



Rainfall -Runoff Modeling of Chalosroud Watershed Using HEC-HMS in Geographic Information System (GIS)

Behrooz Mohseni ¹✉, Karim Solaimani ²

1. (Corresponding Author) Department of Natural Resources, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

Email: b.moseni@areeo.ac.ir

2. Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Email: solaimani2001@yahoo.co.uk

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received:

30 November 2024

Received in revised form:

28 February 2025

Accepted:

7 April 2025

Available online:

26 April 2025

Keywords:

HEC-HMS,
Curve number,
Muskingum Routing,
Hydrological Models,
Extreme Events.

ABSTRACT

Different river basins use hydrological models to simulate available rainfall-runoff, land use and soil characteristics data. The main objective of this study is to use the HEC-HMS model to simulate the rainfall-runoff of the Chalosroud watershed as a useful tool to prevent and reduce flood risks. By preparing the Digital Elevation Map (DEM) in GIS and adding the GIS menu in the developed version of the model, the spatial information of the study area and hydrological parameters were calculated directly in the HEC-HMS software. The model was calibrated and validated after preparing soil maps, slope, daily rainfall, and discharge data (model inputs) during 1981-2017 for rainfall-runoff modeling. Curve number (CN), Muskingum routing and unit hydrograph methods were set for the model. The coefficients of explanation (R^2) and Nash-Sutcliffe (NSE) statistics were used to evaluate the model. The R^2 (0.71 and 0.64) and NSE (0.67 and 0.72) values of the calibration and validation periods indicated good agreement between the observed and simulated flows. The correlation between simulated and observed values was good, but the total discharge volume was slightly overestimated for these years. Therefore, the model well simulated the daily discharge flow. The results obtained by the HEC-HMS model are satisfactory and acceptable as an alternative model to other models in runoff prediction. So, the output hydrograph of this model, combined with other hydrological models (HEC-RAS and SWAT) methods, can be used in various fields of study and management for extreme events.

Citation: Mohseni, B., & Solaimani, K. (2025). Rainfall -Runoff Modeling of Chalosroud Watershed Using HEC-HMS in Geographic Information System (GIS). *Geographical planning of space quarterly journal*, 15 (1), 125-142.

<http://doi.org/10.30488/gps.2024.453219.3739>



© The Author(s)

This is an open access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Publisher: Golestan University Press

Extended Abstract

Introduction

Rainfall-runoff modeling is one of the most important hydrological processes, especially large-scale processes. Also, nonlinearity and multidimensionality make the modeling of rainfall-to-runoff conversion very complicated. Rainfall-runoff models are classified based on model input, parameters, and the number of physical principles applied to the model. These models can be classified based on the model's parameters as a function of space and time under the integrated and distributed model title and based on other criteria into deterministic and random models. Also, the runoff model can be defined as a set of equations that help to estimate the runoff and a function of the various parameters used to describe the characteristics of the basin. The main reasons for a hydrologist to use process simulation modeling tools are to learn system behavior, support decision-making, and predict future behavior. Many researchers have reported that hydrological models depend mainly on input data, hydrological parameters, and model structure. In particular, river modeling studies in an ungauged catchment using climate and physiographic features are only possible if detailed information on topography, land use, soil, vegetation, and climate is available based on the data. Today, several studies have been done to simulate the rainfall-runoff process by comparing experimental, data-driven, hydrological, and statistical models. All these studies have considered the appropriate simulation of the HEC-HMS model. Thus, the HEC-HMS model can be used to conduct studies such as water availability, urban drainage, flow forecasting, flood event simulation, future urbanisation impact, flood damage reduction, wetland hydrology, reservoir overflow design, flood plain regulation and system performance. In general, the HEC-HMS model seems to be the most useful for predicting discharge in watersheds. Therefore, river discharge models are designed to better understand a basin's hydrological characteristics and generate synthetic hydrological data for river flow programs such as flood protection, water

resources planning, pollution reduction or early flood prediction and warning. Specifically, this study aims to simulate rainfall-runoff through the HEC-HMS hydrological model in the Chalosroud watershed.

Methodology

This study was used to simulate rainfall-runoff in Chalous River watershed of the HEC-HMS model. The model was implemented through recorded daily rainfall data. The study area is defined by creating 7 sub-basins based on the physical characteristics of the study area, i.e. LULC and soil distribution, using the GIS interface in the HEC-HMS model. The stages of producing the soil map for the study area were carried out using the Harmonized World Soil Database viewer (HWSD). After running this software under Windows, the data was entered into an Arc map to prepare a map of the hydrological soil groups in the study area. A series of necessary parameters, including primary losses, conversion of excess rainfall to surface flow, determination of base flow, calibration, and validation of the model, are needed to implement the rainfall-runoff model. In other words, this model routing considers flow loss and conversion in calculating runoff. As mentioned earlier, after data analysis, the HEC-HMS model created several parameters and a meteorological model (precipitation and evapotranspiration information), control profiles (rainfall start and end date and time, as well as time steps for simulation calculations) and the watershed model (methods of rainfall loss rate, conversion of precipitation to runoff and flow routing) was implemented through the input parameters to obtain the results. Historical data from different periods were used to validate and calibrate the HEC-HMS model. Daily rainfall and runoff data from 2011-1981 were used for calibration and from 2012-2017 for validation. LULC and sub-basin soil characteristics were considered unchanged during these two periods. R² and Nash-Sutcliffe determination coefficients were also used to evaluate the model's performance.

Results and Discussion

The curve number of each sub-basin was calculated based on the prepared LULC and soil maps and the provided relationships. The results showed that, in the main part, due to the low runoff potential of the river basin, the amount of CN is not very high. Statistical analysis (determination and Nash-Sutcliffe coefficient equal to 0.71 and 0.64) of the time series of simulated and observed discharge and the scatter diagram in the calibration period showed that the hydrological model for Polzoghhal station, the daily observed discharge hydrograph, well simulated. The peak discharge value simulated in the model compared to the observed discharge of the outlet station had an acceptable match in most years. Also, based on the calibrated parameters and values, the model was validated, and the performance slightly improved. The daily hydrograph was simulated with the observed discharge. Statistical analysis (determination and Nash-Sutcliffe coefficient equal to 0.64 and 0.72) in the validation period also showed that the developed hydrological model for Polzoghhal station performed well. However, like the calibration period, the validation period matches the predicted peak flow well. The estimated NSE values, show a good match between the observed and simulated hydrographs, which have been presented in the studies of other researchers. On the other hand, a significant point in the rainfall-runoff simulation process is access to good-quality rainfall-runoff observational data. During the calibration period, the simulated flow was slightly higher than the observed values during 1992-2012 but slightly lower than before. In the validation period, the simulated and observed flow in all years (except 2012) showed excellent agreement. The slight difference in simulated and observed data may be due to the land use map prepared by Landsat data in 2024 and used for the entire study period. In this regard, if there is suitable rainfall-runoff data, the performance of the model can be evaluated more accurately, and better results can be presented. Therefore, it is necessary to analyze the uncertainties caused by the data, model, and user when modeling the rainfall-runoff process.

Conclusions

This study, conducted in the Chalosroud watershed of Mazandaran province, considered rainfall-runoff modeling using the latest version of the HEC-HMS model and without using the HEC-GeoHMS extension. In the hydrometric station of Polzoghhal, the output flow was observed, calibrated and validated. The results show a good agreement between the observed and simulated currents, and R2 for calibration and validation was 0.71 and 0.64, respectively. The correlation between the simulated and observed values was good, but the total discharge storage volume was slightly overestimated for these years. Therefore, the model simulated the daily discharge flow well. However, there is an under- and over-prediction of flows. This is a common feature of hydrological models. The obtained results are satisfactory and acceptable. Therefore, the HEC-HMS model is recommended as an alternative to other runoff forecasting models. So, the output hydrograph of this model, combined with other hydrological models such as HEC-RAS and SWAT, can be used in various fields of study and management for extreme events. Thus, considering the coastal location of Chalous city in Mazandaran province, flood planners and managers can use the results of this research to prevent and control floods and, as a result, reduce their social and economic damages.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



مدل سازی بارش - رواناب حوزه آبخیز چالوس رود با استفاده از HEC-HMS تحت سیستم اطلاعات جغرافیایی

بهرروز محسنی^۱✉، کریم سلیمانی^۲

۱- نویسنده مسئول، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران. رایانامه: b.mohseni@areeo.ac.ir
۲- گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران. رایانامه: solaimani2001@yahoo.co.uk

چکیده	اطلاعات مقاله
مدل های هیدرولوژیکی متفاوتی در حوضه های رودخانه های مختلف برای شبیه سازی داده های رواناب بارش های در دسترس، کاربری اراضی و ویژگی های خاک استفاده می شوند. هدف از این مطالعه، استفاده از مدل HEC-HMS برای شبیه سازی بارش - رواناب حوزه آبخیز چالوس رود به عنوان یک ابزار مفید برای پیشگیری و کاهش خطرات سیلابی باشد. پس از تهیه نقشه کاربری و خاک (تحت نرم افزار HWSD-Viewer فائو) و استفاده از نسخه توسعه یافته مدل (تحت GIS الحاقی)، اطلاعات مکانی منطقه مورد مطالعه و پارامترهای هیدرولوژیکی، مستقیماً در نرم افزار HEC-HMS محاسبه شدند. پس از تهیه نقشه های خاک، شیب، داده های بارش و دبی روزانه (ورودی های مدل) طی سال های ۲۰۱۷-۱۹۸۱ برای شبیه سازی رواناب، مدل واسنجی و صحت سنجی شد. در منطقه مورد مطالعه، روش های شماره منحنی (CN)، روندیابی ماسکینگام و هیدروگراف واحد برای مدل تنظیم شد. در ارزیابی مدل نیز از آماره های ضرایب تبیین (R^2) و نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد. مقادیر R^2 (۰/۷۱ و ۰/۶۴) و NSE (۰/۶۷ و ۰/۷۲) دوره های واسنجی و صحت سنجی نشان دهنده تطابق خوب بین جریان های مشاهده ای و شبیه سازی شده بود. همبستگی بین مقادیر شبیه سازی و مشاهده ای خوب بود، اما حجم کل ذخیره دبی برای این سال ها کمی بیش از حد برآورد شد. بر این اساس، مدل به خوبی جریان دبی روزانه را شبیه سازی نمود. نتایج به دست آمده توسط مدل HEC-HMS به عنوان یک مدل جایگزین برای مدل های دیگر در پیش بینی رواناب، رضایت بخش و قابل قبول است. به طوری که، هیدروگراف خروجی این مدل در تلفیق با روش های دیگر مدل های هیدرولوژیکی (HEC-RAS و SWAT) می تواند در زمینه های مختلف مطالعاتی و مدیریتی برای رویدادهای حدی مورد استفاده قرار گیرد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۰
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۸
	تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶
	واژگان کلیدی: HEC-HMS شماره منحنی، روندیابی ماسکینگام، مدل های هیدرولوژیکی، رویدادهای حدی.

استناد: محسنی، بهروز و سلیمانی، کریم. (۱۴۰۴). مدل سازی بارش - رواناب حوزه آبخیز چالوس رود با استفاده از HEC-HMS تحت سیستم اطلاعات جغرافیایی. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۵ (۱)، ۱۴۲-۱۲۵.

<http://doi.org/10.30488/gps.2024.453219.3739>

ناشر: انتشارات دانشگاه گلستان

© نویسندگان



مقدمه

برآورد رواناب یا جریان رودخانه از یک حوضه برای اهداف ارزیابی اوج سیل، در دسترس بودن آب برای نیازهای شهری، طراحی تأسیسات ذخیره‌سازی برای اهداف چندمنظوره، برنامه‌ریزی عملیات آبیاری برای اهداف کشاورزی یا سایر اهداف صنعتی، حفاظت حیات وحش، تأمین آب قابل اعتماد آینده برای تولید برق و غیره ضروری است. علاوه بر این؛ بارندگی، ورودی اصلی چرخه هیدرولوژیکی است که می‌تواند به راحتی و با صرفه اقتصادی اندازه‌گیری شود، درحالی که رواناب یک متغیر وابسته است که باید برای بارندگی مربوطه تخمین زده شود. بر این اساس، مدل‌سازی بارش - رواناب یکی از مهم‌ترین فرآیندهای هیدرولوژیکی، به‌ویژه فرآیندهای در مقیاس بزرگ است (Ranjan & Singh, 2022: 987; Tassew et al, 2019: 17). همچنین، غیرخطی بودن و چندبعدی بودن، مدل‌سازی تبدیل بارندگی به رواناب را بسیار پیچیده می‌کند (Meshram et al, 2022d: 11). مدل‌های بارش - رواناب بر اساس ورودی مدل، پارامترها و میزان اصول فیزیکی اعمال شده در مدل طبقه‌بندی می‌شوند. این مدل‌ها را می‌توان بر اساس پارامترهای مدل به‌عنوان تابعی از مکان و زمان تحت عنوان مدل یکپارچه و توزیعی و بر اساس سایر معیارها به مدل‌های قطعی و تصادفی طبقه‌بندی کرد. همچنین مدل رواناب را می‌توان به‌عنوان مجموعه‌ای از معادلات تعریف کرد که به تخمین رواناب و تابعی از پارامترهای مختلف مورد استفاده، به توصیف ویژگی‌های حوضه کمک می‌کند. دو ورودی مهم مورد نیاز برای همه مدل‌ها، داده‌های بارندگی و منطقه زهکشی هستند. در کنار این موارد، ویژگی‌های آبریز مانند ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی، توپوگرافی آبخیز، رطوبت خاک، ویژگی‌های سفره آب زیرزمینی نیز در نظر گرفته می‌شوند. امروزه مدل‌های هیدرولوژیکی به‌عنوان ابزاری مهم و ضروری برای مدیریت منابع آب و محیط‌زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند (Gayathri et al, 201: 1002). دلایل اصلی یک هیدرولوژیست برای استفاده از ابزارهای مدل‌سازی شبیه‌سازی فرآیندها برای یادگیری رفتار سیستم، پشتیبانی از تصمیم‌گیری و پیش‌بینی رفتار آینده است (Birkel & Barahona, 2019: 2). این موارد توسط بسیاری از محققان گزارش شده است که مدل‌های هیدرولوژیکی عمدتاً به داده‌های ورودی، پارامتر هیدرولوژیکی و ساختار مدل بستگی دارند (Meresa & Gatachew, 2018: 761). به‌ویژه، مطالعات مدل‌سازی رودخانه در حوضه آبریز اندازه‌گیری نشده با استفاده از اقلیم و ویژگی‌های فیزیوگرافی، تنها در صورتی امکان‌پذیر است که اطلاعات دقیق در مورد توپوگرافی، کاربری زمین، خاک، پوشش گیاهی و اقلیم بر اساس داده‌ها وجود داشته باشد (Meshram et al, 2018: 10431).

امروزه مطالعات متعددی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب با استفاده از مقایسه مدل‌های تجربی، داده محور، مدل هیدرولوژیکی و مدل‌های آماری انجام شده است. جو و همکارانش^۱ (۲۰۱۴: ۳۳۹) سیلاب‌های دو زیر حوزه باکیل (۸ رخداد) و جانکیپونگ در کره جنوبی (۶ رخداد) را با دو مدل هیدرولوژیکی ReFH و HEC-HMS شبیه‌سازی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل ReFH محدودیت در شبیه‌سازی جریان اوج را نشان می‌دهد، درحالی که مدل HEC-HMS شبیه‌سازی خوبی در هر دو حوزه را نشان داد (Joo et al, 2014: 339).

مرسا و گاتاچو (۲۰۱۸: ۷۷۸) سه مدل مفهومی هیدرولوژیکی را برای مطالعه تأثیر تغییرات آب‌وهوا مقایسه کردند و دریافتند که دقت جریان مدل‌سازی شده عمدتاً به ساختار مدل و تعداد پارامترهای مدل بستگی دارد (Meresa & Gatachew, 2018: 778). نیاوپان^۲ و همکارانش (۲۰۱۸: ۳۶۰) به مطالعه‌ای در زمینه استفاده از مدل HEC-HMS برای پیش‌بینی دبی اوج جریان در حوزه آبخیز اروین کریک در شارلوت، کارولینای شمالی پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه ضرورت رویکردهای مناسب برای کاهش رواناب برای توسعه بیشتر منطقه مورد مطالعه را نشان داد (Nyaupane et al, 2018: 778).

1. Joo et al

2. Nyaupane

360: 2018). سمپوو^۱ و همکارانش (۲۰۲۳: ۱۱)، دو مدل هیدرولوژیکی، ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT) و HEC-HMS را برای پیش بینی جریان در دو حوضه Sezibwa و Manafwa، اوگاندا استفاده کردند. عملکردهای این دو مدل به منظور انتخاب مدل مناسب برای حوزه مورد مطالعه مقایسه شد. نتایج نشان داد مدل HEC-HMS در حوضه آبریز Manafwa به ترتیب در طی دوره های واسنجی و صحت سنجی ($p = 0/003$ و $p = 0/00$)، بهتر از SWAT عمل کرد؛ در حالی که در Sezibwa تفاوت در عملکرد مدل از نظر آماری معنی دار نبود ($p = 0/63$). اگرچه، در طی دوره واسنجی، HEC-HMS بهتر عمل کرد ($p = 0/01$). در نهایت، جریان شبیه سازی شده ارائه شده توسط مدل HEC-HMS را از آنچه در مدل SWAT ارائه شده بود، رضایت بخش تر معرفی کرد (Sempewo et al, 2023: 11; Aliye et al, 2020: 120). کومار و پاندی^۲ (۲۰۲۳: ۶۷۲) به شبیه سازی و مدل سازی بارش- رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS در رودخانه هماواتی هندوستان پرداختند. یافته های آنها، کاربرد روش پیشنهادی را برای مدل سازی دبی دقیق نشان داد (Kumar & Pandey, 2023: 672). در تحقیقی دیگر توسط گمیندوگا و همکارانش^۳ (۲۰۱۷: ۳۷۹) مدل سازی بارش- رواناب در ۱۰ زیر حوضه آبریز دارای آمار و بدون آمار رواناب (فاقد ایستگاه) با نرم افزار HEC-HMS در زیمبابوه بررسی شد. همچنین سهم هر یک از زیر حوضه های فاقد آمار در تولید رواناب خروجی حوضه بررسی و محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل، میزان رواناب و دبی پیک حوضه را در حوضه های دارای آمار به طور مناسبی پیش بینی می کند (Gumindoga et al, 2017: 379). معصوم زاده و فتحیان (۱۳۹۵)، مدل HEC-HMS را به همراه مدل تلفات نفوذ (SMA) برای شبیه سازی جریان در حوضه آبریز دز بکار بردند. نتایج بیانگر آن بود که مدل HEC-HMS به همراه مدل تلفات، از قابلیت خوبی در شبیه سازی پیوسته رواناب کل روزانه در دوره های خشک و تر متوالی در حوضه دز برخوردار است.

نصرتی و همکاران (۱۳۹۶) کاربرد تجزیه مؤلفه های اصلی در تعیین عوامل مؤثر بر تولید رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS را در حوزه آبخیز حصارک تهران بررسی کردند. آنها دریافتند که از بین عوامل مؤثر بر تولید رواناب حوضه آبخیز حصارک، دو عامل زمین شناسی و نوع کاربری اراضی در میزان تولید رواناب مؤثر هستند.

سلیمانزاده و همکاران (۱۳۹۹)، به شبیه سازی رواناب و تأثیر تغییر کاربری اراضی بر آن با استفاده از تصاویر ماهواره ای و مدل HEC-HMS در حوزه آبخیز هلیلرود پرداختند. صحت ۹۱ درصد نتایج، حاکی از توانایی قابل قبول روش های سنجش از دور در برآورد خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه های فاقد آمار بود. مقایسه هیدروگراف سیلاب حاصل از مدل بارش- رواناب ناشی از یک بارش مشخص، بیانگر افزایش دبی اوج سیلاب و حجم رواناب بوده است.

حیدری چناری و همکاران (۱۴۰۱)، به واسنجی و ارزیابی پارامترهای مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در شبیه سازی وقایع منفرد بارش- رواناب آبخیز تجن پرداختند. آنها دریافتند که به کارگیری سیستم مدل هیدرولوژیکی به همراه سیستم اطلاعات جغرافیایی، برای تبدیل بارش به رواناب، شبیه سازی سیلاب و پیش بینی دبی اوج و حجم سیلاب بسیار کارآمد است و نتایج به دست آمده قابل استناد می باشند. بنابراین می توان از مدل های نهایی در مدیریت حوزه های آبخیز استفاده نمود. وکیلی و مقدم نیا (۱۴۰۱)، به بررسی مقایسه ای مدل بارش- رواناب HEC-HMS با روش های تجربی مختلف برآورد سیلاب رودخانه شاه بهرام، استان کهگیلویه و بویراحمد پرداختند. آنها دریافتند که مدل هیدرولوژیک HEC-HMS نتایج بهتری با درصد خطای کمتری (بیشترین مقدار با دوره بازگشت ۱۰۰ سال (۱۰/۵۱) و کمترین مقدار با دوره بازگشت ۵ سال (۲/۷۲)) نسبت به روش های تجربی و تحلیلی ارائه داد. بنابراین، به دلیل استفاده مدل نیمه توزیعی HEC-HMS از

1. Jotham Ivan Sempewo

2. Kumar & Pandey

3. Gumindoga et al

پارامترهای بارش و مساحت با واسنجی مناسب می‌توان از این مدل نتایج با دقت بیشتری گرفت. میرزایی و همکاران (۱۴۰۲) کارایی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS را در شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب در آبخیزهای بالادست شهر گنبد مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با توجه به عملکرد مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان برای آبخیز ارازکوسه و آبخیزهای بالادست آن، می‌توان از مدل برای پیش‌بینی اثرات هیدرولوژیک اعمال سناریوهای مختلف کاهش ریسک سیل در آبخیزهای بالادست شهر گنبد استفاده کرد. مدل HEC-HMS را می‌توان برای انجام مطالعاتی همچون قابلیت دسترسی به آب، زهکشی شهری، پیش‌بینی جریان، شبیه‌سازی واقعه سیل، تأثیر شهرنشینی در آینده، کاهش خسارت سیل، هیدرولوژی تالاب، طراحی سرریز مخزن، تنظیم سیلاب‌دشت و عملکرد سیستم مورد استفاده قرار داد (Kazezyilmaz-Alhan et al, 2021: 158; Pichuka et al, 2017: 241). به‌طور کلی، به نظر می‌رسد مدل HEC-HMS بیشترین کاربرد را برای پیش‌بینی دبی در حوضه‌های آبریز داشته باشد. بنابراین، مدل‌های دبی رودخانه برای درک بهتر ویژگی‌های هیدرولوژیکی یک حوضه و تولید داده‌های هیدرولوژیکی مصنوعی برای برنامه‌های جریان رودخانه مانند حفاظت از سیل، برنامه‌ریزی منابع آب، کاهش آلودگی یا برای هشدار و پیش‌بینی زود هنگام سیل طراحی می‌شوند. به‌طور خاص، هدف این مطالعه شبیه‌سازی بارش-رواناب از طریق مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در حوزه آبخیز چالوس رود است.

روش پژوهش

در این مطالعه، از مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوزه آبخیز چالوس رود استفاده شد. HEC-HMS یک مدل هیدرولوژیکی است که توسط ارتش مهندسی ایالات متحده-مرکز مهندسی هیدرولوژی (HEC)^۱ توسعه یافته است. این مدل، یک مدل نیمه توزیعی و مفهومی فیزیک-پایه است که برای شبیه‌سازی فرایندهای رواناب-بارندگی مستمر و مبتنی بر رویداد در محدوده وسیعی از مقیاس فضایی، از هیدرولوژی سیل حوضه رودخانه‌های بزرگ تا رواناب‌های آبریز شهری و طبیعی کوچک طراحی شده است. بسته نرم‌افزاری شامل تبدیل رواناب، تلفات، روندیابی کانال، جریان پایه، پوشش، سطح، شبیه‌سازی بارش-رواناب و تخمین پارامتر می‌باشد. مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS از بسته‌های مختلفی برای نمایش هر جزء از فرایند رواناب رودخانه استفاده می‌کند؛ از جمله مدل‌های جریان پایه، مدل‌های رواناب مستقیم و مدل‌هایی که حجم رواناب را محاسبه می‌کنند. هر مدل اجرا شده یک مدل هواشناسی، مدل حوضه و مشخصات کنترل را با گزینه‌های اجرا ترکیب می‌کند تا نتایج را به دست آورد (Choudhari et al, 2014: 257). در گذشته جهت انجام فرایندهای مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS با استفاده از HEC-GeoHMS و DEM منطقه مورد مطالعه، پردازش انجام می‌شد. HEC-GeoHMS یک فایل ورودی HEMS، مانند حوضه آبریز منطقه مورد مطالعه، شبکه جریان، مرزهای زیر حوضه و پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی را در محیط ArcGIS از طریق یک سری مراحل ایجاد می‌کند. در این تحقیق از ورژن توسعه یافته نرم‌افزار HEC-HMS (4.11) که دارای رابط گرافیکی GIS بوده و نیازمند اکستنشن HEC-GeoHMS نیست، استفاده شده است. لذا توصیه می‌شود به جهت سرعت عمل و دقت شبیه‌سازی و به‌عنوان شیوه نوین از این مدل، محققین از این نسخه مدل هیدرولوژیکی استفاده نمایند. در این مطالعه، برای ارزیابی اثر متقابل بارش-رواناب از طریق مدل HEC-HMS، داده‌های بارندگی روزانه در ایستگاه باران‌سنجی پل ذغال برای دوره ۳۷ ساله (۱۳۶۰-۱۳۹۶) از اداره هواشناسی استان مازندران (به دلیل آخرین آمار ثبت شده) جمع‌آوری

شد. میانگین بارندگی ماهانه در ایستگاه باران سنجی ۲۷/۹۳ میلی متر، میانگین بارندگی سالانه ۳۳۰/۶۴ میلی متر و بیشترین بارندگی عموماً در آبان ماه (۱۳۷/۱ میلی متر) اتفاق افتاد. داده های دبی روزانه نیز از سازمان آب منطقه مازندران از سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۶ جمع آوری شد. پوشش زمین/کاربری زمین (LULC) و نقشه خاک، از ورودی های بسیار مهمی به مدل است زیرا بر محاسبه مقادیر شماره منحنی (CN)^۱ در حوزه آبخیز رودخانه تأثیر می گذارد. شماره منحنی (CN) نیز به نوع خاک، شیب و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه بستگی دارد. مقدار آن از ۳۰ تا ۱۰۰ متغیر است. مقدار کمتر CN، نشان دهنده ضریب رواناب پایین است درحالی که مقدار بالا نشان دهنده ضریب رواناب بالا است. نقشه های خاک و کاربری زمین برای تولید نقشه CN مورد نیاز است. میانگین CN برای هر زیر حوضه با استفاده از معادله زیر محاسبه شد:

$$(CN)_{avg} = \frac{(CN)_i A_i}{A_{Total}} \quad (۱)$$

که در آن؛ i : تعداد زیر حوضه، A_i : مساحت زیر حوضه خاص و A_{Total} : مساحت کل حوضه است.

بر این اساس، نقشه LULC برای حوزه آبخیز چالوس رود از لندست ۸ (OLI)^۲ سال ۲۰۲۴ با استفاده از ArcGIS 10.4.1 تهیه شد. در نهایت، برای نخستین بار مراحل تولید نقشه خاک برای حوضه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار جهانی پایگاه داده خاک جهانی یکسان (HWSD³) انجام شد. پس از اجرای این نرم افزار تحت ویندوز، داده ها به Arc map وارد شد تا نقشه گروه های هیدرولوژیکی خاک منطقه مورد مطالعه تهیه شود. گروه های هیدرولوژیکی خاک (HSGs) معمولاً بر اساس بارندگی، رواناب و نفوذ به ۴ گروه A، B، C و D طبقه بندی می شوند (Derdour et al, 2018: 47). گروه A، بیانگر میزان نفوذ بالا و ظرفیت رواناب کم است. گروه B، نشان دهنده لوم سیلت با نرخ نفوذ متوسط و بافت نسبتاً درشت است. گروه C، نشان دهنده لوم رسی است که سرعت نفوذ کند و بافت نسبتاً ظریفی دارد. به طور کلی، خاک لومی رسی برای رشد هر نوع گیاهی مفید است. خاک های گروه C سرعت انتقال آب متوسطی دارند، درحالی که خاک های گروه D، دارای نفوذ کم و رواناب زیاد هستند. برای تهیه نقشه گروه های هیدرولوژیکی خاک (HSG)، سه گروه خاک Eutric Cambisols با کد ۳۰۲۰، Calcaric Cambisols با کد ۳۰۲۵ و Lithosols با کد ۳۵۰۹ در نقشه خاک منطقه مورد مطالعه شناسایی شدند. برای اجرای مدل بارش- رواناب به یک سری پارامترهای لازم از جمله: تلفات اولیه، تبدیل بارش مازاد به جریان سطحی، تعیین دبی پایه و واسنجی و صحت سنجی مدل نیاز است. به عبارتی، این مدل تلفات، تبدیل جریان و روندیابی را در محاسبه رواناب در نظر می گیرد. همان طور که پیش تر ذکر شد، پس از بررسی داده ها، مدل HEC-HMS با ایجاد چندین پارامتر و یک مدل هواشناسی (اطلاعات بارندگی و تبخیر- تعرق)، نمایه های کنترل (تاریخ و زمان شروع و خاتمه بارش و همچنین گام های زمانی برای محاسبات شبیه سازی) و مدل حوضه (روش های نرخ تلفات بارندگی، تبدیل بارش به رواناب و روندیابی جریان)، از طریق پارامترهای ورودی جهت به دست آوردن نتایج اجرا شد.

نرخ تلفات بارندگی

برای محاسبه تلفات بارندگی، از روش تلفات SCS-CN استفاده شده است. این روش به دلیل در دسترس بودن داده ها برای منطقه و عدم پیچیدگی در طبیعت انتخاب شد (Tassew et al. 2019: 5). روش شماره منحنی سرویس حفاظت خاک (SCS-CN) که بر اساس بیلان آب استوار است، برای محاسبه حجم رواناب مطابق ویژگی خاک و شرایط کاربری

1. Curve Number

2. Operational Land Imager

3. Harmonized World Soil Database viewer

زمین همان طور که در معادله ذیل نشان داده شده است انتخاب شد (Chiang et al, 2022: 4; Aqnouy et al, 2023: 6).

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - I_a)^2}{(R_{\text{day}} - I_a + S)}, I_a = 0.2S, S = \frac{25400}{\text{CN}} - 254 \quad (2)$$

که در آن‌ها؛ Q_{surf} : رواناب انباشته یا ارتفاع بارش مازاد (mm)، R_{day} : عمق (ارتفاع) بارندگی روزانه (mm)، I_a : تلفات اولیه و S : حداکثر پتانسیل ذخیره حوضه (mm) است.

تبدیل بارش به رواناب

برای تبدیل بارندگی اضافی در حوضه به یک هیدروگراف در خروجی از روش تبدیل بارش به رواناب استفاده شد. این یک روش ابتکاری است که به زمان تأخیر و درصد سطح غیرقابل نفوذ حوضه وابسته دارد (Tassew et al. 2019: 6; Barman & Bhattacharjya, 2020: 2). در این مطالعه، تبدیل بارش به رواناب سطحی توسط هیدروگراف واحد SCS انجام شد. مدل هیدروگراف واحد (UH) را پیشنهاد کرد و در برنامه HEC-HMS گنجانده شده است. محققان مختلفی از روش SCS-UH برای بخش روندیابی رواناب در حوضه آبخیز مدل استفاده کردند (Belayneh et al, 2020: 2023). سپس از نتیجه این فرایند برای محاسبه هیدروگراف رواناب مستقیم برای زیر حوضه استفاده شد. روش هیدروگراف واحد SCS تنها به یک پارامتر زمان تأخیر بین بارندگی و رواناب در زیر حوضه برای هر زیر حوضه نیاز دارد که T_c (زمان تمرکز) و Q_p (دبی اوج) را برای تغییر مقیاس هیدروگراف واحد بدون بعد SCS-CN محاسبه می‌کند که روابط آن‌ها (T_c و Q_p) به شرح ذیل است:

$$Q_p = 2.08 \frac{A}{T_p}, T_p = \frac{\Delta t}{2} + T_{\text{lag}} \quad (3)$$

که در آن‌ها؛ A : مساحت آبخیز، Δt : مدت زمان بارش مازاد و T_{lag} : زمان تأخیر (برحسب ساعت) است. زمان تأخیر (T_{lag}) تنها ورودی این روش است. این زمان از مرکز ثقل بارش مازاد تا اوج هیدروگراف است و برای هر حوضه بر اساس زمان تمرکز (T_c) محاسبه می‌شود. در این مطالعه، زمان تمرکز حوضه بر اساس روابط ارائه شده کریچ و SCS محاسبه شد و با استفاده از رابطه پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا مقدار زمان تأخیر محاسبه شد (Zolghadr et al, 2022; USDA, 2010):

$$T_c = 0.0195 \times L^{0.77} \times S^{-0.385} \quad (4)$$

$$T_{\text{lag}} = \frac{L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900Y^{0.5}}, T_c = 1.67T_{\text{lag}} \quad (5)$$

که؛ T_c : زمان تمرکز برحسب ساعت، Y : متوسط شیب حوضه (%)، L : طول رودخانه اصلی برحسب متر (رابطه ۴) و فوت (رابطه ۵) و S : شیب متوسط وزنی آبراهه اصلی به متر بر متر (رابطه ۴) و حداکثر پتانسیل نگهداشت (mm) (رابطه ۵) است.

روندیابی جریان

همان طور که امواج رواناب سیلاب از طریق بازه کانال عبور می‌کند، به دلیل اثرات ذخیره کانال ضعیف می‌شود. مدل روندیابی موجود در نرم افزار HEC-HMS، روش ماسکینگام است که ساده است و نیازی به ورودی‌های متعدد ندارد (Tassew et al. 2019: 6). روش ماسکینگام یک تکنیک رایج روندیابی جریان یکپارچه است. در این مدل، واسنجی برای دو پارامتر X و K مورد نیاز است. X یک وزن بدون بعد با ضریب ثابت است که بین ۰ تا ۰/۵ متغیر است و نشان دهنده

تأثیر نسبی جریان بر سطوح ذخیره است. می توان فرض کرد که مقدار برابر با ۰.۱ به عنوان مقدار اولیه پارامترهای واسنجی است که در طی این فرآیند تصحیح شد و هر چه به صفر نزدیک تر باشد تضعیف بیشتری صورت می گیرد و برعکس. K پارامتری است که دارای واحد زمان بوده و مقدار آن بین ۱ تا ۵ ساعت است. به طور خلاصه پارامترهای مورد نیاز به عنوان ورودی برای اجرای مدل HEC-HMS در جدول ذیل آمده است.

جدول ۱. پارامترهای ورودی مدل HEC-HMS

ردیف	مدل	روش	پارامتر مورد نیاز (واحد)
۱	نرخ تلفات بارندگی	*SCS-CN	جذب اولیه (mm)، سطوح غیرقابل نفوذ (%) و شماره منحنی
۲	تبدیل بارش به رواناب ^۱	هیدروگراف واحد SCS	زمان تأخیر ^۲ (min)
۳	روش روندیابی ثابت	ماسکینگام	زمان جریان ^۳ (K) و وزن بدون بعد ^۴ (X)

* در این روش برای هر زیر حوضه بر اساس نوع کاربری و نفوذپذیری خاک، علاوه بر CN، درصدی از حوضه که غیرقابل نفوذ است، به مدل معرفی می گردد.

پارامترهای محاسبه شده مانند پارامترهای تلفات (شماره منحنی، تلفات اولیه و درصد نفوذناپذیری)، پارامترهای تبدیل (زمان تأخیر) و پارامترهای روندیابی (k و x)، به زیر حوضه ها و بازه ها از طریق جدول توصیفی GIS به صورت دستی اضافه شدند. برای واسنجی و صحت سنجی مدل HEC-HMS از داده های تاریخی دوره های مختلف استفاده شد. داده های بارندگی و رواناب روزانه از سال های ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۰ (۱۹۸۱-۲۰۱۱) برای واسنجی و از سال های ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۶ (۲۰۱۲-۲۰۱۷) برای صحت سنجی استفاده شد. خصوصیات LULC و خاک زیر حوضه در طول این دو دوره بدون تغییر در نظر گرفته شد. تجزیه و تحلیل حساسیت نیز برای شناسایی پارامترهای مورد انتظار و برای دقت مورد نیاز انجام شد. برای ارزیابی عملکرد مدل نیز از ضرایب تعیین R^2 و Nash-Sutcliffe به شرح ذیل استفاده شد (محسنی و همکاران، ۱۴۰۲: ۴۲):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)(S_i - \bar{S})}{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)^{0.5} (\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2)^{0.5}} \right]^2 \quad (6)$$

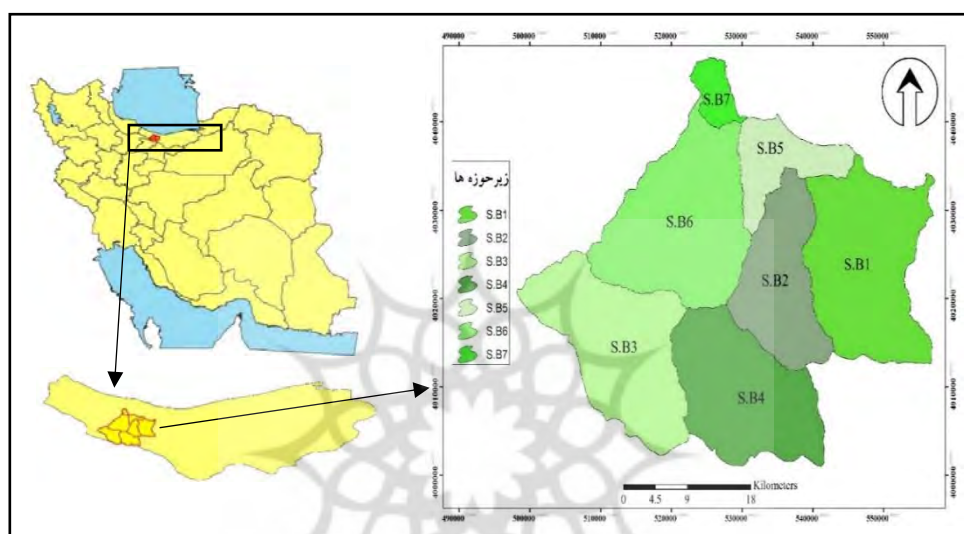
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

که در آن ها؛ O_i : مقدار مشاهده ای، S_i : مقدار شبیه سازی شده، $\bar{O}$: میانگین مقدار مشاهده ای، $\bar{S}$: میانگین مقدار شبیه سازی شده و n: تعداد مشاهدات است. مقادیر عددی ضریب NSE از منفی بی نهایت تا ۱ (مقدار بهینه) متغیر بوده و هرچه به عدد ۱ نزدیک تر باشد بیانگر آن است که مدل در منطقه مورد مطالعه برآورد بهتری داشته و کارایی لازم را داراست. عموماً اگر شاخص نش- ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ باشد؛ کارایی مدل عالی، اگر بین ۰/۷۵-۰/۳۶ باشد رضایت بخش و اگر کمتر از ۰/۳۶ باشد کارایی مدل غیرقابل قبول فرض می شود (Nash & Sutcliffe, 1970: 282). ضریب رگرسیون (R^2) نیز که از ۰ تا ۱ تغییر می کند، شاخص قدرتمندی برای بیان رابطه مناسب بین مقادیر شبیه سازی و مشاهده ای است. مقادیر پیشنهادی NSE در مطالعات هیدرولوژیک و فرآیندهای مربوط به انتقال آلاینده ها در مقیاس ماهانه، باید از ۰/۵ بزرگ تر باشد تا بتوان نتایج مدل را قابل قبول فرض کرد که همین معیار نیز برای ضریب همبستگی مورد استفاده قرار می گیرد (Moriassi et al, 2007: 890).

1. Runoff Transform
2. Lag time
3. Travel time
4. Dimensionless weight

محدوده مورد مطالعه

حوزه آبخیز چالوس رود با طول شرقی ۵۰ درجه و ۵۸ دقیقه ۲۲ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه ۲۵ ثانیه و عرض شمالی ۳۶ درجه و ۰۸ دقیقه ۵۶ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه ۰۱ ثانیه با مساحت ۱۷۲۲/۲ کیلومترمربع از شمال تا جنوب شهرستان چالوس را در دریای مازندران در برگرفته و شامل ۶ زیر حوضه کوچک و بزرگ می‌باشد. رود چالوس، رودی دائمی در غرب مازندران است که از دامنه شمالی ارتفاعات کندوان و طالقان سرچشمه گرفته و پس از طی حدود ۷۲ کیلومتر در کنار چالوس در نزدیکی ده فرج‌آباد به دریای خزر می‌ریزد. این رود دارای دو شاخه اصلی زانوس و میخ‌ساز است. ارتفاع آن از حداقل ۳۳- متر تا حداکثر ۴۲۶۱ متر از سطح دریا متغیر است. چالوس، مرزن آباد و شهرآرا مراکز مهم سکونت این آبخیز را تشکیل می‌دهند. شکل شماره ۴، موقعیت حوزه آبخیز چالوس رود را در ایران و استان مازندران نشان می‌دهد.

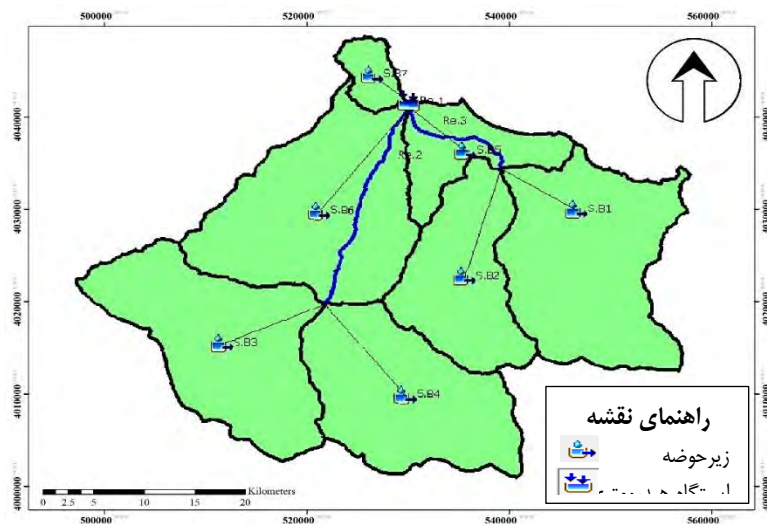


شکل ۱. موقعیت آبخیز مورد مطالعه در ایران و استان مازندران

یافته‌ها

تحلیل نقشه‌های پایه

در شبیه‌سازی بارش- رواناب حوزه آبخیز چالوس رود، پس از اجرای مدل از طریق داده‌های ثبت شده بارش روزانه، نیاز به جداسازی زیر حوضه‌ها و وارد کردن داده‌ها و اطلاعات آن‌ها در بخش‌های مشخص است. از این نظر تهیه اطلاعات و داده‌های مورد نیاز مدل HEC-HMS بر پایه تقسیم‌بندی حوضه‌ها به واحدهای کوچک‌تر بر اساس نحوه اتصال شبکه‌های زهکشی موجود استوار است. بر همین اساس، این حوضه به ۷ زیر حوضه فرعی بر اساس ویژگی‌های فیزیکی، یعنی LULC و توزیع خاک با استفاده از رابط GIS تقسیم‌بندی شده و تحلیل داده‌های فیزیوگرافی نیز بر مبنای این زیر حوضه‌ها محاسبه و ارزیابی شده است. این زیر حوضه‌ها (S.B1، S.B2، S.B3، S.B4، S.B5، S.B6 و S.B7) در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. همچنین برخی از مهم‌ترین پارمترهای فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه به شرح جدول ۲ ارائه شده است.

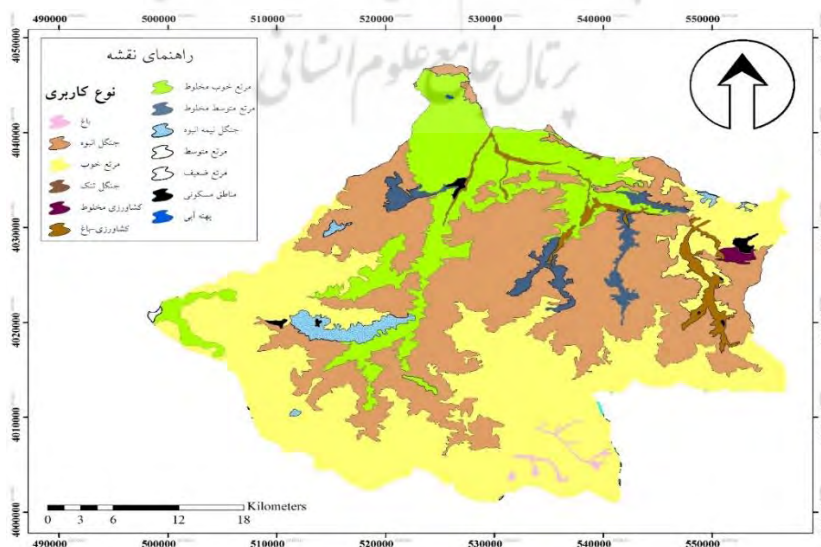


شکل ۲. شماتیک زیر حوزه های آبخیز چالوس رود حاصل از مدل HEC-HMS

جدول ۲. برخی از مهم ترین پارامترهای فیزیوگرافی زیر حوزه های آبخیز چالوس رود

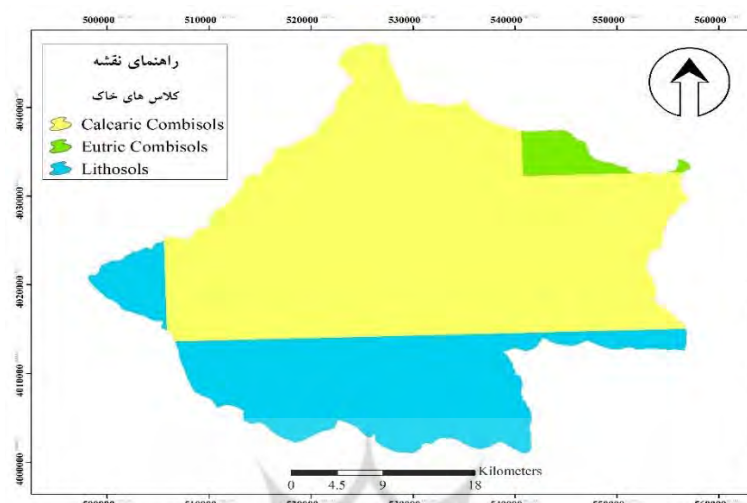
زیر حوضه	مساحت (کیلومترمربع)	طول آبراهه اصلی (کیلومتر)	شیب متوسط حوزه (درصد)
S.B1	308/74	34/9	35/64
S.B2	190/67	27/78	48/82
S.B3	292/09	29/32	57/95
S.B4	263/27	36/63	50/77
S.B5	99/290	21/33	35/92
S.B6	325/46	39/4	46/46
S.B7	34/9	10/62	29/97
کل حوضه	1514/42	196/62	46/49

مطابق آنچه در روش پژوهش ذکر شد، نقشه کاربری تهیه شد و این نقشه نشان داد منطقه مورد مطالعه دارای ۱۳ نوع کاربری است که در شکل ۳ نشان ارائه شده است. نقشه LULC تهیه شده حاکی از آن است که بیشترین مساحت منطقه به اراضی مرتعی (خوب و مخلوط) و جنگلی (انبوه) اختصاص دارد که ضریب رواناب در محدوده متوسط تا زیاد است. مساحت مناطق مسکونی، اراضی کشاورزی و باغی در مقایسه با اراضی مرتعی و جنگلی بسیار ناچیز است.



شکل ۳. نقشه کاربری حوزه آبخیز چالوس رود

همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، به دلیل عدم نقشه خاک منطقه مورد مطالعه، در این پژوهش از نقشه خاک جهانی (فائو) و نرم‌افزار جهانی پایگاه داده خاک جهانی یکسان بهره گرفته شد. بر این اساس، بیشترین درصد مساحت مربوط به خاک Calcaric Cambisols می‌باشد. خاک غالب در حوضه رودخانه DOMSOIL است و HSG یا گروه‌های هیدرولوژیکی خاک بر اساس FAO تعیین شد (شکل ۴ و جدول ۳).



شکل ۴. نقشه HSG خاک منطقه مورد مطالعه

جدول ۳. طبقه‌بندی خاک حوزه آبخیز چالوس رود

نام طبقه	گروه هیدرولوژیکی خاک	درصد مساحت	مساحت (هکتار)	مشخصات بافت
Eutric Cambisols	A	۲/۴۴	۳۷۰۰	Loam
Calcaric Cambisols	A	۶۹/۳	۱۰۴۹۵۸	Loam
Lithosols	C	۲۸/۲۵	۴۲۷۹۱/۸	Clay Loam

شبیه‌سازی بارش-روناب توسط مدل HEC-HMS

حوضه بر اساس شبکه رودخانه به ۷ زیر حوضه تقسیم شد. روناب از زیر حوضه‌ها با استفاده از روش‌های SCS-CN، SCS Unit Hydrograph و Muskingum به ترتیب برای محاسبات تلفات، تبدیل و مسیریابی برآورد شد. بر اساس نقشه‌های LULC و خاک تهیه‌شده، روابط ارائه شده و مشخص شدن شماره منحنی‌های هر یک از زیر حوضه‌ها، مابقی داده‌های اولیه طبق جدول زیر به مدل وارد شدند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که در بخش عمده، به دلیل پتانسیل روناب نه‌چندان زیاد حوضه رودخانه، مقدار CN چندان زیاد نیست.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای محاسبه‌ای ورودی به مدل

زیر حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	مقدار CN	تلفات اولیه (میلی متر)	زمان تأخیر (دقیقه)
S.B1	308/74	۴۱	۷۳/۱۰	۳۹۹/۵۳
S.B2	190/67	۳۳	۱۰۳/۱۴	۳۵۷/۰۹
S.B3	292/09	۳۵	۹۴/۳۴	۳۲۲/۵
S.B4	263/27	۳۷	۸۶/۵۰	۳۸۸/۶۸
S.B5	99/290	۴۰	۷۶/۲	۲۷۵/۸
S.B6	325/46	۳۵	۹۴/۳۴	۴۵۶/۲۲
S.B7	34/9	۴۴	۴۶/۶۵	۱۵۵/۲۵

سپس داده های بارش و دبی در قالب فایل اکسل به صورت روزانه وارد مدل شدند. به طوری که داده های دبی و بارندگی روزانه به دو بخش واسنجی و صحت سنجی تقسیم شدند. از بین کل داده ها، داده سال های ۱۳۹۰-۱۳۶۰ برای واسنجی و داده های ۱۳۹۱-۱۳۹۶ برای صحت سنجی مدل انتخاب شدند. پس از ورود داده های فوق در جهت تنظیم پارامترهای تبدیل بارش به رواناب، روندیابی جریان و نرخ تلفات بارندگی، مدل برای دو دوره مورد نظر اجرا شد. به عبارتی با تنظیم روش های مورد استفاده پارامترهای تلفات (روش شماره منحنی)، انتقال (روش هیدروگراف واحد SCS) و روندیابی (روش ماسکینگام) مدل اجرا شد. به طوری که، در طول مدل سازی با استفاده از HEC-HMS، مشاهده شد که پارامترهای اصلی که بر مقادیر رواناب تأثیر می گذارند، عدد منحنی و سپس نگهداشت اولیه است. لذا، زمان تأخیر و درصد سطح نفوذناپذیر کمتر تحت تأثیر نتایج رواناب قرار گرفت.

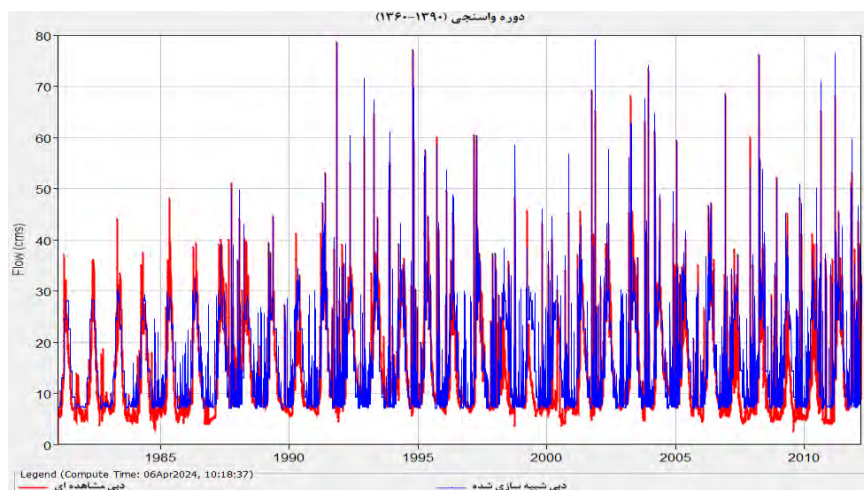
مقایسه هیدروگراف شبیه سازی شده و مشاهده ای در مرحله واسنجی و صحت سنجی مدل

نتایج معیارهای ارزیابی دقت مدل در دوره واسنجی و صحت سنجی با مقایسه دبی شبیه سازی شده روزانه با دبی مشاهده ای در ایستگاه هیدرومتری پل ذغال در جدول ۵ ارائه شد.

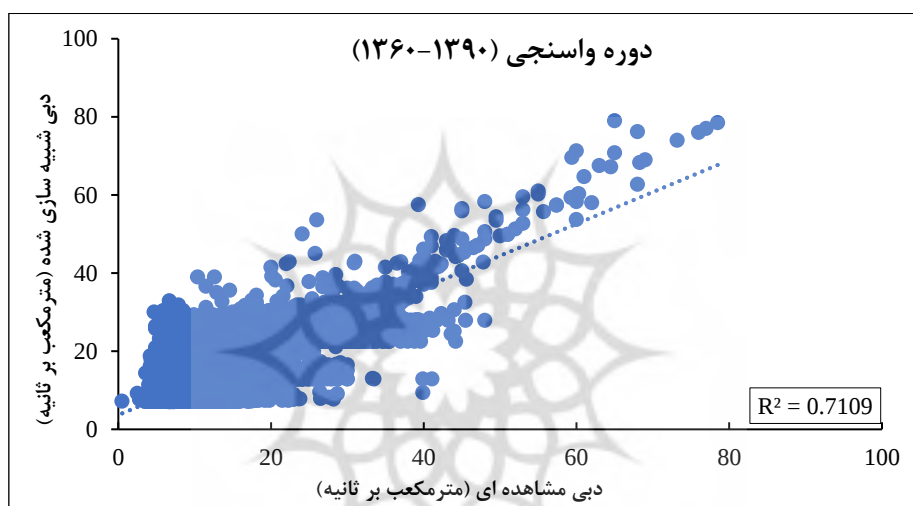
جدول ۵. نتایج مقادیر معیارهای ارزیابی دقت مدل در دوره واسنجی و صحت سنجی

پارامترها	دوره واسنجی	دوره صحت سنجی
ضریب تعیین (R^2)	۰/۷۱	۰/۶۴
ضریب نش- ساتکلیف (NSE)	۰/۶۷	۰/۷۲

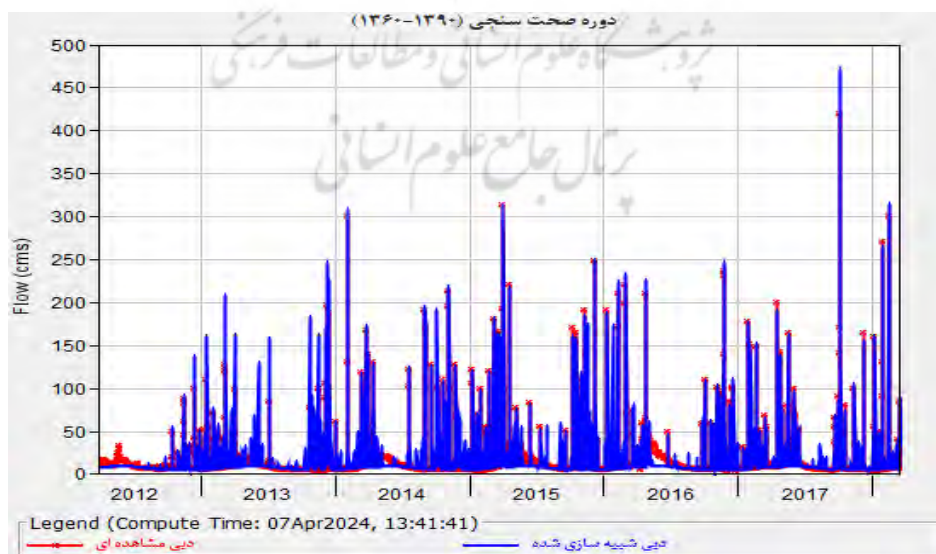
در این مدل که به طور خودکار برای ایستگاه پل ذغال (Re.1- شکل ۲)، جریان بر اساس داده های بارندگی و دبی روزانه ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۰ واسنجی شد، زیر حوضه ها همگن فرض شدند و پارامترهای مدل با توجه به نوع خاک و الگوی کاربری اراضی در زیر حوضه تخصیص داده شدند. تجزیه و تحلیل آماری (ضرایب تعیین و نش- ساتکلیف برابر ۰/۷۱ و ۰/۶۴) سری زمانی دبی شبیه سازی شده و مشاهده ای و نمودار پراکندگی در دوره واسنجی (۱۳۶۰ تا ۱۳۹۰)، نشان داد که مدل هیدرولوژیکی برای ایستگاه پل ذغال، هیدروگراف روزانه دبی مشاهده ای را به خوبی شبیه سازی کرد. چراکه، مقدار دبی پیک شبیه سازی شده در مدل در مقایسه با دبی مشاهده ای ایستگاه خروجی در اکثر سال ها تطابق قابل قبولی داشت (اشکال ۵ و ۶). نتیجه صحت سنجی مدل HEC-HMS برای ایستگاه پل ذغال نیز در شکل ۷ قابل مشاهده است. هیدرو گراف های جریان مشاهده ای و شبیه سازی (تولید) شده کاملاً موافق یکدیگر هستند و ظرفیت مدل را برای تخمین جریان بر اساس داده های اندازه گیری شده بارندگی در ویژگی های حوضه مشابه نشان می دهند. با این حال، مانند دوره واسنجی، دوره صحت سنجی نیز بیانگر تطابق خوب اوج جریان تحت پیش بینی است (شکل ۸).



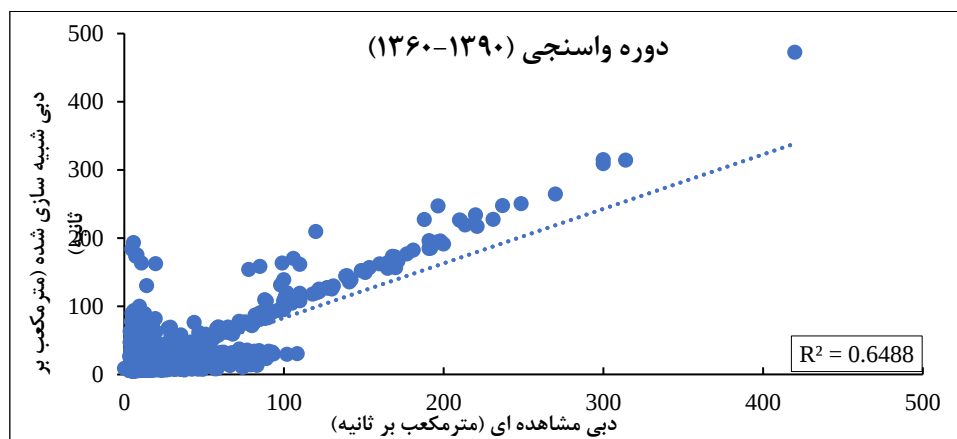
شکل ۵. عملکرد مدل HEC-HMS از نظر مقایسه دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده دوره واسنجی



شکل ۶. نمودار پراکندگی مدل HEC-HMS دبی مشاهده‌ای نسبت به شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی



شکل ۷. عملکرد مدل HEC-HMS از نظر مقایسه دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده دوره صحت‌سنجی



شکل ۸. نمودار پراکندگی مدل HEC-HMS دبی مشاهده ای نسبت به شبیه سازی شده در مرحله صحت سنجی

در جدول ۶ نیز نتایج مقادیر جریان برآوردی حاصل از مدل در هر یک از زیر حوزه های آبخیز چالوس رود ارائه شده است.

جدول ۶. مقادیر جریان برآوردی حاصل از مدل در هر یک از زیر حوزه های آبخیز چالوس رود

کد زیر حوزه	مساحت زیر حوزه (km ²)	دبی اوج (مترمکعب بر ثانیه)	حجم سیل (هزار مترمکعب)
S.B1	308/74	۹۵	۴۹۸۱۵۱
S.B2	190/67	۵۸/۹	۳۰۷۰۷۴
S.B3	292/09	۹۱/۱	۴۸۶۴۳۵
S.B4	263/27	۸۰/۴	۴۱۳۹۶۷
S.B5	99/290	۳۰/۵	۱۵۹۹۰۸
S.B6	325/46	۱۰۱/۳	۵۳۸۴۴۴
S.B7	34/9	۱۶/۷	۱۳۷۶۷۵۰

بحث

با تجزیه و تحلیل حساسیت روی دو پارامتر مدل (روش تلفات و روش انتقال)، پارامترهایی مانند جریان پایه و درصد تلفات نسبی به دلیل رابطه خطی آن ها با تولید رواناب در تحلیل حساسیت لحاظ نشدند. این مدل به طور مکرر با افزایش و کاهش ۲۵٪ و ۲۵٪ از مقدار پایه هر پارامتر اجرا شد و در عین حال تمام پارامترهای دیگر را در مقادیر شروع اسمی ثابت نگه داشت. سپس هیدروگراف های حاصل از سناریوهای پارامترهای مدل تنظیم شده با هیدروگراف مدل پایه مقایسه شدند. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که دو پارامتر (زمان تمرکز و ضریب ذخیره) دارای حساسیت بالاتری هستند.

هیدروگراف های شبیه سازی شده و مشاهده ای برای بازه های دوره واسنجی برای هر دو هیدروگراف (شبیه سازی شده و مشاهده ای) تقریباً با روند و اشکال مشابه نشان داده شده است. با این حال، دبی اوج هیدروگراف های شبیه سازی شده بیشتر از نمونه های مشاهده ای است. نتایج مدل در این مطالعه برازش قابل قبولی را بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهدات نشان داد. روند و شکل هیدروگراف سازگار به نظر می رسد. مقادیر R^2 برای دوره های واسنجی برای بخش خروجی ۰/۷۱ بود. در دوره واسنجی، جریان شبیه سازی شده کمی بیشتر از مقادیر مشاهده شده طی سال های ۲۰۱۲-۱۹۹۳ بود، اما قبل از آن کمی کمتر از مقادیر مشاهده شده بود. در دوره صحت سنجی، جریان شبیه سازی شده و مشاهده شده در تمامی سال ها (به جز سال ۲۰۱۲) تطابق بسیار عالی را نشان داد. تفاوت اندک در داده های شبیه سازی شده و مشاهده ای ممکن است ناشی از نقشه کاربری اراضی باشد که توسط داده های Landsat در سال ۲۰۲۴ تهیه شده و برای کل دوره مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. این نتیجه در راستای تحقیق همدان و همکاران (۲۰۲۱)، برای منطقه شمالی عراق است که نشان دادند

مدل در شبیه‌سازی شکل هیدروگراف و روند تغییرات هیدروگراف عملکرد مناسبی دارد، با اینکه در برآورد دبی اوج دارای بیش تخمینی است. از طرف دیگر، کم تخمینی و بیش تخمینی جریان توسط مدل HEC-HMS در مطالعات ورما و همکاران (۲۰۱۰) در شرق هند و چاتورانگیا و همکاران (۲۰۲۲) در یک منطقه گرمسیری تایلند نیز اشاره شده است. همچنین، هیدروگراف روزانه با جریان دبی مشاهده شده شبیه‌سازی شد. تجزیه و تحلیل آماری (ضریب تعیین و نش-ساکتلیف برابر ۰/۶۴ و ۰/۷۲) در دوره صحت‌سنجی نیز نشان داد که مدل هیدرولوژیکی توسعه یافته برای ایستگاه پل ذغال برای این دوره نیز به خوبی عمل کرده است. مقادیر شاخص NSE برآوردی، نشان‌دهنده تطابق مناسب هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است که در مطالعات نتراجان و رادهاکریشنان (۲۰۱۹)، موراس و همکاران (۲۰۱۸) و میرقاسمی و همکاران (۱۴۰۲) نیز ارائه شده است. در این راستا، مطالعات تاسو و همکاران (۲۰۱۹) و گبری (۲۰۱۵) نیز مدل HEC-HMS را به عنوان مدل مناسب شبیه‌سازی هیدرولوژیکی برای حوضه‌های آبریز در حوضه بالایی نیل آبی معرفی کردند. بر اساس پارامترها و مقادیر کالیبره شده، مدل صحت‌سنجی شد و عملکرد کمی بهبود یافته است. بر اساس نمودار پراکنش دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه پل ذغال، مدل در برآورد دبی‌های کم عملکرد مناسبی داشته، ولی در دبی‌های بالاتر نسبت به مشاهداتی کم تخمینی دارد. به طور کلی، الگوی جریان شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی با مشاهده‌ای داشت. برای بررسی دقت مدل، یک رگرسیون خطی بین جریان‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای جریان برای واسنجی و صحت‌سنجی برازش داده شد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، ضرایب تعیین در حین واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۶۵ بود. از طرفی، نکته قابل توجه در فرایند شبیه‌سازی بارش-رواناب، دسترسی به داده‌های مشاهداتی بارش-رواناب با کیفیت خوب است. نتیجه مشابهی توسط باریوسا (۲۰۱۹)، از هفت روش مختلف RMSE، RSR، NSE، PBIAS، R^2 و KGE برای بررسی عملکرد مدل HEC-HMS به دست آمد. محقق نتیجه گرفت که مدل HEC-HMS فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه تحت بررسی را به طور کارآمد نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که تقسیم‌بندی یک حوضه منجر به بهبود عملکرد مدل HEC-HMS بدون تفاوت قابل توجه در ویژگی‌های فیزیوگرافی نمی‌شود. به عنوان مثال، مقادیر R^2 بین ۰/۷ تا ۰/۷۳ برای دو زیر حوضه تا ۰/۷۳ برای ۳۲ زیر حوضه متغیر بود. با توجه به موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که مدل عملکرد قابل توجهی دارد و می‌توان شبیه‌سازی را رضایت‌بخش ارزیابی کرد. در این راستا، کاکل و همکاران (۲۰۲۳) و حیدری‌چناری و همکاران (۱۴۰۱) نیز بیان کردند که در صورت وجود داده‌های بارش-رواناب مناسب، می‌توان عملکرد مدل را با دقت بیشتر ارزیابی کرده و نتایج بهتری را ارائه کرد. از این رو، ضروری است که در مدل‌سازی فرایند بارش-رواناب عدم قطعیت‌های ناشی از داده، مدل و کاربر نیز تحلیل شود.

نتیجه‌گیری

مطالعات هیدرولوژیکی برای مدیریت منابع آب و محیط‌زیست مهم و ضروری است. تقاضا از جامعه در مورد قابلیت‌های پیش‌بینی چنین مطالعه و تجزیه و تحلیل پارامترهای هیدرولوژیکی بیشتر و بالاتر می‌شود، که منجر به نیاز به تقویت نظریه‌های تحقیقاتی موجود و حتی توسعه نظریه‌های جدید می‌شود. این مطالعه که در حوزه آبخیز چالوس رود استان مازندران انجام شد، شبیه‌سازی بارش-رواناب را با استفاده از جدیدترین ورژن مدل HEC-HMS و بدون استفاده از اکستشن HEC-GeoHMS مدنظر قرار داد. در ایستگاه هیدرومتری پل ذغال، جریان خروجی مشاهده‌ای، واسنجی و صحت‌سنجی شد. نتایج نشان‌دهنده تطابق خوبی بین جریان‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است و R^2 برای واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۶۴ بود. همبستگی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای خوب بود، اما حجم کل ذخیره

سلیمانزاده، محمدعلی؛ محسنی، مرضیه و بختیاری، سمیه. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی رواناب و تأثیر تغییر کاربری اراضی بر آن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل HEC-HMS (مطالعه موردی: حوزه آبخیز هلیل‌رود). *ترویج و توسعه آبخیزداری*، ۸ (۲۸)، ۳۷-۴۷.

محسنی، بهروز؛ مهدوی، محمدجواد و قربانی‌فرد، مهدی. (۱۴۰۲). ارزیابی دقت نقشه‌های خاک جهانی و منطقه‌ای در پیش‌بینی جریان با استفاده از مدل SWAT حوزه آبخیز تالار استان مازندران. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۱۳ (۲)، ۳۷-۵۳. [Doi: 10.30488/GPS.2023.379075.3608](https://doi.org/10.30488/GPS.2023.379075.3608)

معصوم زاده، سجاد و فتحیان، حسین. (۱۳۹۵). تفکیک جریان پایه از رواناب کل در حوضه دز با استفاده از مدل HEC-HMS. *سومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در مهندسی عمران، معماری و مدیریت شهری. دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ۱۳ ص.*

میرزایی، شهرناز؛ سعدالدین، امیر؛ بهره‌مند، عبدالرضا؛ اونق، مجید و مصطفی‌زاده، رئوف. (۱۴۰۲). کارایی مدل هیدرولوژیکی-HEC-HMS در شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در آبخیزهای بالادست شهر گنبد. *اکو هیدرولوژی*، ۱۰ (۳)، ۳۵۵-۳۷۷. [Doi: 10.22059/ije.2023.359860.1734](https://doi.org/10.22059/ije.2023.359860.1734)

میرقاسمی، سیدحمید؛ بانژاد، حسین و فریدحسینی، علیرضا. (۱۴۰۱). کاربرد سنجش‌ازدور در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و تعیین حد بستر رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه ارداک). *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی*، ۱۴ (۱)، ۲۴-۴۸. [Doi: 10.30495/girs.2023.685799](https://doi.org/10.30495/girs.2023.685799)

وکیلی، شبنم و مقدم‌نیا، علیرضا. (۱۴۰۱). بررسی مقایسه‌ای مدل بارش- رواناب HEC-HMS با روش‌های تجربی مختلف برآورد سیلاب. *علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۶ (۵۸)، ۳۲-۴۱.

نصرتی، کاظم؛ حسین‌زاده، محمد مهدی و ایمنی، سپیده. (۱۳۹۶). کاربرد تجزیه مؤلفه‌های اصلی در تعیین عوامل مؤثر بر تولید رواناب. *مجله آمایش جغرافیایی فضا*، ۷ (۲۴)، ۶۱-۷۱.

References

- Aliye, M.R., Aga, A.O., Tadesse, T., & Yohannes, P. (2020). Evaluating the Performance of HEC-HMS and SWAT Hydrological Models in Simulating the Rainfall-Runoff Process for Data Scarce Region of Ethiopian Rift Valley Lake Basin. *Open Journal of Modern Hydrology*, 10 (4), 105-122. [Doi: 10.4236/ojmh.2020.104007](https://doi.org/10.4236/ojmh.2020.104007)
- Aqnouy, M., Ahmed, M., Ayele, G.T., Bouizrou, I., Bouadila, A., & El-Messari, J.E.S. (2023). Comparison of hydrological platforms in assessing rainfall-runoff behavior in a Mediterranean watershed of Northern Morocco. *Water*, 15 (3), 447. [Doi: 10.3390/w15030447](https://doi.org/10.3390/w15030447)
- Barbosa, J., Fernandes, A., Lima, A. (2019). The influence of spatial discretization on HEC-HMS modelling: A case study. *International Journal of Hydrology*, 3, 442-449. [DOI: 10.15406/ijh.2019.03.00209](https://doi.org/10.15406/ijh.2019.03.00209)
- Barman, S., & Bhattacharjya, R.K. (2020). ANN-SCS-based hybrid model in conjunction with GCM to evaluate the impact of climate change on the flow scenario of the River Subansiri. *Journal of Water and Climate Change*, 11 (4), 1150-1164. [Doi: 10.2166/wcc.2019.221](https://doi.org/10.2166/wcc.2019.221)
- Belayneh, A., Sintayehu, G., Gedam, K., & Muluken, T. (2020). Evaluation of satellite precipitation products using HEC-HMS model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 2015-2032. [Doi: 10.1007/s40808-020-00792-z](https://doi.org/10.1007/s40808-020-00792-z)
- Birkel, C., & Barahona, A.C. (2019). Rainfall-Runoff Modeling: A Brief Overview. *Earth Systems and Environmental Sciences*. [Doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11595-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11595-7)
- Cacal, J.C., Austria, V.A., & Taboada, E.B. (2023). Extreme event-based rainfall-runoff simulation utilizing GIS techniques in Irawan watershed, Palawan, Philippines. *Civil Engineering Journal*, 9 (1), 220-232. [Doi: 10.28991/CEJ-2023-09-01-017](https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-01-017)
- Chathuranika, I.M., Gunathilake, M.B., Baddewela, P.K., Sachinthanie, E., Babel, M.S., Shrestha, S., Jha, M.K., & Rathnayake, U.S. (2022). Comparison of two hydrological models, HEC-HMS and SWAT in runoff estimation: Application to Huai Bang Sai Tropical Watershed, Thailand. *Fluids*, 7 (267), 1-17. [Doi: 10.3390/fluids7080267](https://doi.org/10.3390/fluids7080267)

- Chiang, S., Chang, C.H., & Chen, B. (2022). Comparison of rainfall-runoff simulation between Support Vector Regression and HEC-HMS for a rural watershed in Taiwan. *Water*, 14 (2), 191. [Doi: 10.3390/w14020191](https://doi.org/10.3390/w14020191)
- Choudhari, K., Panigrahi, B., & Paul, J.C. (2014). Simulation of rainfall-runoff process using HEC- HMS model for Balijore Nala watershed, Odisha, India. *International Journal of Geomatics Geosciences*, 5 (2), 253-265. [Doi: 10.24018/ejers.2019.4.4.927](https://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.4.927)
- 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), 45–55. [Doi: 10.2478/jwld-2018-0005](https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0005)
- Gayathri, K.Devia., Ganasri, B.Pa., & Dwarakish, G.Sa. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001 – 1007. [Doi: 10.1016/j.aqpro.2015.02.126](https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126)
- Gebre, S. L. (2015). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation of Upper Blue Nile River Basin. *Hydrology Current Research* 6(2). [Doi:10.4172/2157-7587.1000199](https://doi.org/10.4172/2157-7587.1000199)
- Gumindoga, W., Rwasoka, D.T., Nhapi, I., & Dube, T. (2017). Ungauged runoff simulation in Upper Manyame Catchment, Zimbabwe: Application of the HEC-HMS model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100 (371-382). [Doi: 10.1016/j.pce.2016.05.002](https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.05.002)
- 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 (58), 1-17. [Doi: 10.3390/hydrology8020058](https://doi.org/10.3390/hydrology8020058)
- Heidari-Chenari, F., Fazloulou, R., & Nikzad-Tehrani, E. (2023). Calibration and evaluation of HEC-HMS hydrological model parameters in simulation of single Rainfall-Runoff events (Case study: Tajan Watershed). *Watershed Management Research*, 13 (26), 69-81. [Doi: 10.52547/jwmr.13.26.69](https://doi.org/10.52547/jwmr.13.26.69) [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. [Doi: 10.1007/s12205-013-0348-3](https://doi.org/10.1007/s12205-013-0348-3)
- Kazezyilmaz-Alhan, C.M., Yalcin, K., Javanshour, K., Aytekin, M., & Gulbaz, S. (2021). A hydrological model for Ayamama watershed in Istanbul, Turkey, using HEC-HMS. *Water Practice & Technology*, 16 (1), 154–161. [Doi: 10.2166/wpt.2020.108](https://doi.org/10.2166/wpt.2020.108)
- Kumar, S., & Pandey, K.K. (2023). Rainfall-Runoff Simulation & Modeling Using HEC-HMS Model. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 10(2), 667-673. [Doi:10.53555/sfs.v10i2.1209](https://doi.org/10.53555/sfs.v10i2.1209)
- Masoomzadeh, S., & Fathian, H. (2015). Separation of base flow from total runoff in Dez basin using HEC-HMS model. *The third international conference on new research achievements in civil engineering, architecture and urban management. Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran*, 13 pp. [In Persian].
- Meresa, H.K., & Gatachew, M.T. (2018). Climate change impact on river flow extremes in the Upper Blue Nile River Basin. *Journal of Water and Climate Change*, 10 (4), 759 –781. [Doi: 10.2166/wcc.2018.154](https://doi.org/10.2166/wcc.2018.154)
- Meshram, S.G., Ghorbani, M.A., Shamshirband, S., Kraimi, V., & Meshram, C. (2018). River flow prediction using hybrid PSO-GSA algorithm based on feedforward neural network. *Soft Computing*, 20, 10429-10438. [Doi: 10.1007/s00500-018-3598-7](https://doi.org/10.1007/s00500-018-3598-7)
- Meshram, S.G., Meshram, C., Hasan, M.A., Khan, M.A., & Islam, S. (2022d). Morphometric deterministic model for prediction of sediment yield index for selected watersheds in Upper Narmada Basin. *Appl Water Sci*, 12, 153. [Doi: 10.1007/s13201-022-01644-0](https://doi.org/10.1007/s13201-022-01644-0)
- Mirghasemi, S.H., Banejad, H., & Farid-Hosseini, A. (2023). Application of remote sensing in hydraulic modeling and determination of riverbed boundaries (Case study: Ardak River). *RS & GIS for Natural Resources*, 14(1), 24-48. [Doi:10.30495/girs.2023.685799](https://doi.org/10.30495/girs.2023.685799). [In Persian].
- Mirzaei, S., Sadoddin, A., Bahremand, A., Ownegh, M., & Mostafazadeh, R. (2023). The HEC-HMS hydrological model performance in the rainfall-runoff process simulation for the upstream watersheds of Gonbad, Iran. *Ecohydrology*, 10 (3), 355-377. [Doi: 10.22059/ije.2023.359860.1734](https://doi.org/10.22059/ije.2023.359860.1734). [In Persian].
- Mohseni, B., Mahdavi, M.J., & Ghorbanifard, M. (2023). Evaluation of Global and Regional Soil Maps in Flow Forecasting using SWAT Model (Talar Watershed, of Mazandaran Province).

- Geographical planning of space quarterly journal*, 13 (2), 37-53. Doi: 10.30488/GPS.2023.379075.3608 [In Persian].
- Moraes, T.C., Santos, V.J., Calijuri, M.L., & Torres, F.T.P. (2018). Effects on runoff caused by changes in land cover in a Brazilian southeast basin: evaluation by HEC-HMS and HEC-GEOHMS. *Environmental Earth Sciences*, 77 (6), 1-14. Doi:10.1007/s12665-018-7430-6
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50 (3), 885-900. Doi: 10.13031/2013.23153
- Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual, models part I- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. Doi: 10.1016/0022-1694 (70) 90255-6
- Natarajan, S., & Radhakrishnan, N. (2019). Simulation of extreme event-based rainfall-runoff process of an urban catchment area using HEC-HMS. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5, 1867-1881. Doi:10.1007/s40808-019-00644-5
- Nosrati, K., Hoseinzadeh, M.M., & Imeni, S. (2017). Application of principal component analysis in determination of effective factors on runoff generating. *Geographical planning of space quarterly journal*, 7 (24), 61-71. [In Persian].
- Nyaupane, N., Mote, S.R., Bhandari, M., Kalra, A., & Ahmad, S. (2018). Rainfall- Runoff Simulation using Climate Change Based Precipitation Prediction in HEC-HMS Model for Irwin Creek, Charlotte, North Carolina. *American Society of Civil Engineers*, 10 (14), 325-363. Doi: 10.1061/9780784481400.033
- Pichuka, S., Prasad, R.R., Maity, R., & Kunstmann, H. (2017). Development of a method to identify change in the pattern of extreme streamflow events in future climate: application on the Bhadra reservoir inflow in India. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 9, 236-246. Doi: 10.1016/j.ejrh.2016.12.084
- Ranjan, S., & Singh, S. (2022). HEC-HMS based rainfall-runoff model for Punpun river basin. *Water Practice & Technology*, 17 (5), 986-1001. Doi: 10.2166/wpt.2022.033
- Sempewo, J.I., Twite, D., Nyenje, P., & Mugume, S.N. (2023). Comparison of SWAT and HEC-HMS model performance in simulating catchment runoff. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 11 (4). Doi: 10.1080/23249676.2022.2156401
- Solaimanzadeh, M.A., Mohseni, M., & Bakhtiari, S. (2020). Runoff Simulation and Investigation the Effect of Land use Changes on Surface Water Quantity using Remote Sensing data and Hec- Hms Model (Case study: Halil Rud basin). *Extension and Development of Watershed Management*, 8 (28), 37-47. [In Persian].
- Tassew, B.G., Belete, M.A., & Miegel, K. (2019). Application of HEC- HMS model for flow simulation in the Lake Tana basin: The case of Gilgel Abay catchment, upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Hydrology*, 6 (21). Doi:10.3390/hydrology6010021
- USDA, Natural Resources Conservation Service. (2010). *Time of concentration*. Chapter 15. Part 630 Hydrology. National Engineering Handbook. 29 pp.
- Vakili, Sh., & Moghaddamnia, A.R. (2022). Comparative Study of HEC-HMS Rainfall-Runoff Model with Different Experimental Methods of Flood Estimation. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 16 (58), 32-41. [In Persian].
- Verma, A.K., Jha, M.K., & Mahana, R.K. (2010). Evaluation of HEC-HMS and WEPP for simulating watershed runoff using remote sensing and geographical information system. *Paddy Water Environ*, 8 (2), 131-144. Doi: 10.1007/s10333-009-0192-8
- Zolghadr, M., Rafiee, M.R., Esmaeilmanesh, F., Fathi, A., Tripathi, R.P., Rathnayake, U., Gunakala, S.R., & Azamathulla, H.M. (2022). Time of concentration based on two-dimensional hydraulic simulation. *Water*, 14 (19), 3155. Doi: 10.3390/w14193155