



Evaluation and Analysis of Peak Discharge with Different Return Periods for Beshar River Using HEC-HMS Model

T. Kazemi¹, M. Fazeli^{2*}, and M. Farzin³

Abstract

Flood is one of the most important natural disaster that cause human and financial damages and its evaluation needs peak discharge. This study evaluates Beshar River runoff peak discharge due to precipitation with different return periods. The geological and land use maps were provided in ArcGIS and ENVI, based on which the CN map was prepared. Respectively, 53.46 % and 30.75 % of the study area are in A and D hydrologic groups. The best probability distribution for each station was determined using Chi-square test, thereafter, precipitation with different return periods was calculated. After dividing the area into 9 sub-basins and calculating the required parameters for each, the model was created. Three and two flood events were respectively used for calibration and validation and the average values of RMSE and NS indexes were obtained as 0.53 and 0.67 for calibration and 0.55 and 0.68 for validation. The low values of errors indicated the reliability of the simulated model. The peak discharge of each return period was calculated employing type IA of SCS model. Comparing the peak discharges obtained from HEC-HMS and statistical method at the basin outlet showed that the least difference between these two methods was related to the 50-year return period and for the return periods below and above 50 years, the HEC-HMS discharges were correspondingly less and greater than the statistically calculated peak discharges. Consequently, the HEC-HMS model can accurately calculate the flood peak discharge for Beshar basin.

Keywords: Rainfall-Runoff Model, Flood, SCS Model, Beshar River, HEC-HMS Model.

Received: August 21, 2021

Accepted: December 14, 2021

ارزیابی و تحلیل دبی اوج با دوره بازگشت‌های مختلف برای رودخانه بشار با استفاده از مدل HEC-HMS

طاهره کاظمی^۱، مهدی فاضلی^{۲*} و محسن فرزین^۳

چکیده

سیلاب از جمله حوادث طبیعی مهم است که موجب تلفات انسانی و مالی زیادی می‌شود و ارزیابی سیلاب نیازمند محاسبه دبی اوج است. این مطالعه به ارزیابی دبی اوج رودخانه بشار ناشی از بارش با دوره بازگشت‌های مختلف می‌پردازد. نقشه زمین‌شناسی در ArcGIS و نقشه کاربری اراضی در ENVI تهیه و بر اساس آن نقشه شماره منحنی آماده شد. ۵۳/۴۶ درصد از مساحت منطقه در گروه هیدرولوژیکی A و ۳۰/۷۵ درصد در گروه هیدرولوژیکی D قرار می‌گیرند. توزیع برتر برای هر ایستگاه با استفاده از آزمون کای اسکوئر تعیین و بارش برای دوره بازگشت‌های مختلف محاسبه شد. با تقسیم منطقه به ۹ زیرحوضه و محاسبه پارامترهای موردنیاز برای هر زیرحوضه، مدل ساخته شد. واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب با سه و دو رویداد سیل انجام شد و میانگین شاخص‌های RMSE، NS و PTVE به ترتیب برابر ۰/۵۳، ۰/۶۷ و ۱۰/۸۹ در واسنجی و ۰/۵۵، ۰/۶۸ و ۸/۲۱ در اعتبارسنجی بدست آمد. خطاهای پایین، قابلیت اعتماد مدل شبیه‌سازی شده را نشان داد. برای دوره بازگشت‌های مختلف بارش و تیپ IA الگوی SCS، دبی‌های اوج محاسبه شد. مقایسه دبی اوج خروجی مدل HEC-HMS و روش آماری نشان داد که کم‌ترین اختلاف دبی دو روش مربوط به دوره بازگشت ۵۰ سال بوده و برای دوره‌های بازگشت کوچکتر و بزرگتر از ۵۰ سال، دبی اوج محاسبه شده با HEC-HMS به ترتیب کمتر و بیشتر از دبی اوج محاسبه شده به روش آماری است. بدین ترتیب، مدل HEC-HMS می‌تواند با دقت خوبی دبی اوج سیلاب را برای حوضه بشار برآورد نماید.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی بارش-رواناب، سیلاب، الگوی SCS، مدل هیدرولوژیکی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۵/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲۳

1- M.Sc. Graduate, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran. Email: fazeli@yu.ac.ir

3- Assistant Professor, Department of Jungle, Range and Watershed Management, Yasouj University, Yasouj, Iran.

*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1400.17.4.3.0](https://doi.org/10.17352/347.1400.17.4.3.0)

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

۲- استادیار گروه مهندسی عمران دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

۳- استادیار گروه مرتع و آبخیزداری دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۱ امکانپذیر است.



پیش‌بینی رواناب در ایستگاه ایدنک به ترتیب برابر $0/56$ ، $0/67$ و $32/2$ مترمکعب در ثانیه است (Ahmadpour et al., 2019). امکان اولویت‌بندی زیرحوضه‌هایی در حوضه آبریز اسکندری در استان اصفهان با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS و برای بارش‌های طرح با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ ساله بررسی شد. نتایج نشان داد که زیرحوضه ۱ اولویت اول پتانسیل سیل‌خیزی می‌باشد. با مقایسه اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در این مدل در دوره بازگشت‌های متفاوت، مشخص شد که اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از روندی خاص تبعیت می‌کند؛ بنابراین، مدل HEC-HMS نسبت به روش‌های تجربی کارایی بیشتری در اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از لحاظ سیل‌خیزی دارد (Talebi et al., 2019). در پژوهشی به واسنجی^۱ و ارزیابی روش SCS^{۱۱} در برآورد سیلاب در حوضه پسکوهک پرداخته شد. در این مطالعه مقدار CN^{۱۲} (شماره منحنی) با استفاده از مطالعات سنجش از دور، نقشه‌های زمین‌شناسی و بازدیدهای صحرایی به‌دست آمد. سپس با مدل HEC-HMS و با استفاده از روش SCS هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که مقدار ضریب تصحیح برای CNLag برابر با $0/92$ می‌باشد. مقدار میانگین $\frac{Ia}{S}^{13}$ (Ia = تلفات اولیه، S = نگره‌داشت ویژه) در این حوضه برابر $0/44$ می‌باشد که اختلاف زیادی با مقدار $0/2$ معادله SCS دارد. ضریب تصحیحی برای تبدیل CN در حوضه برابر با $0/41$ محاسبه شد (Adeli & Mohammadi, 2019). شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه رودخانه بشار با استفاده از نرم‌افزار HEC-HMS به همراه واسنجی پارامترهای k (ضریب ماسکینگام)، x (ضریب ماسکینگام)، CN Ia و Lag Time (زمان تأخیر) انجام شد. مقادیر شاخص‌های اعتبارسنجی نشان داد که شبیه‌سازی انجام شده دارای دقت قابل قبولی بوده است (Kazemi et al., 2021). مطالعاتی نیز در خارج از ایران با این روش انجام شده است که تعدادی از آن‌ها در ادامه آورده شده است. در شمال کشور اسپانیا به ارزیابی منابع آب سطحی در میان حوضه‌هایی که تعداد ایستگاه کمی دارند پرداخته شد. برای پیش‌بینی آب قابل‌دسترس از مدل HEC-HMS استفاده شد، خروجی‌های مدل با داده‌های ثبت شده تفاوت زیادی نداشتند (Garcia et al., 2008). برای حوضه لای نولا^{۱۵} در اسلام‌آباد شبیه‌سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS انجام شد و اثر تغییر کاربری اراضی بر بارش-رواناب بررسی شد. بر اساس نتایج این بررسی، تغییر کاربری اراضی رواناب را به میزان $51/6$ تا 100 درصد و دبی اوج را به میزان $45/4$ تا $83/3$ درصد افزایش می‌دهد (Ali et al., 2011). در حوضه آبریز آتاناکالو اوپا^{۱۶} در سریلانکا به سه روش مختلف به واسنجی و اعتبار سنجی مدل HEC-HMS پرداخته شد. برای این کار از داده‌های بارندگی روزانه، داده‌های تبخیر ماهانه برای ۲۰ سال و داده‌های دبی روزانه برای ۵ سال استفاده شد.

سیل را می‌توان اضافه جریان آب نسبت به محدوده‌ی معمول رود یا حجمی از آب تعریف کرد. سیل یکی از حوادث طبیعی است که سالانه خسارت‌های زیادی به مردم و جامعه وارد می‌کند و امروزه همه کشورها به دنبال راهکارهایی هستند تا این خسارت‌ها را کاهش دهند (Asghari, 2005). پیش‌بینی، مهار و کاهش خسارت‌های ناشی از سیل، سه موردی است که در مدیریت یکپارچه حوضه آبریز، اهمیت زیادی دارد. با اقدامات مناسب می‌توان شدت خسارت سیل در حوضه را کاهش داد (Hosseini et al., 2015). یکی از راهکارهای مناسب برای پیش‌بینی و مهار سیلاب، در دسترس بودن دبی بیشینه لحظه‌ای است که با استفاده از مدل HEC-HMS^۱ قابل پیش‌بینی است. مدل HEC-HMS توسط مرکز مهندسی ارتش آمریکا (USACE) ارائه شده است این مدل قابلیت شبیه‌سازی هیدروگراف سیل را دارد و می‌توان با استفاده از آن، دبی بیشینه سیلاب‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف را پیش‌بینی کرد. در سال‌های اخیر مطالعات گوناگونی توسط محققان در این زمینه انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. دبی بیشینه سیلاب حوضه آبریز کوشک‌آباد با استفاده از سه روش مدل هیدرولوژیکی بارش-رواناب HEC-HMS، تحلیل فراوانی سیلاب و معادله‌های تجربی کریگر^۲، دیکن^۳ و فاینینگ^۴ محاسبه شده است. نتایج نشان داد که مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، نتایج خوبی نسبت به مقادیر مشاهده شده دارد که علت آن، به در نظر گرفتن متغیرهای مختلف خاک و اقلیم در برآورد دبی برمی‌گردد (Izanloo & Vafakhah, 2011). پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی رودخانه کشکان با استفاده از شبیه‌سازی بارش-رواناب در این حوضه با کمک مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS نشان داد مدل HEC-HMS دارای کارایی بالایی در شبیه‌سازی رواناب و حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به ازای دوره بازگشت‌های کمتر از ۳۰۰ سال است. پس می‌توان از این مدل در شبیه‌سازی رواناب روزانه و حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب برای دوره بازگشت‌های کوچک در حوضه مورد مطالعه استفاده کرد (Hosseini et al., 2015). مقایسه‌ای بین مدل‌های HEC-HMS و IHACRES برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در حوضه کسلیان انجام شد. با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای ضرایب آماری CP^۵ و خطای نسبی (RE)^۶ تحت اجرای هر دو مدل نشان داد که هر دو مدل برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل عملکرد خوبی داشتند اما مدل HEC-HMS دقت بیشتری در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل داشت (Golshan et al., 2018). نتایج بررسی دقت و توانایی مدل HEC-HMS در پیش‌بینی رواناب حوضه مارون نشان داد که آزمون‌های نیکویی برازش شامل ضریب ناش-ساتکلیف^۷، ضریب تعیین^۸ و ریشه میانگین مربعات خطا^۹ در مرحله

در اختیار داشتن داده‌های مربوط به بارش، دبی رواناب و سیلاب، یکی از شرط‌های لازم برای مطالعه حوضه‌ها است. در منطقه مورد مطالعه، به دلیل وجود تنها دو ایستگاه آب‌سنجی واقع در ابتدا و در انتهای حوضه و عدم اندازه‌گیری دبی در سایر نقاط رودخانه، محدودیت داده وجود دارد. بر اساس نتایج پژوهش‌های پیشین، مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی بارش-رواناب از دقت خوبی برخوردار است و می‌توان از این مدل برای محاسبه دبی اوج حوضه‌ها استفاده کرد. با استفاده از این مدل، می‌توان دبی سیلاب را برای همه زیرحوضه‌ها محاسبه و در صورت نیاز از آن‌ها در طرح‌های مربوط به کنترل سیل و همچنین برای مشخص کردن پهنا سیل برای دوره بازگشت‌های مورد نظر استفاده کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز رودخانه بشار واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد است. حوضه آبریز بشار در جنوب غربی ایران و در محدوده طول‌های جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۳۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۴ دقیقه واقع شده است. بیشینه ارتفاع این حوضه ۴۳۶۱ متر، کمینه‌ی آن ۱۳۵۷ متر و میانگین ارتفاع آن ۲۱۹۹ متر از سطح دریا است (Kazemi, 2021). محدوده مورد مطالعه در این پژوهش از قلات تا پاتاوه با طولی حدود ۷۶ کیلومتر و مساحت حوضه حدود ۲۶۷۳ کیلومتر مربع را شامل می‌شود. در شکل ۱ محدوده مطالعاتی حوضه نشان داده شده است.

در این پژوهش از داده‌های ۱۴ ایستگاه باران‌سنجی و دو ایستگاه آب‌سنجی استفاده شده است که اطلاعات مربوط به مختصات جغرافیایی، ارتفاع و طول دوره آماری آن‌ها در جدول ۱ و موقعیت آن‌ها در نقشه در شکل ۲ نشان داده شده است.

۲- تهیه نقشه شماره منحنی

به منظور برآورد مقادیر شماره منحنی و ترسیم نقشه آن، از نقشه‌های کاربری اراضی و زمین‌شناسی استفاده شد.

۱-۲-۲ نقشه کاربری اراضی

برای تهیه نقشه کاربری اراضی از تصاویر ماهواره‌ای پایگاه اینترنتی سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) و از داده‌های سنجنده تصویربرداری عملیاتی زمین (OLI^۲)، نصب شده بر ماهواره لندست^{۲۱} مربوط به تاریخ نهم آگوست ۲۰۱۹ استفاده شد.

عمل واسنجی با استفاده از مدل HEC-HMS برای داده‌های دبی ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ و با روش‌های ضریب عملکرد^{۱۷}، روش باقیمانده^{۱۸} و خطای نسبی انجام شد و برای اعتبارسنجی از داده‌های دبی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که دقت روش هیدروگراف واحد اشنایدر نسبت به روش هیدروگراف واحد کلارک بیشتر است (Halwatura & Najim, 2013). در حوضه آبریز بنو واقع در نیجر، مدل HEC-HMS به کمک داده‌های پیش‌بینی ماهواره‌ای بهینه شد و برای پیش‌بینی سیل و توسعه سیستم هشدار سیل مورد استفاده قرار گرفت. سپس از داده‌های ماهواره‌ای پیش‌بینی بارندگی با فاصله زمانی ۱ تا ۶ روز قبل از زمان واقعی بارش، برای پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب در آینده استفاده و بر اساس آن سامانه هشدار سیل توسعه داده شد. نتایج نشان داد که این روش پتانسیل بالایی برای دسترسی به سیستم هشدار سیل و پیش‌بینی زمان واقعی سیل، برای مناطق دارای کمبود داده دارد. همچنین، با توجه به محدودیت‌های موجود در دسترسی به داده‌های واقعی و قابل‌اعتماد، پیش‌بینی و سیستم هشداردهنده سیل با این روش می‌تواند در بسیاری از مناطق آفریقا ضروری باشد (Haile et al., 2016). در جنوب کشور الجزیره به شبیه‌سازی رواناب در منطقه نیمه‌خشک حوضه Ain Sefra با استفاده از مدل HEC-HMS پرداخته شد. ابتدا شماره منحنی (CN) منطقه با استفاده از نقشه زمین‌شناسی و ویژگی‌های سازند تشکیل‌دهنده و کاربری اراضی محاسبه شد. سپس در مدل HEC-HMS بارش-رواناب منطقه شبیه‌سازی شد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی^{۱۹} مدل، دبی اوج با دوره بازگشت‌های مختلف پیش‌بینی شد که این مقدار برای دوره بازگشت‌های ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله به ترتیب برابر ۴۲۵/۸، ۷۵۰/۵، ۹۰۴/۳ و ۱۳۲۸/۳ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد (Derdour et al., 2018).

مطالعه هیدرولوژیکی حوضه‌ها برای پیش‌بینی سیل و جلوگیری از خسارت‌های ناشی از آن الزامی می‌باشد. رودخانه بشار به عنوان یکی از سرشاخه‌های کارون بزرگ از مناطق کوهستانی جنوب غرب رشته کوه زاگرس می‌گذرد (Kazemi, 2021) و از جنبه‌های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی دارای اهمیت زیادی است. با این حال پژوهش کافی در خصوص دبی اوج سیلاب‌های این رودخانه صورت نگرفته است. نظر به فراوانی وقوع سیلاب‌های سال‌های اخیر به خصوص در جنوب غربی ایران، ارزیابی دبی اوج سیلاب و پیش‌بینی سیل در رودخانه بشار اهمیتی مضاعف می‌یابد. هدف از این مطالعه برآورد دبی اوج حوضه بشار با استفاده از مدل HEC-HMS در نقاطی از حوضه می‌باشد که ایستگاه آب‌سنجی وجود ندارد. برای جلوگیری از خسارت‌های سیل، شبیه‌سازی بارش-رواناب و محاسبه دبی اوج با دوره بازگشت‌های مختلف می‌تواند تا حد زیادی مفید باشد. بدون شک،

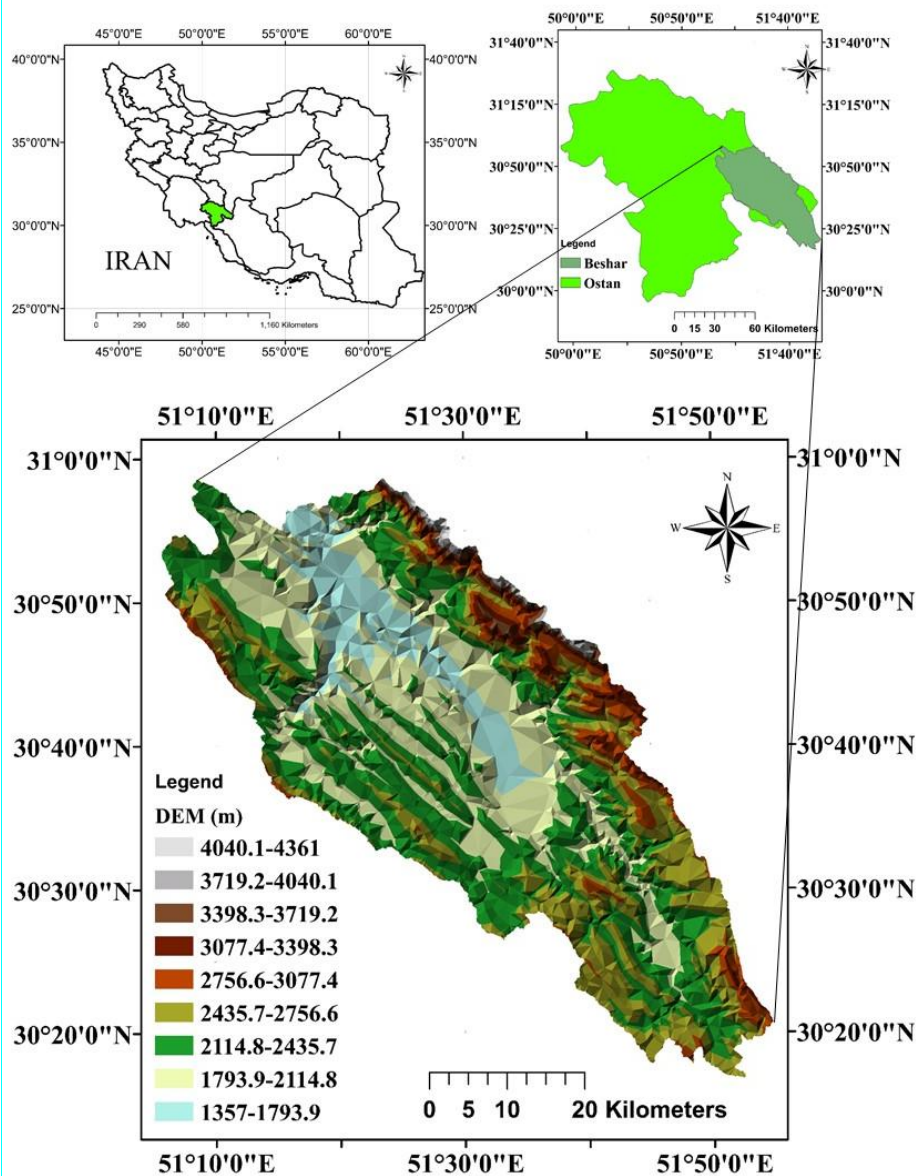


Fig. 1- The study area
 شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

$$\hat{R} = \frac{N \sum_{i=1}^n m_{ii} - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)} \quad (1)$$

در رابطه بالا، N تعداد کل پیکسل‌های طبقه‌بندی شده است که با نمونه‌های صحت‌سنجی مقایسه می‌شوند، m_{ii} تعداد پیکسل‌های متعلق به درایه i در نمونه دوم که در طبقه‌بندی نیز با درایه i باشد، C_i مجموع کل پیکسل‌های طبقه‌بندی شده متعلق به ستون i و G_i تعداد کل پیکسل‌های نمونه دوم (زمین واقعی) متعلق به ردیف i می‌باشد (Yaghoobzadeh et al., 2010). در جدول ۲ مقادیر قابل قبول برای ضریب کاپا آورده شده است.

طبقه‌بندی کاربری اراضی با استفاده از نرم‌افزار ENVI^{۲۲} در سه مرحله پیش‌پردازش، پردازش و پس‌پردازش انجام می‌شود. در مرحله پیش‌پردازش، تصحیح اتمسفری و هندسی تصاویر ارسالی از ماهواره انجام می‌شود. سپس تحت الگوریتم بیش‌ترین احتمال^{۲۳} در محیط ENVI با استفاده از نمونه‌های آماده شده در GoogleEarth طبقه‌بندی کاربری‌های اراضی انجام شد. طبقه‌بندی بدون صحت‌سنجی، کامل نخواهد بود و در مرحله پس‌پردازش باید صحت طبقه‌بندی انجام شده مورد ارزیابی قرار گیرد. برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی از نمونه‌های تهیه شده در محیط GoogleEarth و ضریب کاپا^{۲۴} استفاده می‌شود که رابطه آن به شکل زیر است:

Table 1- Location of the rain gauges and the hydrometric stations

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های باران سنجی و آب‌سنجی

Station Number	Station	Gauge Type	Height (m)	X	Y	The length of the statistical period
1	Patave	Rain Gauge	1585	525786	3424728	1350-1397
2	Tootnade	Rain Gauge	1715	532410	3417338	1371-1397
3	Batari	Rain Gauge	1587	531549	3414086	1349-1397
4	Sisakht	Rain Gauge	2251	543485	3414536	1355-1397
5	Karyak	Rain Gauge	1700	540003	3409804	1364-1397
6	ShahMokhtar	Rain Gauge	1765	550576	3394873	1350-1397
7	Cheshme Chenar	Rain Gauge	2204	560956	3397221	1371-1397
8	Yasuj	Rain Gauge	1857	555893	3394380	1347-1397
9	Ghallat	Rain Gauge	1870	565528	3381778	1379-1397
10	DashtRoom	Rain Gauge	2105	549600	3381510	1362-1397
11	Sepidar	Rain Gauge	2100	535150	3385148	1358-1397
12	Chitab	Rain Gauge	1610	531894	3405454	1371-1397
13	Tangab	Rain Gauge	1940	543079	3399952	1371-1397
14	Pireshkaft	Rain Gauge	1900	527128	3398053	1362-1397
15	Ghallat	River Gauge	1870	565530	3381595	1383-1397
16	Patave	River Gauge	1560	524379	3424728	1350-1397

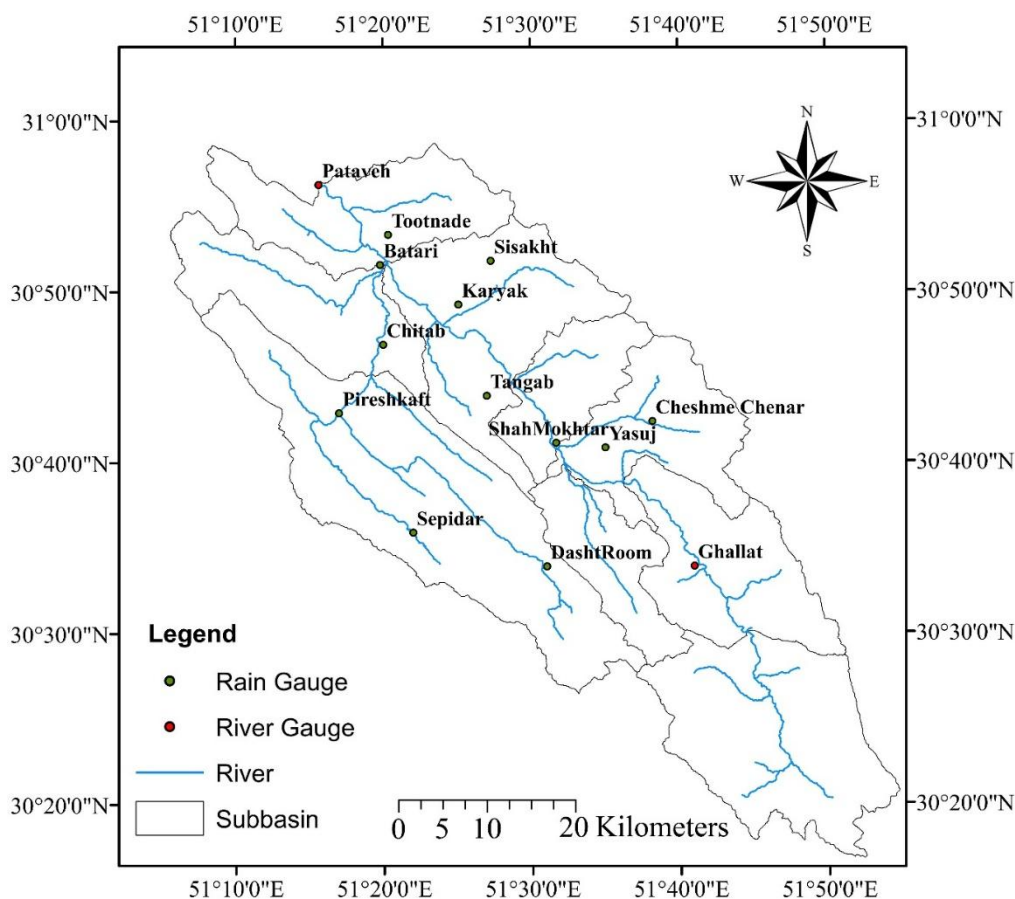


Fig. 2- Location of the rain gauges and the hydrometric stations on the map

شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های باران سنجی و آب‌سنجی بر روی نقشه

پس از این که نقشه کاربری اراضی و نقشه گروه هیدرولوژیکی آماده شد در نرم افزار ArcGIS نسبت به محاسبه و ترسیم نقشه شماره منحنی اقدام گردید.

Table 3- Hydrological classification of soils in SCS method (Safavi, 2014)

جدول ۳- طبقه بندی هیدرولوژیکی خاکها در روش SCS (Safavi, 2014)

Minimum Infiltration ($\frac{mm}{hr}$) Rate	Talent for Creating Runoff	Hydrologic Soil groups
7.6-12.7	Poor	A
3.8-7.6	Fair	B
1.3-3.8	Larg Scale	C
0-1.3	Great	D

۳-۲- تحلیل بارش حوضه آبریز

۳-۲-۱- انتخاب مناسب ترین توزیع برای محاسبه بارش های با دوره بازگشت های مختلف

برای محاسبه بارش با دوره بازگشت های مختلف از بیشینه بارش روزانه ۱۴ ایستگاه موجود در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده در شکل ۲ استفاده شد. بدین منظور کیفیت داده ها از نظر ناقص بودن و همگنی داده ها به کمک نرم افزار SPSS بررسی شد. انتخاب بهترین توزیع سری های زمانی و به دست آوردن تابع توزیع احتمال مناسب و پارامترهای آن با نرم افزار EasyFit انجام شد. توابع توزیعی که کاربرد بیشتری در زمینه مورد مطالعه دارند، شامل گامبل بیشینه، مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV^2)، لوگ نرمال 27 ، لوگ پیرسون نوع سه 28 و گاما 29 مورد استفاده قرار گرفت و پارامترهای هر کدام محاسبه شد. رتبه بندی توابع توزیع و انتخاب بهترین توزیع با آزمون های نیکویی برازش مانند کولموگروف-اسمیرنوف 30 ، اندرسون-دارلینگ 31 و کای اسکوتر 32 قابل انجام است. با توجه به اینکه آزمون کای اسکوتر در پژوهش مورد نظر بیشتر کاربرد دارد از این آزمون برای محاسبه توزیع برتر استفاده شد که به صورت رابطه ۳ معرفی می شود (Bolouki et al., 2021):

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3)$$

که در روابط بالا O_i مقدار دبی مشاهداتی، E_i مقدار دبی شبیه سازی شده می باشد. سپس با کمک تابع توزیع چگالی احتمال 33 و پارامترهای مربوط به آن بارش با دوره بازگشت های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال محاسبه شد.

Table 2- Kappa coefficient classification by Koch and Landis (Safarishad et al., 2019)

جدول ۲- طبقه بندی ضریب کاپا توسط کوچ و لاندیس (Safarishad et al., 2019)

Kappa Coefficient(%)	Acceptance Rate
< 0	Weak
0-20	Low
21-40	Medium
41-60	Appropriate
61-80	Acceptable
81-100	Excellent

۲- شاخص گیاهی تفاضل تعدیل شده 25 NDVI:

این شاخص یکی از معروف ترین، ساده ترین و کاربردی ترین شاخص هایی است که در زمینه پوشش گیاهی شناخته شده است (Shojaei, 2014). شاخص یادشده وضعیت پوشش های گیاهی را در سطح وسیعی از زمین نشان می دهد و ارزش عددی آن بین -۱ تا +۱ می باشد که مقادیر مثبت پوشش گیاهی متراکم و مقادیر صفر و عددهای نزدیک به آن پوشش گیاهی ضعیف را نشان می دهد و مکان هایی که دارای آب می باشد نزدیک به عدد -۱ می باشد (Safarishad et al., 2019). برای طبقه بندی جنگل ها و مراتع از نظر تراکم پوشش گیاهی از این شاخص استفاده شد. این شاخص از طریق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (2)$$

که در آن، NIR باند مادون قرمز (در سنجنده OLI لندست باند ۵) و RED باند قرمز (در سنجنده OLI لندست باند ۴) می باشد (Safarishad et al., 2019).

۲-۲-۲- نقشه گروه های هیدرولوژیکی خاک

باتوجه به اینکه در مطالعات گذشته مانند (Adeli & Mohammadi, 2019) و (Derdour et al., 2018) از نقشه زمین شناسی برای محاسبه گروه هیدرولوژیکی خاک استفاده شده است و از آنجایی که نقشه دقیق و به روزی برای منطقه وجود ندارد، در این پژوهش نیز از نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ استفاده شد. نقشه زمین شناسی توسط نرم افزار ArcGIS تهیه شده است. برای تهیه نقشه گروه های هیدرولوژیکی خاک، لازم است نفوذپذیری هریک از سازندهای زمین شناسی با توجه به ویژگی های هر کدام از آنها شناسایی شوند. در جدول ۳ طبقه بندی هیدرولوژیکی بر حسب سرعت نفوذ آب در خاک ذکر شده است.

۲-۳-۲- الگوی توزیع زمانی حداکثر بارش

روش سازمان حفاظت آمریکا (SCS) استفاده شد. هنگامی که شدت بارندگی از ظرفیت نفوذ خاک بیشتر شود و گودال‌های سطح زمین پر شود، رواناب جاری می‌شود و از طریق شبکه آبراهه‌ها و رودخانه‌ها از حوضه خارج می‌شود (Kazemi, 2021). محاسبه رواناب در مدل بارش روش‌های متعددی امکان‌پذیر است که در این پژوهش از روش SCS استفاده شد. برای جداسازی جریان پایه که سهمی از بارش ندارد و از قبل در رودخانه جریان داشته است از روش فروکش^{۴۲} استفاده شد. روندیابی جریان و استخراج هیدروگراف پایین‌دست با استفاده از هیدروگراف بالادست با روش ماسکینگام^{۴۳} محاسبه شد و ضرایب این روش (k و x) نیز با استفاده از هیدروگراف سیل در بالادست و پایین‌دست حوضه، بدست آمد. برای اثر دادن مقدار بارندگی در هر ایستگاه به زیرحوضه‌ها از روش وزن‌دهی ایستگاه‌ها^{۴۴} و برای تبدیل بارش نقطه‌ای به بارش سطحی نیز از روش چندضلعی تیسن^{۴۵} استفاده شد.

الگوی توزیع زمانی بارش، دقت شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌های آبریز را افزایش می‌دهد. یکی از اصلی‌ترین عوامل موردنیاز در تهیه و توسعه مدل هیدرولوژیکی، شناخت توزیع زمانی بارش است (Masoughi, 2016). در این پژوهش از الگوهای آماده‌ای که توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) ارائه شده است، استفاده شد. در پژوهش‌های گذشته (Biddle et al., 2009; Moradnejadi et al., 2016; Abbasi Jandani, 2016)، به بررسی این الگو و تطابق آن با شرایط جوی کشور پرداخته شده است که بر اساس نتایج به‌دست آمده، از بین چهار الگوی SCS، الگوی تیپ IA بیش‌ترین تشابه را با الگوی بارش کشور ایران دارد؛ بنابراین در این پژوهش نیز برای تعیین الگوی توزیع بارش، از الگوی یادشده استفاده شد.

۲-۴- پیش‌پردازش در الحاقیه HEC-GeoHMS^{۴۶}

بخش‌های محاسبات داخلی مدل HEC-HMS به همراه نام روش‌ها، روابط ریاضی و پارامترهای آن‌ها در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول، S حجم کلی ذخیره (m³)، P عمق بارش (mm)، R عمق رواناب (mm)، Q_P دبی بیشینه رواناب (m³/s)، T_c زمان تمرکز حوضه (hr)، Q_b دبی پایه (m³/s)، Q₀ مقدار ورودی جریان پایه (m³/s)، t زمان (hr) و k ثابت خشکیدگی (بدون بعد) را نشان می‌دهد.

این نرم‌افزار الحاقیه‌ای برای نرم‌افزار HEC-HMS می‌باشد و با استفاده از آن، پارامترهای موردنیاز برای نرم‌افزار HEC-HMS تعیین می‌شود (HEC-GeoHMS, 2010). این نرم‌افزار با کمک نقشه رقومی ارتفاعی (DEM^{۴۷}) به پیش‌پردازش، مشخص کردن محدوده حوضه و محاسبه مشخصات این حوضه می‌پردازد. از جمله مشخصاتی که این نرم‌افزار محاسبه می‌کند عبارت‌اند از: استخراج لایه رستری رودخانه با تعیین حد آستانه تشکیل رودخانه، تعیین جهت جریان، محاسبه طول رودخانه، محاسبه شیب زیرحوضه‌ها، محاسبه شیب رودخانه، محاسبه طولانی‌ترین مسیر هیدرولوژیکی، محاسبه مرکز ثقل زیرحوضه‌ها، محاسبه ارتفاع مرکز ثقل زیرحوضه‌ها، فاصله مرکز ثقل حوضه از خروجی حوضه، محاسبه زمان تأخیر^{۴۶} و محاسبه زمان تمرکز^{۴۷}. پس از طی مراحل پیش‌پردازش در این الحاقیه، خروجی موردنیاز برای نرم‌افزار HEC-HMS تهیه می‌شود.

۲-۶- واسنجی و اعتبارسنجی مدل

پس از معرفی داده‌های اولیه به مدل و انجام آنالیز و گرفتن خروجی اولیه، مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به منظور حذف خطاهای احتمالی و بهبود فرایند مدل‌سازی انجام شد. واسنجی فرآیندی است که طی آن پارامترهای معرفی شده به مدل، برای رسیدن به نتایج همگون با داده‌های مشاهداتی تصحیح می‌شوند (Talebi et al., 2019). در اینجا عمل واسنجی برای پارامترهای ضرایب ماسکینگام، شماره منحنی، زمان تأخیر و تلفات اولیه انجام شد.

۲-۵- مدل‌سازی حوضه در HEC-HMS به منظور برآورد دبی اوج با دوره بازگشت‌های مختلف

این مدل شامل سه بخش اصلی مدل حوضه، مدل هواشناسی و شاخص‌های کنترلی می‌باشد.

به دنبال واسنجی مدل، برای اطمینان از دقت مدل شبیه‌سازی شده و مقادیر واسنجی شده اعتبارسنجی مدل با داده‌های جدید (مستقل از داده‌هایی که در عمل واسنجی استفاده شد) انجام شد. با نزدیک شدن مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر مشاهداتی و واقعی عمل شبیه‌سازی انجام شده مورد تأیید گرفت.

انتخاب مدل‌های محاسبه تلفات^{۴۸}، بارش-رواناب^{۴۹}، دبی پایه^{۴۰} و روندیابی^{۴۱}

برای مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، می‌توان از شاخص‌های آماری سنجش خطا از جمله

پارامترهایی مانند نفوذ، برگاب، چالاب، تبخیر و تعرق از عواملی هستند که در یک حوضه از تبدیل مستقیم بارش به رواناب جلوگیری می‌کنند (Rostamizad et al., 2013). برای محاسبه مقدار تلفات یا نفوذ از

Table 4- Methods and parameters used in HEC-HMS software
جدول ۴- روش‌ها و پارامترهای استفاده شده در نرم‌افزار HEC-HMS

Methods		Equation	Parameters
Routing	Muskingum	$S = k [x I + (1 - x) Q]$ (4)	k x
Loss	SCS Curve Number	$R = \frac{(P-0.2.S)^2}{(P+0.8.S)}$ (5)	CN
		$S = \frac{25400}{CN} - 254$ (6)	
		$Ia = 0.2S$ (7)	Initial Abstraction
SCS Unit Hydrograph	SCS Unit Hydrograph	$Q_p = 484 \frac{A}{T_p}$ (8)	Lag Time
		$T_{Lag} = \frac{L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900y^{0.5}}$ (9)	
		$T_c = 1.67(T_{Lag})$ (10)	
Base Flow	Recession	$Q_t = Q_0 K^t$ (11)	Initial Discharge Recession Constant
			Ratio To Peak Depth Weight
Precipitation	Gage Weight	$P = \frac{P_1 A_1 + P_2 A_2 + \dots + P_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$ (12)	Time Weight

پارامترهای مربوط به آن دبی اوج با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نقشه‌های زمین‌شناسی، کاربری اراضی و شماره منحنی

پس از آماده شدن نقشه زمین‌شناسی در محیط نرم‌افزار ArcGIS، با توجه به نوع سازند تشکیل‌دهنده هر قسمت از حوضه، می‌توان نفوذپذیری و در نتیجه گروه هیدرولوژیکی آن را مشخص کرد. در شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی آورده شده است. این منطقه از ۲۷ سازند مختلف تشکیل شده است که از این تعداد، ۷ سازند کواترنری، آسماری، بختیاری، گچساران، پابده، گورپی و پابده-گورپی بیش از ۸۴ درصد منطقه را تشکیل می‌دهد و بیش‌ترین تأثیر را در تعیین گروه هیدرولوژیکی دارند. سازندهای کواترنری و آسماری که دارای نفوذپذیری بالا هستند و در گروه هیدرولوژیکی A قرار می‌گیرند، در مجموع ۵۳/۴۶ درصد از مساحت منطقه را شامل می‌شود. سازندهای بختیاری، گچساران، پابده، گورپی و پابده-گورپی که نفوذپذیری کمی دارند و در گروه هیدرولوژیکی D قرار می‌گیرند، در مجموع ۳۰/۷۴۸ درصد از منطقه را شامل می‌شوند. در شکل ۴ نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی نشان داده شده است. همچنین، در جدول ۵ نیز مساحت و درصد پوشش هر کدام از این گروه‌های هیدرولوژیکی آورده شده است.

ضریب ناش-ساتکلیف و ریشه میانگین مربعات خطا (Ahmadpour et al., 2019)، استفاده کرد که به ترتیب در روابط ۱۳ و ۱۴ آمده است:

$$NS = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (14)$$

در این روابط، O_i مقدار دبی مشاهداتی، S_i مقدار دبی شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقدار مشاهداتی و n تعداد مشاهدات می‌باشد.

پس از طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی در نرم‌افزار HEC-HMS، توزیع مناسب برای بارش با دوره بازگشت‌های مختلف با انتخاب الگوی SCS اعمال گردید و با اجرای نرم‌افزار HEC-HMS، شبیه‌سازی رواناب برای هر بارش انجام شد و دبی اوج هر دوره بازگشت محاسبه شد.

۲-۷- محاسبه دبی اوج با استفاده از داده‌های ایستگاه آب‌سنجی پاتاوه

برای به‌دست آوردن دبی اوج، تابع توزیع احتمال برتر برای حداکثر دبی ثبت شده هر سال در ایستگاه خروجی حوضه (پاتاوه) با استفاده از نرم‌افزار Easyfit و بر اساس نتایج رده‌بندی توابع با آزمون کای اسکوئر تعیین گردید، سپس با کمک تابع توزیع چگالی احتمال انتخاب‌شده و

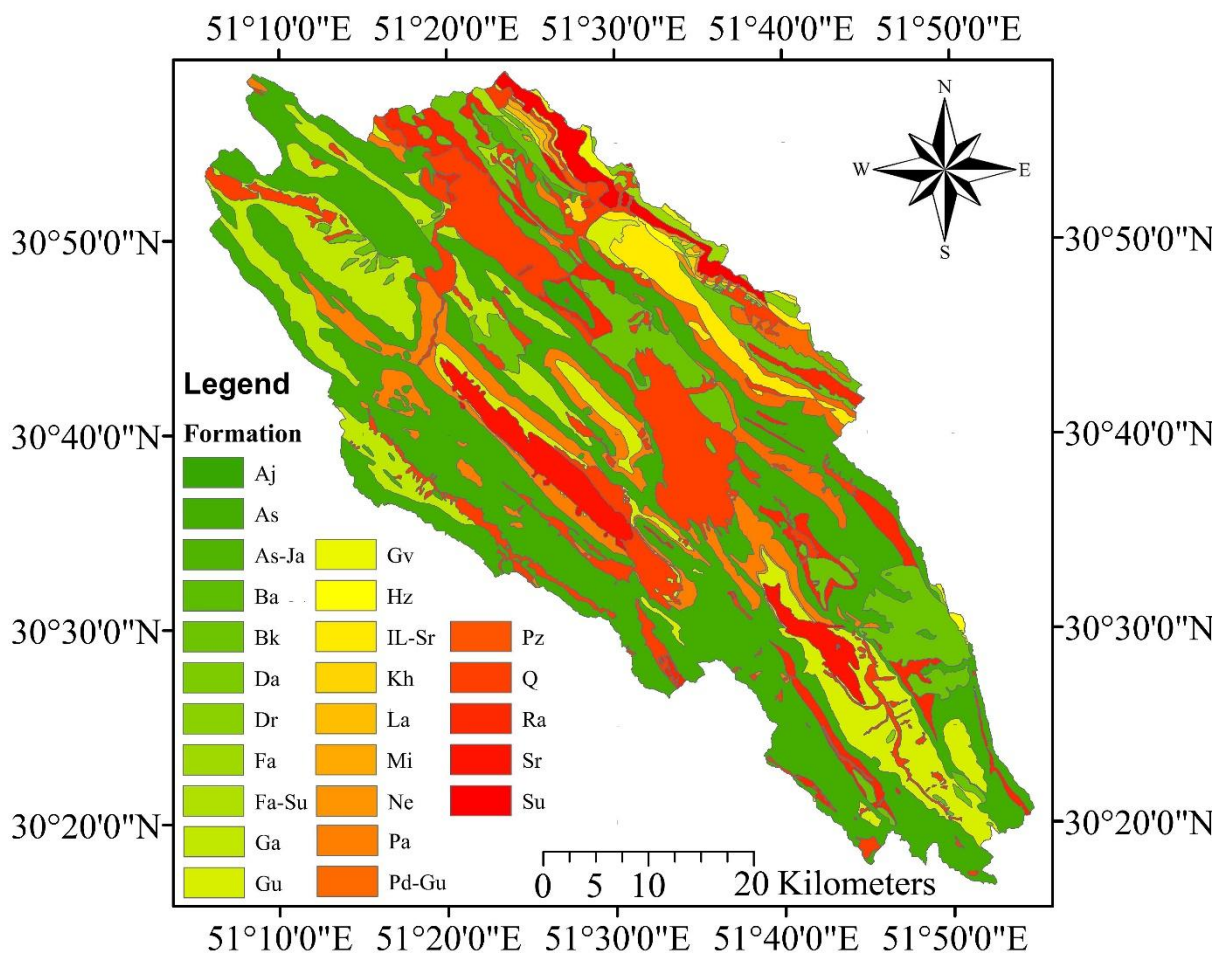


Fig. 3- Geological map of the study area
 شکل ۳- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

و می توان نتیجه گرفت که این طبقه بندی از دقت خوبی برخوردار است.

Table 6- General assessment of land use classification

جدول ۶- ارزیابی کلی صحت طبقه بندی کاربری اراضی

Case Number	Kappa Coefficient	Overall accuracy
Case 1	0.889	90.64
Case 2	0.84	87.19
Case 3	0.906	92.78
Case 4	0.824	86.14

سپس با استفاده از شاخص NDVI، جنگل ها و مراتع از نظر تراکم نیز طبقه بندی شدند. در نهایت با استفاده از نقشه کاربری اراضی و نقشه گروه هیدرولوژیکی، می توان شماره منحنی را محاسبه و نقشه آن را تهیه کرد که در شکل ۶ نشان داده شده است.

Table 5- Area and covering percentage of hydrological groups

جدول ۵- مساحت و درصد پوشش گروه های هیدرولوژیکی

Hydrological groups	Area (ha)	Covering percent
A	170924.53	53.67
B	13856.80	4.35
C	24236.22	7.61
D	109429.72	34.36

نقشه کاربری اراضی که با استفاده از نرم افزار ENVI تهیه شده در شکل ۵ نشان داده شده است. پس از تهیه نقشه کاربری اراضی در ENVI صحت سنجی با چهار گروه نمونه انجام شد تا از دقت طبقه بندی انجام شده اطمینان پیدا کرد که نتایج این صحت سنجی در جدول ۶ مشاهده می شود. همان طور که ملاحظه می شود مقادیر دقت کلی و ضریب کاپا برای هر چهار نمونه دارای مقادیر قابل قبولی هستند

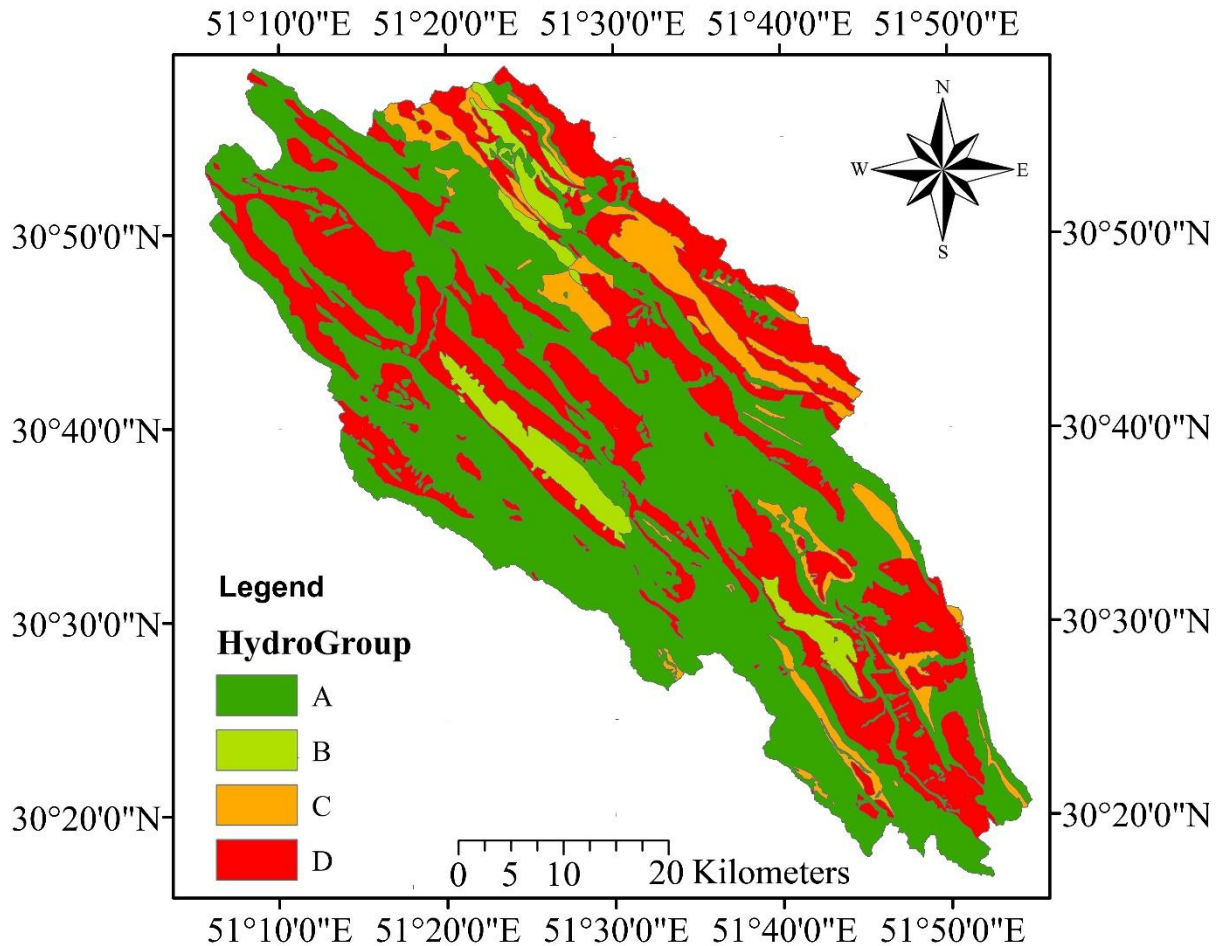


Fig. 4- Map of the soil hydrological groups

شکل ۴- نقشه گروه‌های هیدرولوژیکی خاک

جدول ۸ نیز مقادیر محاسبه شده مساحت، شیب حوضه، شماره منحنی، تلفات اولیه، زمان تمرکز و زمان تأخیر را نشان می‌دهد.

۳-۳- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS

یکی از مهم‌ترین مراحل برای مدل‌سازی، نحوه واسنجی و اعتبارسنجی مدل می‌باشد که به نوبه خود نیاز به داده‌های سیلاب دارد. با توجه به نواقص داده‌های ثبت شده سیلاب در حوضه مورد مطالعه، در آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز برای واسنجی و اعتبارسنجی محدودیت وجود داشت و تنها ۵ رویداد مناسب تشخیص داده شد؛ از این تعداد، ۳ رویداد برای واسنجی و ۲ رویداد برای اعتبارسنجی استفاده شد. بارش‌های استفاده شده در واسنجی و اعتبارسنجی در جدول ۹ آورده شده است. شکل‌های ۸ تا ۱۰ نتایج آنالیز سیل‌ها بعد از واسنجی را نشان می‌دهد. مقادیر دبی اوج شبیه‌سازی شده و مشاهداتی پس از واسنجی اختلاف چندانی نداشته و همین نشانه خوبی از کارایی بالای مدل واسنجی شده در برآورد دبی اوج جریان می‌باشد.

۳-۲- تحلیل بارش و محاسبه بارش با دوره بازگشت‌های مختلف در هر ایستگاه

نتایج حاصل از انتخاب توزیع برتر برای سری‌های زمانی بارش در نرم‌افزار EasyFit با آزمون کای اسکوتر نشان داد که برای ایستگاه‌های بطاری، چشمه چنار، دشت روم، کریک، پیراشگفت، سپیدار، سی‌سخت، یاسوج، پاتاوه و قلات تابع حدی تعمیم یافته، در ایستگاه‌های چیتاب و توت نده تابع لوگ نرمال و برای ایستگاه‌های شاه مختار و تنگاب تابع گاما به عنوان تابع توزیع برتر به دست آمد. پس از انتخاب توزیع مناسب برای بیشینه بارش برای هر ایستگاه و با استفاده از روابط ریاضی مربوط به آن، بارش با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله محاسبه شد که در جدول ۷ نشان داده شده است.

در ادامه، با استفاده از HEC-GeoHMS، ورودی‌های مورد نیاز برای مدل HEC-HMS تهیه شد. شکل ۷ شماتیک حوضه مورد مطالعه و

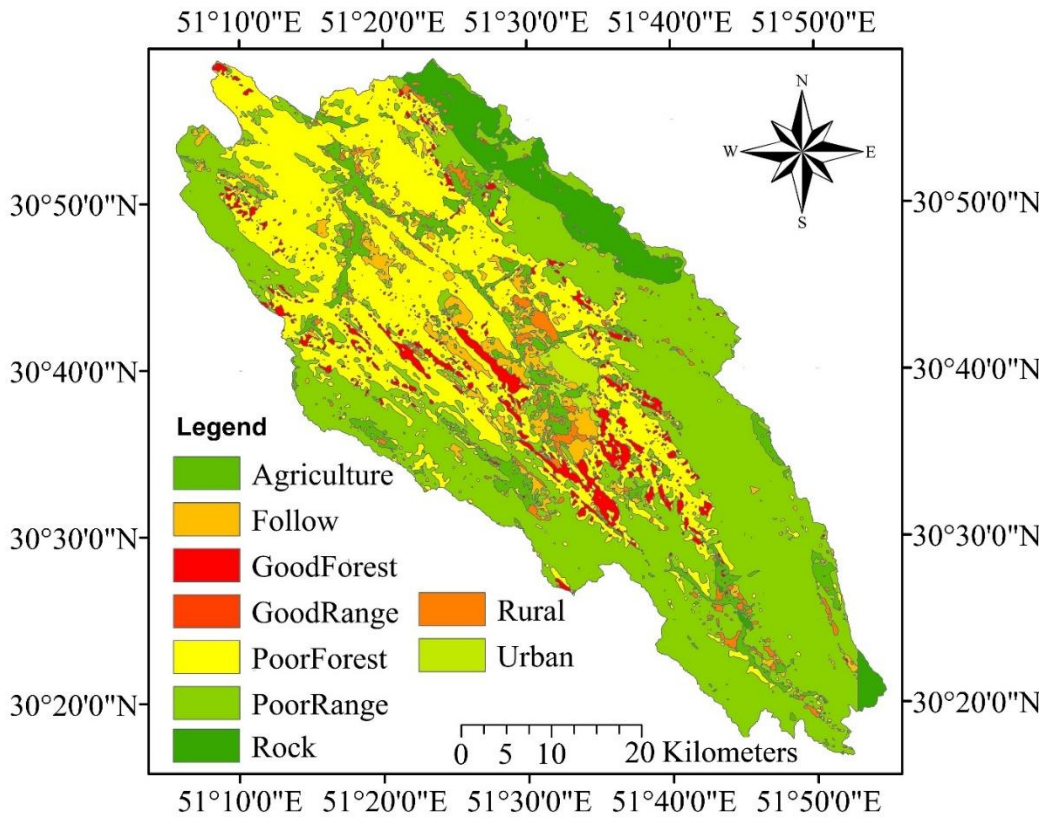


Fig. 5- Landuse map

شکل ۵- نقشه کاربری اراضی

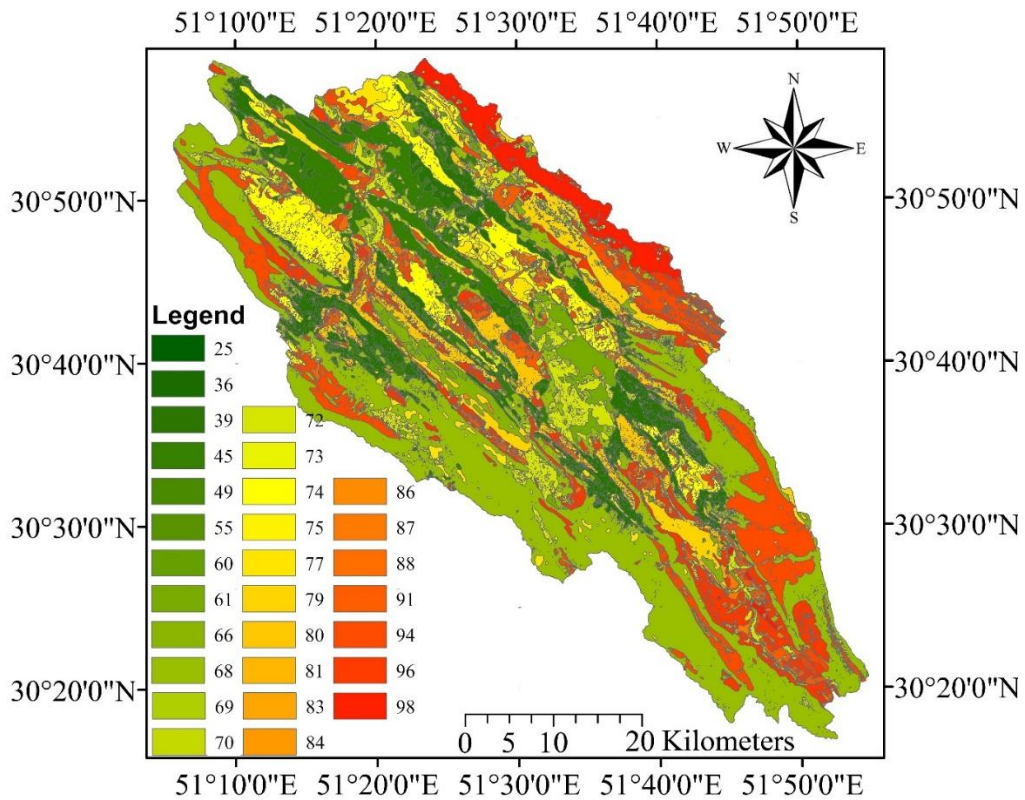


Fig. 6- Curve number map

شکل ۶- نقشه شماره منحنی

Table 7- Calculated precipitation for each station with different return periods

جدول ۷- بارش محاسبه شده برای هر ایستگاه با دوره بازگشت های مختلف

Station	Return periods	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Batari		50.54	66.47	76.17	84.89	95.37	102.68	109.52	117.93	123.84
Patave		46.97	60.58	69.33	77.53	87.86	95.41	102.76	112.22	119.19
Pirashegoft		73.35	91.38	99.9	106.19	112.27	115.68	118.33	120.96	122.45
Tangab		114.2	150.5	173.8	195	222	241	260	284.45	302.6
Tootnade		51	69.7	83.5	97.1	116	130.6	145.9	167.2	184.15
Cheshme Chenar		83.35	109.98	123.91	135.06	146.83	154.04	160.08	166.61	170.66
Chitab		61.1	79	89	99	108	115.8	121.9	122.78	138
DashtRoom		88.7	113.18	127.24	139.32	153.14	162.3	170.52	180.13	186.56
Sepidar		109.74	147.53	172.05	195.19	224.62	246.29	267.56	295.13	315.61
Sisakht		66.7	84.77	94.43	102.26	110.69	115.93	120.4	125.31	128.4
ShahMokhtar		69.55	93.5	109	124	141.7	154.7	167.4	183.8	195.95
Ghallat		71	96.5	114.5	129	152.3	170	183.35	203.4	218.22
Karyak		61.8	81.54	93.15	103.32	115.19	123.23	130.57	139.32	145.31
Yasuj		72.59	93.68	105.9	116.46	128.64	136.76	144.1	152.74	158.56

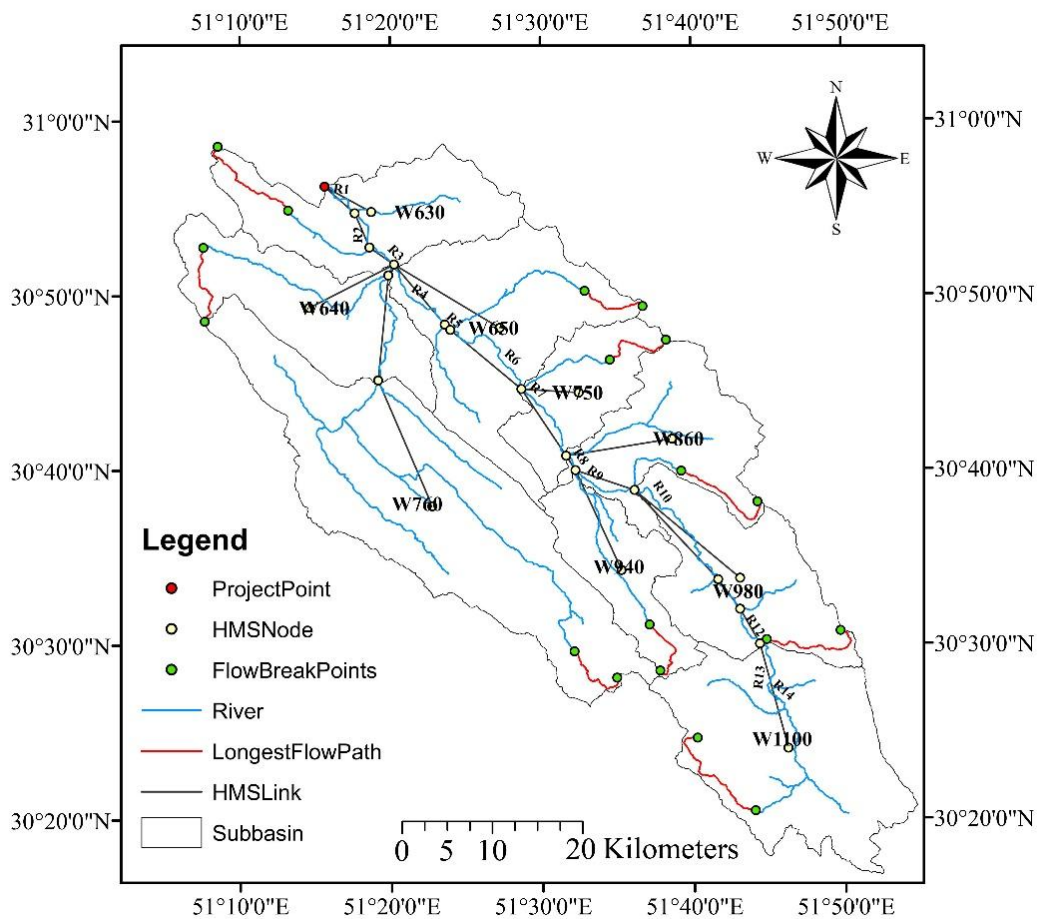


Fig. 7- Schematic of the studied basin in HEC-GeoHMS

شکل ۷- شماتیک حوضه مورد مطالعه در HEC-GeoHMS

Table 8- Calculated specifications for sub-basins in HEC-GeoHMS
جدول ۸- مشخصات محاسبه شده برای زیرحوضه ها در HEC-GeoHMS

Subbasin	Area (Km ²)	Lag Time (hr)	Time of Concentration (hr)	Curve Number	Initial Abstract (m ³ /s)	Slope (Degree)
W10	258.26	4.14	6.91	57.89	36.95	38.46
W20	253.36	5.70	9.52	54.58	42.27	28.18
W30	346.41	4.32	7.21	60.34	33.40	35.62
W40	150.03	2.31	3.85	67.34	24.64	35.08
W50	618.34	8.22	13.72	50.66	49.49	33.54
W60	227.79	3.22	5.37	66.17	25.97	37.27
W70	152.02	5.5	9.18	49.74	51.32	26.30
W80	262.70	4.54	7.58	59.53	34.54	38.25
W90	404.03	6.42	7.71	62.37	30.65	33.01

Table 9- The Precipitation events used in the calibration and validation
جدول ۹- بارش های استفاده شده در واسنجی و اعتبارسنجی مدل

Rain Date Station	Calibration			Validation	
	4 January 2016	4 February 2010	2 February 2012	18 March 2015	8 December 2009
Batari	61	81	99	85	28
Patave	62.5	42.5	88.5	71	20.5
Pirashegoft	99	68	145	154	79
Tangab	227	149	134	362	101
Tootnade	64.5	62	108	106	43
Cheshme Chenar	126	105	146	195	90
Chitab	79	100	120	88	41
DashtRoom	160	89	168	246	93.5
Sepidar	243	143	228	286	43
Sisakht	86	114	150	184	40
ShahMokhtar	126	80.5	146	180	69.5
Ghallat	95	91.5	139	119.5	88.5
Karyak	76	85	120	119	34
Yasuj	127.5	83.5	136.5	187.5	92

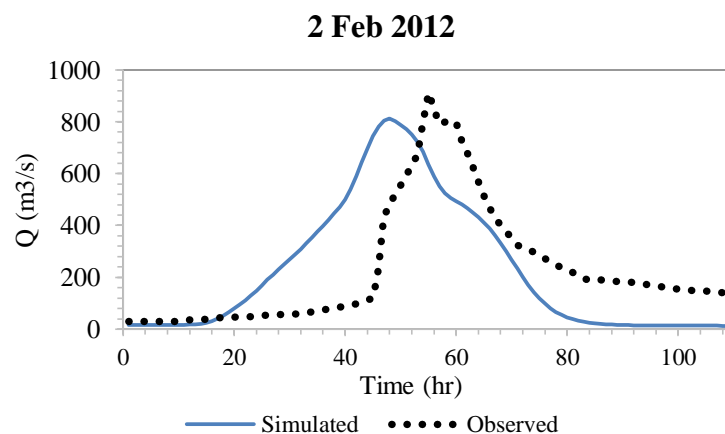


Fig. 8- Simulated vs observed flood hydrograph for Patave station in flood event of 2 February 2012
شکل ۸- هیدروگراف شبیه سازی شده در مقایسه با مشاهداتی برای ایستگاه پاتاوه، سیل ۱۳ بهمن ۱۳۹۰

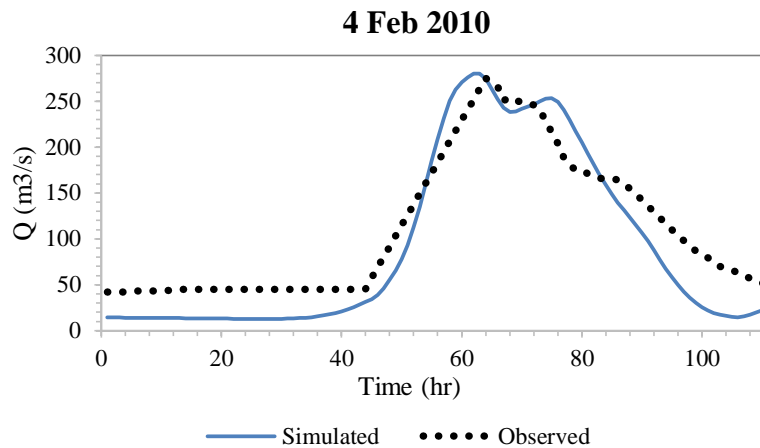


Fig. 9- Simulated vs observed flood hydrograph for Patave station in flood event of 4 February, 2010
 شکل ۹- هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهداتی برای ایستگاه پاتاوه، سیل ۱۵ بهمن ۱۳۸۸

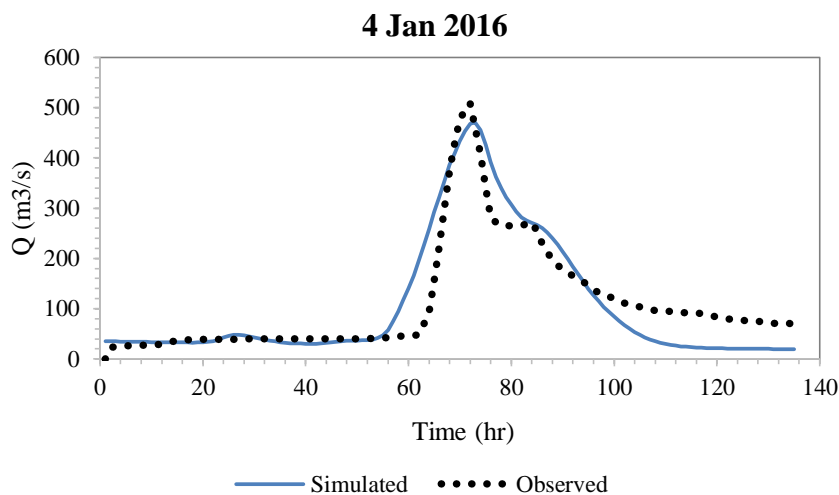


Fig. 10- Simulated vs observed flood hydrograph for Patave station in flood event of 4 January, 2016
 شکل ۱۰- هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهداتی برای ایستگاه پاتاوه، سیل ۱۴ دی ۱۳۹۴

Table 10- Error values calculated in the calibration and validation stages

جدول ۱۰- مقادیر خطای محاسبه شده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

اعتبارسنجی			
	Date	RMSE	NS
Calibration	2 February 2012	0.8	0.397
	4 January 2016	0.4	0.807
	4 February 2010	0.4	0.808
Validation	8 December 2009	0.6	0.602
	18 March 2015	0.5	0.756

پس از اینکه نتایج واسنجی مورد قبول واقع شد، مرحله اعتبارسنجی به کمک پارامترهای به دست آمده از واسنجی انجام شد که شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نتایج آنالیز سیلاب‌ها بعد از اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. همچنین، در جدول ۱۰ مقادیر خطای واسنجی و اعتبارسنجی ذکر شده است که با توجه به مطالعات گذشته در این زمینه، مقادیر خطا در بازه قابل قبولی هستند.

از برازش‌های RMSE و NS در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی در مطالعه حاضر و همچنین در مطالعه‌ای که در گذشته (Ahmadpour et al., 2019) با موضوع مشابه انجام شده است، میانگین گرفته شده و در جدول ۱۱ آورده شدند. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که اغلب شاخص‌های خطا در مطالعه حاضر دارای مقادیر مناسب‌تری هستند.

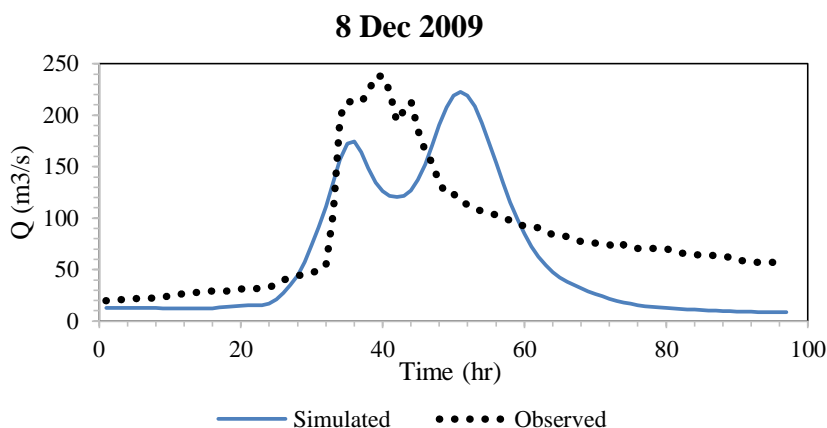


Fig. 11- Simulated vs observed flood hydrograph for Patave station in flood event of 8 December 2009
 شکل ۱۱- هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهداتی برای ایستگاه پاتاوه، سیل ۱۷ آذر ۱۳۸۸

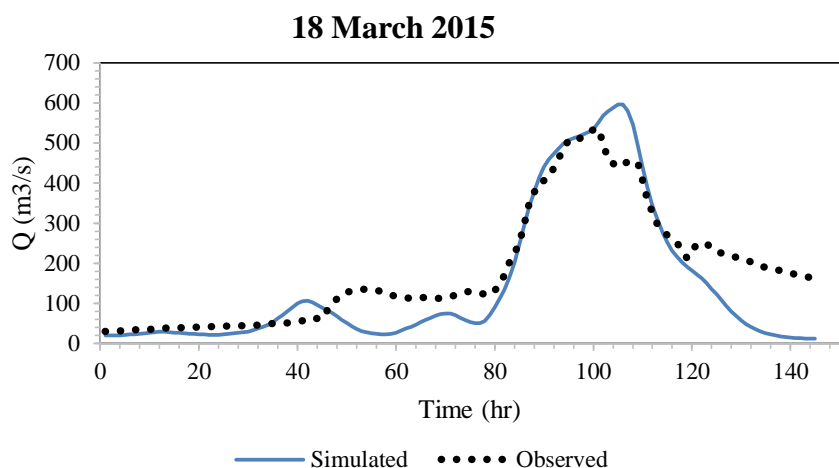


Fig. 12- Simulated vs observed flood hydrograph for Patave station in flood event of 18 March, 2015
 شکل ۱۲- هیدروگراف شبیه‌سازی شده در مقایسه با مشاهداتی برای ایستگاه پاتاوه، سیل ۲۷ اسفند ۱۳۹۳

۳-۴- محاسبه دبی اوج سیلاب در HEC-HMS

پس از واسنجی و اعتبارسنجی مدل، بارش با دوره بازگشت‌های مختلف وارد مدل شد. سپس الگوی SCS و تیپ IA برای تبدیل بارش معرفی شده به سری زمانی انتخاب و مقادیر دبی اوج به ازای هر دوره بازگشت محاسبه شد. دبی‌های اوج به دست آمده برای مقاطع مختلف رودخانه در جدول ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که در جدول مشاهده می‌شود هرچه به نقطه خروجی حوضه نزدیک می‌شویم دبی اوج برای همه دوره بازگشت‌ها نیز بیشتر می‌شود.

۳-۵- آماری محاسبه دبی اوج ایستگاه آب‌سنجی پاتاوه به روش

برای نقطه خروجی حوضه (ایستگاه آب‌سنجی پاتاوه) می‌توان با روش آماری نیز دبی اوج را محاسبه و با نتایج به دست آمده از مدل HEC-

Table 11- Comparison of average error values calculated in the calibration and validation stages with the previous study (Ahmadpour et al., 2019)
 جدول ۱۱- مقایسه مقادیر متوسط خطای محاسبه شده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی با مطالعه پیشین (Ahmadpour et al., 2019)

		RMSE	NS
Current Study	Calibration	0.53	0.67
	Validation	0.55	0.68
AhmadPoor et al.'s Study	Calibration	55.2	0.64
	Validation	48.5	0.62

۳-۶- مقایسه با مطالعات پیشین

در مطالعه‌ای مشابه با مطالعه حاضر دبی اوج ایستگاه پاتاوه (نقطه خروجی حوضه) محاسبه شده است (Roshun et al., 2013). در شکل ۱۵ نتایج خروجی HEC-HMS و روش توزیع برتر در مطالعه حاضر با مطالعه روشان و همکاران (Roshun et al., 2013) مقایسه شده است.

HMS مقایسه کرد. برای این منظور آمار بیشینه دبی سالیانه این ایستگاه استخراج و سپس به کمک آزمون کای اسکوئر، توزیع گاما به عنوان توزیع برتر ایستگاه انتخاب شد. در شکل ۱۳ توزیع گاما برای ایستگاه پاتاوه، به همراه پارامترها و روابط مربوط به آن نشان داده شده است. در ادامه، با استفاده از توزیع برتر انتخاب شده، دبی اوج با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله برای ایستگاه پاتاوه محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۱۳ نشان داده شده است.

Table 12- Peak flow rate calculated for different return periods according to HEC-HMS results

جدول ۱۲- دبی اوج محاسبه شده به ازای دوره بازگشت‌های مختلف بر اساس نتایج HEC-HMS

Section	Start (km)	End (km)	Return Period (Year)								
			2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Section1	0	16.27	378.4	605	773.9	912.2	1135.6	1306.2	1435.5	1629.6	1773.1
Section2	16.27	23.93	394.5	641.7	821	971	1213	1397.5	1538.8	1749.4	1904.9
Section3	23.93	26.65	415.2	686.2	883.1	1048.6	1306.7	1502	1652.8	1874.6	2037.6
Section4	26.65	37.37	407.5	681.8	884.1	1053.2	1315.1	1513.1	1667.2	1892.6	2058.4
Section5	37.37	62.29	462	815.4	1068.1	1285.8	1602.4	1839.2	2031.8	2302.1	2503.8
Section6	62.29	76.93	471.3	834.6	1083.9	1304.4	1619.2	1860.1	2060.6	2339.8	2548.9

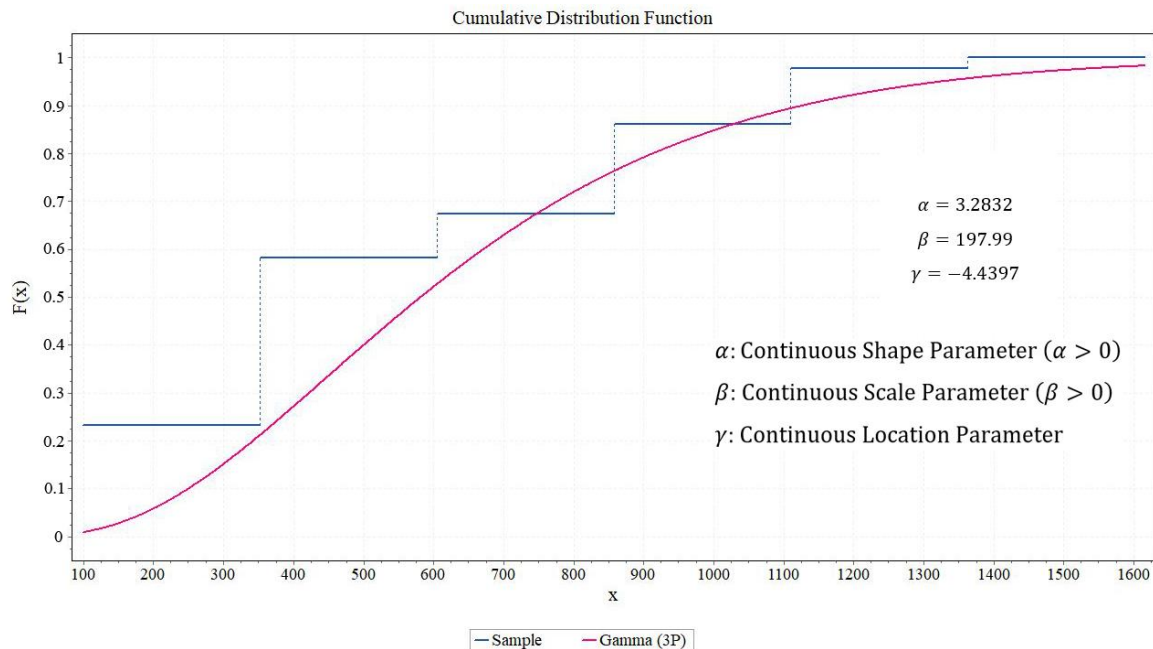


Fig. 13- The best distribution for Pataveh Station Hydrometric Data (Gamma)

شکل ۱۳- بهترین توزیع برای داده‌های ایستگاه آب‌سنجی پاتاوه (گاما)

Table 13- Peak flow rate calculated at basin outlet (Pataveh Station) using hydrometric data for different return periods according to statistical method

جدول ۱۳- دبی اوج محاسبه شده در خروجی حوضه (ایستگاه پاتاوه) به ازای دوره بازگشت‌های مختلف بر اساس روش آماری

Peak flow (m ³ /s)	Return Period (Year)								
	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
	591.054	912.9849	1130	1330	1575	1755	1930	2160	2340

آماري در هر دو مطالعه بيشتر بوده و براي دوره بازگشت‌هاي ۵۰ سال و بالاتر دبي محاسبه شده با مدل HEC-HMS بيشتر از روش آماري بوده است و کم‌ترين قدر مطلق درصد اختلاف بين شبیه‌سازی HEC-HMS و روش آماري را دوره بازگشت ۵۰ سال دارد.

۴- نتیجه‌گیری

براي رسيدن به ويژگي‌هاي هيدرولوژيكي حوضه، يکي از بهترين راه‌ها، استفاده از مدل HEC-HMS مي‌باشد. با استفاده از اين مدل مي‌توان رواناب حوضه را شبیه‌سازی و دبي اوج سيلاب با دوره بازگشت‌هاي مختلف را محاسبه کرد. در اين پژوهش نيز با کمک اين مدل، رواناب حوضه شبیه‌سازی شد. ابتدا با استفاده از نقشه‌هاي کاربري اراضي و زمين‌شناسي مقادير شماره منحنی برای حوضه مورد نظر محاسبه شد، پس از آن با استفاده از HEC-HMS مدل حوضه مورد نظر شبیه‌سازی شد. در مرحله واسنجی سه رویداد مورد بررسی قرار گرفت که ميانگین شاخص‌های RMSE و NS به ترتيب برابر ۰/۵۳ و ۰/۶۷ به دست آمد.

مطابق اين شکل، کم‌ترين اختلاف نسبي بين دبي اوج سه روش يادشده مربوط به دوره بازگشت ۵۰ سال بوده و در ساير دوره‌هاي بازگشت اين اختلاف بيشتر است. همانطور که از شکل ۱۴ مشخص است و با توجه به شرايط هيدرولوژيكي حوضه، دبي شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS و دبي محاسبه شده با روش آماري تقريباً اعداد متناظر را نشان مي‌دهد. تعميم دادن اين نتايج به ديگر حوضه‌ها نياز به بررسي دقيق شرايط هيدرولوژي آن حوضه‌ها دارد و تحت شرايط هيدرولوژيكي مختلف در حوضه‌ها، اين نتايج نيز مي‌توانند متفاوت باشد.

در مطالعه ديگري در جنوب الجزاير که توسط (Derdour et al., 2018) انجام شده مشابه مطالعه حاضر به محاسبه دبي اوج با استفاده از مدل HEC-HMS و با استفاده از تابع توزيع آماري پرداخته و نتايج دو روش را با هم مقايسه کرده است.

مقايسه نتايج مطالعه حاضر و مطالعه (Derdour et al., 2018) نتايج مشابهی را نشان مي‌دهد. همانطور که در جدول ۱۴ نيز مشخص است، براي دوره بازگشت‌هاي کمتر از ۵۰ سال دبي محاسبه شده با روش

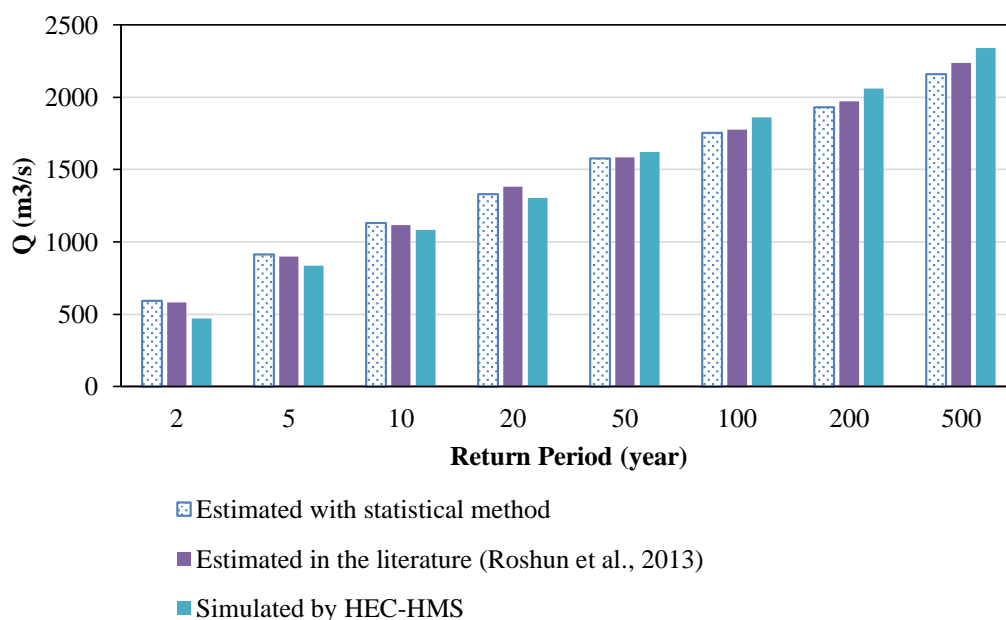


Fig. 14- Comparison of discharge values at the basin outlet for different return periods in three cases: simulated by HEC-HMS, Estimated with statistical method, Estimated in the literature (Roshun et al., 2013)
 شکل ۱۴- مقایسه مقادير دبي در نقطه خروجی حوضه برای دوره بازگشت‌هاي مختلف در سه حالت: شبیه‌سازی شده با HEC-HMS، محاسبه شده به روش آماري و شبیه‌سازی شده در تحقیقات پيشين (Roshun et al., 2013)

Table 14- Comparison of difference percentage between HEC-HMS simulation and statistical in the current study and the study by Derdour et al. (Derdour et al., 2018)

جدول ۱۴- مقایسه درصد اختلاف بین شبیه‌سازی HEC-HMS و روش آماری در مطالعه حاضر و مطالعه پیشین (Derdour et al., 2018)

	Return Period (year)	Simulated with HEC-HMS (m ³ /s)	Calculated with statistical method(m ³ /s)	Percentage of difference between HEC-HMS simulation and statistical method (%)
Derdour et al's Study	10	425.8	463	-8.74
	50	750.5	731	2.60
	100	904.3	845	6.56
	1000	1328.3	1220	8.15
Current Study	10	1083.9	1130	-4.25
	50	1619.2	1575	2.73
	100	1860.1	1755	5.65
	1000	2548.9	2340	8.20

- 12- Curve Number
 13- Initial Abstract
 14- Specific Retention
 15- Lai Nulla
 16- Attanagalu Oya
 17- Coefficient of Performance
 18- Residual Procedure
 19- Validation
 20- Operational Land Imager
 21- Landsat
 22- The Environment for Visualizing Image
 23- Maximum Likelihood
 24- Kappa
 25- Normalized Deference Vegetation Index
 26- Generalized Extreme Value
 27- Lognormal
 28- Log Pearson 3
 29- Gamma
 30- Kolmogorov-Smirnov
 31- Anderson-Darling Test
 32- Chi-Squared
 33- Probability Distribution Function
 34- Hydraulic Engineering Center Geospatial Hydrological Modelling System
 35- Digital Elevation Model
 36- Time Lag
 37- Concentration Time
 38- Loss
 39- Transform
 40- BaseFlow
 41- Routing
 42- Recession
 43- Muskingum
 44- Gage Weight
 45- Thiessen
- سپس با پارامترهای واسنجی شده، مدل با دو رویداد صحت‌سنجی شد که میانگین شاخص‌های RMSE و NS برای این دو رویداد به ترتیب برابر ۰/۵۵ و ۰/۶۸ محاسبه شد. با استفاده از بارش‌های محاسبه شده و مدل شبیه‌سازی شده، دبی اوج با دوره بازگشت‌های مختلف در نقاط مختلف حوضه شبیه‌سازی شد. با روش آماری نیز دبی اوج برای نقطه خروجی حوضه محاسبه شد؛ با مقایسه نتایج این دو روش مشاهده شد که برای حوضه مورد مطالعه دبی به‌دست آمده از هر دو روش به هم نزدیک هستند. از مزایای این تحقیق برای حوضه بشار که تعداد کمی ایستگاه آب‌سنجی دارد، این است که می‌توان دبی اوج با دوره بازگشت‌های مختلف را در هر نقطه از حوضه محاسبه کرد و برای مواردی از جمله تهیه نقشه پهنه‌بندی سیل و محاسبه خسارت سیلاب مورد استفاده قرار داد. برای حوضه‌های دیگر با شرایط هیدرولوژیکی متفاوت، نتایج می‌تواند متفاوت باشد، به همین دلیل، بررسی دقیق شرایط هر حوضه توصیه می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Hydraulic Engineering Center Hydrological Modelling System
 2- Creager
 3- Diken
 4- Fanning
 5- Coefficient of Performance
 6- Relative Error
 7- Nash-Sutcliffe
 8- Coefficient of Determination
 9- Root Mean Square Error
 10- Calibration
 11- Soil Conservation Service

۵- مراجع

- Abbasi Jandani Sh and Talebi A (2016) Study of temporal distribution pattern of precipitation in semi-arid regions (Case study: Sanganeh Research Station, Khorasan Razavi Province). *Iranian Water Research Journal* 10(3):125-117 (In Persian)
- Adeli M, Mohammadi Z (2019) Calibration and evaluation of SCS method for estimating flood runoff in Pasekohak Watershed. *Irrigation Sciences and Engineering* 42(3):1-15
- Ahmadpour A, Mirhashemi H, Haghghatjoo P (2019) Daily runoff forecast in Maroon basin using HEC-HMS model. *Ali-Extension Journal of Water and Wastewater Science and Engineering* 4(1):4-13 (In Persian)
- Ali M, Jamal Khan S, Aslam I, and Khan K (2011) Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Land Scape and Urban Planning* 102(4):271-279
- Asghari M (2005) Water and urban habitate. Sara Publications, 168 P (In Persian)
- Biddle R, Telluri A, Goodarzi M (2009) Temporal distribution pattern in Kermanshah province. *Journal of Watershed Engineering and Management* 3(1):189-200 (In Persian)
- Bolouki H, Fazeli M, and Sharifzadeh M (2021) Investigation of the effect of climate change under emission scenarios on intensity-duration-frequency curves of precipitation in Zahedan synoptic station using fractal theory. *Iranian Journal of Eco Hydrology* 8(3):735-747 (In Persian)
- Derdour A, Bouanani A, & Babahamed K (2018) Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region: Case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains (SW Algeria). *Journal of Water and Land Development* 36(1-111):45-55
- Garcia A, Sainz A, Revilla J, and Alvarez C (2008) Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain. *Journal of Hydrology* 356(3-4):312-326
- Golshan M, Ismali A, Afzali A, Jahanshahi A (2017) Comparison of the efficiency of IHACRES and HMS-HEC hydrological models in simulating flood hydrography. *Rangeland and Watershed Management, Iranian Journal of Natural Resources* 70(4):965-976 (In Persian)
- Haile AT, Tefera FT, and Rientjes T (2016) Flood forecasting in Niger-Benue basin using satellite and quantitative precipitation forecast data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52:475-484
- Halwatura D, and Najim MMM (2013) Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software* 46:155-162
- HEC-GeoHMS (2010) Users manual of HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension). October
- Hosseini M, Jafar Biglou M, Yamani M, Ground F (2015) Prediction of historical floods of the Kashkan River using the hydrological model HEC-HMS. *Journal of Quantitative Geomorphological Research* 4(1):118-133 (In Persian)
- Izanloo H, Vafakhah M (2011) Comparison of different methods for estimating maximum flood discharge in Kushkebad watershed, Khorasan Razavi. *Watershed Engineering and Management* 3(3):177-186 (In Persian)
- Kazemi T (2021) Zoning and flood damage assessment in Beshar Basin using HEC-FIA software. Master Thesis of Yasouj University (In Persian)
- Kazemi T, Fazeli M, and Farzin M (2021) Rainfall-runoff modeling and flood monitoring of Beshar River using HEC-HMS software. 19th Iranian Hydraulic Conference, Ferdowsi University of Mashhad (In Persian)
- Masoughi S (2016) Choosing an appropriate method to determine the pattern of temporal distribution of precipitation (Case study: Khuzestan province). Master Thesis, Shahid Chamran University (In Persian)
- Moradnejadi M, Malekian A, Jorgholami M, Ghasemi A (2016) Study of the temporal distribution pattern of daily rainfall and its relationship with short-term rainfall in coastal-forest areas (Case study: Nowshahr station in northern Iran). *Rangeland and watershed Management, Iranian Journal of Natural Resources* 69(2):475-485 (In Persian)
- Roshun H, Vahabzadeh G, Solaimani K, Farhadi R (2013) Simulation of river hydraulics behavior using HEC-RAS model in GIS environment (Case Study: Beshar River, Kohgiluyeh and Boyerahmad Province). *Journal of Watershed Management Research* 4(7):70-84 (In Persian)
- Rostamizad G, Sigaroodi S K, Mahdavi M (2013) Comparison estimate precipitation loss methods in HEC-HMS model to simulation runoff (Case study: Kan basin). *Journal of Range and Watershed Management* 66(3):359-371
- Safarishad M, Habibnejad Roshan M, Soleimani K, Ildermi AS, Zinivand H (2018) Evaluation of the

- maximum probability method in the process of land use change detection using NDVI index (Case study of Hamadan-Bahar watershed). Quarterly Journal of Geographical Space 18(64):159-176 (In Persian)
- Safavi H R (2014) Engineering hydrology. Arkan Danesh Publications, Fourth Edition. 724 P (In Persian)
- Shojaei S, Arest M (2014) Determining the trend of vegetation change in Hamoon Wetland, using NDVI index and ENVI software. The first national conference of Payame Noor University (In Persian)
- Talebi A, Eslami Z, Abbasi A (2019) Comparing prioritization from flooding of sub-basins using HEC-HMS model and experimental methods in Eskandari Watershed. Journal of Watershed Engineering and Management 11(2):336-343 (In Persian)
- Yaghoobzadeh M, Akbarpoor A, Barani G, Etebari B, and Moghadam H K (2010) Estimation runoff curve number of watershed by using GIS and RS techniques (Case study: Birjand Mansourabad watershed). Iranian Water Research Journal 3(5):31-40 (In Persian)
- Yaghoubi M, Masah B A (2014) Sensitivity analysis and comparison of capability of three conceptual models HEC-HMS, HBV and IHACRES in simulating continuous rainfall-runoff in semi-arid basins. Journal of the Earth and Space Physics 40(2):153-172