۷	۸۰/۹	۲۴/۳۱
هلیلان سیمه	۳۷۷۸/۷۶۷۵	۶۴۳	۲۹۴۷	۹۱۵	۲۱/۶۰	۷۸/۵۱	۲۲/۳۷
تنگ سازین	۵۵۸۲/۵۱	۶۹۰/۴۰	۲۴۶۲	۸۴۰	۱۷/۶۳	۷۸/۰۹	۲۰/۷۳
پل دختر	۱۰۱۴۱/۷۶۲۵	۹۱۴/۶۰	۲۵۱۶	۵۴۳	۲۲/۰۳	۷۸/۵۵	۳۱/۹۶
تنگ سیاب	۱۹۷۹/۳۵	۴۱۲/۹۰	۲۵۷۲	۸۳۴	۲۰/۴۴	۷۷/۹۷	۹/۶
جولوگیر ماژین	۱۴۵۶/۲۱۷۵	۳۶۹/۳	۲۱۵۲	۳۸۶	۲۵/۰۶	۷۸/۰۷	۱۳/۳۹
پل زال	۱۰۲۴/۹۲۵	۲۲۶/۵	۲۰۶۷	۲۷۲	۲۶/۲۶	۷۷/۷۴	۹/۲۲
پای پل	۱۸۷۹/۷۴	۳۲۴/۶۰۰	۲۱۷۶	۱۰۶	۱۲/۲۷	۸۳/۰۲	۱۵/۶۶

نگهداری سد کرخه، از روش outflow structure برای روندیابی مخزن سدهای کرخه و سیمره در این پژوهش استفاده شده است.

جدول ۴. خصوصیات فیزیکی مخازن سدهای کرخه و سیمره

مشخصه‌های مخزن	کرخه	سیمره
ظرفیت مخزن	۵/۳ میلیارد متر مکعب	۲۴۷۳ میلیون متر مکعب
طول تاج	۳۰۳۰ متر	۲۰۲ متر
تراز تاج سد	۲۳۴ متر	۷۳۰ متر
حداکثر تراز بهره‌برداری	۲۲۰ متر	۷۱۵
حداقل تراز بهره‌برداری	۱۶۰ متر	۶۹۵

- مدل هواشناسی: مدل هواشناسی، شرایط آب و هوایی اثرگذار بر حوضه آبریز در طول دوره شبیه‌سازی را فراهم می‌نماید. در این پژوهش، از روش وزن‌دهی به ایستگاه‌ها برای تنظیم میزان بارش اثرگذار بر حوضه استفاده شده است. (Modarsei & Araqinezhad, 2018).
- مشخصه‌های کنترل: هدف اصلی از ایجاد مشخصه‌های کنترل در مدل، مدیریت زمان شروع و پایان فرایند شبیه‌سازی و انتخاب بازه‌های زمانی اجرای مدل است.

اجرای مدل HEC-HMS

برای مدل‌سازی با استفاده از مدل HEC-HMS، بهره‌گیری از داده‌های همزمان بارش و رواناب لازم است. از این رو اقدام به جمع‌آوری داده‌های دبی حداکثر لحظه‌ای رویدادهای سیلابی موجود در ایستگاه‌های هیدرومتری و مقادیر بارش ساعتی و روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه گردید (Izanloo et al., 2009). سپس در زمان وقوع هر رویداد، با استفاده از بارش ثبت شده روزانه در ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و اطراف حوضه توزیع مکانی رگبارها در محیط ArcGIS استخراج شد. بر اساس آمار مربوطه، سیلاب‌های حوضه آبریز کرخه عمدتاً در ماه‌های مرطوب سال رخ می‌دهند. از این میان، سیلاب‌های اسفند و فروردین ماه و به ویژه فروردین ماه بزرگ‌ترین مقادیر می‌باشند. با بررسی‌های انجام شده، تعداد ۱۱ رویداد متناظر بارش- رواناب که دارای دو شرط زیر باشند تعیین شد: (۱) در بیش از دو ایستگاه از حوضه آبریز ثبت شده باشند، (۲) سیلاب مربوط به همان رویداد بارش باشد (Abbasi, et al., 2010). نظر به این‌که داده‌های بارش و دبی انتخابی مدل برای رگبارهای کوتاه مدت است، میزان تبخیر و تعرق در حوضه مورد مطالعه نقشی در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب ندارد. همچنین، از آنجایی که بعضاً هیدروگراف‌های سیلاب تاج کامل داشته و هیدروگراف‌های با تاج پهن نشان دهنده تاثیر ذوب

انتخاب اجزاء مدل HEC-HMS و فرایند مدل‌سازی

نرم افزار HEC-HMS شامل انواع مختلفی است که می‌توان آنها را به گروه‌های مختلفی تقسیم‌بندی نمود. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل تک واقعه‌ای یا پیوسته^۴ اشاره نمود (Ghafoori et al., 2009). در این مطالعه برای شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب از مدل مبتنی بر رویداد استفاده شده است.

- مدل حوضه: بیان‌کننده ویژگی‌های فیزیکی حوضه و نحوه ارتباط بخش‌های مختلف آن با یکدیگر است (Modarsei & Araqinezhad, 2018). در این مدل، محاسبات مربوط به تعیین میزان تلفات، تبدیل بارش مازاد به رواناب، میزان جریان پایه، شبیه‌سازی جریان در کانال‌ها و مخازن نگهداری آب انجام می‌شود (Rahimzadeh & Habibi, 2018).
- تلفات حوضه: برای محاسبه تلفات حوضه از روش شماره منحنی سرویس حفاظت خاک آمریکا (SCS) استفاده شده است که رابطه آن به صورت زیر می‌باشد:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (\text{رابطه ۱})$$

P_e : ارتفاع بارش موثر

P : ارتفاع بارندگی به میلی‌متر

- I_a : این پارامتر بیان‌کننده مقدار بارشی است که باید بر زمین فرود آید پیش از آن که رواناب سطحی ایجاد شود (Modarsei & Araqinezhad, 2018). در هر یک از زیرحوضه‌های مورد مطالعه، ۲۰ درصد نگهداشت حوضه (S) که با استفاده از شماره منحنی بدست آمد به عنوان مقدار اولیه I_a به مدل معرفی گردید (Rahimzadeh & Habibi, 2018)

$$I_a = 0.2 S \quad (\text{رابطه ۲})$$

S : نگهداشت پتانسیل حوضه که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{رابطه ۳})$$

- رواناب حوضه: در این پژوهش، برای تبدیل بارش به رواناب سطحی از روش هیدروگراف واحد کلارک استفاده شده است (Modarsei & Araqinezhad, 2018). برای استفاده از روش مذکور دو پارامتر زمان تمرکز و ضریب ذخیره مورد نیاز است.

- جریان پایه: برای محاسبه جریان پایه، روش بازگشتی^۵ انتخاب شد (Modarsei & Araqinezhad, 2018)
- شبیه‌سازی جریان در کانال‌ها: به دلیل عدم وجود مقاطع عرضی در رودخانه‌ها برای روندیابی رودخانه از روش روندیابی هیدرولوژیک ماسکینگام استفاده شد.
- روندیابی مخزن: روندیابی سیلاب برای تعیین هیدروگراف خروجی از سرریز و پایاب سد حایز اهمیت است (Alizadeh, 2013). بر اساس دستورالعمل بهره‌برداری و

برف می‌باشند (Karimi et al., 2011)؛ در مدل‌سازی از ذوب برف صرف‌نظر شد.

جدول ۵. اطلاعات کلی رویدادهای سیلاب منتخب در حوضه آبریز کرخه

شماره رویداد	تاریخ رویداد	وضعیت مدل	دوره	تراز مخزن سد سیمره	تراز مخزن سد کرخه
۱	۱۳۸۶/۰۹/۱۶ تا ۱۳۸۶/۰۹/۱۷		واسنجی	-	۱۹۲/۳۳
۲	۱۳۸۷/۰۹/۰۹ تا ۱۳۸۷/۰۹/۱۰		واسنجی	-	۱۸۰/۸۱
۳	۱۳۸۹/۰۹/۲۲ تا ۱۳۸۹/۰۹/۲۳	حالت اول	واسنجی	-	۱۸۹/۹۹
۴	۱۳۹۰/۰۱/۲۵ تا ۱۳۹۰/۰۱/۳۱	(مدل فاقد سد	واسنجی	-	۱۹۰/۹۴
۵	۱۳۹۰/۱۱/۱۲ تا ۱۳۹۰/۱۱/۱۴	سیمره)	اعتبارسنجی	-	۱۷۹/۴۷
۶	۱۳۹۱/۰۲/۱۴ تا ۱۳۹۱/۰۲/۱۵		اعتبارسنجی	-	۱۷۸/۸۹
۷	۱۳۹۱/۱۱/۰۹ تا ۱۳۹۱/۱۱/۱۱		اعتبارسنجی	-	۱۸۶/۰۷
۸	۱۳۹۳/۰۸/۰۵ تا ۱۳۹۳/۰۷/۲۲	حالت دوم	واسنجی	۶۶۷/۰۶	۱۸۲/۳۵
۹	۱۳۹۳/۰۹/۰۱ تا ۱۳۹۳/۰۹/۰۷	(مدل با سدهای	واسنجی	۶۶۹/۰۱	۱۸۱/۳۲
۱۰	۱۳۹۴/۰۱/۲۵ تا ۱۳۹۴/۰۱/۳۰	کرخه و سیمره)	اعتبارسنجی	۶۷۹/۲۵	۱۸۰/۳۹
۱۱	۱۳۹۸/۰۱/۰۵ تا ۱۳۹۸/۰۱/۲۰		اعتبارسنجی	۶۹۴/۹۷	۲۱۶/۳۶

Time of Concentration/ Storage Coefficient Clark Unit Hydrograph
Recession Constant
Muskingum K/ Muskingum X

Clark Unit Hydrograph
Recession
Muskingum

اعتبارسنجی:

به منظور رفع خطاهای ایجاد شده پس از واسنجی و تعیین پارامترهای حوضه، فرایند اعتبارسنجی برای پنج رویداد باقیمانده (جدول ۵) انجام و سپس هیدروگراف‌های شبیه‌سازی با هیدروگراف‌های مشاهداتی مقایسه شد. برای ارزیابی کارایی مدل بارش - رواناب مورد استفاده در مرحله اعتبارسنجی نیز از شاخص‌های ناش - ساتکلیف و ضریب واریانس شبیه‌سازی شده (رابطه‌های ۵ و ۶) استفاده شد.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$S_v = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q_o)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_o)^2} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن‌ها: Q_{oi} : دبی مشاهداتی؛ Q_{si} : دبی شبیه‌سازی؛ Q_o : دبی متوسط مشاهداتی می‌باشد. میزان شاخص نش - ساتکلیف یک بیان‌کننده تطابق کامل هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی خواهد بود و میزان ضریب واریانس کمتر از یک بیان‌کننده کارایی بالاتر مدل می‌باشد.

نتایج و بحث

همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود؛ اجرای اولیه مدل برای اکثر رویدادهای سیلاب یاد شده در جدول ۵ حاکی از اختلاف میان حجم، دبی و زمان اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی بود. به نحوی که مدل مقادیر دبی پیک در زیرحوضه‌ها و خروجی مخازن سدهای سیمره و کرخه را بیشتر از مقدار واقعی آن‌ها برآورد کرده است.

برای اجرای مدل از نمونه‌گیری به روش خرد کردن ساده^۶ استفاده شد (Saghafian & Farazjou, 2007; Memariani, 2017) در این روش، سیلاب‌های مشاهداتی به دو گروه تقسیم و پارامترهای مدل با یک گروه از داده‌ها و با استفاده از توابع هدف حداقل‌سازی خطا واسنجی شده و سپس اعتبارسنجی مدل با استفاده از اجرای مدل با پارامترهای بهینه شده برای گروه دوم داده‌ها انجام می‌شود. اطلاعات کلی رویدادهای سیلابی مدنظر در جدول ۵ ارائه شده است.

واسنجی:

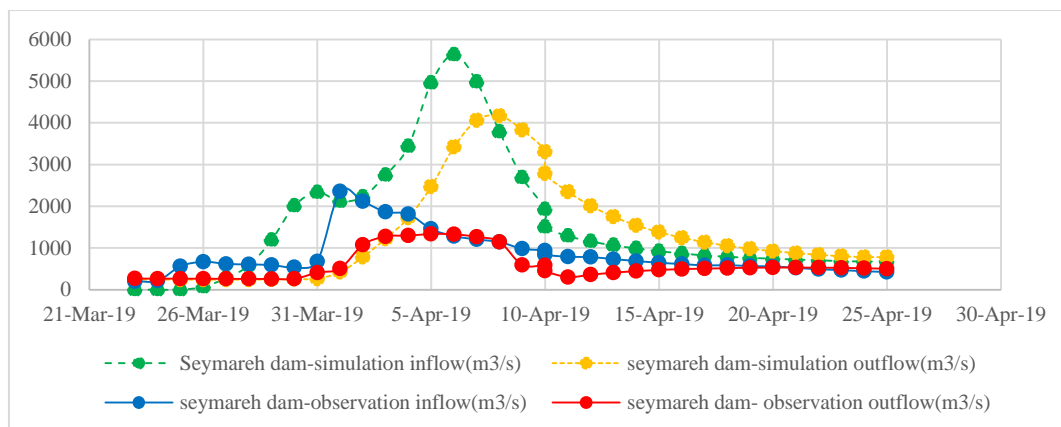
یکی از چالش‌های اساسی مطالعه فرایند بارش - رواناب در حوضه‌های آبریز، یافتن پارامترهای معرف چرخه هیدرولوژیک در فرایندی تحت عنوان واسنجی می‌باشد (Garnei & Faridhosseini, 2015). به منظور اصلاح و به حداقل رساندن اختلافات مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، با کمک تابع هدف مجموع مجذور باقی‌مانده (رابطه ۴)، پارامترهای نشان داده شده در جدول ۶ مورد واسنجی قرار گرفتند. شایان ذکر است، از روش نلد و مید برای بهینه‌سازی استفاده گردید.

$$Z = \sum_{i=1}^{NQ} (Q_{oi} - Q_{si})^2 \quad \text{رابطه ۴}$$

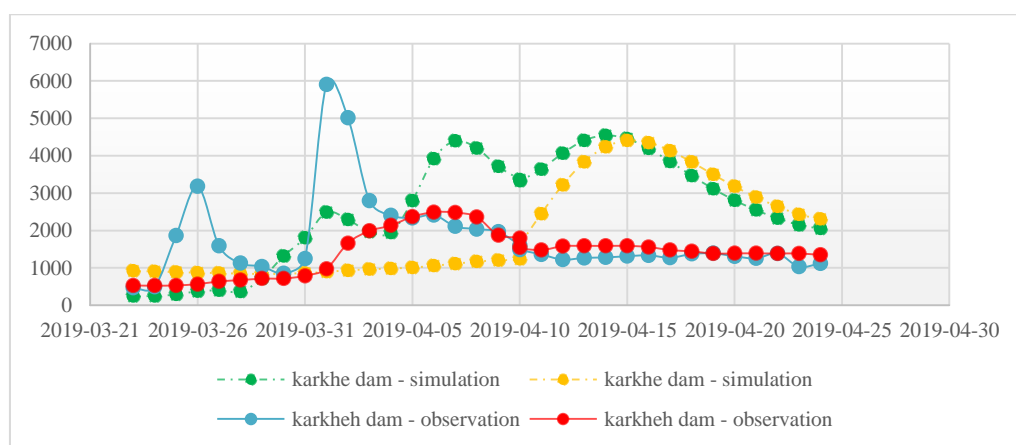
که در آن: Z = تابع هدف، Q_{oi} = دبی مشاهداتی؛ Q_{si} = دبی شبیه‌سازی می‌باشد. در تابع هدف فوق، ضمن محاسبه مربع خطا، وزن بیشتری به خطای بزرگ‌تر داده می‌شود و از این رو، فرایند واسنجی در جهت حداقل‌سازی خطاهای بزرگ‌تر پیش می‌رود.

جدول ۶. پارامترهای مورد استفاده به عنوان متغیر تصمیم

نام روش	پارامتر/ پارامترها
SCS Curve Number	Initial Abstraction/ Curve Number



شکل ۴. هیدروگراف جریان ورودی و خروجی سد سیمره برای رخداد بارش سال ۱۳۹۸



شکل ۵. هیدروگراف جریان ورودی و خروجی سد کرخه برای رخداد بارش سال ۱۳۹۸

در ادامه، ضمن انتخاب تابع هدف مجموع مجذور باقیمانده و واسنجی مدل، پارامترهای بهینه حوضه آبریز کرخه به شرح جداول ۷ و ۸ استخراج شدند.

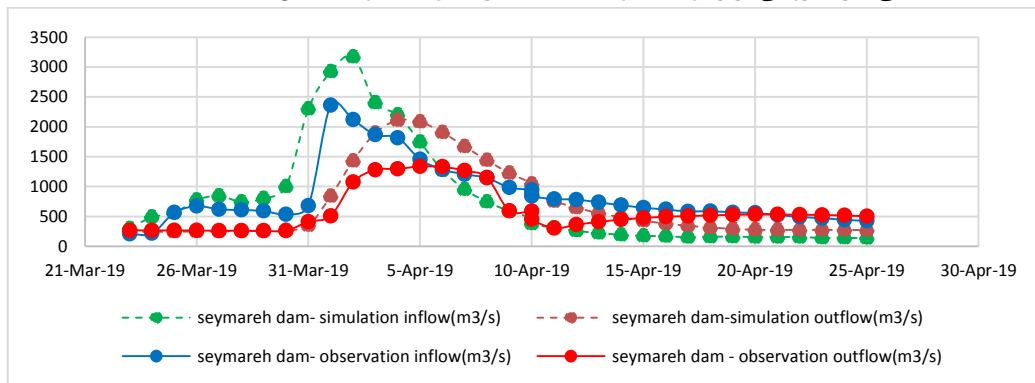
جدول ۷. نتایج حاصل از واسنجی پارامترهای حوضه (حدود بالا و پایین مقادیر بهینه یابی شده در رویدادهای واسنجی)

شماره رویداد	پارامتر	میانگین زیر حوضه‌ها	حد پایین	حد بالا
۴-۱	Initial Abstraction	۱۰/۸	۰/۰۰۴	۲۷/۴
۹-۸		۱۳/۰۳	۰/۰۰۷	۵۷/۳
۴-۱	Curve Number	۶۸/۲	۳۵	۸۵/۸
۹-۸		۵۶/۵	۳۵/۱	۹۸/۷
۴-۱	Storage Coefficient	۴۱/۱	۸/۶	۱۰۷/۷
۹-۸		۴۲/۷	۱۴/۸	۱۱۹/۴
۴-۱	Muskingum K	۲۹	۳/۳	۱۴۹/۹
۹-۸		۲۱/۰۱	۱۲/۴	۲۹/۶
۴-۱	Muskingum X	۰/۲۹	۰/۰۰۲	۰/۴۹
۹-۸		۰/۱۸	۰/۰۰۱	۰/۳۳

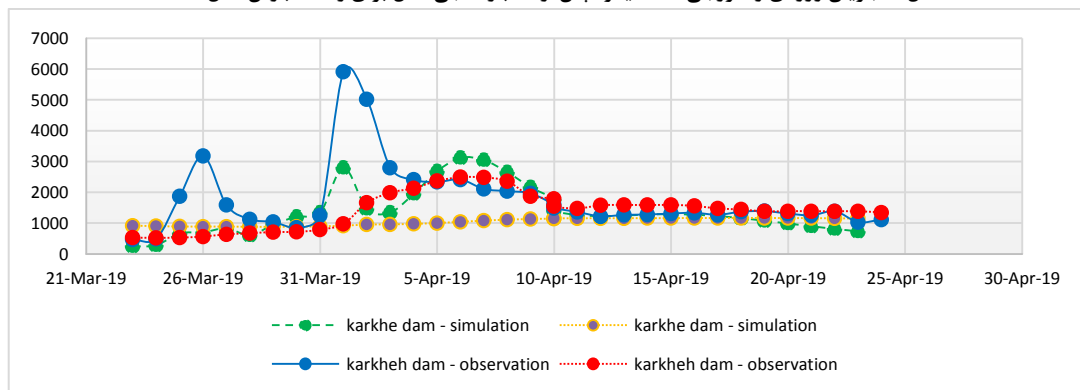
جدول ۸. مقایسه مقادیر زمان تمرکز (ساعت) حاصل از فیزیوگرافی حوضه آبریز و نتایج حاصل از بهینه‌یابی رویدادهای ۴-۱ و ۹-۸

شماره زیر حوضه	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
زمان تمرکز اولیه	۲۹/۳۱	۲۴/۳۱	۲۲/۳۷	۲۰/۷۳	۳۱/۹۴	۹/۶	۱۳/۳۹	۹/۲۲	۱۵/۶۶
رویداد ۴-۱	۳۲/۲۹	۲۱/۰۸	۱۱/۱۹	۳۰/۹۷	۱۴/۶۷	۳/۹۹	۱۹/۰۱	۷/۸۶	۲۱/۳۷
رویداد ۹-۸	۲۶/۹۵	۲۲/۸۴	۸/۶	۱۱/۹۹	۲۸/۵۷	۱/۰۲	۸/۲۴	۳/۷۴	۱۲/۹۷

پس از واسنجی، فرایند اعتبارسنجی برای پنج رویداد باقی‌مانده بر مبنای جدول ۵ انجام و سپس هیدروگراف‌های شبیه‌سازی با هیدروگراف‌های مشاهداتی در خروجی زیرحوضه‌ها و سد‌های سیمره و کرخه مقایسه شدند. برای نمونه، هیدروگراف ورودی و خروجی سد‌های سیمره و کرخه برای رویداد فروردین ماه ۱۳۹۸ در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۶. جریان ورودی و خروجی سد سیمره پس از اعتبارسنجی مدل برای رخداد بارش سال ۱۳۹۸



شکل ۷. جریان ورودی و خروجی سد کرخه پس از اعتبارسنجی مدل برای رخداد بارش سال ۱۳۹۸

بر اساس دسته‌بندی ارائه شده در جدول ۵ و معیارهای سنجش خطا، مقادیر شاخص خطا برای کلیه رخدادها و زیرحوضه‌های کرخه محاسبه شد. نتایج حاصل در جدول ۹ برای رویداد فروردین ماه ۱۳۹۸ ارائه شده است. بررسی نتایج هیدروگراف‌های سیلاب و جداول حاصل از آنها، بیان‌کننده تاثیر بسیار زیاد داده‌های ورودی به مدل می‌باشد. از این رو، هر چه میزان دقت و درستی داده‌های ورودی بیشتر باشد، محاسبات مدل با دقت بیشتر و خطای کمتری همراه است (Sabzevari et al. 2009 ; babani,2017; Rahimzadeh & Habibi, 2018).

جدول ۹. نتایج شاخص‌های کارایی مدل بهینه (ضرایب ناش- ساتکلیف و واریانس) برای دوره اعتبارسنجی برای رویداد سال ۱۳۹۸

نقاط مد نظر	دبی اوج (m ³ /s)		درصد اختلاف		زمان پیک		اختلاف		کارایی	
	مشاهداتی	شبیه سازی	دبی اوج	اختلاف دبی اوج	مشاهداتی	شبیه سازی	دبی اوج	اختلاف دبی اوج	R ²	NSE
پل چهر	۸۵۶	۱۳۷۶	۱۴:۰۰	۵۲۰	۲۰:۰۰	۱۴:۰۰	+۶۰	۵۲۰	۰/۷۰	۰/۵۰
قورباغستان	۴۸۵	۴۵۴/۲	۱۶:۰۰	۳۰/۸	۱۶:۰۰	۶:۰۰	-۶/۳	۳۰/۸	۰/۷۳	۰/۱۳
سد سیمره	۱۳۲۸	۱۱۸۵	۸:۰۰	۱۴۳	۸:۰۰	۱۰:۰۰	+۱۰	۱۴۳	۰/۰۵	۰/۹۹
پلدختر	۶۸۴۵	۴۴۹۱/۲	۱۶:۰۰	۲۳۵۳/۸	۱۶:۰۰	۱۸:۰۰	-۳۴	۲۳۵۳/۸	۰/۹۲	۰/۷۸
جلوگیر	۶۸۸۳	۱۶۴۶	۱۸:۰۰	۵۲۳۷	۱۸:۰۰	۱۴:۰۰	-۷۶	۵۲۳۷	۰/۷۳	-۰/۲
پل زال	۱۵۷۹	۵۶۴	۶:۰۰	۱۰۱۵	۶:۰۰	۱۴:۰۰	-۶۴	۱۰۱۵	۰/۴۳	۰/۳۲
سد کرخه	۲۴۹۱	۱۱۶۸	۸:۰۰	۱۳۲۳	۸:۰۰	۰۲:۰۰	-۵۳	۱۳۲۳	۰/۴۶	۰/۹۹

جدول ۱۰. نتایج تحلیل حساسیت مدل به تغییر در پارامتر CN و T_c برای زیرحوضه ۹ در رویداد فروردین ماه ۱۳۹۸

درصد تغییرات پارامتر		میزان پارامتر		دبی اوج		درصد تغییرات دبی اوج		حساسیت
T_c	CN	T_c	CN	T_c	CN	T_c	CN	T_c
-۲۰	۶۶/۴۱	۱۲/۵۳	۸۶۸/۴	۱۱۰۶/۸	۸۶۸/۴	-۲۰	۱/۹۱	۰/۰۹
-۱۰	۷۴/۷۱	۱۴/۱۰	۹۸۲	۱۰۹۶/۵	۹۸۲	-۹/۵	۰/۹۶	۰/۰۹
۰	۸۳/۰۲	۱۵/۶۷	۱۰۸۶	۱۰۸۶	۱۰۸۶	۰	۰	۰
۱۰	۹۱/۳۲	۱۷/۲۳	۱۱۶۹/۰۲	۱۰۷۰	۱۱۶۹/۰۲	۷/۶	-۱/۴۷	-۰/۱۴
۲۰	۹۹/۶۲	۱۸/۸۰	۱۲۱۰	۱۰۶۰	۱۲۱۰	۱۱/۴	-۲/۳	-۰/۱۱

حساسیت خروجی نسبت به پارامترهای CN و T_c از رویدادهای منتخب، در بازه ای از ۲۰٪ - تا ۲۰٪ + با فواصل ۱۰٪ با روش سعی و خطا تغییر داده شده و اثر آن بر دبی اوج سیل تعیین گردید. در جدول ۱۰ یک نمونه تحلیل حساسیت انجام شده برای زیر حوضه شماره ۹ در رخداد فروردین ماه ۱۳۹۸ ارایه شده است. همانطور که از جدول ۱۰ مشاهده می‌شود، تابع هدف بیشترین حساسیت را نسبت به تغییر پارامتر CN دارد.

نتیجه‌گیری

از آنجایی که مخازن سدها در کاهش اثرات سیلاب موثرند؛ برآورد دبی پیک و هیدروگراف سیلاب به منظور پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیک حوضه اجتناب‌ناپذیر است. در پژوهش حاضر با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی GIS، شبیه‌سازی ۱۱ رویداد بارش شدید در طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۸ ضمن در نظر داشتن المان سدهای کرخه و سیمره در مدل HEC-HMS انجام شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از انجام این پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- بررسی عملکرد مدل HEC-HMS برای رویداد فروردین ماه ۱۳۹۸ برای حالت‌های حوضه بی/با المان سد نشان داد که وجود سدهای کرخه و سیمره تا ۵۸ درصد در کاهش دبی اوج سیلاب نسبت به حالت عدم وجود آنها موثر هستند و این امر با نتایج پژوهش (Memarian Khalilabad et al., 2017) مطابقت دارد.

- بررسی پارامترهای مدل نشان داد که مقدار شماره منحنی در مقایسه با سایر پارامترها از حساسیت بیشتری برخوردار است. در این راستا (Karimi et al., 2011) در حوضه آبخیز چهل گزی و (Memarian Khalilabad et al., 2017) در حوضه آبخیز بار نیشابور نتایج مشابهی به دست آوردند.

- نتایج اعتبارسنجی مدل HEC-HMS در این تحقیق حاکی از آن است که میانگین اختلاف در برآورد دبی اوج سیلاب در ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب سیلاب در حدود ۳۸ درصد است. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS نشان داد که کمترین اختلاف میان مقادیر

با توجه به نتایج ارایه شده مشخص شد که تابع هدف انتخابی توانسته تا حد زیادی اختلاف مقادیر مشاهداتی و محاسباتی را کاهش دهد. همچنین، نتایج نشان می‌دهند که مدل HEC-HMS علاوه بر کاهش دبی پیک، زمان وقوع آن را نیز دستخوش تغییر می‌کند. با مقایسه زمانی وقوع دبی پیک سیلاب ملاحظه می‌شود که اختلاف زمانی وقوع دبی اوج هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهداتی برای زیرحوضه‌های مختلف متفاوت بوده و در محدوده ۲ تا ۶ ساعت می‌باشد. بنابراین، مدل HEC-HMS در مرحله اعتبارسنجی زمان دبی پیک را تا حد قابل قبولی برآورد نموده است. همچنین، ملاحظه شد که بیشترین دبی اوج شبیه‌سازی مربوط به زیر حوضه ۵ با مقدار ۴۴۹۱ متر مکعب بر ثانیه و کمترین دبی اوج مربوط به زیرحوضه ۲ با مقدار ۴۵۴ مترمکعب بر ثانیه است. مقایسه نتایج به دست آمده از مدل با مقادیر مشاهداتی دبی اوج سیلاب در ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب با استفاده از ضریب همبستگی (R^2) نشان داد که به ترتیب برای زیر حوضه‌های ۵، ۲، ۷ و ۱ تطابق نسبتاً خوبی برقرار است. همچنین، مقادیر شاخص کارایی مدل در مرحله اعتبارسنجی برای شاخص‌های ناش- ساتکلیف و ضریب واریانس برای نقاط منتخب حوضه محاسبه شد. نتایج حاکی از آن است که از منظر شاخص ناش- ساتکلیف مدل HEC-HMS به طور نسبی می‌تواند برآورد قابل‌پذیرشی از دبی اوج سیلاب برای زیرحوضه‌های ۹، ۶، ۵، ۱ و ۸ ارایه دهد و از این رو می‌توان نحوه شکل‌گیری رویدادهای سیلابی حوضه آبریز کرخه را به خوبی تحلیل نمود. نتایج ارایه شده با نتایج بدست آمده از (Ghafoori et al., 2009) و (Khademi et al., 2018) تطابق دارد. همچنین از منظر ضریب واریانس شبیه‌سازی، مدل برآورد مناسبی از دبی اوج سیلاب در اکثر زیرحوضه‌ها ارایه می‌دهد.

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل

تحلیل حساسیت، ابزاری برای نمایش اختلاف خروجی‌ها در نتیجه تغییر پارامترهای مدل محسوب می‌شود (Heydari Bisefr et al., 2020). در این پژوهش، تجزیه و تحلیل حساسیت مدل بر مبنای دو پارامتر شماره منحنی و زمان تمرکز انجام شد (Khalighi sigaroodi, 2004). برای تحلیل

- به‌رغم اینکه مدل به طور کلی نتایج قابل قبول و مناسبی ارائه کرده است، ولی با توجه به درصد اختلاف دبی اوج شبیه‌سازی و مشاهداتی، می‌توان ابراز داشت که مدل در دوره اعتبارسنجی رویداد فروردین ماه ۱۳۹۸ را در اکثر زیرحوضه‌ها دست پایین برآورد می‌کند.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از سازمان آب و برق خوزستان، شرکت مدیریت منابع آب ایران، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، سازمان هواشناسی کشور، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، زنده‌یاد جناب آقای دکتر بنی‌حبيب، جناب آقای دکتر رحمان داوطلب، جناب آقای دکتر حسین خلیلی شایان، جناب آقای مهندس مجید حدادیان و جناب آقای دکتر باقر قرمزچشمه ابراز می‌دارند.

هیدروگراف شبیه‌سازی و مشاهداتی مربوط به زیرحوضه‌های ۲ و ۶ برای رویداد فروردین ماه ۱۳۹۸ است.

- اختلاف زمان رسیدن دبی اوج هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده هم در اکثر زیرحوضه‌ها ۴ ساعت بوده است که با نتایج حاصل از (Azami babani, 2017) مشابهت دارد. همچنین، (Rahimzadeh & Habibi, 2018) در برآورد زمان دبی اوج یک روز تعجیل در محاسبه داشتند، لذا توصیه نمودند این مساله در پیش‌بینی زمان وقوع سیلاب مد نظر قرار گیرد.

- نتایج بدست آمده حاکی از برآورد دست‌پایین تا قابل قبول دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در زیرحوضه‌های ۱، ۲، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹ می‌باشد.

Reference:

- Abbasi, M., Mohseni Saravi, M., Kheirkhah, M., Khalighi Sigaroudi, S., Rostamizad, G., & Hosseini, M. (2010). Assessment of Watershed Management Activities on Time of Concentration and Curve Number using HEC-HMS Model (Case Study: Kan Watershed, Tehran). *Journal of Range and Watershed Management*, 63(3), 375-385. [in Persian]
- Alizadeh, A. (2013). *The Principles of Applied Hydrology*. Mashhad: Imam Reza (AS) University.
- Azami babani, b., Mumipour, M., & Azari, A. (2017). Prioritization Flood risk of Hydrologic Units (Case Study: Pole Shah Catchment). *Geography and development*, 16(53), 69-84. [in Persian]
- Azizian, A., Shokoohi, A., & Zamani, F. (2018). Evaluating Scale Effect of Maps Derived via Remote Sensing and Ground Surveying on the Performance of HEC-HMS. *Modares Civil Engineering journal*, 18(1), 157-170. [in Persian]
- Davtalab, R., Mirchi, A., Khatami, S., Gyawali, R., Massah, A., Farajzadeh, M., & Madani, K. (2017). Improving continuous hydrologic modeling of data-poor river basins using hydrologic engineering center's hydrologic modeling system: case study of Karkheh River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(8). Retrieved from [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001525](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001525)
- Garnei, R., & Faridhosseini, A. (2015). OPTIMIZATION PARAMETERS OF RAINFALL-RUNOFF model of hec-hms through pso algorithm. *Iranian journal of soil and water research*, 46(2), 255-264. [in persian]
- Ghafoori, M. R., Saghafian, B., Taheri Shahraini, H., & Bagheri Shouraki, S. (2009). Simulation of daily streamflow in the Karoon basin using HEC-HMS model. *Intenational Conference on Water Resources*. Shahrood. [in Persian]
- Heydari Bisefr, A., Hessari, B., & Samadian, M. (2020). Sensitivity Analysis of Parameters Affecting the Design Flood Using HEC- HMS Mathematical Model (Case Study: Sardasht Dam). *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(4), 954-965. [in Persian]
- Iran Water & Power Resources Development, CO. (2008). *Meteorological report*. Tehran. [in Persian]
- Izanloo, H., Moradi, H., & Sadeghi, S. (2009). COMPARISON OF TEMPORAL PRIORITIZING OF flooding in different hydrological periods (case study: kooshkabad sub-watersheds in razavi province). *Watershed management researches (pajouhesh-va-sazandegi)*, 21-30. [in persian]
- Karimi, m., malekinejad, h., abghari, h., & azizian, m. (2011). Evaluating the methods of flood hydrograph simulation using hec-hms software (a case study, chelgazi watershed). *Iranian water research journal*, 5(9), 29-38. [in persian]
- Khaddor, i., achab, m., rida soumali, m., benjbara, a., & hafidi alaoui, a. (2021). The impact of the construction of a dam on flood management. *Civil engineering journal*, 7(02). Doi:10.28991/cej-2021-03091658
- Khademi, M., Soltani Gerdefaramarzi, S., & Ghasemi, M. (2018). Determination of the Return Period for Probability Maximum Flood Using HEC-HMS Model and Statistical Methods in the Eskandari Watershed. *Iranian journal of watershed management science and engineering*, 129-134. [in Persian]
- khalighi sigaroodi, S. (2004). Investigating the impact of land use change on the hydrological characteristics of surface water (a case study in Bar Andozchai area of West Azarbaijan Province). 218. Tehran: Tehran University. [in Persian]
- Mahabghodss Consulting Engineering, C. (2002). *Operating and maintenance instructions for Karkheh Dam*. Memarian khalilabad, H., Yousefi, M., & Aghakhani afshar, A. (2017). Identification of flooding source regions and investigating the impact of watershed management operations on the peak discharge (Case

- study: Bar watershed, Neyshabour, Iran). JOURNAL OF WATER AND SOIL CONSERVATION (journal of agricultural sciences and natural resources), 25(1), 35-59. [in Persian]
- Modarsei, F., & Araqinezhad, S. (2018). Teaching the hydrological modeling of the watershed in HEC-HMS and HEC-Geo HMS. Tehran: Noavar. [in Persian]
- Moradnezehadi, M., Jourgholami, M., & Malekian, A. (2015). Prioritization of Appropriate Sub-basins in order to Forest Harvesting using HEC-HMS Model (Case Study: Kheyroud Forest). Forest and Wood Products, 68(2), 405-418. [in Persian]
- ORNL DAAC (NASA). (2018, 03 21). Retrieved from https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=1566
- Rahimzadeh, Z., & habibi, m. (2018). Simulation of hydrograph of flood with hydrological model HEC-HMS and prediction of return period in Kermanshah Ravansar Basin. GEOGRAPHY AND DEVELOPMENT, 16(53), 175-194. [in Persian]
- Rostamizad, G., Khalighi Sigaroodi, S., & Mahdavi, M. (2013). Comparison estimate precipitation loss methods in HEC-HMS model to simulation runoff (Case study: Kan basin). Journal of Range and Watershed Managment, 66(3), 359-371. [in Persian]
- Sabzevari, T., Ardakanian, R., Shamsaei, A., & Talebi, A. (2009). Predicting the Flood Hydrographs of Ungauged Watersheds Using the HEC-HMS model and GIS. Water Resources Engineering Journal, 2(4), 1-12. [in Persian]
- Saghafian, B., & Farazjou, H. (2007). PRIORITIZATION OF HYDROLOGIC UNITS WITH RESPECT TO flood potential in golestan dam river basin. Iranian journal of watershed management science and engineering, 1(1), 1-11. [in Persian]
- Salajegheh, A., Razavizadeh, S., Khorazani, N., Hamidifar, M., & Salajegheh, S. (2011). LAND USE changes and its effects on water quality (case study: karkheh watershed). 37(58), 81-86. [in Persian]
- Sharu, E. H. (2021). Development of HEC-HMS Model for Flow Simulation at Dungun River Basin Malaysia. Advances in Agricultural and Food Research Journal, 2(1). doi:<https://doi.org/10.36877/aafmj.a0000169>
- Special Reporting Committee on Flood. (2019). The 2019 Iran Floods Narrative. Tehran. [in Persian]
- Zohrabi, N., Massah Bavani, A., Goodarzi, E., & Heidarnejad, M. (2016). Identify Trend in the Annual Temperature and Precipitation in Karkheh River Basin. Journal of Wetland Ecobiology, 8(2), 5-22. [in Persian]

یادداشت ها

¹ Sharu

² khaddor

³ Davtalab

⁴ Event based or Continuous

⁵ Recession

⁶ Simple-Split Sample Test