



An Investigation of DEM Resolution Influence on Flood Inundation (Case study: Karun River)

Javad Zahiri¹ | Ahmad Jafari² | Mitra Cheraghi³ , Mohamad-Javad Nasr-Esfahani⁴

1. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of

Khuzestan, Iran. E-mail: j.zahiri@asnrukh.ac.ir

2. Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail:

ajafari@asnrukh.ac.ir

3. Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail:

mitra.cheraghi@asnrukh.ac.ir

3. Innovation and Technology Development, Khuzestan Water and Power Organization, Khuzestan, Iran. E-mail:

mo.isfahani@gmail.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	One of the fundamental aspects of flood modeling is the digital elevation model (DEM) of the riverbed and its floodplains. Given that high-accuracy digital elevation maps (DEMs) are not available in many regions of the country, this study seeks to examine the impact of DEM quality of the Karun Riverbed and its floodplains, specifically from the Molasani to Farsiat stations, on flood inundation mapping. The study area encompasses approximately 110 kilometers of the Karun River, including three hydrometric stations: Molasani, Ahvaz, and Farsiat. For two-dimensional modeling in the HEC-RAS environment, the availability of an elevation map of the study area is essential. To this end, elevation maps of the Karun River were prepared with varying accuracies using methods such as existing survey data and aerial imagery. Due to the unavailability of riverbed elevation maps, riverbed reconstruction was conducted in a GIS environment. In this study, to evaluate the quality of DEMs on flood mapping, maps with resolutions of 30, 50, 100, and 150 meters were utilized. For analyzing different scenarios, Sentinel-2 satellite images, along with 12 quantitative indices, were employed. The analysis results show that the Threat Score (TS) decreased from 67% for 30-meter resolution to 66%, 59%, and 56% for 50 m, 100 m, and 150 m resolutions, respectively, indicating an 11% reduction in accuracy with a fivefold decrease in map resolution. The results of various quantitative criteria indicate that intermediate pixel sizes (50×50 or 100×50 meters) can provide reasonable accuracy while reducing computational efforts. This is particularly useful for regional-scale studies or trans-regional analyses. Overall, the findings emphasize the importance of adjusting pixel resolution in accordance with the specific objectives and constraints of flood modeling tasks.
Article history:	
Received: Jan. 2, 2025	
Revised: Feb. 6, 2025	
Accepted: Feb. 22, 2025	
Published online: June, 2025	
Keywords: Digital Elevation Map (DEM), Flood, HEC-RAS, Threat Score.	

Cite this article: Zahiri, J., Jafari, A., Cheraghi, M., & Nas-Esfahani, M. J. (2025) An Investigation of DEM Resolution Influence on Flood Inundation (Case study: Karun River), *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 56 (4), 965-982. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.388047.669865>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.388047.669865>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Effective flood management requires flood mapping, estimating potential damages and risks in flood-prone areas, and designing a comprehensive plan to mitigate flood risks. Understanding the phenomena and the impacts of changes on flow conditions, as well as predicting hydraulic events in rivers, plays a significant role in minimizing damages and losses. Modern methodologies leverage techniques such as remote sensing, geographic information systems (GIS), and hydraulic and hydrological models to simulate river flows. Given the lack of high-accuracy topographic maps in many areas of the country, this study aims to investigate the impact of the quality of topographic maps for the Karun River basin, including the riverbed and floodplains areas from Molasani to Farsiat, on flood inundation mapping.

Materials and Methods

The study area covers approximately 110 km of the Karun River, including three hydrometric stations: Molasani, Ahvaz, and Farsiat. For two-dimensional modeling in the HEC-RAS environment, a digital elevation map (DEM) of the study area is essential. Therefore, DEMs of the Karun River with varying resolutions were prepared using existing survey data and aerial imagery. In aerial maps, riverbed elevation is represented as the water surface elevation. Due to the unavailability of a detailed elevation map for the Karun Riverbed, the riverbed was constructed in the GIS environment based on existing cross sections. For evaluating the impact of topographic map quality on floodplain mapping, maps with resolutions of 30 m, 50 m, 100 m, and 150 m were used. Subsequently, flood inundation map was generated using HEC-RAS model based on the different DEMs. To investigate the efficiency of the different DEMs with varying resolutions, Sentinel-2 satellite imagery and 12 quantitative metrics were employed. These metrics include Proportion Correct (PC), Threat Score (TS), Odds Ratio (θ), Bias, False Alarm Ratio (FAR), Hit Rate (H), False Alarm Rate (F), Extremal Dependence Index (EDI), Heidke Skill Score (HSS), Pierce Skill Score (PSS), Success Ratio, and Odds Ratio Skill Score (ORSS).

Results

Analysis of the performance of 16 scenarios modeled in HEC-RAS with varying pixel resolutions for the river and floodplain, focusing on the PC metric, showed that models with smaller river pixel sizes (30 m and 50 m) consistently achieved the highest PC values. For 30 m pixels, the PC was approximately 0.799, while for 50 m pixels, it was slightly lower (ranging between 0.785 and 0.791). Examination of the TS metric, which is suitable for rare event prediction, revealed that models with the highest river pixel resolution (30 m) consistently achieved the highest TS values (approximately 0.67) across all floodplain pixel sizes, indicating strong performance. Additionally, higher-resolution river pixels consistently yielded the highest Odds Ratios (θ), reflecting high prediction reliability. For 30 m river pixels, θ started at 17.69 for 30 m floodplain pixels and slightly decreased to 17.51 for 150 m floodplain pixels. Increasing river pixel size from 30 m to 150 m led to a consistent rise in Bias, indicating over-prediction tendencies in larger pixel sizes. FAR also increased significantly with larger river pixels, signifying more false alarms. For smaller river and floodplain pixels, FAR remained relatively low, ranging from 0.25 to 0.29, indicating fewer false alarms at higher resolutions. The ORSS analysis showed that smaller pixel sizes for both river and floodplain consistently yielded higher ORSS values, demonstrating superior skill.

Conclusion

Based on the main effect analysis of river pixel size, PC and TS scores decreased as river pixel size increased, particularly for floodplain pixel sizes of 100 m and 150 m. The Heidke, Pierce, and Gilbert skill scores also decreased with larger river pixel sizes, with Gilbert's score showing a steep decline for larger river pixels, reflecting weak flood prediction performance at lower resolutions. Bias increased with larger river pixel sizes, indicating a tendency for over-prediction. FAR followed a similar rising trend. Regarding the main effect of floodplain pixel size, PC and TS scores declined as floodplain pixel size increased, particularly for river pixel sizes of 100 m and 150 m. The drop in TS suggests that lower floodplain resolution reduces the model's ability to accurately predict floods. All skill scores decreased with larger floodplain pixel sizes, especially in scenarios with 100 m and 150 m river pixels. Increased floodplain pixel sizes also resulted in higher Bias, indicating a greater tendency for over-prediction in lower floodplain resolutions.

Author Contributions

Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing Original Draft, J.Z.; Methodology, Writing - Review & Editing, A.J.; Software, Writing - Review & Editing, M.Ch. and M.J.N. All authors have read and

agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper. The authors gratefully acknowledge the support and facilities provided by the Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan [Grant number:1/411/1078].

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تأثیر وضوح مدل رقومی ارتفاع بر روی پهنه سیلاب (مطالعه موردی: رودخانه کارون)

جواد ظهیری^۱ | احمد جعفری^۲ | میترا چراغی^۳ | محمدجواد نصر اصفهانی^۴

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه:

j.zahiri@asnrukh.ac.ir

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه:

ajafari@asnrukh.ac.ir۳. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: mitra.cheraghi@asnrukh.ac.ir۴. گروه نوآوری و توسعه فناوری، سازمان آب و برق خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: mo.isfahani@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی سیلاب، مدل رقومی ارتفاع بستر رودخانه و دشت‌های سیلابی آن است. باتوجه به اینکه در بسیاری از مناطق کشور، نقشه‌های توپوگرافی با دقت بالا در دسترس نیست، در این تحقیق سعی شده است تا تأثیر کیفیت نقشه توپوگرافی بستر رودخانه کارون و محدوده‌های اطراف آن در بازه ملاثاتی تا فارسیات بر روی مدل‌سازی پهنه سیلاب مورد بررسی قرار گیرد. محدوده طرح حدود ۱۱۰ کیلومتر از رودخانه کارون است که شامل سه ایستگاه آب‌سنجی ملاثاتی، اهواز و فارسیات می‌باشد. برای مدل‌سازی دوبعدی در محیط HEC-RAS در دسترس بودن نقشه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه لازم است. بدین منظور نقشه ارتفاعی محدوده‌های اطراف رودخانه کارون با دقت‌های مختلف از طریق داده‌های نقشه‌های توپوگرافی موجود و تصاویر ماهواره‌ای تهیه گردید. به دلیل در دسترس نبودن نقشه ارتفاعی از بستر رودخانه کارون، بستر رودخانه در محیط GIS ساخته شد. در این مطالعه جهت بررسی کیفیت نقشه توپوگرافی بر روی پهنه سیلاب از نقشه‌هایی با دقت ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ متر استفاده شده است. جهت بررسی تأثیر نقشه‌های توپوگرافی با رزولوشن‌های مختلف بر پهنه‌بندی سیلاب نیز از عکس‌های ماهواره Sentinel-2 به همراه ۱۲ شاخص کمی استفاده شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که امتیاز تهدید از ۶۷ درصد به‌ازای رزولوشن ۳۰ متری به ۶۶، ۵۹ و ۵۶ درصد به‌ازای رزولوشن‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ متری رسیده است که نشان‌دهنده کاهش ۱۱ درصدی به‌ازای کاهش ۵ برابری رزولوشن نقشه توپوگرافی بوده است. نتایج معیارهای کمی مختلف نشان می‌دهند که اندازه پیکسل‌های میانه (۵۰×۵۰ یا ۵۰×۱۰۰ متر) می‌تواند دقت معقولی را با کاهش محاسبات فراهم کنند. این نسبت به‌ویژه برای مطالعات در مقیاس منطقه‌ای یا تجزیه و تحلیل‌های فرامنطقه‌ای مفید است. به‌طور کلی، یافته‌ها بر اهمیت استفاده از وضوح مدل رقومی متناسب با اهداف و محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی سیلاب تأکید دارند.
واژه‌های کلیدی: امتیاز تهدید، سیلاب، مدل رقومی ارتفاع، HEC-RAS	
استناد: ظهیری؛ جواد، جعفری؛ احمد، چراغی؛ میترا، نصر اصفهانی؛ محمدجواد، (۱۴۰۴) تأثیر وضوح مدل رقومی ارتفاع بر روی پهنه سیلاب (مطالعه موردی: رودخانه کارون)، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۴)، ۹۶۵-۹۸۲. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.388047.669865	
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.	© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.388047.669865	



مقدمه

به منظور برنامه‌ریزی جهت کنترل پدیده سیل، که از مسائل مهم دنیا و از جمله کشور ما است، مطالعات و تحقیقات زیادی صورت گرفته است. تنها در ایالات متحده آمریکا بین سال‌های ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۲ خسارتی فراتر از ۳۰۰ میلیارد دلار تحت تاثیر سیلاب اتفاق افتاده است (Samadi et al., 2025). مدیریت مؤثر سیلاب نیاز به نقشه‌برداری سیلاب، برآورد احتمالی خسارت و خطرات احتمالی در مناطق سیلاب و طراحی یک برنامه جامع برای کاهش خطر سیل دارد. بدیهی است شناخت پدیده‌ها و آثار ناشی از تغییرات آن‌ها بر شرایط جریان و همچنین پیش‌بینی رخداد‌های هیدرولیکی در رودخانه‌ها، می‌تواند نقش مؤثری در به حداقل رساندن خسارات سیل ایفا نماید. جهت مدل‌سازی جریان رودخانه مدل‌های متعدد و متنوعی با فرضیات و روش‌های عددی مختلف توسعه یافته و مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های نوین ارائه شده از تکنیک‌های مختلفی از قبیل سنجش از دور، سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی جهت مدل‌سازی جریان رودخانه سود می‌برند (Merkuryeva et al., 2015). مدل‌های عددی در مدل‌سازی هیدرودینامیک جریان رودخانه می‌توانند رویکردهای یک‌بعدی، دوبعدی و یا سه‌بعدی داشته باشند. با وجود تفاوت در ظرفیت و دقت مدل، برای مطالعه تأثیر انتشار سیلاب در رودخانه‌ها و به‌ویژه برای برآورد سرعت جریان و سطح آب، از مدل‌های یک‌بعدی استفاده می‌شود (Papaioannou et al., 2016)، در حالی که جهت مدل‌سازی پهنه سیلاب، مدل‌های دوبعدی توانایی بسیار بالاتری دارند. از مهم‌ترین مدل‌های عددی می‌توان به مدل‌های HEC-RAS، MIKE21، CCHE2D، MIKE11 و HEC-RAS اشاره نمود. مدل عددی HEC-RAS به دلیل کاربری گسترده در طرح‌های مهندسی رودخانه از جمله پهنه‌بندی سیلاب، انتقال رسوب، رایگان بودن مدل عددی و همچنین قابلیت ارتباط مناسب با نرم‌افزارهای پردازشگر GIS برای شبیه‌سازی سیلاب کاربرد گسترده‌ای داشته است. تکامل روش‌های عددی و توسعه ابزارهای محاسباتی قدرتمند که کاربرد روش‌های پیچیده‌تر را تسهیل می‌کند، منجر به استفاده بیشتر از مدل‌های هیدرولیک دوبعدی شده است (Haces-Garcia et al., 2024). نقشه‌های رقومی ارتفاع (DEM) و روش‌های حل عددی الزامات اساسی در مدل‌سازی دوبعدی هستند. رشد اخیر در تهیه نقشه‌های رقومی از منابع مختلف (با وضوح مکانی و دقت متفاوت) مدل‌سازی هیدرودینامیکی را تسهیل کرده است (Horritt & Bates, 2001). یکی از مشکلات استفاده از مدل‌های دو و سه‌بعدی، نیاز به نقشه ارتفاعی رودخانه و محدوده اطراف آن است که می‌تواند به‌شدت بر روی نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی تأثیرگذار باشد. تهیه نقشه ارتفاعی شامل دو بخش است که بخش اول آن مربوط به دشت‌های سیلابی رودخانه بوده که می‌بایست توسط سیستم سنجش از راه دور و یا نقشه‌برداری میدانی تهیه شود. بخش دوم نقشه ارتفاعی مربوط به توپوگرافی بستر رودخانه است که تهیه آن بسیار مشکل بوده و نیاز به تکنیک‌های نوین سنجش از راه دور و یا اندازه‌گیری در محل دارد (Lai et al., 2018). اگرچه در زمینه مدل‌سازی پهنه سیلاب مطالعات متعددی صورت پذیرفته است، با این حال تأثیر وضوح DEM بر شبیه‌سازی طغیان سیل کمتر بررسی شده است (Hsu et al., 2016).

با توجه به اینکه در بسیاری از مناطق کشور، نقشه‌های توپوگرافی با دقت بالا در دسترس نیست، در این تحقیق سعی شده است تا تأثیر کیفیت نقشه توپوگرافی محدوده‌های اطراف رودخانه کارون و نیز بستر رودخانه در بازه ملاثانی تا فارسیات بر روی نقشه پهنه سیلاب مورد بررسی قرار گیرد. بر همین اساس از نقشه‌های توپوگرافی با دقت‌های مختلف و نیز مدل هیدرودینامیکی جریان جهت شبیه‌سازی سیلاب در بازه مورد نظر استفاده شده است. جهت تعیین کارایی نقشه‌های توپوگرافی مختلف در مدل هیدرودینامیکی، تصاویر ماهواره‌ای Sentinel 2 به کار رفته است.

پیشینه پژوهش

یکی از زمینه‌های بسیار مهم در علم مهندسی رودخانه مربوط به شبیه‌سازی هیدرولیک جریان و پهنه سیلاب است که علاقه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. در زیر تعدادی از تحقیقات صورت گرفته در داخل و خارج کشور ارائه شده است.

Pena & Nardi (2018) به بررسی عدم قطعیت پارامترهای ورودی ناشی از ساده‌سازی اندازه مش زمین بر روی نتایج شبیه‌سازی دوبعدی انتشار موج سیلاب پرداختند. در این مطالعه روشی برای درون‌یابی بستر رودخانه جهت توسعه مدل‌های دوبعدی بزرگ مقیاس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی خطر سیلاب با استفاده از روش پیشنهادی پردازش زمین در حوضه رودخانه تیبر برای وضوح ۱۵۰ تا ۷۰۰ متر مورد آزمایش قرار گرفت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که شبیه‌سازی سیلاب با نقشه‌های رقومی با وضوح پایین در عرض چند ثانیه اجرا می‌شوند و می‌توانند پهنه و عمق سیلاب را تا حدود مورد قبولی نشان دهند. (Zelenáková et al., 2019). اقدام به مدل‌سازی سیلاب در رودخانه Slatvinec با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS پرداختند. علاوه بر این از سیستم اطلاعات جغرافیایی جهت تعیین

بازه‌هایی از اطراف رودخانه که تحت تأثیر سیلاب قرار می‌گیرند، استفاده گردید. هدف از این تحقیق برآورد میزان خسارت وارد شده به محدوده‌های اطراف رودخانه تحت تأثیر سیلاب‌های با دوره‌های بازگشت متفاوت بوده است. در مطالعه Oganian et al. (2019)، عملکرد سه مدل رقومی ارتفاع با وضوح‌های مختلف با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی سیلاب مانند HEC-HMS و HEC-RAS ارزیابی شد. مدل دوبعدی با استفاده از سه مدل رقومی ارتفاع مختلف که از طریق فناوری‌های لیدار (تشخیص و اندازه‌گیری نور)، Interferometric radar و Synthetic aperture radar به‌دست آمده بودند، پردازش شدند تا شبیه‌سازی و مقایسه سیلاب‌های با دوره بازگشت ۵، ۲۵ و ۱۰۰ سال انجام شود. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل رقومی ارتفاع با وضوح بالاتر، نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب دقیق‌تری تولید می‌کند، در حالی که وضوح‌های پایین‌تر تمایل به پیش‌بینی بیش از حد گستره سیلاب دارد. ظهیری و آشناور (۱۴۰۰) از مدل عددی HEC-RAS جهت شبیه‌سازی یک‌بعدی هیدرودینامیک جریان در رودخانه کارون استفاده نمودند. بازه مورد استفاده در این تحقیق، محدوده ملاثانی تا فارسیات بوده که ایستگاه اهواز به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل HEC-RAS توانایی بالایی جهت شبیه‌سازی عمق و دبی جریان در شرایط غیرمماندگار دارد. (Muthusamy et al. (2021) از نقشه‌های توپوگرافی با اندازه پیکسل‌های مختلف از ۱ تا ۵۰ متر جهت شبیه‌سازی سیلاب در رودخانه درونت^۱ استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با کاهش وضوح شبکه از ۱ متر به ۵۰ متر، وسعت سیلاب ۳۰ درصد و عمق متوسط سیلاب ۱۵۰ درصد افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این امر کاهش دقت هندسه مقطع رودخانه و کاهش عمق تخمین زده‌شده رودخانه است که منجر به کاهش ظرفیت انتقال آب آبراهه می‌شود. این امر به‌ویژه در نزدیکی رودخانه منجر به افزایش وسعت و عمق سیلاب می‌شود. این اثر زمانی که اندازه شبکه رقومی از عرض رودخانه بزرگ‌تر شود، تشدید می‌شود. (Parizi et al. (2022) به بررسی تأثیر وضوح مدل‌های رقومی ارتفاع تولید شده توسط پهپاد، در بازه‌ای از ۱ متر تا ۳۰ متر، بر ویژگی‌های سیلاب از جمله مساحت سیلاب، عمق میانگین جریان و سرعت میانگین جریان پرداختند. سپس، خطاهای ویژگی‌های سیلاب برای مدل‌های رقومی جهانی شامل ALOS (۳۰ متر)، ASTER (۳۰ متر)، SRTM (۳۰ متر) و TDX (۱۲ متر) با استفاده از اندازه‌گیری‌های پهپاد محاسبه شد. مدل دوبعدی HEC-RAS برای شبیه‌سازی سیلاب با دوره بازگشت ۵ تا ۲۰۰ سال در طول ۲۰ کیلومتر از رودخانه اترک استفاده شد. اعتبارسنجی مدل‌سازی هیدرولیکی نشان داد که مدل دوبعدی HEC-RAS همراه با مدل رقومی پهپاد، سیلاب را با دقت حدود ۹۲ درصد شبیه‌سازی می‌کند. مقایسه مدل‌های رقومی جهانی نشان داد که مدل رقومی TDX با خطای ۶/۱۵ درصد در مساحت سیلاب نزدیک‌ترین نتایج را به اندازه‌گیری‌های پهپاد ارائه داد.

بررسی مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که نرم‌افزارهای مدل‌سازی مانند HEC-RAS و HEC-HMS ابزارهای قدرتمندی برای شبیه‌سازی سیلاب هستند، اما دقت نتایج به‌شدت به کیفیت داده‌های ورودی مانند وضوح DEM وابسته است. وضوح مدل‌های رقومی ارتفاع نقش کلیدی در دقت شبیه‌سازی سیلاب دارد. مدل‌های با وضوح بالاتر نتایج دقیق‌تری در خصوص پهنه‌بندی سیلاب، عمق و سرعت جریان ارائه می‌دهند. کاهش وضوح شبکه می‌تواند منجر به پیش‌بینی بیش از حد گستره سیلاب و افزایش خطا در تخمین عمق و وسعت سیلاب شود. این مطالعات به طور کلی بر اهمیت استفاده از داده‌های با وضوح بالا و روش‌های پیشرفته پردازش داده‌ها برای بهبود دقت شبیه‌سازی سیلاب تأکید دارند.

روش‌شناسی پژوهش

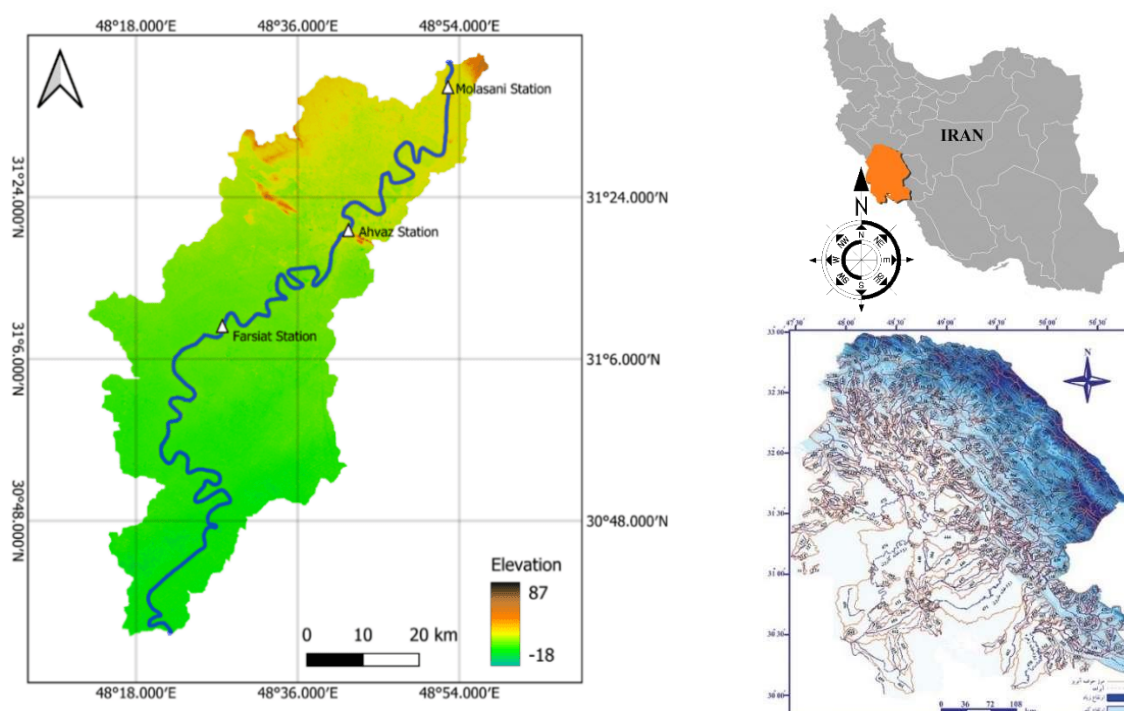
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کارون با مساحتی معادل ۴۲۷۵۴ کیلومتر مربع بین مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۵ دقیقه طول شرقی و ۲۰ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته. رودخانه کارون به طول ۸۹۰ کیلومتر از چهار شاخه اصلی به نام‌های خرسان، آب و نک، آب کیار و بازفت تشکیل گردیده است. رودخانه کارون پس از ورود به دشت خوزستان در شمال گنوند، به سمت جنوب جریان می‌یابد. در شوشتر، توسط بند میزان، رودخانه به دو شاخه شطیط یا دجیل و گرگر تقسیم می‌شود. در بند قیر دو شاخه مذکور به‌علاوه رودخانه دز به هم ملحق شده و به سمت جنوب جریان می‌یابد. رودخانه پس از عبور از شهر اهواز، همچنان مسیر جنوبی را ادامه داده تا در نزدیکی خرمشهر به بهمنشیر و اروندرود متصل می‌شود (Kashefipour & Zahiri, 2010). محدوده طرح مورد مطالعه حدود ۱۱۰ کیلومتر از رودخانه کارون است که شامل سه ایستگاه آب‌سنجی ملاثانی، اهواز و فارسیات می‌باشند که ایستگاه‌های

ملائانی و فارسیات به عنوان شرایط مرزی در بالادست و پایین دست در نظر گرفته شدند و ایستگاه اهواز به عنوان ایستگاه شاهد جهت صحت سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در جدول ۱ و موقعیت جغرافیایی این ایستگاه‌ها بر روی رودخانه کارون در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد استفاده در این مطالعه

ردیف	ایستگاه	اطلاعات مورد استفاده	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)
۱	ملائانی	هیدروگراف	۳۹۸۶۴۹	۳۴۹۶۲۵۵	۲۵
۲	اهواز	هیدروگراف و اشل	۳۷۹۵۸۲	۳۴۶۸۸۶۳	۲۰
۳	فارسیات	اشل	۳۶۲۸۹۴	۳۴۵۱۵۵۲	۱۱



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

اطلاعات مورد استفاده

اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق شامل اطلاعات مقاطع رودخانه کارون، نقشه‌های توپوگرافی محدوده‌های اطراف رودخانه و دبی جریان و تراز سطح آب در سه ایستگاه آب‌سنجی ملائانی، اهواز و فارسیات است. برای مدل سازی در محیط HEC-RAS، در دسترس بودن نقشه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه لازم است. بدین منظور نقشه ارتفاعی رودخانه کارون از داده‌های نقشه برداری موجود و تصاویر هوایی تهیه شد. به دلیل در دسترس نبودن نقشه ارتفاعی از بستر رودخانه کارون، در ابتدا می‌بایست بستر رودخانه در محیط GIS ساخته شود. بدین منظور مقاطع برداشت شده توسط سازمان آب و برق خوزستان در قسمت‌های مختلف رودخانه کارون مورد استفاده قرار گرفتند. این مقاطع شامل نقاط ارتفاعی از بازه ایستگاه آب‌سنجی ملائانی تا فارسیات هستند که سواحل و بستر رودخانه را در برمی گیرند. در این مطالعه جهت بررسی تأثیر کیفیت مدل‌های رقومی بر روی پهنه سیلاب از نقشه‌هایی با دقت ۳۰ متر، ۵۰ متر، ۱۰۰ متر و ۱۵۰ متر استفاده شده است که از نقشه توپوگرافی تولید شده به دست آمده‌اند.

مدل سازی جریان با استفاده از مدل هیدرودینامیکی دوبعدی HEC-RAS

در این تحقیق جهت شبیه سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان در رودخانه کارون از مدل دوبعدی HEC-RAS که توسط گروه مهندسين مشاور ارتش آمریکا توسعه یافته است، استفاده گردید. در سال‌های اخیر شبیه سازی دوبعدی جریان نیز به مدل HEC-RAS اضافه شد که قابلیت‌های فراوانی را در زمینه مدل سازی جریان در اختیار مهندسان هیدرولیک قرار داده و از انعطاف پذیری بالایی برخوردار است. مدل دوبعدی HEC-RAS جریان را به صورت ناپایدار شبیه سازی می‌کند و توانایی حل معادلات به دو صورت مومنتوم کامل و موج دیفیوزیو را

دارد (Brunner, 2023). معادلات پیوستگی و اندازه حرکت حاکم بر مدل دوبعدی HEC-RAS برای جریان غیرماندگار به صورت زیر می باشند:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + fv \quad \text{رابطه (۲)}$$

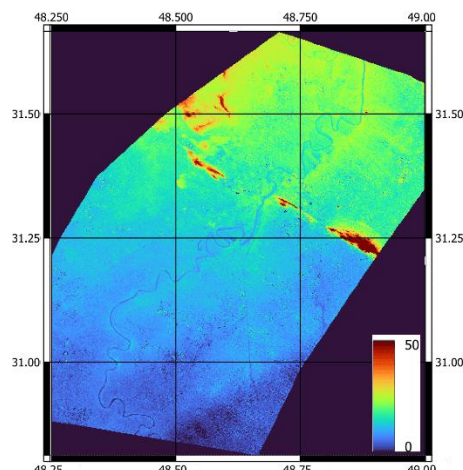
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + fu \quad \text{رابطه (۳)}$$

رابطه (۱) معادله پیوستگی و روابط (۲) و (۳) معادله اندازه حرکت را نشان می دهند. در این روابط H تراز سطح آب، h عمق جریان، t زمان، u و v مؤلفه های سرعت در راستای طولی و عرضی رودخانه، q دبی ورودی یا خروجی در واحد عرض، v_t ضریب ویسکوزیته گردابی در راستای افقی، c_f ضریب اصطکاک کف، R شعاع هیدرولیکی، g شتاب گرانش و f ضریب کوریولیس می باشد.

پس از تهیه نقشه های رقومی منطقه مورد مطالعه، عملیات مدل سازی در نرم افزار HEC-RAS انجام گردید. بدین منظور ابتدا نقشه های مورد نظر به محیط RAS Mapper فراخوانی شده سپس عملیات شبکه بندی، تعیین شرایط مرزی و اولیه و مشخص کردن نقشه کاربری اراضی و اعمال ضرایب زبری مانینگ در مدل HEC-RAS برای محدوده مورد مطالعه اعمال شد. با توجه به مطالعات صورت گرفته، محدوده طرح به چهار بخش تقسیم شد و ضریب زبری مانینگ برای محدوده های مختلف بین ۰/۲۶ تا ۰/۰۵ در نظر گرفته شد (ظهیری و آشناور، ۱۳۹۸). پس از این مراحل می توان اقدام به شبیه سازی شرایط هیدرولیکی جریان و تهیه نقشه پهنه بندی سیلاب به ازای نقشه های مختلف توپوگرافی نمود. نمونه ای از نقشه توپوگرافی با رزولوشن ۳۰ متر و مش بندی ایجاد شده در محیط HEC-RAS در شکل ۲ ارائه شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲. نمونه ای از (الف) مدل رقومی ارتفاع با رزولوشن ۳۰ متر و (ب) مش بندی مورد استفاده در مدل دوبعدی HEC-RAS

معیارهای بررسی کارایی نقشه های توپوگرافی با کیفیت های مختلف

هدف از تحقیق حاضر بررسی دقت مدل های رقومی با رزولوشن های مختلف در پهنه بندی سیلاب است. مدل های رقومی با رزولوشن های مختلف از نقشه توپوگرافی تولید شده برای منطقه مورد مطالعه تهیه شده اند. در این تحقیق جهت بررسی کارایی مدل های رقومی از عکس های ماهواره Sentinel-2 به همراه ۱۲ شاخص کمی استفاده شده است. تصویر ماهواره Sentinel-2 مربوط به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ بوده است. شاخص های مورد استفاده در این مطالعه عبارتند از نسبت صحیح، شاخص تهدید، نسبت شانس، بایاس، نسبت هشدار نادرست، نرخ برخورد، نرخ هشدار نادرست، شاخص وابستگی حدی، نمره مهارت هایدک، نمره مهارت پیرس، نسبت موفقیت و نسبت شانس (Wilks, 2019 ; Ebert et al. 2007). برای مقایسه کارایی مدل های رقومی مختلف نیاز است که سیلاب مشاهداتی در دسترس باشد تا بتوان شاخص های کمی اشاره شده را محاسبه نمود. با در نظر گرفتن سیلاب شبیه سازی شده با مدل های رقومی مختلف در کنار سیلاب

مشاهداتی می‌توان شاخص‌های کمی مورد اشاره را محاسبه نمود. جهت محاسبه شاخص‌های مختلف هر گره مش محاسباتی به عنوان تشخیص درست (a)، عدم تشخیص سیلاب (c)، آلارم اشتباه (b) و یا هیچ‌کدام (d) تقسیم‌بندی شد (شکل ۴). در این شکل، محور افقی مربوط به سیلاب مشاهداتی بوده و نشان دهنده وقوع یا عدم وقوع سیلاب در هر پیکسل است. بر همین اساس جهت محاسبه شاخص‌های مختلف می‌بایستی تصویر ماهواره‌ای از رویداد سیلاب وجود داشته باشد.

		Observed		
		Yes	No	
Forecast	Yes	a	b	a + b
	No	c	d	c + d
		a + c	b + d	n = a + b + c + d
		Marginal totals for observations		Marginal totals for forecasts

شکل ۴. گره‌های سیلاب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده جهت محاسبه کارایی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته (ویلیکس، ۲۰۱۹)

معیار دقت میزان هم‌خوانی پیش‌بینی‌ها با رویدادهای واقعی را نشان می‌دهد. در پیش‌بینی‌های کاملاً دقیق، تمامی پیش‌بینی‌های «بله» با وقوع رویداد و «نه» با عدم وقوع رویداد تطابق دارند. برای پیش‌بینی‌های ناقص، معیارهای دقت مختلفی برای سنجش این هم‌خوانی استفاده می‌شود. یکی از ساده‌ترین معیارها، نسبت صحیح^۱ (PC) است که نشان‌دهنده درصد پیش‌بینی‌های درست از کل موارد پیش‌بینی است (Roux et al., 2020).

$$PC = \frac{a + d}{n} \quad \text{رابطه ۴}$$

نسبت صحیح پیش‌بینی‌های درست «بله» و «نه» را به طور مساوی ارزیابی می‌کند، اما در مواردی که رویداد «بله» نادر است، ممکن است مناسب نباشد. این معیار هر دو نوع خطا (هشدار نادرست و ازدست‌دادن) را یکسان جریمه می‌کند و مقدار آن بین ۰ (بدترین) و ۱ (بهترین) است. با اینکه این معیار درصد پیش‌بینی‌های درست را نشان می‌دهد، اما بین پیش‌بینی‌های صحیح رویداد و عدم رویداد تمایز قائل نمی‌شود. در چنین شرایطی، امتیاز تهدید (TS)^۲ جایگزین مناسبی است که برای رویدادهای نادر مفیدتر است:

$$TS = \frac{a}{a + b + c} \quad \text{رابطه ۵}$$

امتیاز تهدید (TS) یا شاخص موفقیت بحرانی^۳ (CSI) معیاری برای ارزیابی عملکرد پیش‌بینی‌های دسته‌بندی شده است که برابر است با تعداد کل پیش‌بینی‌های صحیح رویداد (برخوردها) تقسیم بر مجموع تعداد پیش‌بینی‌های رویداد به‌علاوه تعداد از دست‌دادن‌ها (برخوردها + هشدارهای کاذب + از دست‌دادن‌ها). دامنه آن از ۰ تا ۱ است، به‌طوری که مقدار ۱ نشان‌دهنده پیش‌بینی کامل است. این شاخص در ارزیابی پیش‌بینی‌های مکانی، مانند هشدارهای بارش سنگین و پهنه‌بندی سیلاب کاربرد فراوانی دارد و به دلیل عدم نیاز به مشخص کردن نواحی پیش‌بینی «نه»، مفید است (Ebert & McBride, 2000). یکی دیگر از روش‌های ارزیابی دقت، استفاده از نسبت احتمالات^۴ (θ) برای مقایسه پیش‌بینی‌های صحیح و هشدارهای نادرست است.

$$\theta = \frac{ad}{bc} \quad \text{رابطه ۶}$$

مقادیر بالاتر این نسبت نشان‌دهنده دقت بیشتر پیش‌بینی‌ها است. در حالت‌هایی که پیش‌بینی‌ها و مشاهدات مستقل هستند، مقدار این نسبت برابر ۱ است. این معیار توسط Stephenson (2000) به ارزیابی پیش‌بینی‌های هواشناسی معرفی شد و پیش‌تر در آمار پزشکی استفاده می‌شد. بایاس (Bias) یا مقایسه میانگین پیش‌بینی با میانگین مشاهده معمولاً به‌صورت یک نسبت برای ارزیابی نتایج مدل، مورد

1 Proportion Correct

2 Threat Score

3 Critical Success Index

4 Odds Ratio

استفاده قرار گرفته و به صورت زیر تعریف می شود:

$$B = \frac{a + b}{a + c} \quad \text{رابطه ۷}$$

پیش بینی های بدون بایاس زمانی رخ می دهند که $B = 1$ باشد که نشان دهنده این است که رویداد به همان تعداد پیش بینی شده است که مشاهده شده است. بایاس اطلاعاتی درباره هم خوانی بین پیش بینی ها و مشاهدات در موقعیت های خاص ارائه نمی دهد، بنابراین نمی تواند معیاری برای دقت باشد. بایاس بزرگ تر از ۱ نشان دهنده پیش بینی بیش از حد است، یعنی سیلاب بیشتر از میزان مشاهده شده پیش بینی شده است. در مقابل، بایاس کمتر از ۱ نشان دهنده پیش بینی کمتر از حد است، یعنی سیلاب کمتر از میزان مشاهده شده پیش بینی شده است (Pennelly et al. 2014).

نسبت هشدار نادرست^۱ (FAR) معیاری برای ارزیابی دقت پیش بینی ها است که نشان می دهد چه درصدی از پیش بینی های «بله» اشتباه بوده اند. مقدار FAR هر چه کمتر باشد، دقت پیش بینی بالاتر است و ایده آل ترین مقدار FAR صفر است. این معیار در ارزیابی مدل های پیش بینی به ویژه در مواقعی که هشدارهای نادرست مهم هستند، کاربرد دارد.

$$FAR = \frac{b}{a + b} \quad \text{رابطه ۸}$$

نرخ برخورد^۲ (H) و نرخ هشدار نادرست^۳ (F) دو معیار مهم برای ارزیابی پیش بینی ها هستند. نرخ برخورد نشان دهنده درصد پیش بینی هایی است که صحیح بوده و رویداد مورد نظر واقعاً رخ داده است. به عبارت دیگر، این پارامتر نشان دهنده بخشی از پهنه سیلاب است که به درستی پیش بینی شده است.

$$H = \frac{a}{a + c} \quad \text{رابطه ۹}$$

نرخ هشدار نادرست نشان دهنده درصد پیش بینی های نادرستی است که در آن پیش بینی سیلاب صورت گرفته، ولی در واقعیت رخ نداده است. این نرخ به عنوان احتمال شناسایی نادرست^۴ شناخته می شود.

$$F = \frac{b}{b + d} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

شاخص وابستگی حدی^۵ (EDI) که توسط Ferro & Stephenson (2011) پیشنهاد شد، برای ارزیابی دقت پیش بینی ها در مواجهه با رویدادهای نادر طراحی شده است. این شاخص مقادیری بین -۱ تا +۱ می گیرد. مقادیر مثبت نشان دهنده برتری پیش بینی ها نسبت به پیش بینی های تصادفی بوده، در حالی که مقادیر منفی یا نزدیک به صفر به معنای عملکرد ضعیف تر از پیش بینی های تصادفی است.

$$EDI = \frac{\ln(F) - \ln(H)}{\ln(F) + \ln(H)} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

نمره مهارت هایدک^۶ (HSS) یک معیار ارزیابی پیش بینی است که بر اساس نسبت پیش بینی های صحیح تعریف می شود. این نمره برای پیش بینی های کامل مقدار ۱، برای پیش بینی هایی معادل پیش بینی های مرجع مقدار صفر، و برای پیش بینی های بدتر از پیش بینی های مرجع مقدار منفی دارد. در این روش، پیش بینی های مرجع به پیش بینی های تصادفی آماری مستقل اشاره دارند.

$$HSS = \frac{2(ad - bc)}{(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

نمره مهارت پیرس^۷ شباهت هایی با نمره هایدک دارد؛ اما از یک نرخ برخورد مرجع متفاوت استفاده می کند. این معیار را می توان به عنوان تفاوت بین دو احتمال شرطی نرخ برخورد (H) و نرخ هشدار نادرست (F) در نظر گرفت.

$$PSS = \frac{(a + d)/n - [(a + b)(a + c) + (b + d)(c + d)]/n^2}{1 - [(a + c)^2 + (b + d)^2]/n^2} = \frac{ad - bc}{(a + c)(b + d)} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

پیش بینی های کاملاً درست نمره یک دریافت می کنند (زیرا $b = c = 0$ ، یا به طور دیگر، $H = 1$ و $F = 0$). پیش بینی های تصادفی

1 False Alarm Ratio

2 Hit Rate

3 False Alarm Rate

4 False Detection

5 Extremal Dependence Index

6 Heidke Skill Score

7 Peirce Skill Score

دارای $PSS = 0$ بوده زیرا $H = F$ است و پیش‌بینی‌هایی که از پیش‌بینی‌های تصادفی بدتر باشند نمره منفی می‌گیرند. علاوه بر این، برخلاف نمره هایدک، سهم پیش‌بینی درست «نه» یا «بله» در نمره مهارت پیرس بسته به احتمال وقوع رویداد تغییر می‌کند؛ به‌طوری‌که اگر رویدادی کمتر یا بیشتر محتمل باشد، پیش‌بینی درست آن سهم بیشتری خواهد داشت.

امتیاز مهارت گیلبرت^۱ (GSS) توسط Gilbert (1884) ارائه شد که می‌توان آن را به‌عنوان نسبت موفقیت نامید که نشان‌دهنده دقت کلی مدل محاسباتی در شبیه‌سازی پهنه سیلاب بوده و دارای یک عبارت تصحیح بوده که اثر تصادفی بودن شبیه‌سازی را کاهش می‌دهد. مقادیر مثبت نسبت موفقیت نشان‌دهنده کارایی بالای مدل بوده و یک شبیه‌سازی کاملاً صحیح دارای نسبت موفقیت برابر با یک است، درحالی‌که نسبت موفقیت صفر حاکی از تصادفی بودن شبیه‌سازی است (Pennelly et al., 2014).

$$GSS = \frac{a/(a+b+c) - a_{ref}/(a+b+c)}{1 - a_{ref}/(a+b+c)} = \frac{a - a_{ref}}{a - a_{ref} + b + c} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

از آنجاکه برای محاسبه $a_{ref} = (a+b)(a+c)/n$ به حجم نمونه n نیاز است، GSS برخلاف TS به تعداد پیش‌بینی‌های صحیح "نه" نیز بستگی دارد (Ebert et al., 2007). نسبت شانس^۲ (Q) را می‌توان به‌صورت رابطه ۱۵ نوشت. پیش‌بینی‌های تصادفی مقدار $Q = 0$ دارند، و پیش‌بینی‌های کامل مقدار $Q = 1$ را تولید می‌کنند (Stephenson, 2000).

$$Q = \frac{\theta - 1}{\theta + 1} = \frac{(ad/bc) - 1}{(ad/bc) + 1} = \frac{ad - bc}{ad + bc} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

یافته‌های پژوهشی

در این تحقیق از ۴ اندازه مختلف برای پیکسل‌های رودخانه و دشت‌های سیلابی استفاده گردید که در مجموع ۱۶ نقشه توپوگرافی متفاوت در محیط QGIS تهیه شد. پس از تهیه نقشه‌های توپوگرافی رودخانه و دشت‌های سیلابی و ترکیب کردن آن‌ها از مدل دو بعدی HEC-RAS جهت شبیه‌سازی دو بعدی سیلاب استفاده شد. بر اساس سناریوهای مختلف، نتایج شبیه‌سازی سیلاب ۹۸ با استفاده از اندازه‌های متفاوت پیکسل‌های رودخانه و دشت‌های سیلابی در شکل ۵ ارائه شده است.

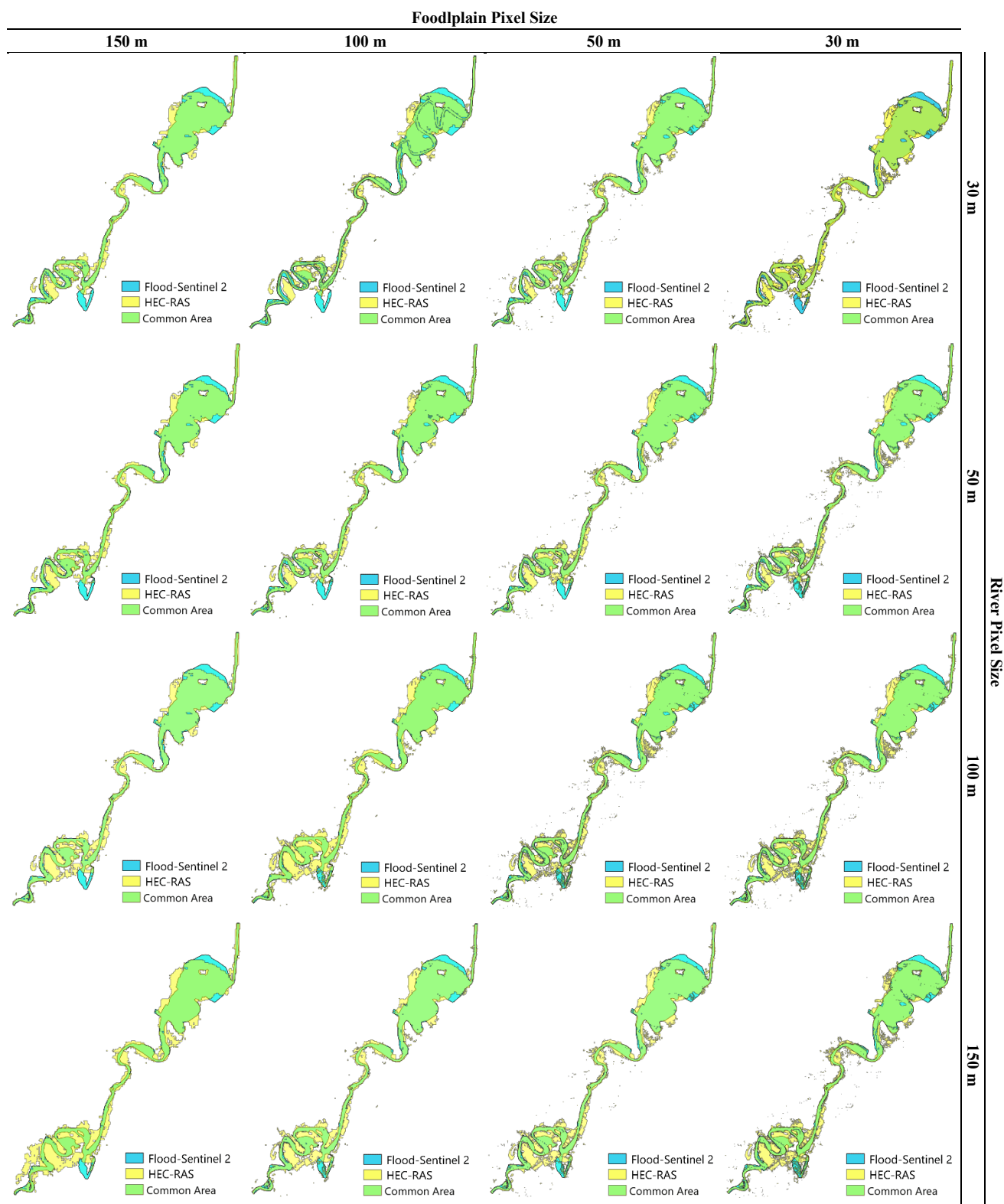
نتایج آنالیزهای صورت‌گرفته شامل معیارهای نسبت صحیح، شاخص تهدید، نسبت شانس، بایاس، نسبت هشدار نادرست، نرخ برخورد، نرخ هشدار نادرست، شاخص وابستگی حدی، نمره مهارت هایدک، نمره مهارت پیرس، نسبت موفقیت و نسبت شانس بر روی سناریوهای مختلف اجرا شده توسط مدل دوبعدی HEC-RAS در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته بر روی سناریوهای مختلف

Q	GSS	PSS	HSS	EDI	F	H	FAR	Bias	θ	TS	PC	Floodplain pixel size (m)	River pixel size (m)
۰/۸۹	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۸۰	۰/۲۵	۰/۸۶	۰/۲۴	۱/۱۳	۱۷/۶۹	۰/۶۷	۰/۷۹	۳۰	۳۰
۰/۸۹	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۸۰	۰/۲۶	۰/۸۶	۰/۲۴	۱/۱۳	۱۷/۶۰	۰/۶۷	۰/۷۹	۵۰	۳۰
۰/۸۹	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۸۰	۰/۲۶	۰/۸۶	۰/۲۴	۱/۱۴	۱۷/۵۵	۰/۶۷	۰/۷۹	۱۰۰	۳۰
۰/۸۹	۰/۴۳	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۸۰	۰/۲۶	۰/۸۶	۰/۲۴	۱/۱۴	۱۷/۵۱	۰/۶۷	۰/۷۹	۱۵۰	۳۰
۰/۸۸	۰/۴۱	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۷۹	۰/۲۷	۰/۸۶	۰/۲۶	۱/۱۵	۱۶/۳۰	۰/۶۶	۰/۷۹	۳۰	۵۰
۰/۸۸	۰/۴۱	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۷۹	۰/۲۸	۰/۸۶	۰/۲۶	۱/۱۶	۱۵/۸۵	۰/۶۶	۰/۷۸	۵۰	۵۰
۰/۸۸	۰/۴۱	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۷۹	۰/۲۸	۰/۸۶	۰/۲۶	۱/۱۶	۱۵/۸۸	۰/۶۶	۰/۷۸	۱۰۰	۵۰
۰/۸۷	۰/۴۰	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۷۹	۰/۲۹	۰/۸۶	۰/۲۷	۱/۱۷	۱۵/۵۶	۰/۶۶	۰/۷۸	۱۵۰	۵۰
۰/۸۶	۰/۳۷	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۷۹	۰/۳۳	۰/۸۸	۰/۲۹	۱/۲۴	۱۴/۱۹	۰/۶۴	۰/۷۶	۳۰	۱۰۰
۰/۸۶	۰/۳۵	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۷۸	۰/۳۵	۰/۸۸	۰/۳۰	۱/۲۶	۱۳/۵۷	۰/۶۴	۰/۷۶	۵۰	۱۰۰
۰/۸۰	۰/۳۷	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۷۳	۰/۴۶	۰/۸۸	۰/۳۶	۱/۳۸	۹/۵	۰/۵۹	۰/۷۰	۱۰۰	۱۰۰
۰/۷۹	۰/۲۵	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۷۲	۰/۴۸	۰/۸۹	۰/۳۷	۱/۴۰	۸/۵۲	۰/۵۸	۰/۶۹	۱۵۰	۱۰۰
۰/۸۶	۰/۳۶	۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۷۹	۰/۳۵	۰/۸۸	۰/۳۰	۱/۲۷	۱۴/۱۴	۰/۶۴	۰/۷۶	۳۰	۱۵۰
۰/۸۴	۰/۳۱	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۷۷	۰/۴۱	۰/۸۹	۰/۳۴	۱/۳۴	۱۱/۴۸	۰/۶۱	۰/۷۳	۵۰	۱۵۰
۰/۸۴	۰/۳۱	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۷۷	۰/۴۱	۰/۸۹	۰/۳۳	۱/۳۴	۱۱/۹۴	۰/۶۲	۰/۷۳	۱۰۰	۱۵۰
۰/۷۵	۰/۲۰	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۶۹	۰/۵۵	۰/۹۰	۰/۴۰	۱/۵۰	۷/۳	۰/۵۶	۰/۶۶	۱۵۰	۱۵۰

1 Gilbert Skill Score

2 Odds Ratio



شکل ۵. پهنه سیلاب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل HEC-RAS برای سناریوهای مختلف

نتایج تحلیل عملکرد ۱۶ سناریو با مدل HEC-RAS با وضوح پیکسلی مختلف برای رودخانه و دشت سیلابی با تمرکز بر معیار نسبت صحیح نشان داد که مدل‌هایی با اندازه پیکسل کوچک‌تر رودخانه (۳۰ و ۵۰) به طور مداوم بالاترین PC را به دست آورده‌اند. با افزایش اندازه پیکسل رودخانه به ۱۰۰ متر، کاهش قابل توجهی در PC مشاهده می‌شود. پایین‌ترین مقادیر PC در وضوح ۱۵۰ متر برای رودخانه ثبت شده است، جایی که مقدار PC از ۰/۷۶۲ (برای پیکسل‌های دشت سیلابی ۳۰ متر) به ۰/۶۶۳ (برای پیکسل‌های دشت

سیلابی ۱۵۰ متر) کاهش می‌یابد. به طور کلی، اندازه‌های پیکسل کوچک‌تر برای رودخانه و دشت سیلابی مقادیر PC بالاتری را ارائه می‌دهند، در حالی که تأثیر افزایش اندازه پیکسل رودخانه بیشتر از تأثیر پیکسل‌های دشت سیلابی است.

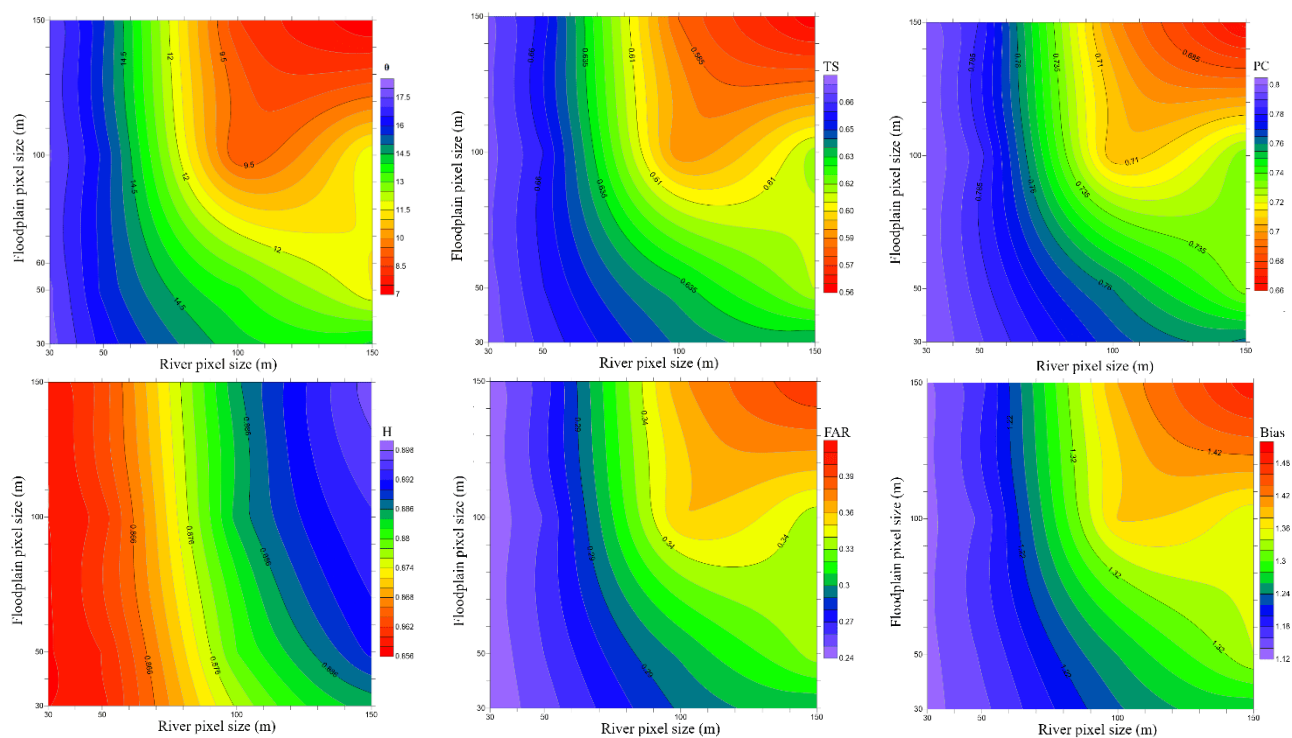
بررسی شاخص تهدید که برای پیش‌بینی رویدادهای نادر مناسب است، نشان می‌دهد که مدل‌هایی با بالاترین وضوح پیکسلی برای رودخانه (۳۰ متر) به‌طور مداوم بالاترین مقادیر TS (معادل ۰/۶۷) را در تمامی اندازه‌های پیکسلی سیلاب‌دشت کسب می‌کنند که نشان‌دهنده عملکرد قوی آن‌ها است. با کاهش وضوح پیکسلی رودخانه (۱۰۰ و ۱۵۰ متر)، مقادیر TS به‌ویژه در ترکیب با اندازه‌های بزرگ‌تر پیکسلی سیلاب‌دشت، کاهش قابل توجهی نشان می‌دهد. به‌طور کلی، وضوح‌های بالاتر برای پیکسل‌های رودخانه و سیلاب‌دشت (۳۰ یا ۵۰ پیکسل) اکثراً مقادیر TS بهتری را ارائه می‌دهند و پیش‌بینی دقیق‌تری از رویدادهای نادر را تضمین می‌کنند. وضوح‌های پایین‌تر، به‌ویژه در مقیاس ۱۰۰ یا ۱۵۰ متر برای هر دو رودخانه و سیلاب‌دشت، منجر به کاهش قابل توجهی در مقادیر TS می‌شوند که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر مدل است.

جدول ۲ نشان می‌دهد که رزولوشن‌های بالاتر پیکسل‌های رودخانه (۳۰ و ۵۰ متر) به طور مداوم بالاترین نسبت شانس (θ) را ارائه می‌دهند که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالای پیش‌بینی است. با این حال، نسبت شانس‌ها برای رزولوشن‌های متوسط پیکسل رودخانه (۱۰۰ متر) به‌شدت کاهش می‌یابد و مقادیر آن از اندازه پیکسل سیلاب‌دشت ۳۰ متر (۱۴/۱۹) به ۱۵۰ متر (۸/۵۳) تقریباً نصف می‌شود، که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در عملکرد مدل است. در سناریوهای رودخانه با اندازه پیکسل درشت‌تر (۱۵۰ متر)، نسبت شانس‌ها بیشتر افت می‌کند که نشان‌دهنده تأثیر منفی ترکیب رزولوشن‌های درشت پیکسل‌های رودخانه و سیلاب‌دشت بر قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌ها است. به طور کلی، داده‌ها نشان می‌دهند که رزولوشن‌های دقیق‌تر (پیکسل‌های ۳۰ و ۵۰ رودخانه و سیلاب‌دشت) بهترین تعادل را بین پیش‌بینی صحیح و هشدارهای اشتباه ایجاد می‌کنند، در حالی که رزولوشن‌های درشت‌تر منجر به کاهش قابلیت اطمینان پیش‌بینی می‌شوند. با افزایش اندازه پیکسل رودخانه از ۳۰ به ۱۵۰، بایاس به طور مداوم افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده بیش‌برآوردی بیشتر در اندازه‌های پیکسل بزرگ‌تر است. به همین ترتیب، افزایش اندازه پیکسل دشت سیلابی از ۳۰ به ۱۵۰ متر منجر به مقادیر بالاتر بایاس می‌شود، به طوری که اندازه‌های پیکسل کوچک‌تر (مثلاً 30×30 یا 30×50) مقادیر بایاس بین $1/13 - 1/17$ را حفظ می‌کنند، در حالی که اندازه‌های بزرگ‌تر (مثلاً 100×100 یا 150×150) مقادیر بایاس تا $1/50$ را نشان می‌دهند. علاوه بر این، با افزایش اندازه پیکسل رودخانه، افزایش قابل توجهی در FAR مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد مدل‌هایی با اندازه پیکسل رودخانه بزرگ‌تر، هشدارهای اشتباه بیشتری تولید می‌کنند. علاوه بر این با افزایش اندازه پیکسل دشت سیلابی، FAR نیز به طور کلی افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده هشدارهای اشتباه بیشتر در پیش‌بینی‌های مدل است. مدل‌هایی با اندازه پیکسل‌های کوچک رودخانه و دشت سیلابی FAR نسبتاً کمی (حدود ۰/۲۴ تا ۰/۲۷) نشان می‌دهند که نشانگر هشدارهای اشتباه کمتر و پیش‌بینی‌های قابل اعتمادتر است. این در حالی است که مدل‌هایی با اندازه پیکسل‌های بزرگ (مثلاً 100×100 یا 150×150) FAR به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و در بعضی موارد به ۰/۳۶ و حتی ۰/۴ می‌رسد. نرخ برخورد (H) برای پیکسل‌های کوچک‌تر رودخانه و دشت سیلابی (30×30 یا 50×30) ثابت و برابر با ۰/۸۶ باقی می‌ماند که نشان‌دهنده توانایی متوسط مدل در شناسایی صحیح رویدادهای مثبت است. این ثبات در اندازه‌های مختلف پیکسل دشت سیلابی نیز حفظ می‌شود و نشان می‌دهد که در این وضوح‌های دقیق، بهبود یا کاهش عملکرد قابل توجهی رخ نمی‌دهد. با افزایش اندازه پیکسل، نرخ برخورد اندکی بهبود می‌یابد و نشان‌دهنده افزایش دقت شناسایی در وضوح‌های درشت‌تر است. دلیل این امر این است که مدل در نقشه‌های با پیکسل‌های درشت‌تر، بیش‌برازش بیشتری در شبیه‌سازی سیلاب در مقایسه با پیکسل‌های ریزتر داشته و در نتیجه نرخ برخورد بهبود یافته است. برای اندازه‌های کوچک‌تر پیکسل رودخانه و دشت سیلابی (30×30 یا 50×30) نرخ هشدار اشتباه نسبتاً پایین و در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۲۹ باقی می‌ماند. این موضوع هشدارهای اشتباه کمتری را در وضوح‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد. در مقابل، با افزایش اندازه پیکسل رودخانه به ۱۵۰، نرخ هشدار اشتباه به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و در محدوده ۰/۳۵ تا ۰/۵۵ قرار می‌گیرد که بیشترین مقادیر آن در بزرگ‌ترین اندازه‌های پیکسل دشت سیلابی مانند ۱۵۰ مشاهده می‌شود. روند افزایش نرخ هشدار اشتباه با بزرگ‌تر شدن اندازه پیکسل در نقشه‌های رودخانه و دشت سیلابی ثابت است. در اندازه‌های پیکسل متوسط مانند 100×100 نرخ هشدار اشتباه به ۰/۴۶ تا ۰/۴۸ افزایش می‌یابد و در بزرگ‌ترین اندازه‌ها (مانند 150×150) به محدوده ۰/۴۱ تا ۰/۵۵ می‌رسد. برای اندازه‌های پیکسل کوچک‌تر رودخانه و دشت سیلابی مقدار EDI به طور مداوم بالا و حدود ۰/۸ باقی می‌ماند که نشان‌دهنده وابستگی قوی و پایدار بین رویدادهای حدی است. با افزایش اندازه پیکسل، مقدار EDI به تدریج کاهش می‌یابد و نشان‌دهنده تضعیف وابستگی بین رویدادهای حدی است. امتیاز مهارت هایدک (HSS) و امتیاز مهارت پیرس (PSS) در اندازه‌های کوچک‌تر پیکسل رودخانه و دشت سیلابی دقت و عملکرد بهتری دارند. برای این وضوح‌های

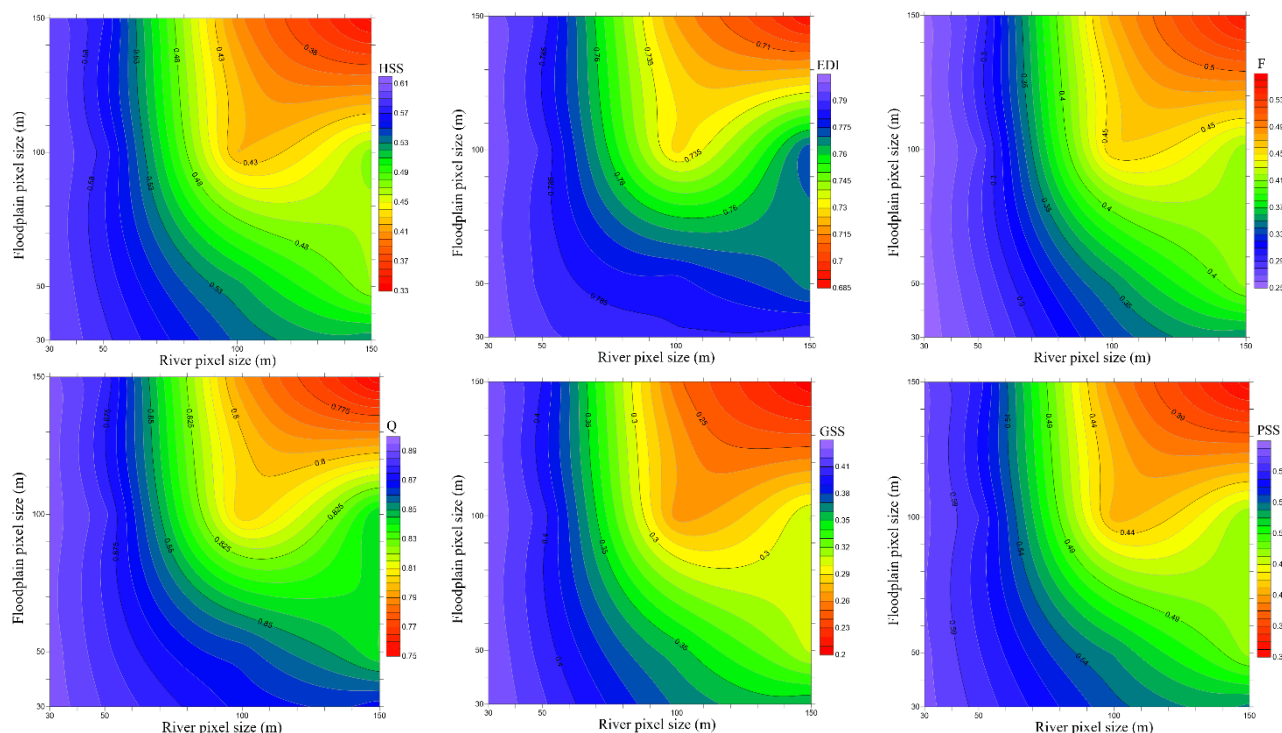
بالتر، مقادیر HSS و PSS به طور مداوم حدود ۰/۶ باقی می ماند که نشان دهنده عملکرد پایدار و قوی مدل در پیش بینی رویدادهای سیلابی است. این موضوع نشان می دهد که اندازه های کوچک تر پیکسل به طور مؤثری دینامیک سیلاب را ثبت کرده و تغییرات کمی را در پیکربندی های مختلف به همراه دارند. با افزایش اندازه پیکسل هر دو معیار HSS و PSS به طور قابل توجهی کاهش می یابند که نشان دهنده کاهش دقت و مهارت پیش بینی است. تحلیل نمره مهارت گیلبرت (GSS) نشان می دهد که اندازه پیکسل های کوچک تر رودخانه و دشت سیلابی به مقادیر GSS نسبتاً بالا و ثابتی بین ۰/۴ تا ۰/۴۳ منجر می شود که بیانگر عملکرد پایدار و دقیق در پیش بینی سیلاب است. این وضوح بالاتر به مدل کمک می کند تا وقایع مثبت سیلاب را بهتر تشخیص دهد و هشدارهای اشتباه و وقایع ازدست رفته را به حداقل برساند، و بدین ترتیب عملکرد مدل را با کمترین تغییرات در پیکربندی ها تضمین می کند. در مقابل، با افزایش اندازه پیکسل ها مقادیر GSS به طور قابل توجهی کاهش می یابد که کاهش مهارت پیش بینی را نشان می دهد. تحلیل امتیاز مهارت نسبت شانس (ORSS) نشان می دهد که اندازه های کوچک تر پیکسل های رودخانه و دشت سیلاب به طور مداوم مقادیر بالای ORSS را دارند که بین ۰/۸۷۹ تا ۰/۸۹۳ متغیر است. این نشان دهنده ارتباط قوی بین رویدادهای پیش بینی شده و مشاهدات سیلاب است و عملکرد خوبی را در شناسایی صحیح رویدادهای مثبت واقعی بازتاب می دهد. عملکرد مدل در اندازه های کوچک پایدار است و نشان می دهد که رزولوشن های دقیق تر توانایی مدل را در پیش بینی دقیق رویدادهای سیلاب افزایش می دهند. با افزایش اندازه پیکسل ها مقادیر ORSS کاهش می یابد که نشان دهنده کاهش اندک در مهارت پیش بینی مدل است.

بحث

جهت بررسی دقیق تر تأثیر اندازه پیکسل های رودخانه و دشت های سیلابی بر روی شاخص های مورد استفاده در این مطالعه از نقشه های کانطور استفاده شده است. در شکل ۶ تغییرات شاخص های آماری مختلف براساس اندازه پیکسل های رودخانه و دشت های سیلابی رودخانه کارون برای سناریوهای مختلف شبیه سازی شده توسط مدل هیدرودینامیکی دو بعدی HEC-RAS به ازای سیلاب سال ۱۳۹۸ به صورت نقشه های کانطور ارائه شده است.



شکل ۶. تغییرات شاخص های آماری مختلف براساس اندازه پیکسل های رودخانه و دشت های سیلابی



ادامه شکل ۶. تغییرات شاخص‌های آماری مختلف براساس اندازه پیکسل‌های رودخانه و دشت‌های سیلابی

نقشه‌های کانتور ارائه شده در شکل ۶ تاثیر اندازه‌های مختلف پیکسل‌های رودخانه و دشت سیلابی را بر معیارهای ارزیابی مدل‌سازی سیلاب نشان می‌دهند. در تمامی نقشه‌های کانتور، اندازه پیکسل دشت‌های سیلابی تاثیر ملموسی بر روی شاخص‌های مورد استفاده به ازای پیکسل رودخانه ۳۰ متر نداشته است. با افزایش اندازه پیکسل رودخانه، تاثیر اندازه پیکسل دشت‌های سیلابی بیشتر شده، بویژه در اندازه پیکسل ۱۵۰ متر رودخانه، تغییرات پیکسل دشت‌های سیلابی به شدت بر روی میزان شاخص‌های مورد استفاده تاثیرگذار بوده است. در حالت کلی اندازه‌های پیکسل کوچک‌تر عملکرد بهتری در معیارهای ارزیابی مانند امتیاز تهدید (TS)، نسبت صحیح (PC) و امتیاز مهارت هایدک (HSS) دارند. این عملکرد بالا به توانایی وضوح بالای مدل در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و پهنه‌بندی سیلاب مربوط است. علاوه بر این، معیارهایی مانند بایاس به مقدار ایده‌آل نزدیک هستند که نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های متوازن با حداقل تخمین بیش‌ازحد یا کمتر از حد مناطق مستعد سیلاب است. همچنین شاخص خطای تشخیص (EDI) و نسبت هشدار اشتباه (FAR) در وضوح‌های دقیق بهبود قابل توجهی نشان می‌دهند و نرخ پایین پیش‌بینی‌های مثبت کاذب را تأیید می‌کنند. امتیازهای بالای معیارهای مهارت مانند HSS و امتیاز مهارت گیلبرت (GSS) نیز بر قابلیت اطمینان وضوح بالاتر در مدل‌سازی سیلاب تأکید دارند. با افزایش اندازه پیکسل به وضوح‌های پایین‌تر (۱۰۰×۱۰۰ یا ۱۵۰×۱۵۰) کاهش قابل توجهی در عملکرد مدل مشاهده می‌شود. این کاهش نشان‌دهنده ناتوانی وضوح‌های پایین در نمایش مؤثر فرآیندهای هیدرودینامیکی در دشت سیلابی و رودخانه است. وضوح‌های بزرگ‌تر منجر به نمایش هموارتر پهنه سیلاب شده و توانایی مدل‌سازی پهنه‌های سیلابی کوچک را دارند. این اثر در افزایش مقادیر FAR (که در وضوح‌های پایین‌تر به بیش از ۰/۳۵ می‌رسد) و افزایش مقادیر Bias (تا ۱/۳۸) که نشان‌دهنده تمایل به بیش‌برآورد گستره سیلاب است، آشکار است. علاوه بر این، معیارهای مهارت مانند GSS و PSS کاهش توانایی پیش‌بینی مدل در وضوح‌های پایین‌تر را نشان می‌دهند که بیانگر کاهش دقت مدل در تعیین گستره سیلاب است.

نقشه‌های کانتور نشان‌دهنده رابطه بین وضوح مکانی و کارایی محاسباتی در مدل‌سازی سیلاب می‌باشند. درحالی‌که وضوح‌های بالا نتایج بسیار دقیق و قابل اطمینانی ارائه می‌دهند، اما به محاسبات و زمان بیشتری نیاز دارند (Brunner, 2023) که ممکن است برای مطالعات بزرگ‌مقیاس یا پیش‌بینی‌های سیلاب در زمان واقعی امکان‌پذیر نباشد. از سوی دیگر، وضوح‌های پایین‌تر از مزایای محاسباتی برخوردارند اما باعث کاهش دقت و مهارت مدل شده و برای کاربردهایی که نیازمند تعیین دقیق گستره سیلاب هستند، مانند مدیریت سیلاب‌های شهری، مناسب نیستند. شاخص‌هایی مانند EDI و سایر معیارهای قابلیت اطمینان نشان می‌دهند که اندازه پیکسل‌های میانه (۵۰×۵۰ یا ۵۰×۱۰۰ متر) می‌توانند دقت معقولی را با کاهش محاسبات فراهم کنند. این تعادل به‌ویژه برای مطالعات در مقیاس منطقه‌ای

یا تجزیه و تحلیل های فرامنطقه ای مفید است.

ضریب تهدید محاسبه شده توسط Horritt & Bates (2001) که از مدل LISFLOOD-FP جهت شبیه سازی پهنه سیلاب با رزولوشن های مختلف استفاده نمودند، به ازای رزولوشن ۵۰ متر برابر با ۷۲/۲ درصد و به ازای رزولوشن ۲۵۰ متر برابر با ۶۱/۲ درصد محاسبه شد که نشان دهنده کاهش ۱۱ درصدی میزان کارایی مدل با افزایش ۵ برابری رزولوشن نقشه توپوگرافی از ۵۰ متر به ۲۵۰ متر است. در مطالعه حاضر نیز با اینکه از مدل متفاوت HEC-RAS در منطقه متفاوت استفاده شده است، میزان ضریب تهدید از ۶۷ درصد به ازای رزولوشن ۳۰ متری به ۵۶ درصد به ازای رزولوشن ۱۵۰ متری رسیده است که نشان دهنده کاهش ۱۱ درصدی به ازای کاهش ۵ برابری رزولوشن نقشه توپوگرافی بوده است. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با تحقیق صورت گرفته توسط Merwade (2009) & Cook حاکی از مطابقت نتایج دو مطالعه است. در مطالعه ذکر شده از نقشه های با رزولوشن ۳۰ متر و ۱۰ متر جهت پهنه بندی سیلاب در رودخانه استرودس کریک^۱ با استفاده از مدل HEC-RAS استفاده شد که ضریب تهدید کاهش حدود ۱۰ درصدی با افزایش اندازه سه برابری پیکسل ها داشته است. در مطالعه حاضر ضریب تهدید در رزولوشن ۳۰ متر برابر با ۶۷ درصد و برای رزولوشن ۱۰۰ متر، ۵۹ درصد محاسبه گردید که نشان می دهد با افزایش اندازه پیکسل ها، ۸ درصد کاهش در ضریب تهدید اتفاق افتاده است. امتیاز تهدید مربوط به نقشه توپوگرافی با رزولوشن ۳۰ متری در مطالعه Muthusamy et al. (2021) برابر با ۰/۶۸ محاسبه شد که نزدیکی بالایی با مطالعه حاضر دارد. هرچند امتیاز تهدید به ازای رزولوشن ۵۰ متری حدود ۰/۶ محاسبه گردید که نسبت به تحقیق حاضر کمتر محاسبه شده است. عوامل مختلفی می تواند در این زمینه موثر باشد که از آن جمله می توان به تفاوت در شرایط توپوگرافی دو منطقه مورد مطالعه اشاره نمود.

نتیجه گیری

در این مطالعه تأثیر اندازه های پیکسل رودخانه و دشت های سیلابی بر روی شبیه سازی پهنه سیلاب توسط مدل دویعدی HEC-RAS مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس تحلیل اثر اصلی اندازه پیکسل رودخانه، نسبت صحیح و امتیاز تهدید با افزایش اندازه پیکسل رودخانه به ویژه برای اندازه های پیکسل دشت سیلابی ۱۰۰ و ۱۵۰ متر کاهش می یابد. امتیازهای مهارتی هایدک، پیرس و گیلبرت با افزایش اندازه پیکسل رودخانه کاهش می یابند. امتیاز مهارتی گیلبرت به ویژه برای پیکسل های بزرگ تر رودخانه کاهش شدیدی نشان می دهد، که نشان دهنده عملکرد ضعیف تر پیش بینی سیل در وضوح های پایین تر است. با افزایش اندازه پیکسل رودخانه، بایاس افزایش می یابد، که نشان دهنده تمایل به پیش بینی بیش از حد است. نسبت هشدار اشتباه نیز روند افزایشی مشابهی را نشان می دهد. براساس بررسی اثر اصلی اندازه پیکسل دشت سیلابی، نسبت صحیح و امتیاز تهدید با افزایش اندازه پیکسل دشت سیلابی به ویژه برای اندازه های پیکسل رودخانه ای ۱۰۰ و ۱۵۰ متر کاهش می یابند. کاهش در امتیاز تهدید نشان می دهد که وضوح پایین تر دشت سیلابی توانایی مدل در پیش بینی دقیق سیل را کاهش می دهد. همه امتیازهای مهارتی با افزایش اندازه پیکسل دشت سیلابی به ویژه در سناریوهای پیکسل رودخانه ای ۱۰۰ و ۱۵۰ متر کاهش می یابند. با افزایش وضوح دشت سیلابی، بایاس افزایش می یابد، که نشان دهنده تمایل بیشتر به پیش بینی بیش از حد در وضوح های پایین تر دشت سیلابی است. بررسی تأثیرات متقابل نشان می دهد که ترکیب وضوح پایین برای هر دو پیکسل رودخانه و دشت سیلابی (مثلاً ۱۵۰ × ۱۵۰ متر) منجر به پایین ترین امتیازهای مهارتی می شود ($GSS = 0.20$, $HSS = 0.34$). برای ۱۵۰ × ۱۵۰ متر) که نشان دهنده عملکرد ضعیف تر مدل است. بایاس و نسبت هشدار اشتباه برای ترکیبات اندازه پیکسل های بزرگ رودخانه و دشت سیلابی (مثلاً ۱۵۰ × ۱۵۰ متر) بالاترین هستند، که منعکس کننده روند پیش بینی بیش از حد است. مقادیر EDI برای وضوح پایین دشت سیلابی و اندازه های بزرگ تر پیکسل رودخانه بالاترین هستند، که نشان دهنده چالش های بیشتر در پیش بینی است. بر اساس اثرات اصلی هر دو اندازه پیکسل رودخانه و دشت سیلابی بر شاخص ها تأثیر دارند، اما تأثیر اندازه پیکسل دشت سیلابی برجسته تر است. اندازه های پیکسل بزرگ تر منجر به کاهش دقت و امتیازهای مهارتی، افزایش بایاس و نسبت هشدار اشتباه می شوند. بر اساس اثرات متقابل نیز ترکیب وضوح پایین برای هر دو پیکسل رودخانه و دشت سیلابی منجر به بیشترین کاهش عملکرد در تمام شاخص ها می شود. به طور کلی، یافته ها بر اهمیت استفاده از وضوح مدل رقومی متناسب با اهداف و محدودیت های موجود در مدل سازی سیلاب تأکید دارند.

سپاس گذاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان بابت تأمین هزینه های طرح پژوهشی کاربردی با کد قرارداد

۱/۴۱/۱۰۷۸ کمال تشکر را دارند.

"هیچ گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

ظہیری، جواد و آشناور، مہران (۱۳۹۸). مدل سازی دوبعدی هیدرولیک جریان در رودخانه کارون. نشریه نشریه علوم آب و خاک، ۲۳ (۴)، ۳۳۱-۳۴۴.

ظہیری، جواد و آشناور، مہران (۱۴۰۰). کارایی HEC-RAS و GIS در شبیه سازی یک بعدی هیدرودینامیک جریان در رودخانه. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۵۱ (۲)، ۶۳-۷۲.

REFERENCES

- Brunner, G. W. (2023). HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 6.4. US Army Corps of Engineers-Hydrologic Engineering Center, CPD-69.
- Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 131-142. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2009.08.015>.
- Ebert, E. E., & McBride, J. L. (2000). Verification of precipitation in weather systems: determination of systematic errors. *Journal of Hydrology*, 239(1-4), 179-202. <https://doi.org/ch4m9p>.
- Ferro, C. A. T., & Stephenson, D. B. (2011). Extremal Dependence Indices: Improved Verification Measures for Deterministic Forecasts of Rare Binary Events. *Weather and Forecasting*, 26(5), 699-713. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-10-05030.1>.
- Haces-Garcia, F., Ross, N., Glennie, C. L., Rifai, H. S., Hoskere, V., & Ekhtari, N. (2024). Rapid 2D hydrodynamic flood modeling using deep learning surrogates. *Journal of Hydrology*, 132561. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2024.132561>.
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2001). Effects of spatial resolution on a raster-based model of flood flow. *Journal of Hydrology*, 253(1), 239-249. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00490-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00490-5).
- Hsu, Y. C., Prinsen, G., Bouaziz, L., Lin, Y. J., & Dahm, R. (2016). An Investigation of DEM Resolution Influence on Flood Inundation Simulation. *Procedia Engineering*, 154, 826-834. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.07.435>.
- Kashefipour, S. M., & Zahiri, J. (2010). Comparison of Empirical Equations' Application in the Advection-Dispersion Equation on Sediment Transport Modelling. *World Appl. Sci.*, 11(8), 1015-1024.
- Lai, R., Wang, M., Yang, M., & Zhang, C. (2018). Method based on the Laplace equations to reconstruct the river terrain for two-dimensional hydrodynamic numerical modeling. *Computers & Geosciences*, 111, 26-38. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2017.10.006>.
- Merkuryeva, G., Merkuryev, Y., Sokolov, B. v., Potryasaev, S., Zelentsov, V. A., & Lektuers, A. (2015). Advanced river flood monitoring, modelling and forecasting. *Journal of Computational Science*, 10, 77-85. <https://doi.org/10.1016/J.JOCS.2014.10.004>.
- Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling. *Journal of Hydrology*, 596. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126088>.
- Ogania, J. L., Puno, G. R., Alivio, M. B. T., & Taylaran, J. M. G. (2019). Effect of digital elevation model's resolution in producing flood hazard maps. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 5(1), 95-106. <https://doi.org/10.22034/GJESM.2019.01.08>.
- Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L., & Aronica, G. T. (2016). Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach. *Natural Hazards*, 83(1), 117-132. <https://doi.org/10.1007/S11069-016-2382-1/METRICS>.
- Parizi, E., Khojeh, S., Hosseini, S. M., & Moghadam, Y. J. (2022). Application of Unmanned Aerial Vehicle DEM in flood modeling and comparison with global DEMs: Case study of Atrak River Basin, Iran. *Journal of Environmental Management*, 317, 115492. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115492>.
- Peña, F., & Nardi, F. (2018). Floodplain Terrain Analysis for Coarse Resolution 2D Flood Modeling. *Hydrology 2018*, Vol. 5, Page 52, 5(4), 52. <https://doi.org/10.3390/HYDROLOGY5040052>.
- Pennelly, C., Reuter, G., & Flesch, T. (2014). Verification of the WRF model for simulating heavy precipitation in Alberta. *Atmospheric Research*, 135-136, 172-192.



<https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2013.09.004>.

- Roux, H., Amengual, A., Romero, R., Bladé, E., & Sanz-Ramos, M. (2020). Evaluation of two hydrometeorological ensemble strategies for flash-flood forecasting over a catchment of the eastern Pyrenees. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 425–450. <https://doi.org/10.5194/NHESS-20-425-2020>.
- Samadi, A., Jafarzadegan, K., & Moradkhani, H. (2025). DEM-based pluvial flood inundation modeling at a metropolitan scale. *Environmental Modelling & Software*, 183, 106226. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2024.106226>.
- Stephenson, D. B. (2000). Use of the “odds ratio” for diagnosing forecast skill. *Weather and Forecasting*, 15(2), 221-232. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2000\)015%3C0221:UOTORF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015%3C0221:UOTORF%3E2.0.CO;2).
- Wilks D. (2019). Statistical methods in the atmospheric sciences. *Elsevier*. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1370853567635628434>.
- Zahiri, J., & Ashnavar, M. (2019). Two-dimensional hydraulic modeling of Karun river. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 23(4), 331-344. (In Persian).
- Zahiri, J., & Ashnavar, M. (2021). River Flow Simulation by Integrating Numerical Methods and Satellite Images. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 51.2(103), 63–72. <https://doi.org/10.22034/jcee.2019.9090>. (In Persian).
- Zeleňáková, M., Fijko, R., Labant, S., Weiss, E., Markovič, G., & Weiss, R. (2019). Flood risk modelling of the Slatvinec stream in Kružlov village, Slovakia. *Journal of Cleaner Production*, 212, 109–118. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.008>.