



Hydrological Modeling and Flood-Generating Sub-Basin Prioritization Using HEC-HMS in the Kalan Dam Watershed

Mohammad Bashirgonbad¹, Shadi Jafari²

1. Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. Email: m.bashir@malayeru.ac.ir

2. M.Sc. in Watershed Management, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. Email: siamakjafari2010a@gmail.com

Article Info

Article type

Research Article

Article history:

Received 09 February 2026

Revised 06 March 2026

Accepted 18 March 2026

Available online 21 March 2026

Keywords:

Flood,
HEC-HMS model,
Specific discharge,
Prioritization,
Kalan watershed

ABSTRACT

Objective: Floods are among the most destructive natural disasters, and in Iran, land use changes and vegetation degradation have significantly increased flood frequency and intensity. Integrated watershed management requires identifying critical flood-producing sub-basins, as treating an entire watershed is impractical. This study aims to identify and prioritize flood-producing sub-basins in the Kalan Dam watershed by integrating the HEC-HMS hydrological model with an individual sub-basin removal sensitivity analysis.

Method: The Kalan Dam watershed in Hamadan Province, Iran, was studied using a 1:25,000 DEM. Physiographic and hydrological parameters were extracted using ArcGIS, ArcHydro, and HEC-GeoHMS. Ten rainfall-runoff events were selected; eight for calibration and two for validation of the HEC-HMS model. The SCS-CN method was used for loss calculation, the Clark unit hydrograph for runoff transformation, and the Muskingum method for routing. Model performance was evaluated using NSE, RMSE, and PBIAS. Critical sub-basins were identified by sequentially removing each sub-basin and calculating the percentage reduction in outlet peak discharge. Specific discharge and reduction per unit area were also computed to eliminate area effects.

Results: The HEC-HMS model showed good performance during validation (high NSE, low RMSE and PBIAS). The individual sub-basin removal analysis revealed uneven contributions to outlet peak discharge. Sub-basin W530, despite having a moderate area, caused the highest reduction in outlet peak discharge when removed, identifying it as the most critical flood-producing sub-basin. Rankings based on specific discharge and reduction per unit area differed significantly from rankings based on absolute discharge, confirming that area alone is an insufficient criterion. Sub-basins with steeper slopes, higher Curve Numbers, and shorter time of concentration contributed more to flood generation.

Conclusions: Integrating HEC-HMS with sub-basin removal sensitivity analysis provides a robust, quantitative framework for prioritizing critical flood-producing areas. For the Kalan Dam watershed, sub-basin W530 requires urgent flood control interventions. Prioritization should not rely solely on area but should incorporate specific discharge and reduction per unit area. This methodology can be extended to other flood-prone semi-arid regions.

Cite this article: Bashirgonbad, M., Jafari, S (2026). Hydrological Modeling and Flood-Generating Sub-Basin Prioritization Using HEC-HMS in the Kalan Dam Watershed. *Journal of Ecohydrology*, 13(1), 1186-1207.

<https://doi.org/10.22059/IJE.2026.408949.1903>



© Mohammad Bashirgonbad, Shadi Jafari.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/IJE.2026.408949.1903>

Introduction

Floods are among the most destructive natural disasters, causing irreparable damages to human societies and ecosystems. In Iran, arid and semi-arid climatic conditions, along with unsustainable land use and vegetation degradation, have significantly increased the frequency and intensity of floods, ranking the country seventh in the world in terms of flood susceptibility. Land use changes and uncontrolled urban development are major factors exacerbating floods in the current century, sometimes with even stronger effects than climate change. Integrated watershed management is essential for predicting, mitigating, and reducing flood damages. Such management requires the identification of critical flood-producing areas at the sub-basin scale, as implementing control measures across an entire watershed is not only impractical but may also lead to adverse outcomes. Various methods have been proposed for prioritizing sub-basins regarding flood potential, each with limitations. Some studies have analyzed the whole watershed as a single unit, ignoring intra-basin differences. Others have relied on qualitative, expert-based methods (e.g., Analytic Hierarchy Process) and weighting of effective parameters, which can yield inconsistent results with slight changes in weights and often do not sufficiently utilize hydrological and historical flood data. In contrast, hydrological simulation approaches, such as the HEC-HMS model using rainfall-runoff data, allow for a more quantitative and realistic analysis of each sub-basin's contribution to outlet flood discharge. One widely used method in this context is the individual sub-basin removal approach. However, in most of these methods, the non-linear behavior of the watershed, river routing effects, and the simultaneity of flow arrival are not properly accounted for. Given the limitations of existing methods, this study aims to integrate the HEC-HMS hydrological model with a sub-basin sensitivity analysis approach to accurately identify and prioritize critical flood-producing sub-basins in the Kalan Dam watershed. The ultimate goal is to provide a scientific basis for focusing management and watershed restoration efforts on areas with the highest flood generation potential to reduce destructive impacts.

Method

The study was conducted in the Kalan Dam watershed, located south of Malayer city in southeastern Hamadan Province, Iran, covering an area of approximately 33,286 hectares. A 1:25,000 digital elevation model (DEM) was used to extract morphometric parameters including area, slope, main channel length, channel slope, and sub-basin boundaries using ArcHydro tools. Physiographic and hydrological characteristics of sub-basins (area, average slope, main channel length and slope, percentage of impervious surfaces, lag time, and time of concentration) were derived using ArcGIS, ArcHydro, and HEC-GeoHMS. Ten rainfall-runoff events with peak discharges exceeding 5 m³/s, recorded at the Darudgaran hydrometric station, were selected. Eight events (events 2 and 4–10) were used for model calibration, and two independent events (events 1 and 3) for validation. The HEC-HMS model (version 3.04) was employed for rainfall-runoff simulation. The SCS Curve Number method was used for loss calculation; the Clark unit hydrograph method for transforming effective rainfall into direct runoff; and the Muskingum method for channel routing. Peak discharge, runoff volume, and hydrograph shape were compared between observed and simulated data. Model performance was evaluated using the Nash–Sutcliffe efficiency (NSE), root mean square error (RMSE), and percent bias (PBIAS). To identify critical sub-basins, the individual sub-basin removal method was applied: each sub-basin was sequentially "removed" (i.e., its contribution set to zero) in the calibrated model, and the resulting percentage reduction in outlet peak discharge was calculated. To eliminate the effect of sub-basin area, specific discharge (discharge per unit area) and reduction percentage per unit area were also computed and ranked.

Results

The HEC-GeoHMS processing successfully delineated the watershed into multiple sub-basins with considerable variability in area, slope, and Curve Number. Model calibration results showed acceptable agreement between observed and simulated peak discharges and runoff volumes for the eight calibration events. Validation using two independent events demonstrated that the calibrated model could simulate hydrograph shape, timing of peak, and peak discharge with good accuracy. The event of 26/02/2020 performed better than 01/04/2018 and was selected as the basis for further analyses. The NSE value for the validation event was satisfactorily high, while RMSE and PBIAS values were low, indicating reliable model performance. The individual sub-basin removal analysis revealed that sub-basins contributed unevenly to the outlet peak discharge. Sub-basin W530, despite having a moderate area, caused the highest percentage reduction in outlet peak discharge when removed, indicating it is the most critical flood-producing sub-basin. In contrast, sub-basin W860 had the lowest impact. When ranking by specific discharge (discharge per unit area), the priority order changed significantly compared to ranking by absolute peak discharge, demonstrating that area alone is not a sufficient criterion. Sub-basin W530 again ranked high in specific discharge analysis. Furthermore, when the percentage reduction in peak discharge per unit area was considered, sub-basin W530 ranked first, and W860 last. The results indicated that sub-basins with steeper slopes, shorter main channel length, higher Curve Number, and shorter time of concentration contributed more to flood generation. The maximum retention parameter had the greatest influence on runoff volume, while Curve Number had the greatest influence on peak discharge.

Conclusions

This study demonstrates that integrating the HEC-HMS hydrological model with the individual sub-basin removal sensitivity analysis provides a robust and quantitative framework for identifying and prioritizing critical flood-producing sub-basins. The approach overcomes the limitations of qualitative, expert-based weighting methods and avoids the oversimplification of treating a watershed as a homogeneous unit. For the Kalan Dam watershed, sub-basin W530 was identified as the most critical area, requiring urgent flood control interventions. The results emphasize that prioritization should not be based solely on sub-basin area but should incorporate specific discharge and the percentage reduction in outlet peak discharge per unit area. The HEC-HMS model proved to be a reliable tool for rainfall-runoff simulation in this semi-arid watershed.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

CRedit authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

All text used in this research has been written in accordance with scientific and ethical principles.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

مدل سازی هیدرولوژیکی و اولویت بندی زیر حوضه های مولد سیلاب با استفاده از مدل HEC-HMS در حوضه آبخیز سد کلان

محمد بشیر گنبد^{۱*}، شادی جعفری^۲

۱. استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، رایانامه: m.bashir@malayeru.ac.ir
 ۲. دانش آموزانه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران، رایانامه: siamakjafari2010a@gmail.com

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>مقدمه: سیلابها از جمله مخربترین بلایای طبیعی هستند که خسارت‌های جبران‌ناپذیری به جوامع انسانی و اکوسیستم‌ها وارد می‌کنند. در ایران، شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک همراه با تغییرات کاربری اراضی و تخریب پوشش گیاهی، موجب افزایش قابل توجه فراوانی و شدت سیلاب‌ها شده است.</p> <p>هدف: این مطالعه با هدف شناسایی و اولویت‌بندی دقیق زیرحوضه‌های بحرانی مولد سیل در حوضه آبخیز سد کلان از طریق تلفیق مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و رویکرد تحلیل حساسیت حذف انفرادی زیرحوضه‌ها انجام شده است.</p> <p>روش پژوهش: حوضه آبخیز سد کلان به مساحت ۳۳۲۸۶ هکتار در استان همدان واقع شده است. پارامترهای فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی با استفاده از ArcHydro، ArcGIS و HEC-GeoHMS استخراج شد. ده رویداد بارش - رواناب انتخاب شد؛ هشت رویداد برای کالیبراسیون و دو رویداد برای اعتبارسنجی مدل HEC-HMS استفاده شد. روش SCS-CN برای محاسبه تلفات، هیدروگراف واحد کلارک برای تبدیل بارش مؤثر به رواناب و روش ماسکینگام برای روندیابی جریان به کار رفت. کارایی مدل با ضرایب نش - ساتکلیف، ریشه میانگین مربعات خطا و درصد خطای اریب ارزیابی شد. زیرحوضه‌های بحرانی با حذف متوالی هر زیرحوضه و محاسبه درصد کاهش دبی اوج خروجی شناسایی شدند. همچنین برای حذف اثر مساحت، دبی ویژه و درصد کاهش به ازای واحد سطح محاسبه شد.</p> <p>یافته‌ها: مدل HEC-HMS عملکرد مطلوبی در مرحله اعتبارسنجی نشان داد (نش-ساتکلیف=۰/۹۴۷، ریشه میانگین مربعات خطا=۰/۲ و درصد خطای کلی=۸/۵۶-). تحلیل حذف انفرادی زیرحوضه‌ها نشان داد سهم زیرحوضه‌ها در تولید دبی اوج خروجی یکسان نیست. زیرحوضه W530 با وجود مساحت متوسط، بیشترین درصد کاهش را در دبی اوج خروجی هنگام حذف ایجاد کرد و به عنوان بحرانی‌ترین زیرحوضه مولد سیل معرفی شد. اولویت‌بندی بر اساس دبی ویژه و درصد کاهش به ازای واحد سطح تفاوت قابل توجهی با اولویت‌بندی بر اساس دبی مطلق داشت که نشان می‌دهد مساحت به‌تنهایی معیار کافی برای اولویت‌بندی نیست.</p> <p>نتیجه‌گیری: تلفیق مدل HEC-HMS با تحلیل حساسیت حذف انفرادی زیرحوضه‌ها چارچوبی کمی و قابل اعتماد برای اولویت‌بندی مناطق بحرانی مولد سیل فراهم می‌کند. در حوضه آبخیز سد کلان، زیرحوضه W530 نیاز فوری به اقدامات کنترل سیل دارد. اولویت‌بندی نباید تنها بر اساس مساحت باشد، بلکه باید دبی ویژه و درصد کاهش به ازای واحد سطح نیز در نظر گرفته شود.</p>	<p>نوع مقاله: پژوهشی</p> <p>تاریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۱۵</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۷</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱</p> <p>کلیدواژه‌ها:</p> <p>تولید سیل، اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها، مدل بارش رواناب، مدیریت حوضه آبخیز، سد کلان.</p>

استناد: بشیر گنبد، محمد؛ جعفری، شادی (۱۴۰۵). مدل‌سازی هیدرولوژیکی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های مولد سیلاب با استفاده از مدل HEC-HMS در حوضه آبخیز سد کلان. *مجله اکوهیدرولوژی*، ۱۳(۱)، ۱۱۸۶ - ۱۲۰۷.



<https://doi.org/10.22059/IJE.2026.408949.1903>

© محمد بشیر گنبد، شادی جعفری.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

سیلاب‌ها از جمله مخرب‌ترین بلایای طبیعی هستند که خسارت‌های جبران‌ناپذیری به جوامع انسانی و اکوسیستم‌ها وارد می‌کنند (اسمیت و وارد، ۱۹۹۸). در ایران، شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک همراه با استفاده ناپایدار از منابع طبیعی و تخریب پوشش گیاهی، موجب افزایش قابل توجه فراوانی و شدت سیلاب‌ها شده است؛ تا جایی که کشور در رتبه هفتم سیل‌خیزی جهانی قرار دارد (ندافی و حسینی، ۱۳۹۵). تغییرات کاربری اراضی و توسعه شهری بی‌رویه از عوامل عمده تشدید سیلاب در قرن حاضر شناخته می‌شوند که گاهی اثراتی قوی‌تر از تغییر اقلیم به جا می‌گذارند (اسلام و دب بارمان، ۲۰۲۰).

مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبخیز برای پیش‌بینی، مهار و کاهش خسارت‌های سیل امری ضروری است. این مدیریت مستلزم شناسایی مناطق بحرانی مولد سیل در سطح زیرحوضه‌ها است؛ زیرا اجرای اقدامات کنترل در سراسر حوضه نه تنها امکان‌پذیر نیست، بلکه ممکن است نتایج معکوس داشته باشد (حسین‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲). روش‌های متعددی برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر سیل‌خیزی ارائه شده‌اند که هر یک محدودیت‌هایی دارند. برای نمونه، برخی مطالعات کل حوضه را یکپارچه تحلیل کرده‌اند (بسال پور و همکاران، ۲۰۲۲) و نقش تفاوت‌های درون حوضه‌ای را نادیده گرفته‌اند. دسته‌ای دیگر با اتکا به روش‌های کیفی و مبتنی بر نظر کارشناسی (مانند فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی) و وزن‌دهی پارامترهای مؤثر (جلالیان و همکاران، ۱۳۹۵؛ حلییان و همکاران، ۱۳۹۶؛ حسین‌زاده و همکاران، ۱۴۰۲؛ مریانجی و همکاران، ۱۳۹۹؛ کزاکیس و همکاران، ۲۰۱۵؛ نوری و همکاران، ۱۴۰۲؛ مختاری و همکاران، ۱۴۰۲)، نتایج ارائه داده‌اند که با تغییر جزئی در وزن‌ها، ممکن است دچار ناسازگاری شود. این روش‌ها همچنین معمولاً از داده‌های هیدرولوژیکی و تاریخی سیل بهره کافی نمی‌برند.

در مقابل، رویکردهای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی مانند مدل HEC-HMS با استفاده از داده‌های بارش - رواناب، امکان تحلیل کمی و واقع‌بینانه‌تری از سهم هر زیرحوضه در تولید سیل خروجی فراهم می‌کنند (بدری و همکاران، ۱۳۹۵؛ طالبی و همکاران، ۱۳۹۸). یکی از روش‌های پرکاربرد در این زمینه، روش تکرار حذف انفرادی زیرحوضه‌ها است (ثقفیان و خسروشاهی، ۱۳۸۴) که در مطالعات مختلفی به کار رفته است (بهرامی و همکاران، ۱۳۹۰؛ حجازی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶؛ معماریان و همکاران، ۱۴۰۰؛ معماریان خلیل‌آباد و همکاران، ۱۳۹۷؛ میرکازمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ رفیعی ساردویی و همکاران، ۱۳۹۴؛ ونزوینانو و ویلانی، ۱۹۹۹). با این حال، عموماً در این روش‌ها رفتار غیرخطی حوضه، آثار روندیابی رودخانه و هم‌زمانی رسیدن جریان‌ها به‌درستی لحاظ نمی‌شود.

با توجه به محدودیت‌های روش‌های موجود، این مطالعه با تلفیق مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و رویکرد تحلیل حساسیت زیرحوضه‌ها، به دنبال شناسایی و اولویت‌بندی دقیق زیرحوضه‌های بحرانی مولد سیل در حوضه آبخیز سد کلان است. هدف نهایی، ارائه مبنایی علمی برای تمرکز اقدامات مدیریتی و آبخیزداری در مناطق با بیشترین پتانسیل تولید سیل، جهت کاهش اثرات مخرب آن است.

پیشینه پژوهش

پژوهش‌های داخلی و خارجی نشان می‌دهد عوامل انسانی و طبیعی نقش کلیدی در تشدید سیلاب دارند و مدل‌های هیدرولوژیکی ابزارهای مؤثری برای تحلیل این پدیده هستند. در ایران، مطالعات متعددی با استفاده از مدل HEC-HMS به بررسی تأثیر تغییرات کاربری اراضی، ویژگی‌های فیزیوگرافی و رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز پرداخته‌اند و تأکید کرده‌اند که پارامترهایی مانند شماره منحنی (CN¹)، پوشش گیاهی، شیب و مساحت زیرحوضه‌ها تأثیر قابل توجهی بر دبی اوج و حجم رواناب دارند (خسروشاهی و ثقفیان، ۱۳۸۲؛ ثقفیان و همکاران، ۱۳۸۵؛ توکلی، ۱۳۹۰).

در زمینه اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها، نوذری و همکاران (۱۳۹۶)، طالبی و همکاران (۱۳۹۸) و قدیمی و همکاران (۱۴۰۱) سهم زیرحوضه‌ها را با روش‌های تجربی، شاخص‌های مورفومتریکی یا مدل‌های هیدرولوژیکی ارزیابی کرده‌اند. با این حال، بسیاری از این روش‌ها مبتنی بر وزن‌دهی کارشناسی بوده و نتایج آن‌ها به دلیل ماهیت کیفی، از عدم قطعیت بالایی برخوردار است. همچنین، برخی مطالعات رفتار

هیدرولوژیکی را خطی فرض کرده و اثرات روندیابی و هم‌زمانی دبی‌ها را نادیده گرفته‌اند که می‌تواند به برآوردهایی با دقت کم منجر شود.

در مطالعات خارجی، کاربرد مدل HEC-HMS برای تحلیل تغییرات کاربری اراضی و رفتار هیدرولوژیکی رایج است و بر اهمیت اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها برای مدیریت سیل تأکید شده است (میلر و همکاران، ۲۰۰۲؛ چن و همکاران، ۲۰۰۹؛ سوری و مادگال، ۲۰۱۲؛ سانیا و همکاران، ۲۰۱۴؛ مصطفی و همکاران، ۲۰۱۵؛ شلار و همکاران، ۲۰۲۲). مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد مدل HEC-HMS ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی بارش - رواناب است، اما بسیاری از مطالعات گذشته به تحلیل یکپارچه حوضه پرداخته و تفاوت‌های مکانی زیرحوضه‌ها را کمتر مورد توجه قرار داده‌اند. از سوی دیگر، روش‌های وزن‌دهی کارشناسی عدم قطعیت بالایی دارند. بنابراین، با توجه به اینکه تا کنون مطالعه جامعی برای شبیه‌سازی جریان، تعیین سهم و اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها با استفاده از مدل HEC-HMS در حوضه آبخیز سد کلان انجام نشده است، این پژوهش به منظور پر کردن این خلأ تحقیقاتی تعریف شده و هدف آن، ارائه مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی اقدامات آبخیزداری مؤثر است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز سد کلان در جنوب شهرستان ملایر و در جنوب شرقی استان همدان واقع شده و یکی از زیرحوضه‌های مهم رودخانه کرخه به شمار می‌رود. این حوضه در محدوده مختصات جغرافیایی $30^{\circ}38'40''$ تا $32^{\circ}49'01''$ طول شرقی و $33^{\circ}44'34''/08$ تا $37^{\circ}16'36''/36$ عرض شمالی قرار دارد و مساحت آن تا ایستگاه خروجی حوضه حدود 33286 هکتار است. ارتفاعات حوضه از 1924 متر تا 2720 متر متغیر بوده و میانگین ارتفاع آن 2209 متر از سطح دریا است. شکل ۱ سمت راست نشان‌دهنده موقعیت حوضه در استان همدان و کشور است.

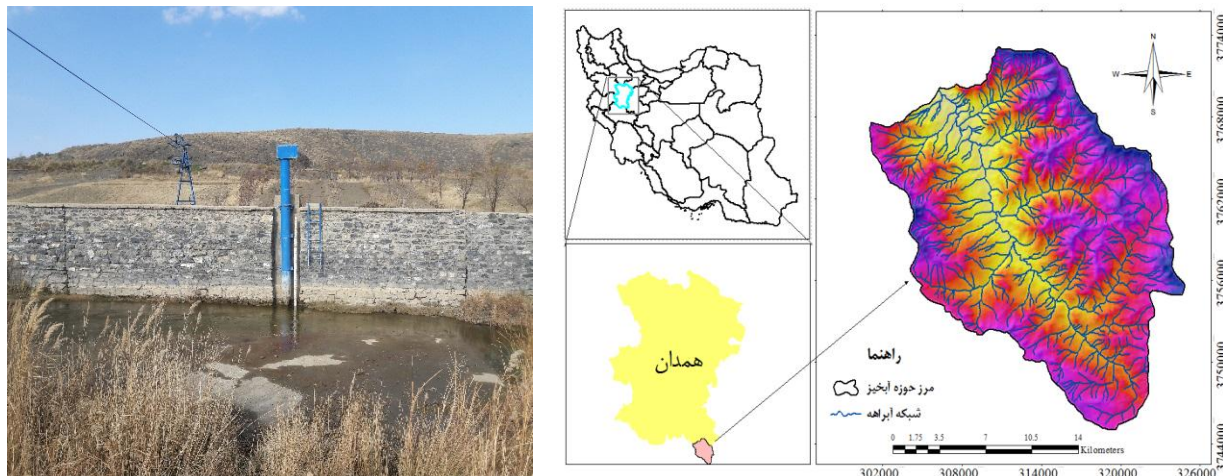
برای تحلیل شرایط اقلیمی، از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک ملایر، ایستگاه تبخیرسنجی وسج و ایستگاه باران‌سنجی پیهان استفاده شد. میانگین دمای سالانه منطقه $13/4$ درجه سانتی‌گراد، میانگین تبخیر سالانه حدود 1039 میلی‌متر و میانگین بارندگی سالانه 360 میلی‌متر است. بیشترین بارش سالانه ثبت شده 596 میلی‌متر (سال 1397) و کمترین مقدار، 231 میلی‌متر (سال 1386) بوده است. رودخانه کلان از ارتفاعات زالیان در شرق بروجرد سرچشمه گرفته و پس از پیوستن به رودخانه‌های نهاوند، تویسرکان و حرم‌رود، وارد گاماسیاب می‌شود. ایستگاه هیدرومتری درودگران در فاصله 5 کیلومتری سد کلان، مجهز به لیمینوگراف و اشل، داده‌های دبی خروجی را ثبت می‌کند (شکل ۱ سمت چپ).

روش تحقیق

جمع‌آوری داده‌ها و استخراج خصوصیات فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی زیرحوضه‌ها، مدل‌سازی بارش - رواناب با مدل HEC-HMS، اعتبارسنجی آن و تحلیل حساسیت و تعیین سهم زیرحوضه‌ها در تولید رواناب سه مرحله اصلی این تحقیق است که داده‌های مورد نیاز و نحوه آماده‌سازی آن‌ها در ادامه تحقیق آمده است.

مدل ارتفاعی رقومی (DEM)

برای تهیه DEM حوضه، از نقشه های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان منابع طبیعی استفاده شد. این مدل مبنای استخراج پارامترهای مورفومتری شامل مساحت، شیب، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه و تعیین مرز زیرحوضه ها بود. لایه های جهت جریان، تجمع جریان، مسیر جریان، شیب و طبقات ارتفاعی با استفاده از ابزار ArcHydro تولید شد.



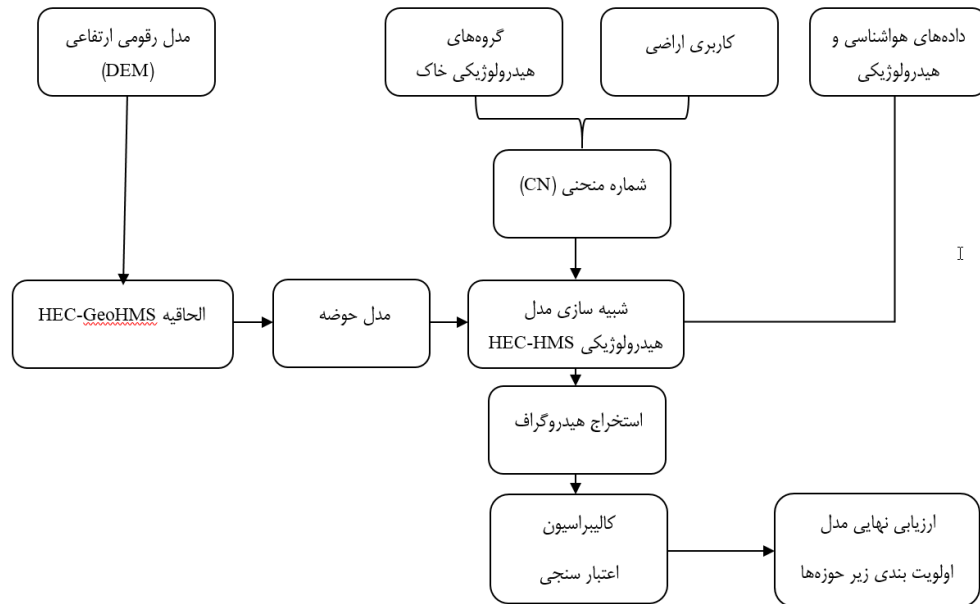
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه هیدرومتری درودگران

استخراج خصوصیات فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی

خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه ها شامل مساحت، شیب متوسط، طول و شیب آبراهه اصلی، درصد سطوح نفوذناپذیر، زمان تأخیر و زمان تمرکز با استفاده از ArcGIS، ArcHydro و الحاقیه HEC-GeoHMS استخراج شد. این اطلاعات ورودی اصلی مدل HEC-HMS برای شبیه سازی بارش - رواناب بودند.

نرم افزارهای مورد استفاده

در این تحقیق به منظور تهیه نقشه ها از نرم افزار ArcGIS 10.2، برای تولید ساختار شماتیک حوضه و آماده سازی ورودی مدل از الحاقیه HEC-GeoHMS و برای شبیه سازی فرایند بارش - رواناب از نرم افزار HEC-HMS 3.04 و همچنین، برای تکمیل مشاهدات میدانی و کنترل تطبیق مکانی از نرم افزار Google Earth استفاده شد. مراحل انجام این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. روندنمای مراحل انجام تحقیق

معرفی مدل HEC-HMS

مدل HEC-HMS یکی از مدل‌های معتبر شبیه‌سازی بارش - رواناب است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی ارتش آمریکا توسعه یافته است. این مدل امکان تحلیل سیلاب، طراحی سازه‌های کنترل سیلاب، پیش‌بینی جریان و مدیریت حوضه‌های آبخیز را فراهم می‌کند (میلر و همکاران، ۲۰۰۲).

ساختار مدل شامل سه بخش اصلی است:

مدل حوضه (Basin Model): شامل زیرحوضه‌ها، آبراهه‌ها، اتصالات و پارامترهای هیدرولوژیکی
 مدل بارش (Precipitation Model): شامل داده‌های بارش تاریخی یا طراحی
 مشخصات کنترل (Control Specifications): شامل زمان شروع، پایان و گام زمانی شبیه‌سازی

روش محاسبه تلفات بارش

در این پژوهش از روش SCS Curve Number برای محاسبه تلفات بارش استفاده شد. پارامترهای مورد نیاز شامل شماره منحنی (CN)، تلفات اولیه و درصد سطوح نفوذناپذیر است که با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد (بارکر و چانراکانتا، ۲۰۲۲). مقدار شماره منحنی با مقدار نفوذ آب در سطح حوضه و سایر ویژگی‌های حوضه متناسب است. مقدار شماره منحنی بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است. در شماره منحنی برابر صفر هیچ‌گونه روانابی از بارندگی حاصل نیامده و در شماره منحنی برابر ۱۰۰ تمامی بارش در سطح زمین جریان یافته و ارتفاع رواناب برابر ارتفاع بارندگی خواهد بود. شماره منحنی به نوبه خود از روی مشخصات خاک، نوع بهره‌برداری از زمین و شرایط رطوبت قبلی خاک تعیین می‌شود. پس از تعیین شماره منحنی، مقدار نگهداشت مشخص شده و با در نظر گرفتن بارندگی، ارتفاع رواناب محاسبه می‌شود. نقشه CN با استفاده از نقشه کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک در محیط HEC-GeoHMS تولید شد.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (1)$$

تبدیل بارش مؤثر به رواناب

برای تبدیل بارش مؤثر به رواناب مستقیم، از هیدروگراف واحد کلارک استفاده شد. پارامترهای مورد نیاز شامل زمان تمرکز (Tc) و ضریب ذخیره (R) نیز با استفاده از روابط استاندارد SCS محاسبه شدند.

روندیابی جریان در آبراهه ها

روندیابی سیلاب در آبراهه ها (کانال و رودخانه) عبارت است از عملیات محاسباتی که تغییرات مقادیر متغیرهای هیدرولیکی، هندسه جریان و شکل موج سیل را به عنوان تابعی از زمان در یک یا چند نقطه در طول آبراهه ها پیش بینی می کند. روش های زیادی برای روندیابی در رودخانه وجود دارد که در مدل HEC-HMS روش های موج سینماتیک، Lag، ماسکینگام، ماسکینگام کانتر را در خود دارد. در این تحقیق از روش ماسکینگام با دو پارامتر K و X استفاده شد. مبنای روش ماسکینگام بر پایه معادله پیوستگی استوار است:

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (2)$$

که در آن S حجم ذخیره آب در رودخانه، I دبی سیل ورودی و O دبی سیل خروجی و T زمان است. در روش ماسکینگام خطی فرض می شود که حجم ذخیره، تابعی از سیلاب ورودی و خروجی است:

$$S = K[xI + (1-x)O] \quad (3)$$

که K بر (حسب ساعت) و x ضرایب ثابتی هستند که باید بر اساس هیدروگراف ورودی و خروجی اندازه گیری شده در رودخانه، محاسبه شوند. پارامتر K بیان کننده زمان پیمایش رودخانه بوده و به طول رودخانه و تندی موج سیلاب بستگی دارد، در حالی که x بیانگر اثر دبی های ورودی و خروجی سیل بر حجم ذخیره رودخانه بوده و معمولاً در محدوده ۰ - ۰/۵ تغییر می کند. با تعیین این دو پارامتر، می توان هیدروگراف دبی خروجی سیلاب را برای هر سیلی که در رودخانه اتفاق می افتد محاسبه کرد.

هیدروگراف واحد SCS

برای تولید هیدروگراف واحد، از مدل پارامتریک SCS استفاده شد. زمان تا اوج (Tp) و دبی اوج (qp) با استفاده از روابط استاندارد SCS محاسبه شدند.

محاسبه رواناب با روش شماره منحنی

ارتفاع رواناب با استفاده از رابطه استاندارد SCS محاسبه شد:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (4)$$

در این رابطه، S ضریب نگهداشت سطحی، Q ارتفاع رواناب (میلی متر)، P ارتفاع بارندگی (میلی متر). که مقدار S از رابطه ۱ محاسبه می شود.

پارامترهای زمانی شامل:

زمان تأخیر (T_{lag})

زمان تأخیر، فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارش مازاد و مرکز ثقل هیدروگراف بوده و غالباً به جای آن، زمان تأخیر تا اوج در نظر گرفته می‌شود که فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارش مازاد و نقطه اوج است.

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8}(s+1)^{0.7}}{1900Y^{0.5}} \quad (5)$$

در این رابطه L طول رودخانه اصلی بر حسب فوت، y شیب رودخانه اصلی بر حسب درصد، T_{lag} زمان تأخیر بر حسب ساعت و S نگهداشت آب بر سطح حوضه (اینچ) است.

زمان تمرکز (T_c)

زمان تمرکز، به عنوان بزرگ‌ترین زمان لازم برای جریان آب از هر نقطه منطقه، به نقطه تمرکز تعریف شده است که متداول‌ترین پارامتر زمانی مورد استفاده در هیدرولوژی است. زمان تمرکز به خصوصیات فیزیوگرافی حوضه از قبیل شیب و طول آبراهه، پوشش گیاهی، شکل و ناهمواری‌های سطحی حوضه و بالأخره شدت بارندگی و توزیع زمانی و مکانی آن بستگی دارد. در نهایت با توجه به زمان تأخیر حاصل، زمان تمرکز به صورت رابطه ۶ و بر حسب ساعت به دست می‌آید.

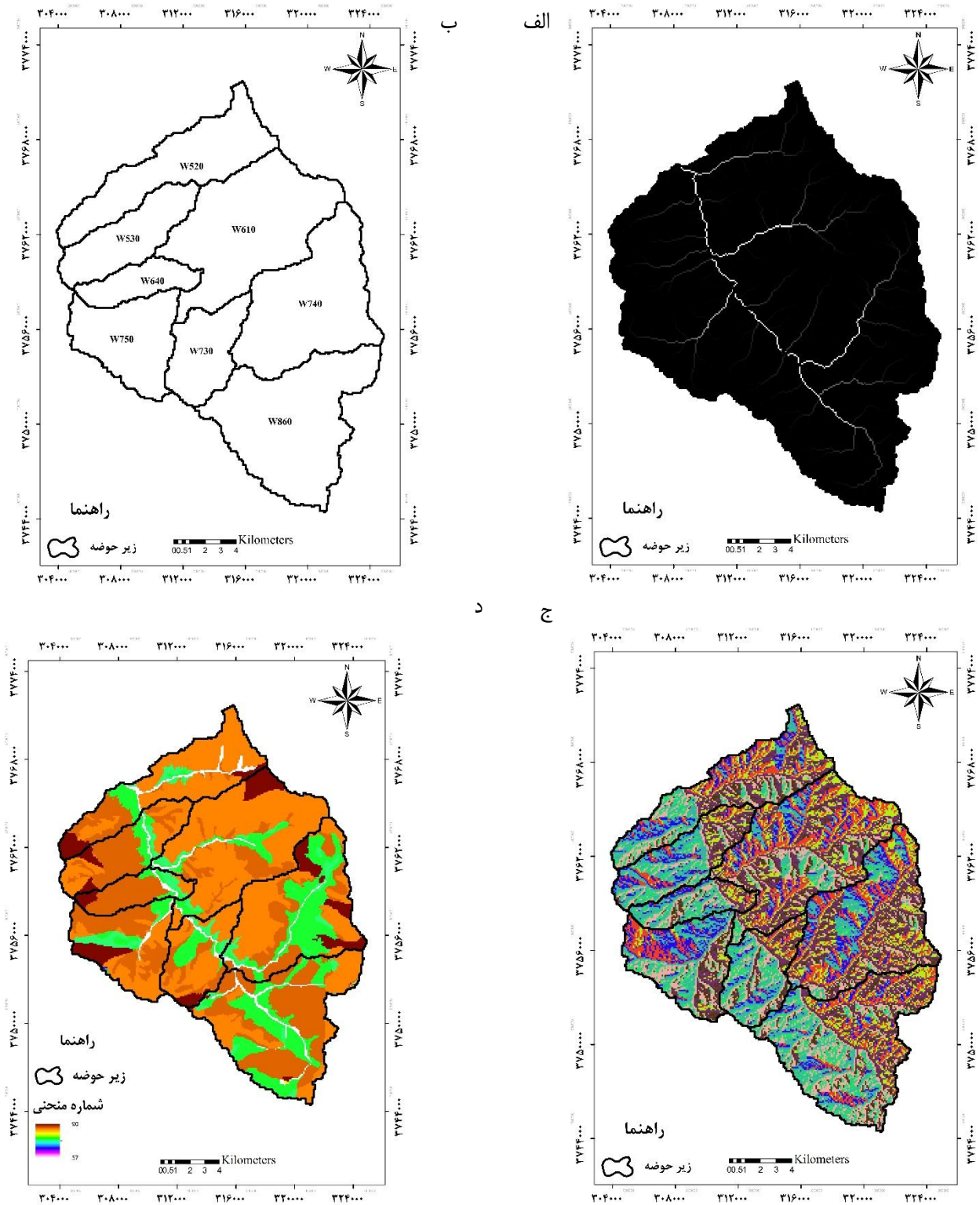
$$T_c = 1.67(T_{lag}) \quad (6)$$

یافته‌های پژوهش

نتایج مدل‌سازی حوضه با استفاده از HEC-GeoHMS

برای آماده‌سازی ورودی‌های مدل HEC-HMS، ابتدا مدل ارتفاعی رقومی حوضه در محیط ArcGIS پردازش شد. مراحل شامل تصحیح DEM، استخراج جهت جریان، تجمع جریان، تعیین شبکه آبراهه‌ها، ترسیم مرز حوضه و تفکیک زیرحوضه‌ها بود. خروجی این مراحل، ساختار کامل هیدرولوژیکی حوضه شامل زیرحوضه‌ها، آبراهه‌ها و اتصالات بود که مبنای مدل‌سازی قرار گرفت. شکل ۳ نتایج مربوط به این مرحله را نشان می‌دهد.

همچنین، جدول ۱ خصوصیات فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها شامل مساحت، شیب، طول آبراهه اصلی، شماره منحنی (CN)، زمان تمرکز و ارتفاعات حدی را نشان می‌دهد. این اطلاعات نشان داد زیرحوضه‌ها از نظر مساحت، شیب و CN تنوع قابل توجهی دارند و انتظار می‌رود رفتار هیدرولوژیکی متفاوتی داشته باشند.



شکل ۳. موقعیت زیرحوضه ها و نتایج پیش برداش مدل رقمی ارتفاعی برای تولید اجزای هیدرولوژیکی مدل حوضه در الحاقیه HEC-GeoHms
 نقشه تجمع جریان (الف)، نقشه موقعیت زیرحوضه ها (ب)، نقشه جهت جریان (ج) و نقشه شماره منحنی (د)

جدول ۱. خصوصیات زیرحوضه‌های منطقه مورد مطالعه

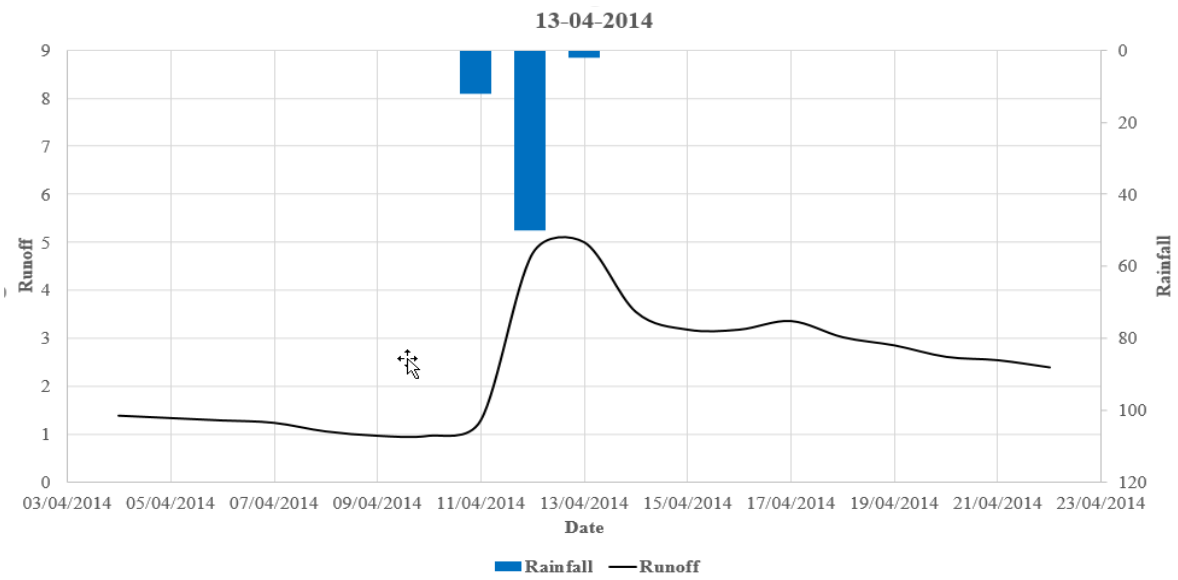
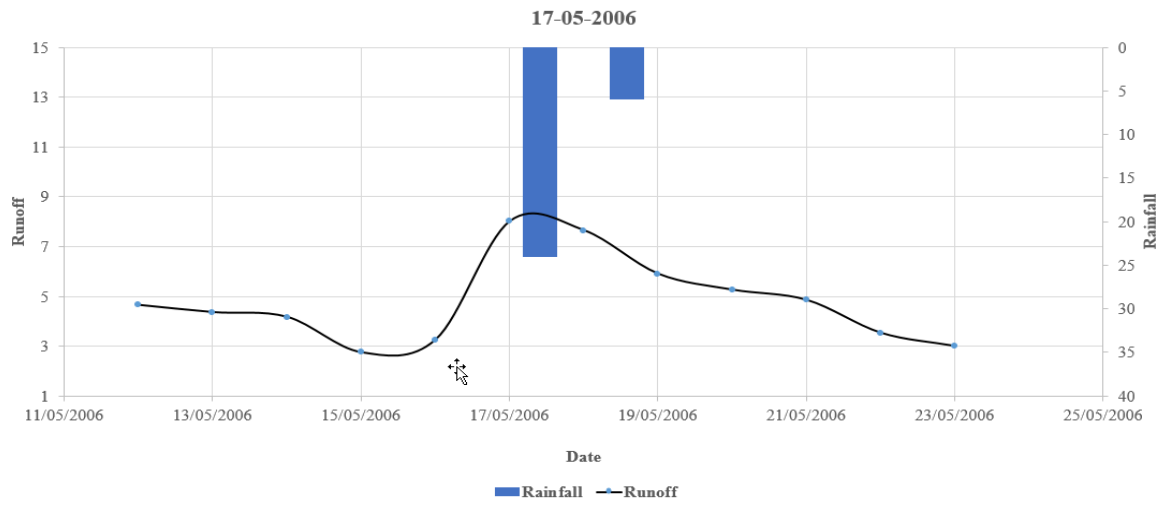
زیرحوضه‌ها	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد شیب	طول رودخانه (متر)	شماره منحنی	ضریب جذب	زمان تمرکز به روش SCS (ساعت)	بیشترین ارتفاع (متر)	کمترین ارتفاع (متر)
۱	۶۶/۲۷۴	۱۰/۴۲	۴۹۷۴/۳۰	۷۸/۲۲	۳/۴۰	۳/۹۴	۲۳۸۰	۲۰۵۳
۲	۵۹/۷۳۴	۱۴/۲۳	۱۷۵۱۹/۴۸	۷۸/۴۷	۳/۷۰	۳/۷۵	۲۵۲۷	۲۰۴۲
۳	۲۳/۶۷۱	۱۲/۶۶	۹۳۹۸/۷۵	۷۹/۱۲	۲/۰۹	۲/۳۷	۲۴۴۵	۲۰۰۱
۴	۶۶/۲۹۷	۱۷/۳۴	۱۵۵۴۵/۰۹	۸۰/۰۹	۲/۵۷	۲/۹۴	۲۵۲۹	۱۹۷۳
۵	۳۲/۳۹۹	۱۰/۵۵	۱۱۸۲۷/۳۱	۸۰/۰۲	۲/۸۰	۳/۰۴	۲۴۸۰	۱۹۹۵
۶	۱۴/۶۴	۱۱/۶۲	۶۶۶۹/۴۶	۷۹/۷۱	۱/۵۴	۱/۸۵	۲۵۰۲	۱۹۷۳
۷	۲۶/۹۱۸	۱۴/۱۸	۱۱۴۵۴/۲۸	۸۰/۲۹	۲/۴۴	۲/۵۳	۲۵۱۱	۱۹۴۵
۸	۴۳/۰۱	۱۸/۱۳	۱۲۳۰۷/۷۶	۷۹/۳۲	۲/۱۲	۲/۴۴	۲۴۸۷	۱۹۲۴

رویدادهای بارش - رواناب مورد استفاده

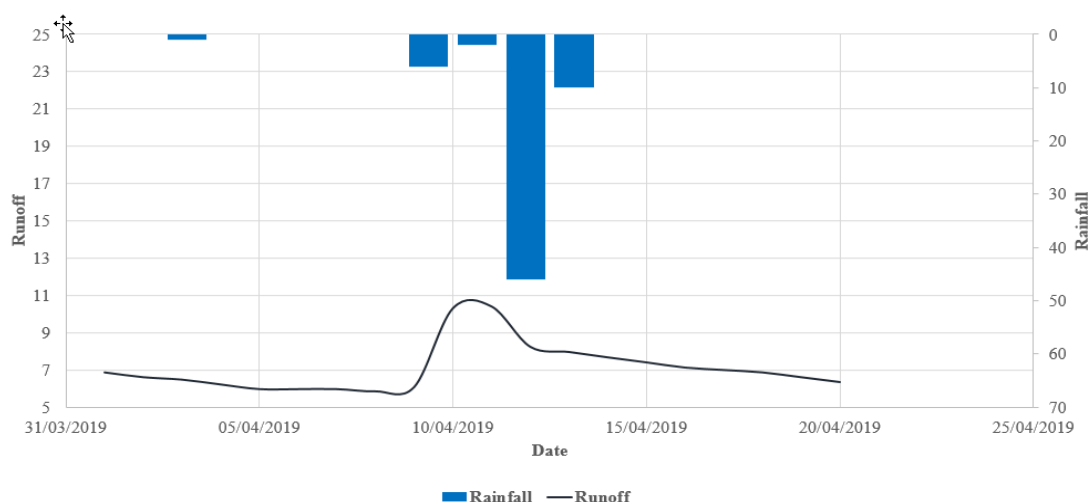
بر اساس بازبینی‌های میدانی و تحلیل دبی‌های ثبت‌شده در ایستگاه هیدرومتری درودگران، رویدادهایی با دبی اوج بیش از ۵ مترمکعب بر ثانیه برای شبیه‌سازی انتخاب شدند. در مجموع ۱۰ رویداد بارش - رواناب استخراج شد که مطابق جدول ۲ رویدادهای ۲ و ۴ تا ۱۰ برای کالیبراسیون مدل و رویدادهای ۱ و ۳ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شدند. این رویدادها دامنه متنوعی از شدت و تداوم بارش را پوشش می‌دهند و برای ارزیابی عملکرد مدل مناسب هستند. هیتوگراف بارش و هیدروگراف نظیر ۱۰ رویداد منتخب در شکل ۳ آمده است.

جدول ۲. مشخصات دبی‌های سیلابی استفاده‌شده در شبیه‌سازی

ردیف	تاریخ شروع رویداد	دبی اوج مشاهده‌ای	دبی متوسط	زمان تداوم (ساعت)
۱	۲۰۲۰/۰۲/۲۶	۵۲/۲۰	۱۲/۱۱	۶۹۶
۲	۲۰۱۹/۰۴/۱۱	۱۰/۴۰	۵/۵۳	۲۷۴۸
۳	۲۰۱۸/۰۴/۰۱	۵۸/۸۰	۱۴/۲۸	۱۲۷۲
۴	۲۰۱۵/۰۴/۱۵	۲۰/۳۰	۷/۳۹	۸۱۶
۵	۲۰۱۷/۰۳/۲۰	۶/۷۳	۴/۰۵	۲۱۶
۶	۲۰۱۶/۰۴/۰۱	۱۱/۸۰	۶/۳۷	۱۲۰۰
۷	۲۰۱۴/۰۴/۱۳	۵/۰۵	۳/۷۸	۱۶۸
۸	۲۰۰۷/۰۳/۱۶	۵/۰۱	۳/۷۲	۴۳۲
۹	۲۰۰۶/۰۵/۱۷	۸/۰۱	۵/۴۹	۱۶۸
۱۰	۲۰۰۶/۰۴/۱۵	۲۰/۲۰	۹/۰۹	۱۳۲۰



11-04-2019



شکل ۴. هیدروگراف رواناب و هیتوگراف بارش ۳ رویداد منتخب مورد استفاده در کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل

کالیبراسیون مدل

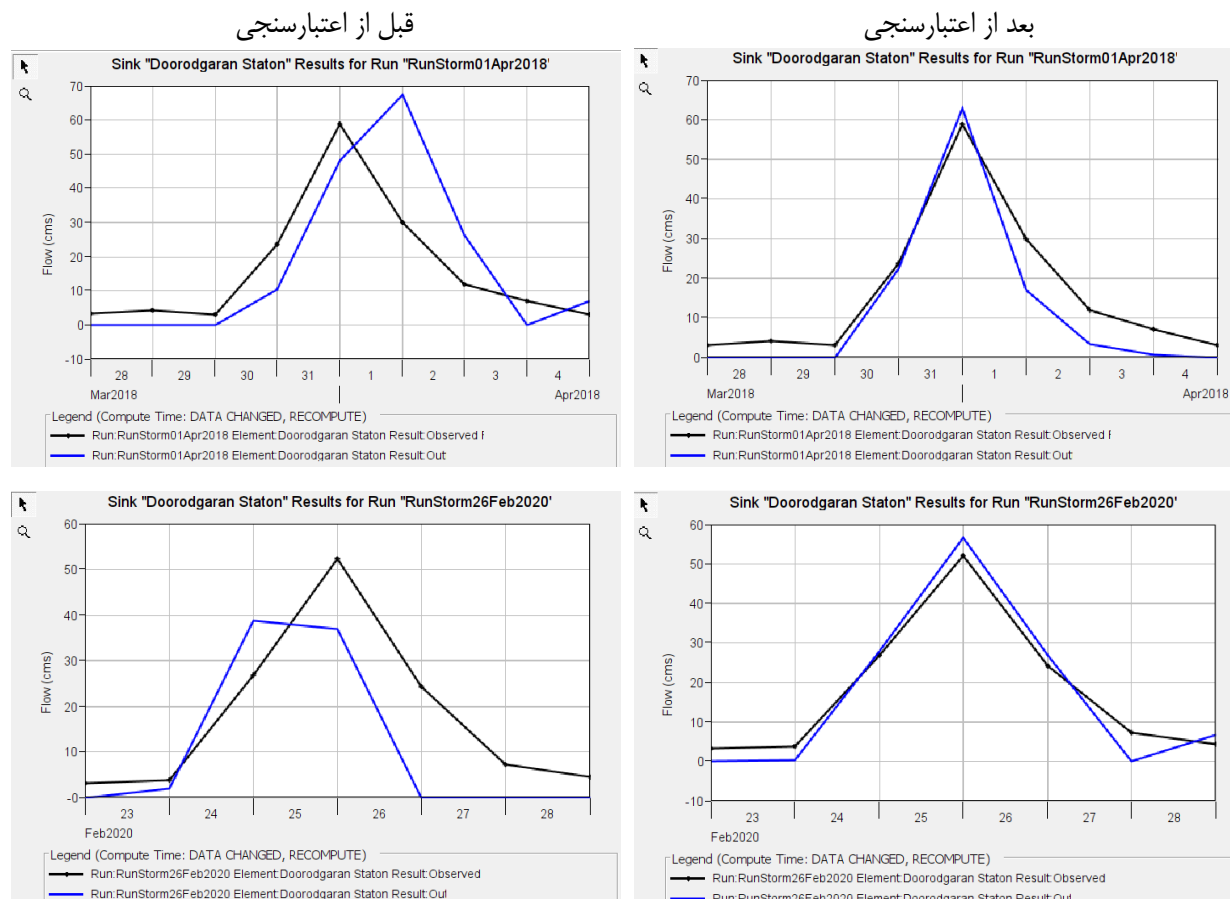
کالیبراسیون مدل با استفاده از روش خودکار HEC-HMS و بر اساس هشت رویداد ۲ و ۴ تا ۱۰ انجام شد. شاخص‌های کالیبراسیون در این تحقیق مقادیر مربوط به جذب آغازین و روندیابی سیل در رودخانه است. معیار تصمیم در خصوص کفایت هر یک از پارامترهای مربوط به شاخص کالیبراسیون، تغییر در میزان دبی اوج و حجم دبی در ایستگاه خروجی است. نتایج نشان داد مدل پس از تنظیم پارامترها قادر است دبی اوج و حجم سیلاب را با دقت قابل قبول شبیه‌سازی کند. اختلاف بین دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مربوط به مرحله کالیبراسیون مدل در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. رویدادهای مورد استفاده و نتایج مربوط به مرحله کالیبراسیون مدل

ردیف	تاریخ رویداد	دبی اوج مشاهده‌ای (متر مکعب در ثانیه)	دبی اوج شبیه‌سازی شده (متر مکعب در ثانیه)	حجم سیلاب مشاهده‌ای (میلی متر)	حجم سیلاب شبیه‌سازی شده (میلی متر)
۳	۲۰۱۵/۰۴/۱۵	۲۰/۳۰	۹۱/۸	۱۷/۴۲	۵۳/۴۰
۴	۲۰۰۶/۰۴/۱۵	۲۰/۲۰	۳۲/۴	۵۲/۰۴	۲۲/۹۲
۵	۲۰۱۶/۰۴/۰۱	۱۱/۸۰	۴/۱	۷/۵	۱/۸۵
۶	۲۰۱۹/۰۴/۱۱	۱۰/۴۰	۴۳	۱۴/۰۲	۲۲/۴۹
۷	۲۰۰۶/۰۵/۱۷	۸/۰۱	۱۲/۸	۱۳/۹۷	۷/۰۴
۸	۲۰۱۷/۰۳/۲۰	۶/۷۳	۱۵/۵	۵/۳۹	۸/۵۱
۹	۲۰۰۷/۰۳/۱۶	۵/۰۵	۸/۳	۲/۳۷	۳/۷۸
۱۰	۲۰۱۴/۰۴/۱۳	۵/۰۱	۴۲/۱	۱۱/۴۹	۲۴/۵۶

اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی، دو رویداد مستقل (۲۰۱۸/۰۴/۰۱ و ۲۰۲۰/۰۲/۲۶) استفاده شد. مطابق شکل ۴ مقایسه هیدروگراف های مشاهده ای و شبیه سازی شده نشان داد مدل پس از کالیبراسیون توانایی شبیه سازی شکل هیدروگراف، زمان اوج و مقدار دبی اوج را دارد و رویداد ۲۰۲۰/۰۲/۲۶ عملکرد بهتری نسبت به رویداد ۲۰۱۸/۰۴/۰۱ نشان داد و به عنوان مبنای تحلیل های بعدی انتخاب شد.



شکل ۵. هیدروگراف قبل (سمت چپ) و بعد از اعتبارسنجی (سمت راست) رویدادهای منتخب

ارزیابی کارایی مدل

ضرایب مختلفی وجود دارد که می تواند برای ارزیابی دقت مدل های هیدرولوژیکی استفاده شود. رایج ترین توابع هدف استفاده شده برای واسنجی مدل های هیدرولوژیکی، ضریب نش - ساتکلیف، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطای کلی (BIAS) است که در این تحقیق از ضرایب فوق استفاده شده و نتایج آن در جدول ۴ آمده است. مطابق نتایج جدول و با توجه به معیارهای ارزیابی سه گانه، رویداد ۲۰۲۰/۰۲/۲۶ نسبت به رویداد ۲۰۱۸/۰۴/۰۱ شرایط بهتری داشته و مبنای تجزیه و تحلیل های آینده در خصوص موضوع تحقیق است.

جدول ۴. نتایج کارایی مدل

Percent Bias	RMSE Std Dev	NSE	معیار ارزیابی رویداد
۲/۵۲	-/۳	۰/۸۷	۲۰۱۸/۰۴/۰۱
-۸/۵۶	-/۲	۰/۹۴۷	۲۰۲۰/۰۲/۲۶

نتایج اولویت بندی زیر حوضه ها از لحاظ پتانسیل تولید سیل

جدول ۵ نتایج اولویت بندی زیر حوضه های ۸ گانه منطقه مورد مطالعه را با توجه به شبیه سازی رویداد اعتباریابی شده تاریخ ۲۰۲۰/۰۲/۲۶ نشان می دهد.

جدول ۵. نتایج اولویت بندی زیر حوضه ها در منطقه مورد مطالعه

زیر حوضه	مساحت (کیلومتر مربع)	اولویت بندی مساحت	دبی اوج زیر حوضه (متر مکعب بر ثانیه)	اولویت بندی دبی اوج زیر حوضه	مقدار کاهش دبی اوج خروجی (متر مکعب بر ثانیه)	درصد کاهش دبی اوج خروجی	اولویت کاهش دبی	دبی ویژه (متر مکعب بر ثانیه بر کیلومتر مربع)	اولویت دبی ویژه	کاهش دبی به ازای واحد سطح	اولویت کاهش دبی به ازای واحد سطح
W640	۱۴/۵۶	۸	۲/۲	۸	۵۰	۴/۲۱	۸	۰/۱۵۱	۴	۰/۲۸۹	۵
W730	۲۳/۶۷	۷	۳/۶	۷	۴۸/۶	۶/۹۰	۷	۰/۱۵۲	۵	۰/۲۹۱	۴
W530	۲۶/۹۱	۶	۴/۲	۶	۴۸	۸/۰۵	۶	۰/۱۵۶	۸	۰/۲۹۹	۱
W750	۳۲/۳۹	۵	۵	۵	۴۷/۲	۹/۵۸	۵	۰/۱۵۴	۶	۰/۲۹۶	۳
W520	۴۳/۰۱	۴	۶/۳	۴	۴۵/۹	۱۲/۰۷	۴	۰/۱۴۶	۲	۰/۲۸۱	۷
W740	۵۹/۷۲	۳	۸/۸	۳	۴۳/۴	۱۶/۸۶	۳	۰/۱۴۷	۳	۰/۲۸۲	۶
W860	۶۶/۲۷	۲	۹/۶	۲	۴۲/۶	۱۸/۳۹	۲	۰/۱۴۴	۱	۰/۲۷۸	۸
W610	۶۶/۲۹	۱	۱۰/۳	۱	۴۱/۹	۱۹/۷۳	۱	۰/۱۵۵	۷	۰/۲۹۸	۲

از آنجا که تقریباً تمامی روابط و فرمول های مربوط به محاسبات دبی، وابسته به عامل مساحت هستند، این موضوع بدیهی است که زیر حوضه های با مساحت زیاد، به دلیل دریافت نزولات بیشتر، نسبت به زیر حوضه های کوچک، دبی بیشتری در خروجی شان تولید می کنند. برای جبران این مشکل - حذف اثر مساحت زیر حوضه ها - دبی ویژه (دبی به ازای واحد سطح) هر یک از زیر حوضه ها نیز بررسی شد که نتایج آن در ستون ۹ جدول آمده است. پس از این مرحله، زیر حوضه ها از لحاظ دبی ویژه نیز اولویت بندی شده اند. همان طور که در ستون ۱۰ جدول نشان داده شد، نتایج مربوط به اولویت بندی دبی ویژه نشان می دهد اولویت کاهش دبی ویژه دقیقاً با اولویت عامل مساحت یکسان نیست و باید نقش سایر عوامل ژئومتری و هیدرولوژیکی را دخیل دانست.

پس از این مرحله درصد کاهش دبی اوج ریز حوضه ها به ازای واحد سطح ریز حوضه ها نیز بررسی شد که در ستون های ۱۱ و ۱۲ جدول آورده شد. به این ترتیب که درصد کاهش دبی اوج در خروجی هر زیر حوضه به مساحت آن زیر حوضه تقسیم و سپس، اولویت بندی زیر حوضه ها به ازای واحد سطح هر زیر حوضه نیز بررسی شد. در این مورد زیر حوضه W530 در رتبه اول، و W860 در رتبه آخر قرار گرفت.

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد زیر حوضه های حوضه آبخیز سد کلان رفتار هیدرولوژیکی متفاوتی دارند و سهم آن ها در تولید رواناب و دبی اوج سیلاب یکسان نیست. این تفاوت ها ناشی از ترکیب عوامل فیزیوگرافی، هیدرولوژیکی و کاربری اراضی است که در هر زیر حوضه به صورت متفاوتی عمل می کنند. تحلیل نتایج مدل HEC-HMS نشان داد زیر حوضه هایی با شیب بیشتر، طول آبراهه

کوتاه‌تر، شماره منحنی بالاتر و زمان تمرکز کمتر، سهم بیشتری در تولید رواناب دارند. این یافته با اصول نظری هیدرولوژی همخوانی دارد.

مقایسه نتایج این مطالعه با نتایج پژوهش‌های داخلی و خارجی نشان می‌دهد نقش پارامترهای فیزیوگرافی و کاربری اراضی در تولید رواناب، در حوضه آبخیز سد کلان نیز مشابه سایر حوضه‌ها است. برای مثال، خسروشاهی و ثقفیان (۱۳۸۴) و ثقفیان و همکاران (۱۳۸۵) گزارش کردند که شماره منحنی (CN) و تغییرات کاربری اراضی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر دبی اوج سیلاب هستند. همچنین، نتایج پژوهش سپهوند و همکاران (۱۴۰۲) نشان داد استفاده از نقشه شماره منحنی حاصل از تصاویر سنتینل ۲ در مقایسه با لندست ۸ به طور قابل توجهی روی هیدروگراف خروجی مدل هیدرولوژیکی تأثیر داشته، به طوری که نتایج ارزیابی نش - ساتکلیف را از ۰/۳۹ به ۰/۶۸ در مرحله اعتبارسنجی رسانده است؛ یافته‌ای که در این پژوهش نیز تأیید شد.

نتایج حاصل از تحلیل حجم رواناب نیز نشان داد پارامتر حداکثر نگهداشت، بیشترین تأثیر را بر حجم رواناب را داشت، به طوری که افزایش ۳۰ درصدی آن موجب کاهش شدید در حجم رواناب شد. شماره منحنی نیز در این زمینه نقش مهمی داشت. تفاوت‌های میان دبی اوج و حجم رواناب نشان می‌دهند شماره منحنی بیشترین تأثیر را بر دبی اوج داشت، اما حداکثر نگهداشت نقش بیشتری در کنترل حجم رواناب ایفا کرد. به بیان دیگر، دبی اوج به پارامترهای مرتبط با تغییرات لحظه‌ای و شدت جریان حساس‌تر است، در حالی که حجم رواناب به پارامترهای ذخیره و نفوذپذیری بیشتر وابسته است که با نتایج پژوهش مؤذنی و همکاران (۱۴۰۴) هم‌راستا است.

همچنین، نتایج مطالعات محمودی و همکاران (۱۴۰۰) و قدیمی و همکاران (۱۴۰۱) نشان می‌دهد زیرحوضه‌های کوچک‌تر نیز می‌توانند به دلیل ویژگی‌های ژئومتری خاص، سهم قابل توجهی در تولید رواناب داشته باشند؛ موضوعی که در زیرحوضه W530 نیز مشاهده شد. یکی از نکات مهم این پژوهش، تفاوت قابل توجه بین رتبه‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس دبی اوج و دبی ویژه است. این تفاوت نشان می‌دهد اتکا به مساحت یا دبی مطلق برای اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها کافی نیست و باید شاخص‌های ترکیبی مانند دبی ویژه و درصد کاهش دبی اوج خروجی نیز در نظر گرفته شوند. این موضوع با یافته‌های بدری و همکاران (۱۳۹۵) و خسروشاهی (۱۳۸۴) همخوانی دارد.

نتایج این پژوهش همچنین نشان داد روش حذف انفرادی زیرحوضه‌ها، ابزاری مؤثر برای شناسایی مناطق بحرانی است. این روش که نخستین بار توسط خسروشاهی و ثقفیان (۱۳۸۴) معرفی شد، در این مطالعه نیز توانست زیرحوضه‌هایی را که بیشترین تأثیر را بر دبی اوج خروجی دارند، به طور دقیق شناسایی کند. زیرحوضه W530 با وجود مساحت متوسط، بیشترین کاهش دبی اوج را ایجاد کرد و به عنوان بحرانی‌ترین زیرحوضه معرفی شد. این یافته نشان می‌دهد عوامل دیگری مانند شیب، CN و زمان تمرکز نقش مهم‌تری نسبت به مساحت در تولید رواناب دارند.

از سوی دیگر، عملکرد مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه آبخیز سد کلان بسیار رضایت‌بخش بود. مقادیر بالای NSE و مقادیر پایین RMSE و Bias در مرحله اعتبارسنجی نشان داد مدل توانایی بالایی در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب دارد. این موضوع با نتایج پژوهش‌هایی مانند معماریان و همکاران (۱۳۹۷)، میرکازمی و همکاران (۱۴۰۰) و حسین‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) همسو است که دقت بالای این مدل را در حوضه‌های مختلف گزارش کرده‌اند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

به طور کلی، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد ترکیب مدل HEC-HMS با تحلیل‌های فیزیوگرافی و روش حذف انفرادی زیرحوضه‌ها می‌تواند چارچوبی مناسب برای اولویت‌بندی اقدامات آبخیزداری فراهم کند. این رویکرد به مدیران منابع آب کمک می‌کند تا با تمرکز بر زیرحوضه‌های بحرانی، اثربخشی اقدامات کنترل سیلاب را افزایش دهند و از اتلاف منابع جلوگیری کنند.

منابع

- 1 Badri, B., Zare Bidaki, R., Honarbakhsh, A., & Atashkhar, F. (2016). Prioritization of Flooding Potential in Beheshtabad Subbasins. *Physical Geography Research Quarterly*, 48(1), 143–158. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.57032>
- 2 Bahrami, S. A., Onagh, M., & Farazjoo, H. (2011). The role of flood routing in determination and Prioritizing hydrologic units Bostan Dam Basin from flooding and showing management technique. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 1(1), 10–26. Retrieved from https://wsrcj.srbiau.ac.ir/article_1930.html
- 3 Barker, R. D., & Chandrakantha, G. (2022). Estimation of Runoff Potential using Curve Number Method. *Indian Journal of Ecology*, 49, 1843–1847. <https://doi.org/10.55362/ije/2022/3745>
- 4 Besalatpour, A., Hajabbasi, M. A., Ayoubi, S., & Jalalian, A. (2012). Identification and prioritization of critical sub-basins in a highly mountainous watershed using SWAT model. *Eurasian Journal of Soil Science*, 1, 58–63.
- 5 Ghadimi, M., Hajihassani, N., Malekian, A., & Moghimi, E. (2022). Flood potential assessment of the Kan basin using morphometric parameters. *Journal of Range and Watershed Management*, 75(4), 539–551. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2021.311132.1537>
- 6 Hejazizadeh, Z., Hosseini, A., & Shadfar, S. (2017). Locating the effective levels on the flood peak flow in order to plan and contain the flood. *Geography*, 14(51), 31–42. Retrieved from https://mag.iga.ir/article_254350.html
- 7 Hosseini, A. N. S. M. (2016). A New Approach on Unit Flood Response Method in Prioritization of Sub-basins for Flood Control Activities. *Ferdowsi Civil Engineering*, 27(1), 51–66. Retrieved from https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/article_28914.html?lang=en
- 8 Hosseinzadeh, M. M., Salehi Milani, A. R., & Rezaian Zarandini, F. (2023). Zoning of the sensitivity of the sub-basins of Nekarood basin to flooding, Neka-Mazandaran. *Hydrogeomorphology*, 10(34), 100–175. <https://doi.org/10.22034/hyd.2023.52132.1646>
- 9 Islam, A., & Deb Barman, S. (2020). Drainage basin morphometry and evaluating its role on flood-inducing capacity of tributary basins of Mayurakshi River, India. *SN Applied Sciences*, 2(6), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2839-4>
- 10 jalaliyan, seed I. (2022). Evaluating and zoning flooding on a temporal and spatial scale (Study Area: Gorgan River Watershed in Golestan Province). *Geographical Planning of Space*, 11(42), 143–162. <https://doi.org/10.30488/gps.2020.213834.3157>
- 11 Kazakis, N., Kougiyas, I., & Patsialis, T. (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece. *Science of the Total Environment*, 538, 555–563.
- 12 Khosroshahi, M. (2016). An overview to identification and prioritization of flood prone areas using SSSE method in sub-watersheds. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 10(33), 59–72.
- 13 Mahmoodi, E., Azari, M. and Dastorani, M. T. (2022). Prioritization of flood source areas in Darongar Dam basin using hydrological modeling. *Journal of Climate Research*, 1401(50), 151–166.
- 14 Maryanaji, Z., & Ramezani, A. (2020). Analysis of the effect of factors affecting flooding in Hamadan province using Shannon entropy model and GIS. *Hydrogeomorphology*, 7(23), 185–207. <https://doi.org/10.22034/hyd.2020.11120>
- 15 Memarian, H., Pourreza-Bilondi, M., & Ghaffari, M. (2021). The prioritization of isochrones affecting peak flood discharge in Neishabour Bar Watershed, Iran. *Water Harvesting Research*, 4(2), 176–190. <https://doi.org/10.22077/jwhr.2022.5058.1054>
- 16 Memarian Khalil Abad, H., Yousefi, M., & Aghakhani Afshar, A. (2018). Identification and separation

- of flooding source regions and investigating the impact of watershed management operations on the peak discharge (Case study: Bar watershed, Neyshabour, Iran). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 35–59. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.13978.2875>
- 17 Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S., & Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515, 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.011>
 - 18 Mir Kazemi, S. M., Jalalkamali, N., & Irandoost, M. (2021). Sensitivity Analysis of Single Successive Sub-Basin Elimination Method in Flood Prone Area Derivation to Temporal and Height of Precipitation (Case Study: Zahedan Basin). *Iranian Water Researches Journal*, 15(3), 51–59. Retrieved from https://iwrij.sku.ac.ir/article_11160.html
 - 19 Mojiri, H., & Halabian, A. (2019). Evaluation of the Effects of Temporal variables of Temperature, Precipitation and Water Harvesting on Groundwater Resources in Mehrgerd basin of Semirom. *Journal of Watershed Management Research*, 10(20), 238–249. <https://doi.org/10.29252/jwmr.10.20.238>
 - 20 Moazeni Noghondar, S., Salajegheh, A., Khalighi Sigaroudi, S., & Golkarian, A. (2025). Sensitivity Analysis of Parameters Influencing Runoff Reduction Using the HEC-HMS Model in Gonbad Paired Watersheds, Hamadan. *Journal of Watershed Management Research*, 16(2), 1–18. <https://doi.org/10.61882/jwmr.2025.1305>
 - 21 Mokhtari, E., Mezali, F., Abdelkebir, B., & Engel, B. (2023). Flood risk assessment using analytical hierarchy process: A case study from the Cheliff-Ghrib watershed, Algeria. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 694–711. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.316>
 - 22 Noori, A., & Bonakdari, H. (2023). A GIS-Based Fuzzy Hierarchical Modeling for Flood Susceptibility Mapping: A Case Study in Ontario, Eastern Canada, 62. <https://doi.org/10.3390/ecws-7-14242>
 - 23 Nozari, hamed, marofi, safar, & edirsh, mahnaz. (2017). Identification and prioritize of potential areas to flood inundation in the Dez basin using WMS. *Journal of Range and Watershed Managment*, 70(3), 805–820. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2017.136829.935>
 - 24 Rafiei Sardoi, E., Khalighi Sigarodi, S., Azareh, A., & Rostami Khalaj, M. (2015). Application of HEC-HMS model for prioritization of flooding potential in Upper Karaj Dam Catchment. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 9(28), 53–56.
 - 25 Rahman, M., Ningsheng, C., Mahmud, G. I., Islam, M. M., Pourghasemi, H. R., Ahmad, H., ... Dewan, A. (2021). Flooding and its relationship with land cover change, population growth, and road density. *Geoscience Frontiers*, 12(6), 101224. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101224>
 - 26 Saghafian, B., & Khosroshahi, M. (2005). Unit Response Approach for Priority Determination of Flood Source Areas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10(4), 270–277. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2005\)10:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2005)10:4(270))
 - 27 Sepahvand, T., Soleimani- Motlagh, M., Zeinivand, H., & Mirzaei Mosivand, A. (2023). Estimating Flood through the Fractal Theory-Based Precipitation Estimation and the CN Extracted from Sentinel 2 in HEC-HMS Model: A Case Study of Thireh Watershed in Borujerd-Dorud Region. *Desert Ecosystem Engineering*, 12(38), 87–103. <https://doi.org/10.22052/deej.2024.253747.1028>
 - 28 Shelar, R. S., Shinde, S. P., Pande, C. B., Moharir, K. N., Orimoloye, I. R., Mishra, A. P., & Varade, A. M. (2022). Sub-watershed prioritization of Koyna river basin in India using multi criteria analytical hierarchical process, remote sensing and GIS techniques. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103219.
 - 29 Smith, K., & Ward, R. (1998). Floods: Physical Processes and Human Impacts. Retrieved from <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:127494226>
 - 30 Talebi, A., Eslami, Z., & Abbasi, A. (2019). Comparing prioritization from flooding of sub-basins using

- HEC-HMS model and experimental methods in Eskandari Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 11(2), 336–343. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.107260.1174>
- 31 Vansteenkiste, T., Tavakoli, M., Van Steenbergen, N., De Smedt, F., Batelaan, O., Pereira, F., & Willems, P. (2014). Intercomparison of five lumped and distributed models for catchment runoff and extreme flow simulation. *Journal of Hydrology*, 511, 335–349. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.01.050>
- 32 Veneziano, D., & Villani, P. (1999). Best linear unbiased design hyetograph. *Water Resources Research*, 35(9), 2725. <https://doi.org/10.1029/1999WR900156>