



Simulation of Rainfall-Runoff in Tajan Basin under Different Scenarios of Climate Change

Fatemeh Heidari Chenari¹ | Ramin Fazloulou² | Esmail Nikzad Tehrani³

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: F.heydari.ch1997@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. r.fazloulou@sanru.ac.ir

3. Office of basic studies of water resources, Mazandaran Regional Water Company, Sari, Iran. Email: Nikzadtehrani@gmail.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 9, 2024

Revised: Sep. 14, 2024

Accepted: Nov. 17, 2024

Published online: March. 2025

Keywords:

*Daily Discharge,
Hydrologic Model,
Runoff,
RCP 2.6,
RCP 8.5.*

ABSTRACT

Determining and predicting runoff is a crucial step in the proper use of water resources. This research aims to calibrate and validate the HEC-HMS model and simulate rainfall-runoff for continuous data series in the Tajan basin based on climate change Scenarios. In this research, the data recorded during the years 2002-2009 were used for the calibration stage and the data recorded during the years 2010-2016 were used for the verification stage. The results of model calibration showed that the correlation coefficient between observed and simulated discharge values was equal to 0.81 and the Nash-Sutcliffe coefficient was equal to 0.68, which indicates a good match between the mentioned data. Also, in the verification stage, the correlation index and Nash-Sutcliffe coefficient were equal to 0.80 and 0.63, respectively, confirming that the model shows a good estimate for the observations. In the next step, data values in the daily time scale for the period of 2020-2049 were loaded in the model and basin runoff was simulated for this period. The results showed that the amount of discharge in the future period compared to the base period would decrease strongly under both RCP 8.5 and RCP 2.6 climate change scenarios, and only in the RCP 8.5 scenario, the discharge will increase a little compared to the base period in August, September, October and November. The simulation results showed that the amount of discharge in summer and autumn under the RCP 8.5 scenario will increase more than in the RCP 2.6 scenario.

Cite this article: Heidari, F., Fazloulou, R., & Nikzad Tehrani, E. (2025). Simulation of Rainfall-Runoff in Tajan Basin under Different Scenarios of Climate Change, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (1), 187-205. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376077.669709>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376077.669709>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Flood is one of the main known natural disasters in the world, which imposes a lot of damage on human societies, institutions, industrial centers and agricultural lands, especially in the vicinity of rivers, but the worrying point is the increasing trend of flood losses in the world in recent decades, which is mostly due to The reason is human intervention in nature and disrupting its balance. Among the usual methods for investigating floods include regional flood analysis methods, using empirical relationships and rainfall-runoff simulation models. The application of precipitation-runoff models as well as the development of calibration methods using GIS is increasingly expanding. In this research, in order to simulate rainfall-runoff and determine the outflow hydrograph of Tajen catchment under RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios, HEC-HMS model has been used. The HEC-HMS model represents the watershed as an interconnected system with hydrological and hydraulic components. Each component simulates an aspect of the rainfall-runoff process within a part of the catchment called a sub-catchment. Also, by entering the information related to the characteristics of the basin and its components, the simulation is done to transform precipitation into runoff and the runoff hydrograph is produced.

Materials and Methods

Tajan basin, with an approximate area of 4026.6 square meters, is located in the geographical range of 53 degrees 7 minutes to 53 degrees 42 minutes east longitude and 35 degrees 56 minutes to 36 degrees 17 minutes north latitude in Mazandaran province and in terms of divisions Politically, it is located in the territory of Sari city.

In the continuous simulation method, the soil is considered as a single layer and infiltration takes place when the soil is saturated. This method should be used in combination with a meteorological model that calculates evaporation and transpiration, so that, with the help of the meteorological model, the amount of potential evaporation and transpiration, which indicates the amount of soil drying between two rainfalls, is calculated. SCS unit hydrograph method was used to convert precipitation into runoff and drying method was used to simulate continuous events to simulate base flow. The drying method is used when a certain behavior is determined in the basin and the channel flow recedes exponentially after the precipitation event

In this study, first the variables of precipitation and temperature were entered into the model, then the model parameters was calculated for different calibration statistical periods. The hydrographs generated from the scenarios of the adjusted model parameters were compared with the observed hydrographs of Kordkheil station. For continuous simulation, the period 2002 to 2009 was used for the calibration and 2010 to 2016 for the validation. After calibration and evaluation of the model, daily precipitation data of the basin average and average temperature in the period 2049-2020 were generated for the basin.

Result and Discussion

The results showed that the amount of discharge in the future period compared to the base period under both scenarios was a decrease in all months except May, June and July, and its increase in the mentioned three months is probably due to the increase in temperature and melting of snow in these months. In general, the simulation results showed that the amount of discharge in summer and autumn under the RCP 8.5 scenario will increase more than the RCP 2.6 scenario.

Conclusion

According to the results obtained and also the changes in climate variables that will occur in the future, it is suggested that the officials and planners of the agriculture, water resources, and environment, industry and economy sectors take the necessary solutions to reduce the consequences and adapt to new climate conditions.

Author Contributions

Conceptualization, R.Fazloulou. and E.Nikzad Tehrani.; methodology, F.Heidari Chenari and R.Fazloulou.; software, F.Heidari Chenari. and E.Nikzad Tehrani.; validation, F.Heidari Chenari., R.Fazloulou. and E.Nikzad Tehrani.; formal analysis, F.Heidari Chenari.; investigation, F.Heidari Chenari.; resources, F.Heidari Chenari., R.Fazloulou. and E.Nikzad Tehrani.; data curation, F.Heidari Chenari. and R.Fazloulou.; writing—original draft preparation, F.Heidari Chenari., R.Fazloulou. and E.Nikzad Tehrani.; writing—review and editing, F.Heidari Chenari., R.Fazloulou. and E.Nikzad Tehrani.; visualization, F.Heidari Chenari.; supervision, R.Fazloulou.; project administration, R.Fazloulou.; funding acquisition, F.Heidari Chenari. and R.Fazloulou. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبریز تجن تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم

فاطمه حیدری چناری^۱، رامین فضل‌اولی^۲ و اسماعیل نیکزاد طهرانی^۳

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه:

F.heydari.ch1997@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران. رایانامه:

r.fazloulou@sanru.ac.ir۳. دفتر مطالعات پایه منابع آب، شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران، ساری، ایران. رایانامه: Nikzadtehrani@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	تعیین و پیش‌بینی رواناب گامی بسیار مهم در بهره‌برداری مناسب از منابع آب است. هدف این پژوهش، واسنجی و اعتبارسنجی مدل HEC-HMS و همچنین شبیه‌سازی بارش-رواناب برای سری داده‌های پیوسته در حوضه آبریز تجن براساس سناریوهای تغییر اقلیم بوده است. در این پژوهش، از داده‌های ثبت شده طی سال‌های ۱۳۸۸-۱۳۸۱ برای مرحله واسنجی و از داده‌های ثبت شده طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۸۹ در مرحله صحت‌سنجی استفاده شد. نتایج واسنجی مدل نشان داد که ضریب همبستگی میان مقادیر دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برابر ۰/۸۱ و ضریب ناش-ساتکلیف معادل ۰/۶۸ بوده است که بیان‌گر تطابق مناسب میان داده‌های مذکور می‌باشد. همچنین در مرحله صحت‌سنجی، شاخص همبستگی و ضریب ناش-ساتکلیف به ترتیب برابر با ۰/۸۰ و ۰/۶۳ بوده و تأیید می‌نماید که مدل برآورد خوبی از مشاهدات را نشان می‌دهد. در مرحله بعد، مقادیر داده‌ها در مقیاس زمانی روزانه برای دوره ۱۴۰۰-۱۴۲۸ در مدل بارگزاری و رواناب حوضه برای این دوره شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که میزان دبی در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی پایه تحت هر دو سناریوی تغییر اقلیم RCP 2.6 و RCP 8.5 به شدت کاهش یافته و فقط در سناریوی RCP 8.5 و آن هم به میزان جزئی در ماه‌های آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر نسبت به دوره پایه افزایش دبی رخ خواهد داد. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی نشان داد که میزان دبی تابستان و پاییز تحت سناریوی RCP 8.5 افزایش بیشتری را نسبت به سناریوی RCP 2.6 خواهد داشت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۲/۲۰	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۲۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۷	
تاریخ انتشار: فروردین ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: دبی روزانه، رواناب، مدل هیدرولوژیکی، RCP 2.6 RCP 8.5	

استناد: حیدری چناری، فاطمه؛ فضل‌اولی، رامین و نیکزاد طهرانی، اسماعیل، (۱۴۰۴) شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوضه آبریز تجن تحت تأثیر سناریوهای مختلف تغییر

اقلیم، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱)، ۲۰۵-۱۸۷. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376077.669709>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.376077.669709>

مقدمه

پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها با توجه به اهمیت آن در طراحی تأسیسات آبی، آب‌گیری از رودخانه‌ها، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از مخازن سدها، کنترل فرسایش و رسوب رودخانه‌ها از دیرباز مورد توجه مهندسان آب بوده است. هم‌چنین پیش‌بینی رواناب به‌منظور بهره‌برداری موثر از مخازن کنترل سیل و سامانه‌های سیل‌بندهای خاکی و بتنی ضروری است. از این‌رو پیش‌بینی رواناب در حوزه‌های آبریز از اهمیت زیادی برخوردار است. مدل‌سازی جریان در مدیریت منابع آب از ابزارهای مؤثر و کارآمد برای برنامه‌ریزی و شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیکی حوضه به‌منظور ارزیابی توان آن در تولید آب است که برآورد آن با توسل به مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی که از روش‌های مختلف نظری بهره‌مند می‌شوند، صورت می‌گیرد. میزان بارش، توزیع و نوع آن، پوشش گیاهی، تجمع و ذوب برف، خصوصیات لایه‌های خاک و تشکیلات زمین‌شناسی از عمده عواملی هستند که میزان رواناب و مؤلفه‌های بیلان آب حوضه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. برای شناخت فرآیند بارش-رواناب حوضه‌های آبریز، شبیه‌سازی آن با استفاده از مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی و تجزیه و تحلیل نتایج حاصله ضروری است (خیری و همکاران، ۱۳۹۶). شبیه‌سازی پیوسته‌ی بارش-رواناب در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی، از جمله بررسی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه، پیش‌بینی سیلاب و برنامه‌ریزی منابع آب، از اهمیت ویژه برخوردار است. این پدیده، مستلزم شناخت مؤلفه‌ها و متغیرهای شکل‌دهنده‌ی آن است. یکی از مهم‌ترین محاسبات هیدرولوژیکی برای یک حوضه، تعیین ارتباط بین بارش و رواناب است. میزان تبدیل آب حاصل از بارش به حجم رواناب، وابسته به پارامترهای اقلیمی و فیزیکی حوضه است. طبق معادله‌ی پیوستگی، میزان رواناب حاصل از بارش با مجموع جبری آب سطحی، نفوذ و تبخیر برابر می‌باشد. تخمین ناصحیح هر یک از مؤلفه‌های ذکر شده، موجب عدم دستیابی به نتیجه‌ی درست در شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌شود. در حال حاضر استفاده از مدل‌های بارندگی-رواناب در این زمینه کاربرد وسیعی یافته و روش استدلالی به تدریج جای خود را به مدل‌هایی که در آن نه‌تنها دبی حداکثر (وج)، بلکه رژیم جریان سطحی نیز در هر نقطه از محدوده‌ی مطالعاتی مورد محاسبه قرار می‌گیرد، داده است. مدل‌سازی بارش-رواناب یکی از موارد کلیدی در علوم هیدرولوژی و مدیریت محیط زیست برای دستیابی به خصوصیات سیلاب از قبیل میزان دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج به شمار می‌رود. یکی از نرم‌افزارهای موجود جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب، مدل HEC-HMS می‌باشد. این مدل با داشتن تنوع زیرمدل‌های موجود در آن کاربرد و کارایی وسیعی در بسیاری از نقاط دنیا دارد (حسین‌زاده و ایمنی، ۱۳۹۴). مدل HEC-HMS یکی از پرکاربردترین مدل‌های بارش-رواناب است. این مدل یک مدل مفهومی نیمه‌توزیعی بوده که دارای قابلیت شبیه‌سازی تلفات و نفوذ، ذوب برف، روندیابی زیرحوضه‌ها و روندیابی شبکه‌ی رودخانه‌ها است. پیش‌بینی رواناب ممکن است تامین آب انرژی برقایی، نیازهای زیست‌محیطی و دیگر نیازهای بهره‌برداری را پشتیبانی نماید. نکته‌ی نگران‌کننده، در جهان در دهه‌های اخیر دخالت‌های بشر در طبیعت و برهم زدن تعادل آن می‌باشد. یکی از تبعات دخالت‌های انسانی تغییر اقلیم می‌باشد. تغییر اقلیم عبارت است از تغییرات رفتار آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت‌شده در آن منطقه مورد انتظار است (منصوری و همکاران، ۱۳۹۳). استفاده بیش از حد از سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری اراضی، افزایش جمعیت جهان، گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی برای تأمین رفاه و نیازهای جمعیت کره زمین، باعث شده است تا پس از انقلاب صنعتی به تدریج تغییرات مشهودی در اقلیم کره‌زمین به‌وجود آید که بارزترین آن افزایش متوسط دمای کره زمین، افزایش پدیده‌های حدی اقلیمی نظیر سیل، طوفان، تگرگ، طوفان‌های حاره‌ای، امواج گرمایی، افزایش سطح آب دریاها، ذوب شدن یخ‌های قطبی و خشکسالی می‌باشد (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۸). هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، براساس تخمین تجمع گازهای گلخانه‌ای، افزایش دمایی معادل ۱ تا ۳/۵ درجه‌ی سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ میلادی پیش‌بینی می‌کند (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۹۷). تغییر در مقدار پارامترهای اقلیمی به‌خصوص بارش و دما نقش برجسته‌ای در تعیین میزان رواناب یک حوضه در دوره‌های آتی خواهد داشت (الماسی و همکاران، ۱۳۹۵)، از این رو پیش‌بینی اقلیم آینده با مدل‌های اقلیمی نقش مهمی در شناخت بهتر تغییرات این پدیده و ارائه راه‌کارهای مناسب جهت مقابله با شرایط پیش‌رو خواهد داشت.

در سال‌های اخیر مناطق مختلفی از کشور (به‌ویژه نواحی شمالی مانند شهرهای شرق مازندران، خصوصاً شهر ساری) تحت تأثیر رواناب‌های مازاد که منجر به سیلاب شده، بوده است و خسارت‌های مالی و جانی فراوانی به این مناطق وارد شده است. آگاهی از مقدار بارش و پیش‌بینی رواناب ناشی از آن در زمان مناسب و کافی می‌تواند خسارات احتمالی را کاهش دهد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی ارتباط میان بارندگی و رواناب حاصل از آن در حوضه آبریز تجن است که تاکنون در حوضه مورد مطالعه، پژوهشی با ابعاد و اهداف و جزئیات در نظر گرفته شده در این پژوهش، انجام نشده است. به‌منظور شبیه‌سازی بارش-رواناب و تعیین هیدروگراف رواناب خروجی حوضه

آبریز تجن تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 از مدل HEC-HMS استفاده شده است. مدل HEC-HMS حوضه آبریز را به عنوان یک سیستم به هم پیوسته با مؤلفه‌های هیدرولوژیکی نمایش می‌دهد. هر مؤلفه یک جنبه از فرایند بارش - رواناب را در داخل بخشی از حوضه که زیر حوضه نامیده می‌شود، شبیه‌سازی می‌کند. همچنین با وارد کردن اطلاعات مربوط به خصوصیات حوضه و اجزا آن شبیه‌سازی برای تبدیل بارش به رواناب انجام می‌شود و هیدروگراف رواناب تولید می‌شود.

پیشینه پژوهش

پورمحمدی و جوادیان‌زاده (۱۳۹۷)، بارش را برای دوره‌ی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ با استفاده از مدل‌های گردش عمومی و ریزمقیاس‌سازی آماری نتایج تحت دو سناریو B1 و A1B پیش‌بینی کردند. سپس مقدار رواناب را در حوضه آبریز تویسرکان همدان با استفاده از مدل بارش - رواناب HEC-HMS، شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان‌دهنده کاهش حجم رواناب در دوره‌ی آبی نسبت به دوره‌ی پایه تحت هر دو سناریو بود. موجرلو و همکاران (۱۳۹۸)، به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر روی دبی حوضه آبریز تجن در دوره آبی پرداختند. آن‌ها ابتدا پارامتر بارش و دما را با استفاده از مدل جوی CANESM تحت سناریوهای جدید انتشار RCP 2.6 و RCP 8.5 شبیه‌سازی کردند. سپس شبیه‌سازی دبی روزانه حوضه در دوره آبی با مدل IHECRAS انجام دادند. نتایج مدل نشان داد که میانگین دمای سالانه حوضه در دوره آبی (۱۴۲۸-۱۳۹۸) نسبت به دوره تحقیق (۱۳۸۴-۱۳۵۴) تحت دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5، ۱/۱۴ و ۱/۵۷ افزایش و مقدار بارش سالانه به ترتیب همان دو سناریو ۵۹/۷۲ و ۷۰/۹۸ میلی‌متر کاهش خواهد یافت. با توجه به نتایج این تحقیق، پیش‌بینی شد که میزان دبی تحت دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 در دوره آبی نسبت به دوره پایه به ترتیب به میزان ۱۹/۸ و ۲۱/۷ درصد کاهش می‌یابد. در تحقیقی که توسط مساح بوانی و مرید (۱۳۸۴) انجام شد، اثرات این پدیده بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان تحت داده‌های مدل گردش عمومی HadCM3 و دو سناریوی A2 و B2 در دو دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل‌ها نشان از کاهش بارندگی و افزایش دما تا سال ۲۱۰۰ به خصوص در نیمه دوم قرن دارد. شبیه‌سازی دبی ورودی به سد چادگان با استفاده از تکنیک شبکه عصبی، افت جریان ورودی به سد را تا ۵/۸ درصد نشان می‌دهد. مقایسه سناریوهای A2 و B2 نشان از وضعیت بحرانی‌تر سناریوی A2 در این حوضه دارد. دامادی و همکاران (۱۳۹۹)، جهت شبیه‌سازی فرایند بارش - رواناب حوزه‌ی آبخیز سرباز استان سیستان و بلوچستان از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده نمودند. هیدروگراف‌های سیل برای دوره‌های بازگشت ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال محاسبه شد. با توجه به نتایج، کارایی این مدل مطلوب بوده و با افزایش دوره بازگشت در برآورد دبی، اختلاف مقادیر دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی کم بوده و خطای کمتری داشته است. متشفق و همکاران (۱۴۰۲)، به ارزیابی تأثیر نحوه شکل‌گیری الگوی جریان بر هیدروگراف خروجی حوضه آبریز رود زرد در شبیه‌ساز HEC-HMS پرداختند. نتایج نشان داد در کنار روش متعارف شبیه‌سازی بارش - رواناب در مدل HEC-HMS می‌توان الگوی جریان دیگری به نام الگوی تأخیری را متصور شد که برخلاف روش متعارف، رواناب حاصله را براساس تصویر مرکز ثقل زیرحوضه روی آبراهه اصلی محاسبه می‌کند که به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد، نزدیک‌تر است.

Shieh et al (2007)، به شبیه‌سازی جریان، در حوضه آبریز تسنگون تایوان با استفاده از نرم‌افزارهای HEC-HMS و HEC-RAS پرداختند. نتایج نشان داد تأثیر احداث سازه بر جریان، در سطح ($P < 0.05$) معنی‌دار بوده است. Joo et al (2009)، برای دو زیر حوضه باکیل و جانکیونگ در کره جنوبی ۸ سیلاب رخ داده در حوضه بوکیل و ۶ سیلاب در حوضه جانکیونگ را با دو مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و ReFH شبیه‌سازی کردند. آن‌ها نتایج دو مدل را با هم مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل ReFH محدودیت در شبیه‌سازی جریان اوج را نشان می‌دهد در حالی که مدل HEC-HMS شبیه‌سازی خوبی در هر دو حوضه نشان داد. Steel-Dunne et al (2008) با استفاده از مدل گردش عمومی ECHAM5 و سناریوی انتشار A1B، تأثیر اقلیم بر هیدرولوژی جریان رودخانه ۹ حوضه در کشور ایرلند با استفاده از مدل مفهومی بارش - رواناب HBV-Light را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که در این حوضه‌ها، بارش زمستانه روندی افزایشی و بارش تابستانه روند کاهشی در دوره ۲۰۶۰-۲۰۱۰ داشته است. Fleming and Vincent (2004) در تحقیق مدل‌سازی هیدرولوژیکی، الگوریتم بیلان رطوبت خاک (SMA) را برای تشریح توزیع مکانی ظرفیت رطوبت خاک به کار گرفتند. در این تحقیق سه مدل سالبانه، نیمه سالبانه و فصلی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد مدل فصلی و نیمه سالبانه در مقایسه با مدل سالبانه، شبیه‌سازی مناسب‌تری را ارائه می‌دهد، به طوری که مدل سالبانه اساساً در شرایط «تر» معتبر بوده و مقدار پیش‌بینی بیشتری از جریان در شرایط «خشک» می‌دهد. Try et al (2020) عملکرد مدل بارندگی - رواناب و آب‌گرفتگی در حوضه‌ی آبریز مکنونگ را با استفاده از بارش اندازه‌گیری شده مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج کالیبراسیون (۲۰۰۰-۲۰۰۳) و صحت‌سنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۴) نشان داد که مدل بارندگی -

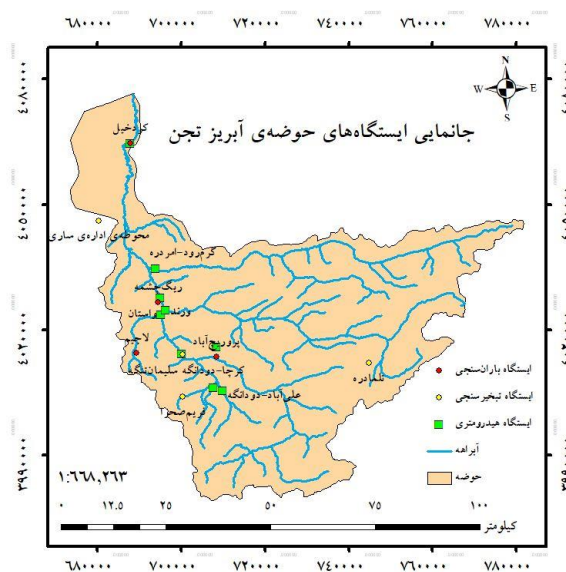
رواناب و آب‌گرفتنی عملکرد قابل قبولی در این حوضه دارد. علاوه بر این، پنج مجموعه داده‌ی بارش شبکه‌بندی شده شامل APHRODITE، GPCC، PERSIANN-CDR، GSMaP (RNL) و TRMM (3B42V7) از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ به‌عنوان ورودی به مدل واسنجی شده استفاده شد. نتایج دبی شبیه‌سازی شده رودخانه نشان داد که TRMM، GPCC و APHRODITE بهتر از سایر مجموعه‌ی داده‌ها عمل کردند. (Daide et al (2021) برای تاثیر 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 به‌دست آمده نشان داد که مدل را می‌توان از نظر ارزشیابی معتبر ارزیابی کرد. (Hamdan et al (2021) ابتدا با استفاده از ابزار HEC-GeoHMS در محیط GIS مشخصات فیزیکی حوضه رودخانه العظیم عراق را محاسبه و سپس از SCS-CN و هیدروگراف واحد SCS و روش ماسکینگ برای محاسبه تلفات و روندیابی جریان و در نهایت از مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی بارش رواناب استفاده نمودند نتایج تحقیق ایشان نشان داد که مدل HEC-HMS در پیش‌بینی سیل موفق عمل نموده است.

با توجه به نتایج مطالعات پیشین، استفاده از داده‌های بارش از طریق ماهواره‌ها و مدل‌های عددی پیش‌بینی هوا و شبیه‌سازی بارش - رواناب به کمک مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند در تخمین مقدار رواناب و برآورد دبی روزانه جهت مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب نقش مؤثری داشته باشد. بنابراین هدف از انجام این پژوهش، واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS و هم‌چنین شبیه‌سازی بارش - رواناب برای سری داده‌های پیوسته براساس سناریوهای تغییر اقلیم در حوضه آبریز تجن به منظور تخمین میزان رواناب ایجاد شده تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بوده است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

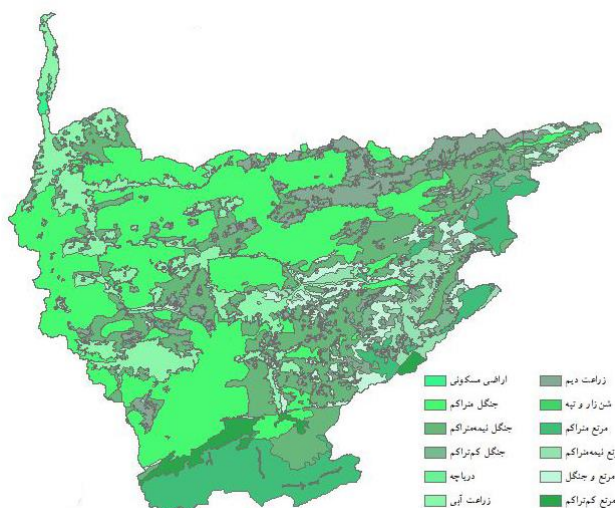
حوضه آبریز تجن، با مساحت تقریبی ۴۰۲۶/۶ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی ۵۳ درجه و ۷ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۴۲ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی در استان مازندران واقع شده و از نظر تقسیمات سیاسی در قلمرو شهرستان ساری واقع است. حداکثر ارتفاع آن ۳۷۸۲ متر و پست‌ترین نقطه آن ۲۶- از سطح دریای آزاد در خروجی حوضه قرار دارد. این حوضه از شمال به دریای خزر، از شرق و شمال شرقی به حوضه رودخانه نکا، از جنوب شرق به حوضه رودخانه سلطان میدان، از جنوب به دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز در منطقه شه‌میرزاد، از غرب و شمال غرب به حوضه رودخانه سیاهرود و از جنوب غرب به حوضه تالار در منطقه پل سفید محدود می‌گردد. متوسط بارش سالانه حوضه ۵۲۵ تا ۶۸۷/۱ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه بین ۱۱/۸ تا ۱۶/۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است. رودخانه اصلی این حوضه، رودخانه تجن می‌باشد. طول آبراهه اصلی برای رودخانه تجن معادل ۱۷۲ کیلومتر محاسبه شده‌است (موجولو، ۱۳۹۷).



شکل ۱. نقشه حوضه آبریز تجن

تعیین خصوصیات فیزیوگرافی زیر حوضه‌ها

HEC-GeoHMS (الحاقیه مدل‌سازی هیدرولوژیکی زمین مکانی) یکی از برنامه‌های جانبی ArcGIS برای مدل‌سازی مکانی، هیدرولوژیکی می‌باشد و به کاربر اجازه وارد کردن نتایج به‌دست‌آمده از ArcGIS به HEC-HMS را می‌دهد (کوهپایان و قل‌خانی، ۱۳۸۹). مبنای اطلاعات این الحاقیه مدل ارتفاعی رقومی حوضه آبریز است؛ که با استفاده از آن حوضه موردنظر به زیرحوضه‌های کوچک‌تر تقسیم شده و خصوصیات فیزیوگرافی آن‌ها نظیر شیب، مساحت، محیط و مرکز ثقل هر زیرحوضه تعیین می‌شود. مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین، یک بستر اطلاعاتی جهت نمایش، ذخیره‌سازی و تحلیل اطلاعات ارتفاعی سطح زمین به‌صورت ایجاد یک سطح پیوسته از آن می‌باشد. در این مدل‌ها، اطلاعات ارتفاعی سطح زمین در قالب رئوس یک شبکه‌ی منظم یا نامنظم نمایش داده می‌شود. این مدل‌ها پایه و اساس اولیه‌ی بسیاری از تجزیه و تحلیل‌ها در مطالعات مختلف از جمله مطالعات منابع آب را تشکیل می‌دهند (امور نظام فنی اجرایی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور، ۱۳۹۲). تخریب نواحی بالادست حوضه به صورت‌های مختلف از جمله تخریب پوشش گیاهی و جاده‌سازی، همچنین گسترش بی‌رویه‌ی اراضی شهری و صنعتی، سبب کاهش نفوذ و افزایش رواناب می‌گردد. در برآورد شماره‌ی منحنی و محاسبه‌ی بارش مازاد، آگاهی از کاربری اراضی منطقه اهمیت فراوانی دارد (غفاری گیلانده و همکاران، ۱۳۹۵).

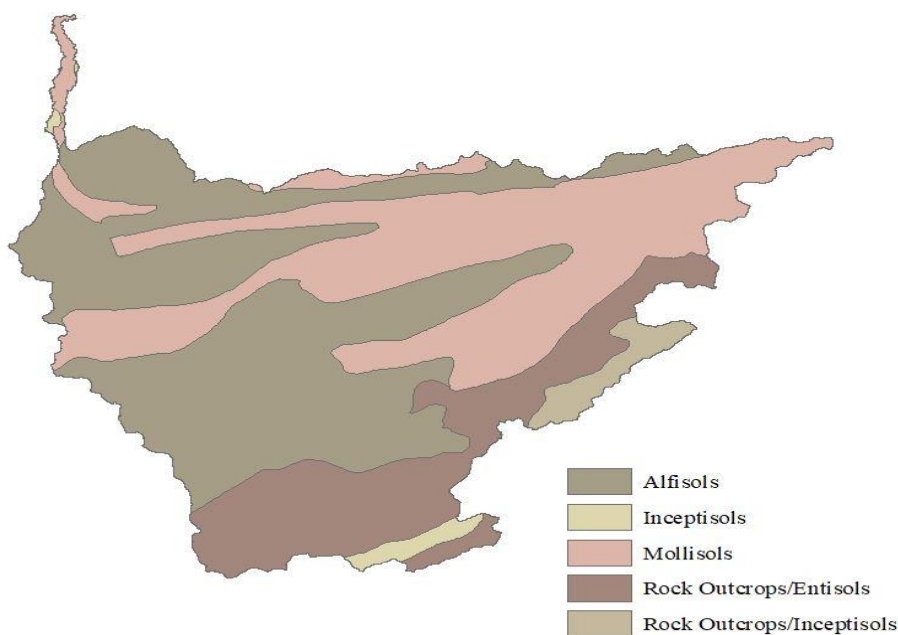


شکل ۲. نقشه‌ی کاربری اراضی حوضه‌ی آبریز تجن

گروه هیدرولوژیک خاک اثر مهمی روی تخمین ارتفاع رواناب می‌گذارد و خاک‌های مختلف، توانایی ایجاد رواناب متفاوتی دارند (زراعتکار و حسن‌پور، ۱۳۹۵). این نقشه با استفاده از نقشه‌ی خاک‌شناسی حوضه، برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، مانند بافت، ساختمان، سنگریزه، عمق و همچنین نوع سنگ بستر، سرعت نفوذپذیری خاک زیرین و پوشش گیاهی تعیین می‌شود. با استفاده از این خصوصیات، عمدتاً با تکیه بر بافت، عمق و سرعت نفوذپذیری خاک زیرین، نقشه‌ی گروه هیدرولوژیک خاک تهیه می‌شود (محرّم‌پور و همکاران، ۱۳۹۷). جهت تعیین مقدار نوع خاک (گروه هیدرولوژیک)، با توجه به استاندارد گروه‌های خاک انجمن حفاظت خاک آمریکا، ۴ گروه خاک معرفی شده است که در جدول ۱ آمده است (تیموری و همکاران، ۱۳۸۸).

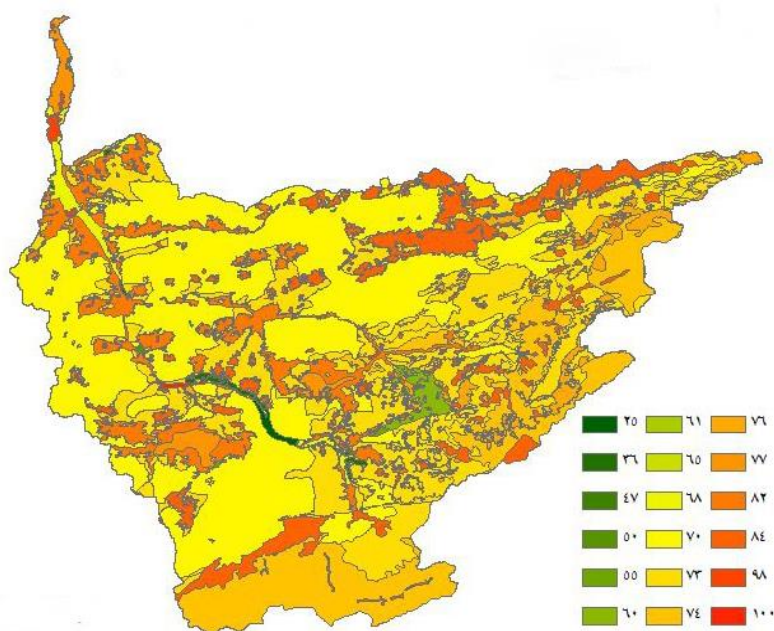
جدول ۱. گروه هیدرولوژیک خاک

گروه هیدرولوژیک خاک	دامنه مقدار نفوذپذیری خاک (میلیمتر در ساعت)	حدود پیشنهادی حداقل نفوذپذیری خاک (میلیمتر در ساعت)
A	۱۲/۷۰ - ۷/۶۲	۱۰
B	۳/۸۱ - ۷/۶۲	۶
C	۱/۲۷ - ۳/۸۱	۳
D	۰ - ۱/۲۷	۱



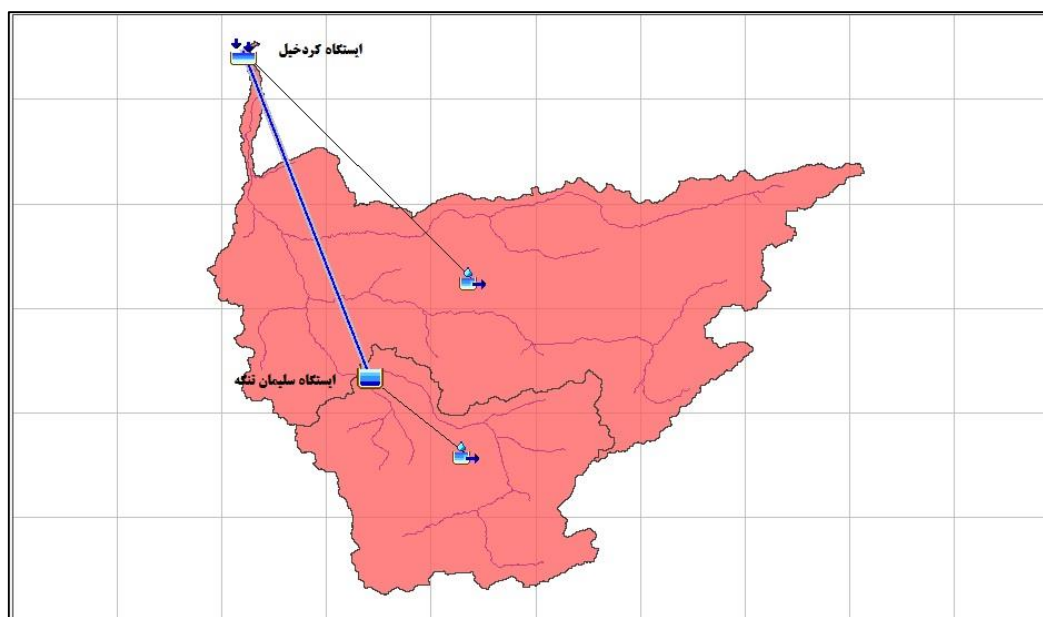
شکل ۳. نقشه‌ی رده‌بندی خاک حوضه‌ی آبریز تجن

برای محاسبه‌ی این که چه مقدار از بارش به داخل خاک و یا زیر زمین نفوذ کرده و چه مقدار به رواناب تبدیل می‌گردد، اقدام به برآورد شماره‌ی منحنی می‌شود. در این حالت شماره‌ی منحنی بالا به معنی رواناب بیشتر و نفوذپذیری کمتر است (مناطق شهری). در حالی که شماره‌ی منحنی پایین، نشان‌دهنده‌ی رواناب کمتر و نفوذپذیری بالا می‌باشد (خاک‌های خشک) (غفاری گیلانده و همکاران، ۱۳۹۵). در واقع، این پارامتر بیان‌گر پتانسیل تولید رواناب حوضه‌ی آبخیز و یکی از ورودی‌های اصلی نرم‌افزار HEC-HMS است (ریاحی و همکاران، ۱۳۹۶). برای تعیین CN حوضه، عمل هم‌پوشانی لایه‌های کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS انجام شد.



شکل ۴. نقشه‌ی شماره‌ی منحنی حوضه‌ی آبریز تجن

در این تحقیق ابتدا، با استفاده از الحاقیه HEC-GeoHMS و براساس مدل ارتفاعی رقومی (DEM)، پارامترهای فیزیوگرافی حوضه محاسبه شد (شکل ۵).



شکل ۵. نقشه زیرحوضه‌های حوضه آبریز تجن با استفاده از مدل HEC-GeoHMS

روش تحقیق

مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی پیوسته

به منظور شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه آبریز تجن، مقدمات شامل بررسی منابع، جمع‌آوری نقشه‌ها و داده‌ها انجام شد. در این تحقیق، حوضه براساس ایستگاه‌های موجود به ۲ زیرحوضه تقسیم شده که شکل ۵ آبراهه‌ها و زیرحوضه‌های ایجاد شده را نشان می‌دهد. سپس اطلاعات جغرافیایی موجود به نقشه‌های رقمی تبدیل شد و با استفاده از قابلیت‌های نرم افزار ArcGIS خصوصیات فیزیوگرافی حوضه (شامل تعیین محدوده زیرحوضه‌ها، شیب، مساحت، محیط و مرکز ثقل زیرحوضه‌ها) محاسبه شد. جدول ۲ اطلاعات به دست آمده از نرم افزار ArcGIS توسط الحاقیه HEC-GeoHMS را نمایش می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات زیرحوضه‌های حوضه رودخانه تجن

شماره زیرحوضه	مختصات مرکز ثقل		مساحت (km ²)	محیط (km)	شیب زیرحوضه (%)
	Y	X			
۱	۴۰۲۷۰۴۹	۷۲۵۴۸۰	۲۷۵۱	۵۳۷	۲۵/۷۴
۲	۳۹۹۷۳۸۷	۷۱۸۸۷۵	۱۲۰۸	۲۵۳	۳۵/۷۴

در این تحقیق از داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های هیدرومتری کردخیل برای واسنجی مدل هیدرولوژیکی استفاده شده است. با به کارگیری الحاقیه HEC-GeoHMS اطلاعات موجود به اطلاعات کاربردی برای نرم افزار HEC-HMS تبدیل شد و سپس، مدل هواشناسی برای حوضه تعریف و سری‌های زمانی داده‌های بارندگی و هیدرومتری نیز تعریف شده و داده‌های آن‌ها وارد مدل شده است. تلفات نفوذ با استفاده از روش کمبود اولیه و نرخ ثابت تلفات در هر زیر حوضه با نرم افزار HEC-HMS محاسبه گردید. این روش برای شبیه‌سازی‌های پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش خاک به صورت یک لایه در نظر گرفته می‌شود و زمانی نفوذ صورت می‌گیرد که خاک اشباع باشد. این روش باید به صورت ترکیبی با یک مدل هواشناسی که تبخیر و تعرق را محاسبه می‌کند، استفاده شود تا به کمک مدل هواشناسی، میزان تبخیر و تعرق پتانسیل که گویای میزان خشک شدن خاک بین دو بارش است، محاسبه شود. چهار پارامتر مورد نیاز این روش که باید وارد مدل شود عبارت‌اند از:



شرایط اولیه خاک

این پارامتر بیانگر میزان کمبود رطوبت خاک برای رسیدن به شرایط اشباع است و مقدار آن برحسب میلی‌متر (ارتفاع آب معادل) بیان می‌شود.

حداکثر ظرفیت خاک برای اشباع شدن

این پارامتر در اصل باید بر اساس میزان کل خلل و فرج موجود در خاک محاسبه شود ولی اغلب بر اساس میزان کمبود آب برای رسیدن از نقطه پژمردگی دائم (نقطه‌ای که در آن میزان آب موجود در خاک در حدی است که گیاه از آن نمی‌تواند استفاده کند و دچار پژمردگی دائم می‌شود. در این حالت آب توسط نیروی مکش به ذرات خاک چسبیده است و قابل استفاده نیست) به نقطه اشباع محاسبه می‌شود و مقدار آن برحسب میلی‌متر (ارتفاع آب معادل) بیان می‌شود.

نرخ ثابت نفوذ

این پارامتر نشان‌دهنده‌ی سرعت نفوذ آب در زمانی است که لایه خاک اشباع باشد و واحد آن برحسب میلی‌متر بر ساعت است. بهترین تقریب برای این پارامتر، ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع است.

درصد نفوذناپذیری

این پارامتر نشان‌دهنده‌ی درصدی از زیرحوضه است که زمین آن غیرقابل نفوذ است. در چنین بخشی از زیر حوضه (زمین غیرقابل نفوذ) تمامی بارش به‌طور مستقیم به رواناب تبدیل می‌شود.

همچنین برای تبدیل بارش به رواناب از روش هیدروگراف واحد SCS و برای محاسبه دبی پایه از روش خشکیدگی استفاده شد و در نهایت مدل برای تبدیل بارش به رواناب، با داده‌های پایه اجرا شد.

روش خشکیدگی برای زمانی که رفتار مشخصی در حوضه مشخص می‌شود و جریان کانالی پس از رخداد بارش به‌صورت نمایی عقب‌نشینی می‌کند، به‌کار می‌رود. پارامترهای ورودی این روش عبارت است از:

شرایط اولیه

برای محاسبه شرایط اولیه دو روش موجود است که عبارت‌است از: ۱- دبی: در این روش جریان پایه اولیه به‌صورت دبی برحسب واحد حجم بر زمان به مدل معرفی می‌شود. ۲- دبی بر واحد سطح: در این روش جریان پایه اولیه به‌صورت دبی برحسب واحد حجم بر مساحت بر زمان به مدل معرفی می‌شود.

دبی اولیه

با توجه به نوع جریان پایه اولیه انتخاب شده، مقدار اولیه جریان پایه به مدل معرفی می‌شود.

ثابت فروکش

پارامتر ثابت فروکش نشان‌دهنده‌ی سرعت بازگشت جریان پایه بین رخداد‌های بارش است. این پارامتر به‌صورت نسبت جریان پایه در حال حاضر به جریان پایه در یک روز قبل تعریف می‌شود.

نوع آستانه

در این گزینه محل تبدیل جریان پایه به جریان اصلی رودخانه پس از اتمام بارش تعیین می‌شود (وقتی رخداد بارش تمام می‌شود، جریان موجود در رودخانه همان جریان پایه است).

نسبت

در صورتی که در گزینه نوع آستانه، گزینه نسبت به دبی اوج انتخاب شود، در این گزینه باید نسبت جریان رودخانه به دبی اوج تعیین شود. در این حالت زمانی که نسبت دبی در بازوی پایین‌رونده هیدروگراف به مقدار دبی اوج برابر با این مقدار شود، جریان پایه تبدیل به جریان رودخانه می‌شود. آنالیز حساسیت مدل HEC-HMS برای تعیین میزان تأثیر تغییرات هر یک از پارامترهای ورودی (حداکثر تغییرات ۳۰ درصدی) در میزان رواناب انجام شده است. در مرحله بعدی، واسنجی نرم‌افزار HEC-HMS برای داده‌های سال آبی ۸۸-۱۳۸۱ انجام شد. هدف از واسنجی کمینه کردن اختلاف بین هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی است. برای واسنجی در این نرم‌افزار از بهینه‌سازی استفاده می‌شود بنابراین یک تابع هدف در عنصری که در آن هیدروگراف مشاهداتی وجود دارد، در نظر گرفته می‌شود و این تابع به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که اگر مقدار هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی در عنصر موردنظر برابر شوند، مقدار آن برابر صفر شود (خلیلی و همکاران، ۱۳۸۵). سپس صحت‌سنجی مدل انجام شد. صحت‌سنجی مدل از طریق اجرای مدل با پارامترهای بهینه‌شده در مرحله واسنجی و با داده‌های

سال‌های آبی ۹۵-۱۳۸۹ انجام گرفت. در نهایت نرم‌افزار HEC-HMS برای شبیه‌سازی رواناب برای دوره آبی (دوره ۱۴۲۸-۱۴۰۰) با استفاده از داده بارش مدل گردش عمومی جو گزارش پنجم به عنوان CanESM2 تحت دو سناریو RCP 2.6 و RCP 8.5 که توسط مدل SDSM ریزمقیاس‌نمایی شده است، اجرا می‌شود (موجرلو، ۱۳۹۷).

در این پژوهش از روش کمبود اولیه و نرخ ثابت به دلیل کاربرد در شبیه‌سازی دوره‌های تر و خشک و همچنین در دسترس بودن اطلاعات و پارامترهای معادلات آن برای تعیین میزان تلفات نفوذ شبیه‌سازی پیوسته به کار گرفته شد. همچنین از آمار و اطلاعات تبخیر از تشت برای محاسبه تبخیر در مدل‌سازی بهره گرفته شده است.

دوره زمانی واسنجی و اعتبارسنجی مدل و معیارهای آن

در این پژوهش از داده‌های بارش، دبی روزانه و تبخیر و تعرق ماهانه سال‌های آبی ۸۸-۱۳۸۱ برای واسنجی و از سال‌های آبی ۹۵-۱۳۸۹ جهت صحت‌سنجی مدل استفاده شده است. ابتدا پارامترهای مدل با استفاده از سری اول داده‌ها واسنجی شده به طوری که در مرحله واسنجی مجموعه پارامترهای موردنیاز برای اجرای مدل تعیین شد و این مقادیر برای بدست آوردن نتایج برای صحت‌سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت، به عبارت دیگر با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای به‌دست‌آمده از سری اول داده‌ها، مدل با استفاده از سری دوم داده‌ها مورد صحت‌سنجی قرار گرفت، همچنین این مراحل آن قدر تکرار شد که در مواردی که نتیجه صحت‌سنجی دقیق نبوده، واسنجی دوباره انجام و صحت‌سنجی مجدداً صورت گرفت تا دقت لازم در مرحله صحت‌سنجی حاصل شود.

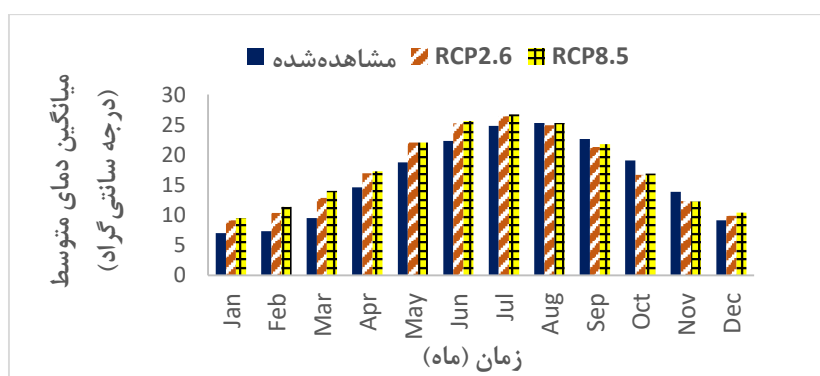
سناریوهای اقلیمی تحت دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 در SDSM

در مرحله آخر، سری زمانی پارامترهای حداقل و حداکثر دما و بارش تحت دو سناریوی RCP 2.6 و RCP 8.5 برای دوره‌ی آبی ۲۸-۱۴۰۰ تولید شدند (میزان تغییرات پارامترها در جداول ۳). نتایج نشان داد که مقادیر دمای متوسط در تمام فصول به جز پاییز روند افزایشی دارد و به‌طور کلی میزان پارامتر مذکور حوضه در دوره‌ی آبی نسبت به دوره‌ی پایه تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب به میزان ۱/۱۴ و ۱/۵۷ درجه سانتی‌گراد افزایش و میزان بارش متوسط حوضه در تمام فصول به جز فصل تابستان کاهش خواهد یافت. به‌طور سالانه میزان بارش حوضه در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی پایه تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب ۵۹/۷۲ میلی‌متر (معادل ۸/۹ درصد) و ۷۰/۹۸ میلی‌متر (معادل ۱۰/۶ درصد) کاهش می‌یابد (شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۴) که با نتایج منصوری و همکاران (۱۳۹۳) مطابقت دارد (موجرلو، ۱۳۹۷).

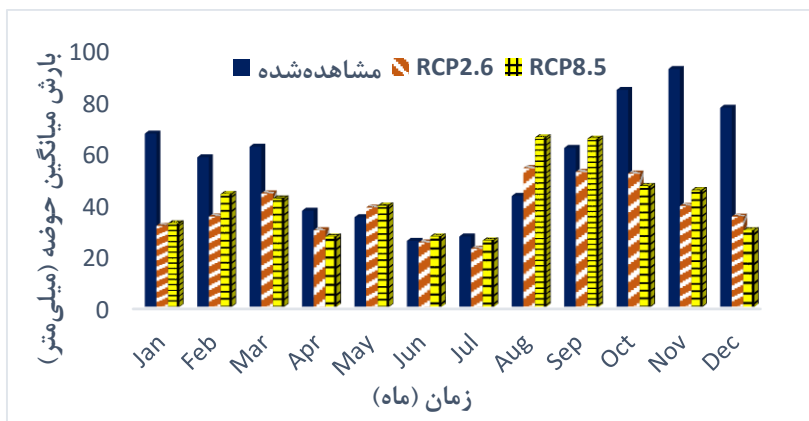
جدول ۳. تغییرات دمای حداقل و حداکثر در دوره‌ی آبی (۱۴۲۸-۱۴۰۰) نسبت به دوره‌ی پایه (۱۳۸۴-۱۳۵۵)

تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5

زمان	دمای حداقل (درجه سانتی‌گراد)		دمای حداکثر (درجه سانتی‌گراد)	
	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5
زمستان	۱/۹۳	۲/۵۳	۱/۹۸	۲/۶۶
بهار	۳/۰۴	۳/۵۶	۲/۹۳	۳/۴۲
تابستان	۰/۹۱	۱/۲۶	۱/۸۳	۲/۱۹
پاییز	-۱/۲۸	-۱/۰۷	-۲/۲۲	-۱/۹۹
سالانه	۱/۱۵	۱/۵۷	۱/۱۳	۱/۵۷



شکل ۶. مقایسه دمای میانگین حوضه در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی پایه



شکل ۷. مقایسه میانگین بارش حوضه در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی پایه

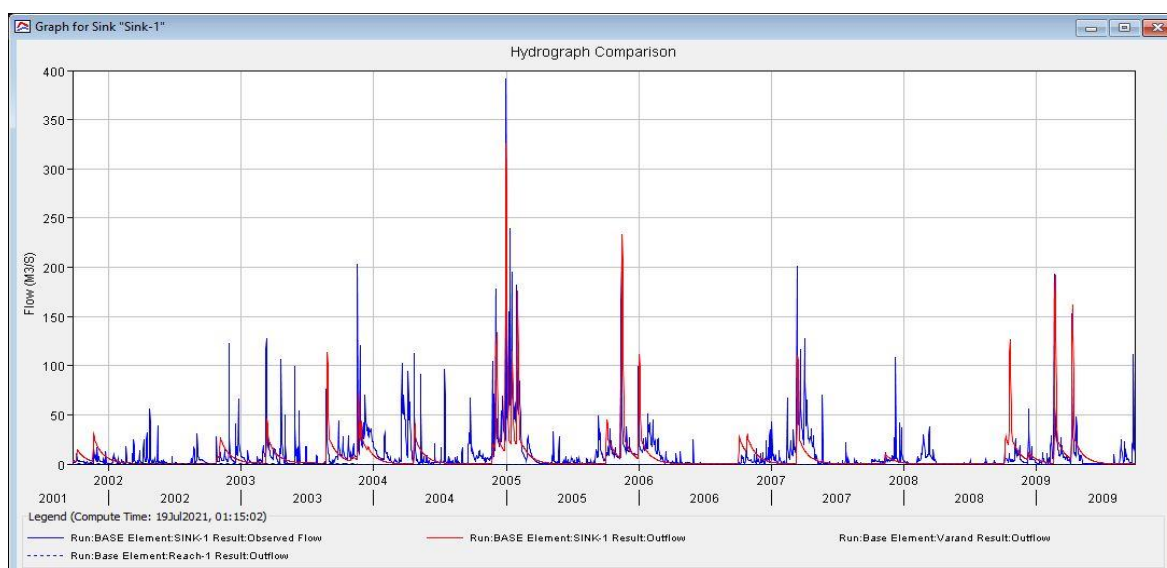
جدول ۴. تغییرات بارش و دمای متوسط حوضه در دوره‌ی آتی (۱۴۰۰-۱۴۲۸) نسبت به دوره‌ی پایه (۱۳۸۴-۱۳۵۵) تحت سناریوهای RCP 8.5 و RCP 2.6

دما (درجه سانتی‌گراد)		بارش (میلی‌متر)		زمان
RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 8.5	RCP 2.6	
۲/۶۰	۱/۹۵	-۳۴/۰۰	-۳۲/۰۰	زمستان
۳/۴۹	۲/۹۸	-۷/۳۰	-۸/۵۱	بهار
۱/۷۲	۱/۳۷	۱/۸۶	۷/۶۲	تابستان
-۱/۵۳	-۱/۷۵	-۳۱/۵۴	-۲۶/۸۳	پاییز
۱/۵۷	۱/۱۴	-۷۰/۹۸	-۵۹/۷۲	سالانه

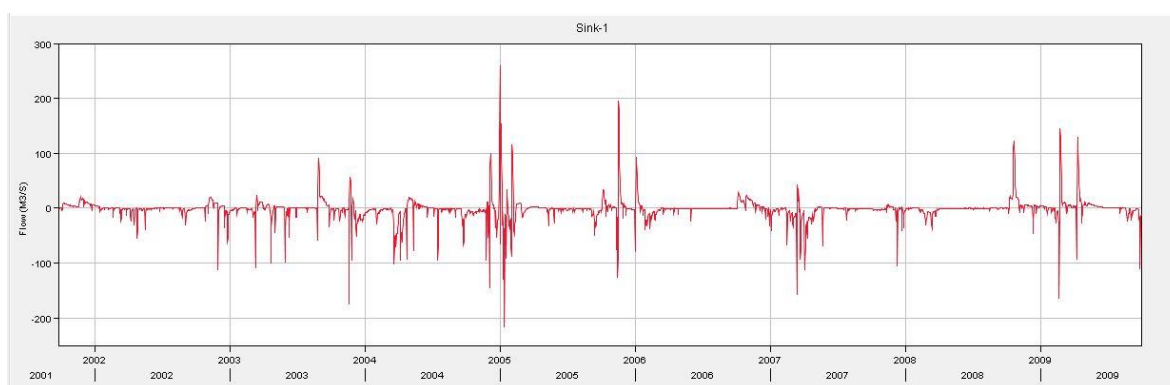
یافته‌های پژوهش

نتایج اولیه شبیه‌سازی برای دوره ۱۳۸۱-۱۳۸۸

در شکل شماره ۸ هیدروگراف‌های جریان (در مقیاس زمانی) روزانه مشاهده‌شده و محاسبه‌شده توسط مدل HEC-HMS که برای سال‌های آبی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۸ شبیه‌سازی شده‌است، نمایش داده شد. همان‌گونه که در شکل شماره ۸ نشان داده شده‌است، نمودارهای دبی‌های مشاهده‌شده با شبیه‌سازی شده، هم‌خوانی خوبی ندارند. در شکل شماره ۹ نمودار باقی‌مانده جریان ارائه شده‌است. باقی‌مانده جریان در تعیین وجود اختلاف در مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، کمک می‌کند.



شکل ۸. هیدروگراف جریان روزانه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده (۱۳۸۱-۱۳۸۸)



شکل ۹. تغییرات اختلاف جریان (اختلاف جریان مشاهده شده و شبیه سازی شده)

همان گونه که اشاره شد، نمودارهای مشاهداتی و شبیه سازی شده، باهم هم خوانی خوبی نداشته و نیاز به آنالیز حساسیت پارامترها دارد یعنی تعیین پارامترهای حساس که با تغییر در مقدارشان باعث تغییرات زیادی در نتایج مدل و نزدیک سازی مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده می شوند.

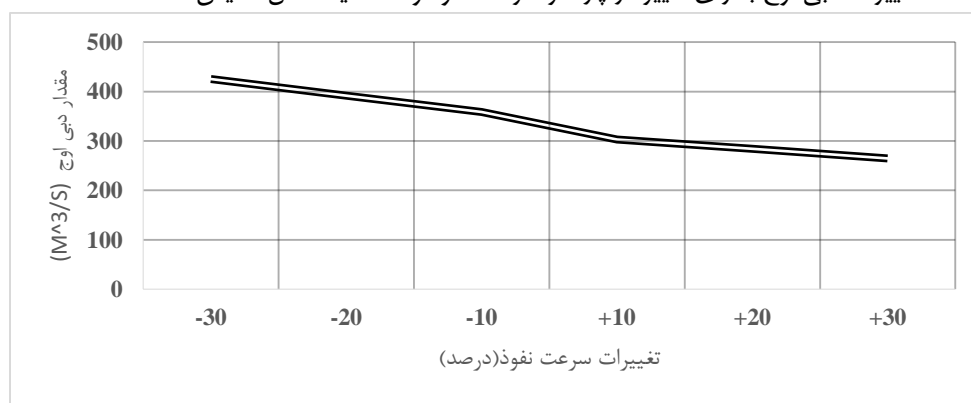
نتایج آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت پارامترها با اجزای متعدد مدل با کاهش و افزایش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصدی مقدار پارامترها انجام شد و نهایتاً حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترها تعیین شد. پارامتر حساس مدل در حوضه تجن، در قسمت تلفات و پارامتر سرعت ثابت نفوذ آب در شرایط اشباع خاک (زمانی که خاک به حالت اشباع رسیده)، می باشد که با افزایش ۱۰ درصدی و همچنین کاهش آن تا ۳۰ درصد تغییرات قابل ملاحظه ای در مدل نمایان می شود. سایر پارامترها بی تأثیر و یا تأثیری بسیار جزئی در نتایج آنالیز حساسیت از خود نشان دادند که می توان از این تغییرات صرف نظر کرد (جدول شماره ۵).

جدول ۵. دبی اوج و زمان وقوع مشاهده ای و محاسبه شده به ازای تغییر در سرعت نفوذ

زمان وقوع دبی اوج شبیه سازی	دبی اوج شبیه سازی m ³ /s	زمان وقوع دبی اوج مشاهده ای	دبی اوج مشاهده ای m ³ /s	درصد تغییرات پارامتر
۱۳۸۳ آذر ۱۱	۲۶۴/۹	۱۳۸۳ آذر ۱۱	۳۹۱	+۳۰
۱۳۸۳ آذر ۱۱	۲۸۳/۹			+۲۰
۱۳۸۳ آذر ۱۱	۳۰۳			+۱۰
۱۳۸۳ آذر ۱۱	۳۵۸/۶			-۱۰
۱۳۸۳ آذر ۱۱	۳۹۱/۵			-۲۰
۱۳۸۳ آذر ۱۱	۴۲۵/۵			-۳۰

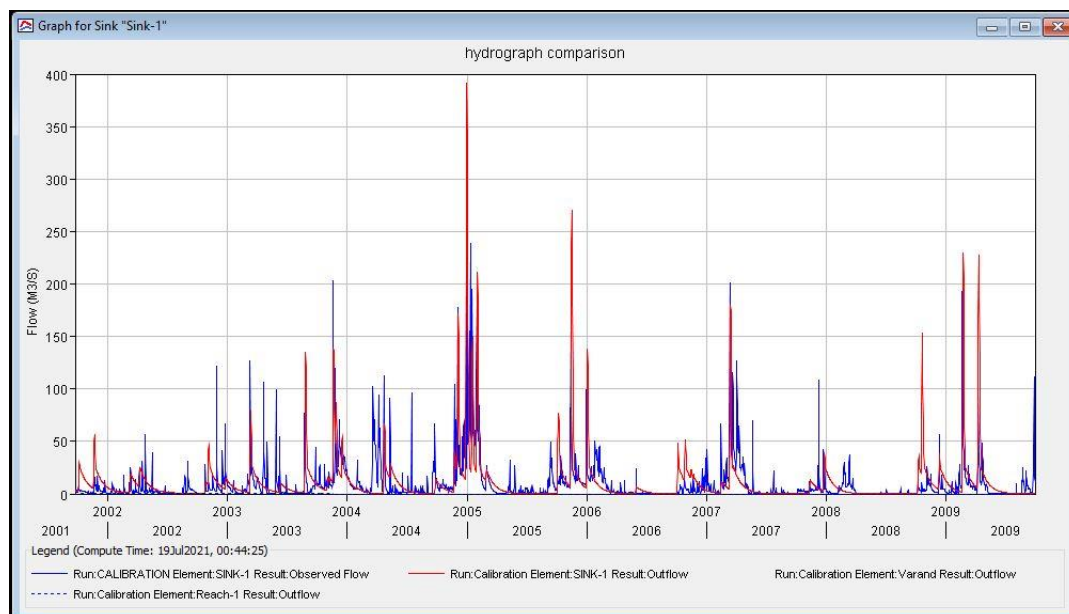
نمودار شماره ۱۰ تغییرات دبی اوج به ازای تغییر در پارامتر سرعت نفوذ و حساسیت مدل نمایش داده شده است.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات دبی اوج نسبت به ازای تغییرات همزمان در پارامترها

نتایج واسنجی

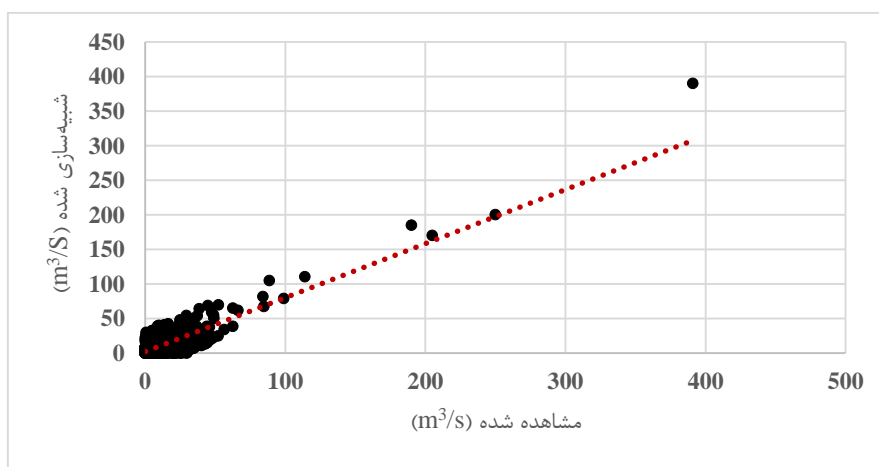
در شکل شماره ۸ هیدروگراف‌های جریان (در مقیاس زمانی) روزانه مشاهده شده و محاسبه شده توسط مدل HEC-HMS که برای سال‌های آبی ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۸ شبیه‌سازی شده است، نمایش داده شد. همان‌گونه که در شکل شماره ۱۱ نشان داده شده است، نمودارهای دبی‌های مشاهده شده با شبیه‌سازی شده، هم‌خوانی خوبی دارند.



شکل ۱۱. هیدروگراف جریان روزانه مشاهده‌ای و محاسبه شده در مرحله واسنجی (۱۳۸۱-۸۸)

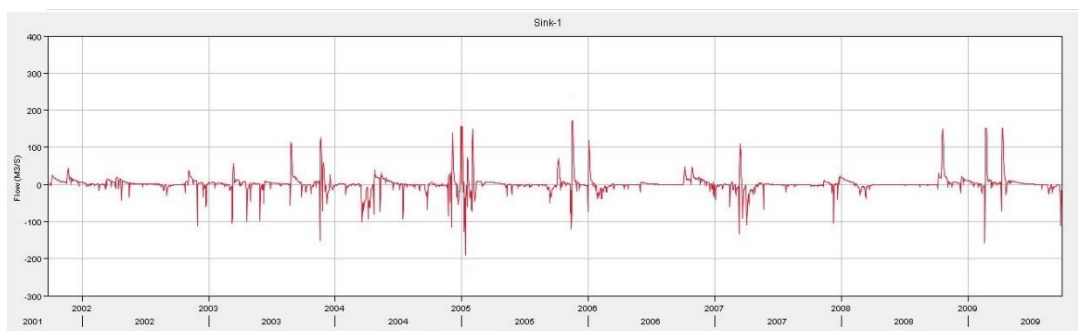
همان‌گونه که در شکل ۱۲ نمایان است، مدل HEC-HMS توانسته با دقت بالایی دبی روزانه حوضه تجن را در مرحله واسنجی مدل تخمین بزند ($R=0.81$).

با توجه به جدول مقادیر بحرانی ضریب همبستگی (مهدوی، ۱۴۰۱)، مقدار بحرانی ضریب همبستگی در سطح معنی‌داری ۵ درصد و با درجه‌ی آزادی ۱۰۰۰ معادل ۰/۰۶۲ می‌باشد و با توجه به اینکه ضریب همبستگی محاسبه شده به مراتب بزرگتر از مقدار بحرانی بوده است بنابراین معنی‌داری آن در سطح ۵ درصد مورد تأیید قرار گرفت. هم‌چنین ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) معادل ۰/۶۸ محاسبه شد که براساس منابع معتبر هرچه شاخص مذکور به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است.



شکل ۱۲. نمودار مقایسه مقادیر دبی متوسط روزانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی (۱۳۸۱-۸۸)

در شکل ۱۳ نمودار باقی‌مانده جریان ارائه شده است. باقی‌مانده جریان در تعیین وجود اختلاف در مقادیر مشاهداتی و محاسباتی، کمک می‌کند.



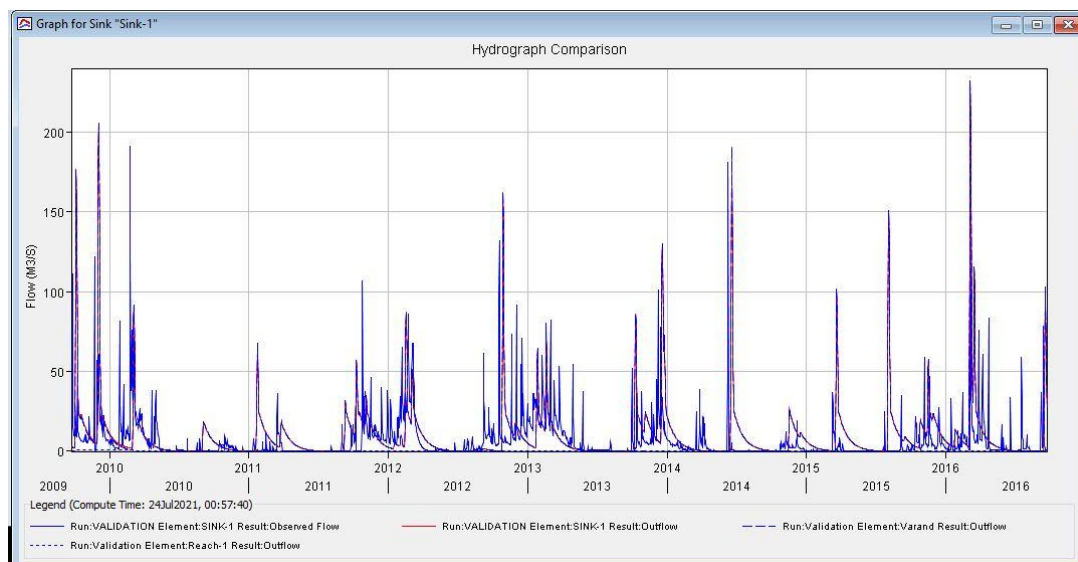
شکل ۱۳. نمودار تغییرات اختلاف جریان در مرحله واسنجی (اختلاف جریان مشاهده‌ای و محاسبه‌شده)

جدول ۶. مقدار بهینه پارامترها بعد از واسنجی (موسوی ندوشنی و داننده‌مهر، ۱۳۸۴)

پارامتر	مقدار بهینه	حد پایین	حد بالا	واحد
شرایط کمبود اولیه	۲۰	۰	۵۰۰	میلی‌متر
حداکثر ظرفیت خاک برای اشباع شدن	۴۰	۰	۱۰۰۰	میلی‌متر
نرخ ثابت نفوذ	۰/۹	۰	۳۰۰	میلی‌متر بر ساعت
زمان تمرکز	۹/۴	۰/۱	۵۰۰	ساعت
دبی اولیه	۳	۰	۱۰۰۰۰۰	مترمکعب بر ثانیه
ثابت فروکش	۰/۹	۰/۰۰۰۱	۱	-

نتایج اعتبارسنجی مدل HEC-HMS

در شکل ۱۴ هیدروگراف‌های جریان (در مقیاس زمانی) روزانه مشاهده‌شده و محاسبه‌شده توسط مدل HEC-HMS که برای سال‌های آبی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۵ شبیه‌سازی شده‌است، نمایش داده شد.



شکل ۱۴. هیدروگراف جریان روزانه مشاهده‌ای و محاسبه‌شده در مرحله صحت‌سنجی (۹۵-۱۳۸۹)

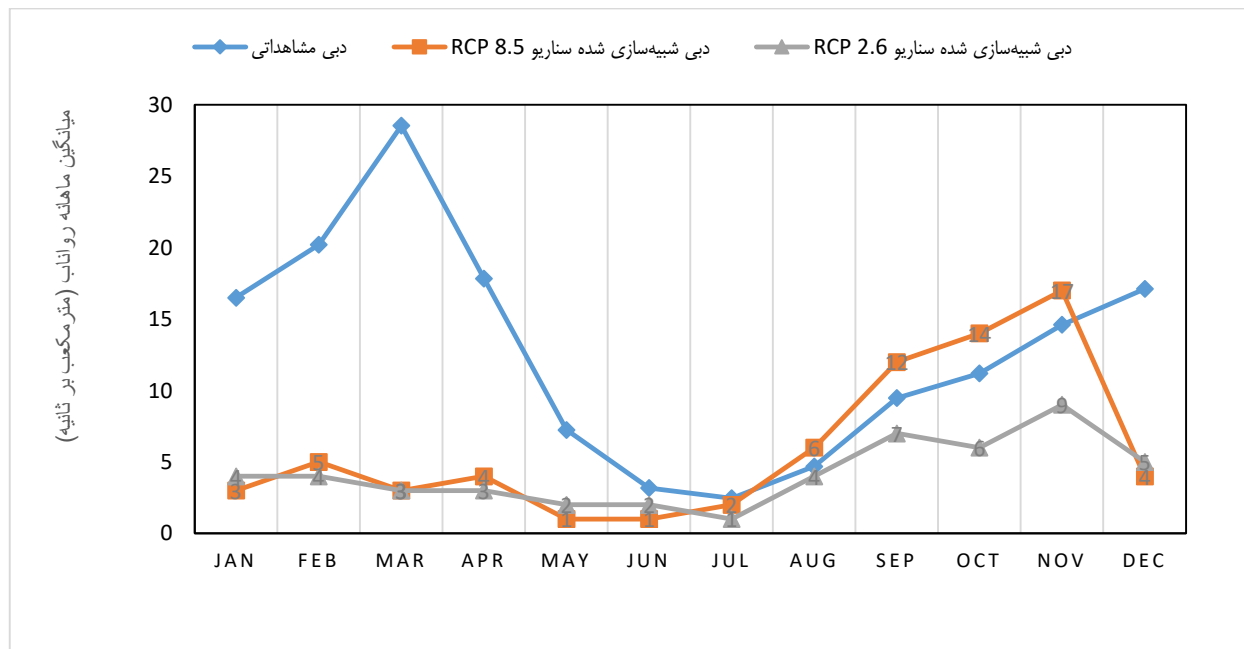
همان‌گونه که در شکل ۱۴ نمایان است، مدل HEC-HMS توانسته با دقت بالایی دبی روزانه حوضه تجن را در مرحله صحت‌سنجی مدل تخمین بزند ($R=0.80$).

با توجه به جدول مقادیر بحرانی ضریب همبستگی (مهدوی، ۱۴۰۱)، مقدار بحرانی ضریب همبستگی در سطح معنی‌داری ۵ درصد و با درجه‌ی آزادی ۱۰۰۰ معادل ۰/۰۶۲ می‌باشد و با توجه به اینکه ضریب همبستگی محاسبه شده به مراتب بزرگتر از مقدار بحرانی بوده

است بنابراین معنی‌داری آن در سطح ۵ درصد مورد تأیید قرار گرفت. هم‌چنین ضریب ناش-ساتکلیف (NSE) معادل ۰/۶۳ محاسبه شد که براساس منابع معتبر هرچه شاخص مذکور به عدد یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است. با توجه به این که نتایج آماره‌های خطاسنجی (ضریب همبستگی و ناش-ساتکلیف) در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی کارایی مدل HEC-HMS را برای حوضه آبریز تجن که وسعت بسیار زیادی دارد، تأیید نمود لذا از این مدل برای شبیه‌سازی دوره‌های آبی نیز استفاده شد.

شبیه‌سازی بارش-رواناب برای دوره‌ی آینده در مدل HEC-HMS

پس از واسنجی و ارزیابی مدل، داده‌های میانگین بارش روزانه حوضه و دمای میانگین در دوره‌ی ۱۴۰۰-۱۴۲۸ وارد مدل شده و رواناب حوضه برای این دوره شبیه‌سازی شد (شکل ۱۵). لازم به ذکر است نتایج شبیه‌سازی اقلیمی برای دوره آینده تحت سناریوهای مختلف از منبع موجولو (۱۳۹۷) گرفته شده و در این تحقیق از نتایج ارائه شده در منبع مذکور به عنوان بخشی از داده‌های ورودی به منظور مدل‌سازی پیوسته بارش-رواناب برای دوره آبی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده میزان دبی در دوره‌ی آینده نسبت به دوره‌ی پایه تحت هر دو سناریوی تغییر اقلیم RCP 2.6 و RCP 8.5 به شدت کاهش خواهد یافت و فقط در سناریوی RCP 8.5 و آن هم به میزان جزئی در ماه‌های آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر دبی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. به‌طور کلی نتایج پیش‌بینی نشان می‌دهد که میزان دبی تابستان و پاییز تحت سناریوی RCP 8.5 افزایش بیشتری را نسبت به سناریوی RCP 2.6 خواهد داشت.



شکل ۱۵. تغییرات دبی شبیه‌سازی شده در دوره‌ی آبی نسبت به دوره‌ی پایه مشاهداتی تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5

بحث

نتایج شبیه‌سازی پیوسته مدل HEC-HMS در مرحله واسنجی نشان داد که مدل توانسته با دقت بالایی دبی روزانه حوضه تجن را تخمین بزند ($R^2=0.66$). هم‌چنین با توجه به این که نتایج آماره‌های خطاسنجی (ضریب همبستگی و ناش-ساتکلیف) در مرحله صحت‌سنجی کارایی مدل HEC-HMS را برای حوضه آبریز تجن تأیید نمود لذا از این مدل برای شبیه‌سازی جریان روزانه حوضه در دوره‌ی ۱۴۰۰-۱۴۲۸ استفاده شد که نشان‌دهنده این است که مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی دبی حوضه دارد که با نتیجه تحقیقات دودانگه و هم‌کاران (۱۳۹۷)، سهرابی‌ان و هم‌کاران (۱۳۹۴) هم‌خوانی دارد. نتایج شبیه‌سازی دبی حوضه تجن در شرایط تغییر اقلیم نشان داد که میزان دبی سالانه حوضه در دوره‌ی آبی نسبت به دوره‌ی پایه تحت هر دو سناریو کاهش خواهد یافت که از پیامدهای کاهش رواناب، نقصان در تأمین به‌هنگام و کافی نیاز آبی بخش کشاورزی و کاهش امنیت غذایی خواهد بود، که با یافته‌های منصوری و هم‌کاران (۱۳۹۳) و مساح بوانی و مرید (۱۳۸۴) هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج شبیه‌سازی پیوسته مدل HEC-HMS در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی نشان داد که مدل توانسته با دقت بالایی دبی روزانه حوضه تجن را تخمین بزند. نتایج شبیه‌سازی دبی حوضه تجن در شرایط تغییر اقلیم حاکی از آن بود که میزان دبی سالانه حوضه در بازه زمانی آتی نسبت به بازه زمانی پایه تحت هر دو سناریو کاهش خواهد یافت که از پیامدهای کاهش رواناب، نقصان در تأمین به‌هنگام و کافی نیاز آبی بخش کشاورزی و کاهش امنیت غذایی خواهد بود. این تحقیق که با به‌کارگیری داده‌های GCM در مدل‌سازی هیدرولوژیکی انجام گردید، راه‌کاری مؤثر و جدید را در زمینه پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های آبخیز ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج گرفته‌شده و همچنین تغییراتی که در متغیرهای اقلیمی که در آینده رخ خواهد داد، پیشنهاد می‌شود که مسئولان و برنامه‌ریزان بخش‌های کشاورزی، منابع آب، محیط‌زیست، صنعت و اقتصاد راه‌کارهای لازم را برای کاهش پیامدها و سازگاری با شرایط آب و هوایی جدید اتخاذ کنند.

سپاسگزاری

نویسندگان از کلیه اشخاص و نهادهایی که در انجام این تحقیق همکاری داشته‌اند تشکر و قدردانی می‌نمایند.
"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

- الماسی، پریسا؛ سلطانی، سعید؛ گودرزی مسعود و مدرس، علی (۱۳۹۵). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب سطحی در حوضه آبخیز بازفت. *نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*، سال ۲۰، شماره شماره ۷۸، ص ۵۲-۳۹.
- بابائیان، ایمان؛ نحفی نیک، زهرا؛ زابل عباسی، فاطمه؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ ادب، حامد و ملبوسی، شراره (۱۳۸۸). ارزیابی تغییر اقلیم در دوره‌ی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G. *مجله جغرافیا و توسعه*، شماره ۱۶، ص ۱۵۲-۱۳۵.
- پورمحمدی، سمانه و جوادیان‌زاده، محمدمهدی (۱۳۹۷). مقایسه کارایی روش‌های هوش مصنوعی و مدل مفهومی HEC-HMS در برآورد افزایش منابع ناشی از بارورسازی ابرها. *هفتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب*، یزد، ۱۲۳ ص.
- تیجوری، محمدعلی؛ پیرنیا، عبدالله و سلیمانی، کریم (۱۳۸۸). *آنالیز حساسیت CN بر روی هیدروگراف حاصل از سیل توسط مدل WMS*. پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران (مدیریت پایدار بلایای طبیعی)، تعداد صفحات: ۱۳.
- حسین‌زاده، محمدمهدی و ایمنی، سپیده (۱۳۹۴). مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبخیز کوچک-رودک با استفاده از مدل HEC-HMS. *پژوهش‌های دانش زمین*، ۲۵(۷): ۴۳-۳۱.
- خلیلی، نجمه؛ خداشناس، سعیدرضا و داوری، کامران (۱۳۸۵). پیش‌بینی بارش با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی. *دومین کنفرانس مدیریت منابع آب*، ۲ ص.
- خیری، هوشنگ؛ مقامی مقیم، غلام‌رضا و احمدی، حسن (۱۳۹۶). مدل‌های بیلان آب در حوضه‌های آبریز جنگلی (مطالعه موردی: حوضه معرف کسلیان). *نشریه برنامه‌ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)*، ۲۱(۴): ۸۵-۵۹.
- دامادی، سکینه؛ دهواری، عبدالحمید؛ دهمرده قلعه‌نو، محمدرضا و ابراهیمیان، محبوبه (۱۳۹۹). شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل HEC-HMS در حوزه آبخیز سرباز استان سیستان و بلوچستان. *پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۲۲(۱۱): ۲۹۵-۲۸۷.
- دودانگه، اسماعیل؛ شاهدی، کاکا و سلیمانی، کریم (۱۳۹۷). کاربرد تئوری کوپلا جهت ارزیابی عملکرد مدل هیدرولوژیکی IHACRES (مطالعه موردی: حوضه آبریز طالقان). *مجله فیزیک زمین و فضا*، دوره ۴۴، شماره ۱، ص ۸۸-۷۱.
- ریاحی، محمدرضا؛ سلیمانی، کریم؛ موسوی، سید رضا و بنی‌هاشمی، معصومه (۱۳۹۶). بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر دبی رودخانه با استفاده از مدل HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لکشا نکارود). *مجله پژوهش آب ایران*، ۱(۱۱): ۴۳-۳۳.
- زراعتکار، زهرا و حسن‌پور، فرزاد (۱۳۹۵). شبیه‌سازی سیلاب شهری بیرجند با استفاده از مدل HEC-RAS و ARC-GIS. *پژوهش‌های آبخیزداری (پژوهش و سازندگی)*، شماره‌ی ۱۱۲، ۵۶-۴۱.
- سهرابیان، الهه؛ مفتاح هلقی، مهدی؛ قربانی کلیان، سعید و ذاکری‌نیا، مهدی (۱۳۹۴). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر آبدی حوضه با دخالت مدل هیدرولوژی (مطالعه موردی: حوضه گالیکش در استان گلستان). *نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، دوره ۲۲، شماره ۲، ص ۱۲۵-۱۱۱.
- غفاری گیلانده، عطا؛ سبحانی، بهروز و استادی باباکندی، الناز (۱۳۹۵). برآورد شماره‌ی منحنی و ارتفاع رواناب در محیط Arc-GIS (مطالعه‌ی موردی: شهرستان مشکین‌شهر). *هیدروژئومورفولوژی*، شماره‌ی ۹، ۱۷۵-۱۵۹.



کارآموز، محمد و عراقی نژاد، شهاب (۱۳۹۷). هیدرولوژی پیشرفته. چاپ چهارم. انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر. پلی تکنیک تهران. ایران. ۴۶۴ ص.

کوهپایان افضل، فرشاد و قل خانی، حسین (۱۳۸۹). راهنمای کاربردی شبیه سازی بارش - رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS، انتشارات متفکران. ۲۱۰ ص.

متشفیع، بهزاد؛ آخوند علی، علی محمد؛ شریفی، محمدرضا و زارعی، حیدر (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر نحوه ی شکل گیری الگوی جریان بر هیدروگراف خروجی حوضه ی آبریز در شبیه ساز HEC-HMS (مطالعه موردی: حوضه آبریز رود زرد). علوم و مهندسی آبیاری، ۴۶(۲)، ۱-۱۴.

محرم پور، الهام؛ نظر نژاد، حبیب و بابایی، سیاوش (۱۳۹۷). برآورد شماره ی منحنی و ارتفاع رواناب در محیط Arc GIS با ابزار Arc CN-Runoff در حوضه ی آبخیز نازلوچای ارومیه، شماره ی ۱۱۹، ۴۹-۴۱.

مساح بوانی، علیرضا و مرید، سعید (۱۳۸۴). اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده رود اصفهان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال ۹، شماره ۴، ص. ۱۷-۲۷.

منصوری، بهاره؛ احمدزاده، حجت؛ مساح بوانی، علیرضا؛ مرید، سعید؛ دلاور، مجید و لطفی، سعید (۱۳۹۳). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه زربینه رود با استفاده از مدل SWAT. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۸، شماره ۶، ص. ۱۱۹۱-۱۲۰۳.

موجرلو، فاطمه (۱۳۹۷). تعیین مناسب ترین الگوی بهره برداری و تخصیص منابع آب در حوضه آبریز رودخانه تجن تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم با استفاده از مدل WEAP. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. ۱۳۳ ص.

موجرلو، فاطمه؛ فضل اولی، رامین و عمادی، علیرضا (۱۳۹۸). کاربرد مدل برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دبی حوضه آبریز تجن. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۱): ۱۴۱-۱۳۹.

موسوی ندوشنی، سید سعید و داننده مهر، علی (۱۳۸۴). سیستم مدل سازی هیدرولوژیکی (HEC-HMS)، مؤسسه ی فرهنگی-هنری دیباگران تهران. ۲۹۶ ص.

مهدوی، محمد (۱۴۰۱). هیدرولوژی کاربردی (جلد اول)، تهران: موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران. چاپ دوازدهم. ۳۴۰ ص.

REFERENCES

- Almasi, Parisa., Soltani, Saeed., Goodarzi, Masoud., & Modarres, Ali. (2017). Assessment the Impacts of Climate Change on Surface Runoff in Bazoft Watershed. *Journal of Water and Soil Science* 78(20): 39 – 52. (In Persian)
- Babaian, Iman., Najafi Nik, Zahra., Zabol Abbasi, Fatemeh., Habibi Nokhandan, Majid., Adab, Hamed., & Malbousi, Sharareh. (2009). Assessment of climate change in the period of 2010-2039 using the exponential microscale data of ECHO-G atmospheric general circulation model. *Journal of Geography and Development* 16: 152-135. (In Persian)
- Daide, F., Afgane, R., Lahrach, A., Chaouni, A., Msaddek, M., & Elhasnaoui, I. (2021). Application of the HEC-HMS hydrological model in the Beht watershed (Morocco). *E3S Web of Conferences* 314, 05003.
- Damadi, Sekineh., Dehvare, Abdulhamid., Dahmardeh Ghaleno, Mohammadreza., & Ebrahimian, Mahbobeh. (2020). "Technical Report" Flood Hydrograph Simulation Using HEC-HMS Model in Sarbaz River Basin of Sistan and Baluchestan Province. *J Watershed Manage Res.* 11(22), 287-295. (In Persian)
- Dodange, Esmail., Shahedi, Kaka., & Solaimani, Karim. (2015). The application of the copula theory to evaluate the performance of the IHACRES hydrological model (case study: Taleghan watershed). *Journal of Earth and Space Physics* 44(1): 88-71. (In Persian)
- Fleming, M., & Vincent, N. (2004). Continuous hydrologic modeling study with the hydrologic modeling system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(3): 175-183.
- Ghafari Gilandeh, A., Sobhani, B., & Ostadi Babakandi, E. (2017). Estimation of Curve Number and Runoff in ArcGIS (A Case Study of Meshkin Shahr City). *Hydrogeomorphology*, 3(9), 159-175. (In Persian)
- Hamdan, A.N.A., Almuktar, S., & Scholz, M. (2021). Rainfall-Runoff Modeling Using the HEC-HMS Model for the Al-Adhaim River Catchment, Northern Iraq. *Hydrology*, 8(2), 58.
- Hosseinzadeh, Mohammadmehdi., & Eimani, Sepideh. (2016). Modeling hydrological Ghouchak - Roodak catchment by using HMS - HEC model. *Researches in Earth Sciences*, 7(1), 31-43. (In Persian)
- Joo, J., Kjeldsen, T., Kim, H., & Lee, H. (2014). A comparison of two event-based flood models (ReFH-rainfall runoff model and HEC-HMS) at two Korean catchments. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(1): 330-343.
- Karamouz, Mohammad., & Arghinejad, Shahab. (2017). *Advanced Hydrology*, 4th edition, AmirKabir University of Technology Publications, Tehran Polytechnic, Iran. 464 p. (In Persian)
- Khalili, Najmeh., Khodashanas, Saedreza., & Davari, Kamran. (1385). Forecasting precipitation using

- artificial neural networks. *Iran Water Resources Management Conference*, SID. (In Persian)
- Kheiry, Hoshang., Maghami Moghim, Gholamreza., & Ahmadi, Hassan. (2017). Modeling Water Balance Components in the Small-Forested Watershed (Case study: Kasilian Representative Basin). 21 (4) :59-85. (In Persian)
- Kuhpayan Afzal, Farshad., & Qolkhani, Hossein. (2009). A practical guide for rainfall-runoff simulation using the HEC-HMS model. Motafkaran Publications, 210 p. (In Persian)
- Mahdavi, Mohammad. (2022). Applied Hydrology (Volume 1), Tehran: University of Tehran Publishing and Printing Institute, 12th edition, 340 p. (In Persian)
- Mansouri, Bahareh., Ahmadzadeh, Hojjat., Massah Bavani, Alireza., Morid, Saeed., Delavar, Majid., & Lotfi, Saeed. (2014). Investigating the effects of climate change on the water resources of Zarinerood basin using the SWAT model. *Water and soil journal (agricultural sciences and industries)* 28(6):1203-1191. (In Persian)
- Massah Bavani, Alireza., & Morid, Saeed. (2006). The effect of climate change on the flow of Zayandeh River in Isfahan. *Agricultural sciences and techniques and natural resources* 9(4):17-27. (In Persian)
- Moharrampour, Elham., Nazarnejad, Habib., & Babaei, Siavash. (2017). estimation of curve number and height of runoff in Arc GIS environment with Arc CN-Runoff tool in Nazlochai watershed of Urmia, No. 119, 49-41. (In Persian)
- Mojerloo, Fatemeh. (2018). Determination the Best Pattern of Operation and Allocation of Water Resources in the Watershed of Tajan River under Different Climate Change Scenarios using WEAP Model. Master's thesis, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. 123 p. (In Persian)
- Mojerloo, Fatemeh., Fazloulou, Ramin., & Emadi, Alireza. (2019). The application of the model to evaluate the effects of climate change on the discharge of the Tajen watershed. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 13(1): 141-129. (In Persian)
- Moteshaffeh, Behzad., Akhund Ali, Ali Mohammad., Sharifi, Mohammad Reza., & 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. (In Persian)
- Mousavi Nadoushani, Seyyed. Saeed., & Danandeh Mehr, Ali. (2013). Hydrological Modeling System (HEC-HMS). Dibagaran Cultural-Art Institute, Tehran, 296 p. (In Persian)
- Pourmohammadi, Samaneh., & Javadianzadeh, Mohammadmehdi. (2017). Comparing the effectiveness of artificial intelligence methods and the HEC-HMS conceptual model in estimating the increase in resources due to cloud fertilization, *the 7th National Water Resources Management Conference*, Yazd 123 p. (In Persian)
- Riahi, Mohammadreza., Soleimani Karim., Mousavi Seyyed. Reza., & Bani Hashemi, Masoumeh. (2016). Investigating the effect of land use change on river flow using the HEC-HMS model (case study: Laksha Nekarud watershed). *Iranian Water Research Journal*, (11)1: 33-43. (In Persian)
- Shieh, Ch.L., Guh, Y.R., & Wang, Sh.O. (2007). The application of range of variability approach to the assessment of a check dam on riverine habitat alteration. *Environ Geol.* 52:427-435.
- Sohrabian, Elahe., Meftah Halghi, Mehdi., Ghorbani Golian, Saeed., & Zakerinia, Mehdi. (2015). Investigating the impact of climate change on the drainage of the basin with the intervention of the hydrological model (case study: Galikash basin in Golestan province). *Water and soil protection research journal* 22(2): 111-125. (In Persian)
- Steele-Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, S., Hanafin, J., & Nolan, P. (2008). The impacts of climate change on hydrology in Ireland, *Journal of Hydrology*, 356: 28-45.
- Teimuri, Mohammadali., Pirnia, Abdollah., & Soleimani, Karim. (2018). CN sensitivity analysis on flood hydrograph by WMS model, 5th Iran National Watershed Science and Engineering Conference (sustainable management of natural disasters), number of pages: 13. (In Persian)
- Try ,S., Tanaka, S., Tanaka, K., Sayama, T., Oeurng, C., UK, S., Takara, K., Hu, M., & Han, D. (2020), Comparison of gridded precipitation datasets for rainfall-runoff and inundation modeling in the Mekong River Basin, *PLoS ONE*, 15(1): 13p.
- Zeraatkar, Zahra., & Hasanpour, Farzad. (2015). Birjand urban flood simulation using HEC-RAS and ARC-GIS model. *Watershed Research (Research and Development)*, No. 112, 41-56. (In Persian)