

Research Paper

Application of Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) in Hydraulic Flow Modeling and Agricultural Water Management with a Hydroinformatics Approach

Mostafa Alinaghizadeh^{*1}, Abolfazl Aslani Kordkandi²

1. Assistant Prof., Dept. of Agricultural, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran
2. Department of Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

PP: 1-18

Use your device to scan and read
the article online



Keywords: Remote Sensing (RS), Geographic Information Systems (GIS), Hydraulic Modeling, Hydroinformatics, Water Resource Management

Abstract

This research aims to develop an integrated hydroinformatics framework to improve the accuracy of hydraulic flow modeling and water resource management. It investigates the integration of Remote Sensing (RS) and Geographic Information System (GIS) technologies. Focusing on the Karkheh River Basin, the research methodology comprises five main stages: satellite data collection (such as Sentinel-2 and ALOS PALSAR DEM), automated extraction of hydraulic parameters through image processing, development of an integrated model in HEC-RAS, uncertainty analysis using the Monte Carlo method, and performance evaluation with NSE, R^2 , and RMSE indices. The current study demonstrates that integrating these technologies can fundamentally transform and improve the quality and efficiency of hydraulic models. The research findings indicate that using satellite data alongside spatial analyses provides deeper insights into the behavior of water systems. This integrated approach not only enhances prediction accuracy but also significantly improves the reliability of modeling results. The main advantage of this method lies in its ability to cover vast areas and provide access to up-to-date and continuous data. Another strength of this research is the high adaptability of the proposed method. This study clearly shows that the hydroinformatics approach can bridge the gap between observational data and modeling needs. Utilizing these technologies not only improves the quality of model outputs but also facilitates the decision-making process in water resource management.

Citation: Alinaghizadeh, M., Aslani Kordkandi, A. (2025). **Application of Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) in Hydraulic Flow Modeling and Agricultural Water Management with a Hydroinformatics Approach.** *Geography (Regional Planning)*, 15(60), 1-18.

DOI: 10.22034/jgeoq.2025.537381.4311

^{*} **Corresponding author:** Mostafa Alinaghizadeh, **Email:** Alinaghizadeh62@pnu.ac.ir

Copyright © 2025 The Authors. Published by Qeshm Institute. This is an open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Extended Abstract

Introduction

Water resource management in the 21st century faces unprecedented challenges, driven by climate change, population growth, and escalating economic and environmental demands. Conventional methods for hydraulic modeling and water management, often reliant on sparse and costly field measurements, struggle to provide the spatial extent and temporal frequency required for accurate forecasting and effective decision-making. This is particularly critical in regions prone to hydrological extremes, such as floods and droughts, where precise and timely data is essential for risk mitigation and resource allocation. To bridge this gap, this research proposes and develops a comprehensive integrated hydroinformatics framework. This framework strategically leverages the synergistic capabilities of Remote Sensing (RS) and Geographic Information Systems (GIS) to fundamentally enhance the accuracy, efficiency, and scope of hydraulic flow modeling and agricultural water management. The study is strategically focused on the Karkheh River Basin in Iran, a complex and economically vital catchment that exemplifies these modern water management challenges, including severe flood risks, significant morphological changes due to sedimentation, and inherent data scarcity in certain areas.

The core objective of this research is to harness the power of multi-temporal satellite data-providing repetitive, synoptic views of the Earth's surface and combine it with advanced spatial analysis and hydraulic modeling. By doing so, the study directly addresses critical limitations of traditional approaches. It aims to significantly reduce uncertainties in model input parameters, create more reliable and robust predictive models for flow behavior, and ultimately establish a sophisticated, data-driven support system for

sustainable and adaptive water resource management strategies.

This work positions itself at the intersection of geospatial technology and hydrological science, contributing to the evolving field of hydroinformatics by offering a practical, scalable methodology for managing the world's precious water resources in an era of increasing uncertainty.

Methodology

The research methodology is based on a five-stage hydroinformatics framework. In the first stage, satellite data (such as Sentinel-2, Sentinel-1, and ALOS PALSAR DEM) were collected and pre-processed using platforms like Google Earth Engine (GEE) and ENVI software. Atmospheric and geometric corrections were applied to ensure data accuracy. The second stage involved the automated extraction of key hydraulic parameters (e.g., river width, depth, slope, and roughness coefficients) from the processed imagery using machine learning (ML) algorithms and GIS-based morphometric analysis. The third stage comprised integrated model development, where the extracted parameters were incorporated into the HEC-RAS hydraulic model (v6.3). Model calibration and validation were performed using SWAT-CUP and field data from hydrometric stations. In the fourth stage, uncertainty analysis was conducted using Monte Carlo simulation and Sobol sensitivity analysis to quantify model uncertainties and identify the critical parameters affecting the outputs. Finally, the fifth stage involved performance evaluation, where the model's accuracy was assessed using statistical indices (NSE, R^2 , RMSE) and compared against traditional methods. The model's capability to simulate extreme events, such as floods, was also tested.

Results and Discussion

The application of the integrated RS-GIS approach demonstrated significant improvements in the accuracy and efficiency of hydraulic modeling. The use of high-precision DEMs (e.g.,

- Remote Sensing, 14(5), 1099. <https://doi.org/10.3390/rs14051099>.
9. Popescu, C. A., Vîlceanu, C.-B., Beilicci, R., & Herban, S. (2025). GIS-Based Flood Assessment Using Hydraulic Modeling and Open-Source Data: An Example of Application. *Applied Sciences*, 15(5), 2520. <https://doi.org/10.3390/app15052520>.
 10. Ebrahimi, R., Hamzeh, S., & Maroufi, S. (2016). Modeling snow cover and runoff using integrated SRM hydrological model and satellite images. *Iranian Journal of Irrigation & Water Engineering*, 6 (3), 66–77. [In Persian]
 11. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *Enhancing knowledge and collaboration for sustainable development through WaPOR*. <https://openknowledge.fao.org/items/e801a6c5-31cc-47a5-9622-12d56aea5cbb>.
 12. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research. (2021). *Hydroinformatics application for water resources and risk management*. IAHR Publications.
 13. Kamali, S., Saedi, F., & Asghari, K. (2023). Prediction of flood in Karkheh basin using data-driven methods. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4 (W1), 349–354. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-349-2023>.
 14. Loucks, D. P. (2023). Hydroinformatics: A review and future outlook. *Cambridge Prisms: Water*, 1, e10. <https://doi.org/10.1017/wat.2023.10>.
 15. Mekonnen, K., Melesse, A. M., & Woldesenbet, T. A. (2021). Effect of Temporal Sampling Mismatches between Satellite Rainfall Estimates and Rain Gauge Observations on Modelling Extreme Rainfall in the Upper Awash Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 598(7), 126467. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126467>.
 16. Mirghasemi, S. H., Banejad, H., & Fariedhosseini, A. R. (2023). Application of remote sensing in hydraulic modeling and determination of riverbed boundaries (Case study: Ardak River). *Remote Sensing & GIS in Natural Resources*, 14(1), 9–22. [In Persian]
 17. Muthuwatta, L. P., Ahmad, M. u. D., Bos, M. G., & Amer, S. A. (2010). Assessment of water availability and consumption in the Karkheh River Basin, Iran—Using remote sensing and geo-statistics. *Water Resources Management*, 24(2), 459–484. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9455-9>.
 18. Nearing, G. S., Kratzert, F., Sampson, A. K., Pelissier, C. S., Klotz, D., Frame, J. M., Prieto, C., & Gupta, H. V. (2021). What role does hydrological science play in the age of machine learning? *Water Resources Research*, 57(3), e2020WR028091. <https://doi.org/10.1029/2020WR028091>.
 19. Office of Basic Water Resources Studies, Ministry of Energy. (2021). *Comprehensive report of basic studies of the Karkheh River basin*. Ministry of Energy Publications. [In Persian]
 20. Office of Basic Water Resources Studies. (2021). *Comprehensive hydrological studies of the Karkheh basin*. Ministry of Energy. [In Persian]
 21. Oweis, T., Farahani, H., Qadir, M., Anthofer, J., Siadat, H., Abbasi, F., & Bruggeman, A. (2009). Improving on-farm agricultural water productivity in the Karkheh River Basin. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). <https://www.researchgate.net/publication/267025362>.
 22. Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Thyer, M., & Franks, S. W. (2010). Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, 46(5), W05521. <https://doi.org/10.1029/2009WR008328>.
 23. Senthilkumar, M., Gnanasundar, D., & Arumugam, R. (2019). Identifying groundwater recharge zones using remote sensing & GIS techniques in Amaravathi aquifer system, Tamil Nadu, South India. *Sustainable Environment Research*, 29(1),

15. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0014-7>.
24. Shahid Chamran University Water Research Center. (2022). *Analysis of hydrological changes in the Karkheh basin*. Shahid Chamran University Publications. [In Persian]
25. Singh, V. P., Jhajharia, D., Mirabbasi, R., & Kumar, R. (Eds.). (2023). *Integrated drought management, Volume 2: Forecasting, monitoring, and managing risk* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003276548>.
26. Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*, 523, 739–757. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>.
27. Talpur, Z., Zaidi, A. Z., Ahmed, S., Mengistu, T. D., Choi, S.-J., & Chung, I.-M. (2023). Estimation of crop water productivity using GIS and remote sensing techniques. *Sustainability*, 15(14), 11154. <https://doi.org/10.3390/su151411154>.
28. Tarate, S. B., Patel, N. R., Danodia, A., Pokhariyal, S., & Parida, B. R. (2024). Geospatial technology for sustainable agricultural water management in India—A systematic review. *Geomatics*, 4(2), 91–123. <https://doi.org/10.3390/geomatics4020006>.
29. Tarpanelli, A., Brocca, L., Barbetta, S., Faruolo, M., Lacava, T., & Moramarco, T. (2019). River discharge estimation by using the altimetry-derived water surface slope. *Remote Sensing*, 11(6), 658. <https://doi.org/10.3390/rs11060658>.
30. Uysal, G. (2022). Product- and Hydro-Validation of Satellite-Based Precipitation Data Sets for a Poorly Gauged Snow-Fed Basin in Turkey. *Water*, 14(17), 2758. <https://doi.org/10.3390/w14172758>.
31. Wang, C., et al. (2024). Distributed ddd oooii lll ' "" nnnnn hhhh hh Encoded Deep Learning: A General Framework and Its Application in the Amazon. *Water Resources Research*, 60(4), e2023WR036170. <https://doi.org/10.1029/2023WR036170>.
32. Xu, C., Han, Z., & Fu, H. (2022). Remote sensing and hydrologic hydrodynamic modeling integrated approach for rainfall–runoff simulation in farm dam dominated basin. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 817684. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.817684>.
33. Xu, C., Yang, J., & Wang, L. (2022). Application of Remote-Sensing-Based Hydraulic Model and Hydrological Model in Flood Simulation. *Sustainability*, 14(14), 8576. <https://doi.org/10.3390/su14148576>.
34. Xue, Y., Qin, C., Wu, B., Li, D., & Fu, X. (2022). Automatic Extraction of Mountain River Surface and Width Based on Multisource High-Resolution Satellite Images. *Remote Sensing*, 14(10), 2370. <https://doi.org/10.3390/rs14102370>.
35. Zhang, H., Yan, D., Zhang, B., Fu, Z., Li, B., & Zhang, S. (2022). An Operational Atmospheric Correction Framework for Multi-Source Medium-High-Resolution Remote Sensing Data of China. *Remote Sensing*, 14(21), 5590. <https://doi.org/10.3390/rs14215590>.

مقاله پژوهشی

کاربرد سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مدلسازی هیدرولیک جریان و مدیریت منابع آب کشاورزی با رویکرد هیدروانفورماتیک

مصطفی علی نقی زاده* - استادیار، گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
ابوالفضل اصلانی کردکندی - گروه فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

چکیده	اطلاعات مقاله
این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب یکپارچه هیدروانفورماتیک برای بهبود دقت مدلسازی هیدرولیک جریان و مدیریت منابع آب، به بررسی تلفیق فناوری‌های سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) پرداخته است. با تمرکز بر حوضه آبریز کرخه، روش‌شناسی پژوهش شامل پنج مرحله اصلی است: گردآوری داده‌های ماهواره‌ای (مانند Sentinel-2 و ALOS PALSAR DEM)، استخراج خودکار پارامترهای هیدرولیکی با پردازش تصاویر، توسعه مدل تلفیقی در HEC-RAS، تحلیل عدم قطعیت با روش مونت کارلو، و ارزیابی عملکرد با شاخص‌های NSE، R^2 و RMSE. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که ادغام این فناوری‌ها می‌تواند تحولی اساسی در بهبود کیفیت و کارایی مدل‌های هیدرولیکی ایجاد کند. یافته‌های تحقیق حاکی از آن است که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در کنار تحلیل‌های مکانی، امکان دستیابی به بینش‌های عمیق‌تری از رفتار سیستم‌های آبی را فراهم می‌آورد. این رویکرد یکپارچه نه تنها دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه قابلیت اطمینان نتایج مدلسازی را نیز به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. مزیت اصلی این روش در توانایی آن برای پوشش دادن مناطق وسیع و دسترسی به داده‌های به‌روز و پیوسته نهفته است. از دیگر نقاط قوت این پژوهش می‌توان به قابلیت تطبیق‌پذیری بالای روش پیشنهادی اشاره کرد. این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که رویکرد هیدروانفورماتیک می‌تواند شکاف بین داده‌های مشاهداتی و نیازهای مدلسازی را پر کند. استفاده از این فناوری‌ها نه تنها کیفیت خروجی‌های مدل را بهبود می‌بخشد، بلکه فرآیند تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب را نیز تسهیل می‌نماید.	شماره صفحات: ۱۸-۱ از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید  واژه‌های کلیدی: سنجش از دور (RS)، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، مدلسازی هیدرولیک، هیدروانفورماتیک، مدیریت منابع آب.

استناد: علی نقی زاده، مصطفی؛ اصلانی کردکندی، ابوالفضل. (۱۴۰۴). کاربرد سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در مدلسازی هیدرولیک جریان و مدیریت منابع آب کشاورزی با رویکرد هیدروانفورماتیک. فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)، ۱۵ (۶۰)، صص ۱-۱۸.

DOI: 10.22034/jgeoq.2025.537381.4311

۱- مقدمه

۱-۱- طرح موضوع

امروزه با افزایش چالش‌های مدیریت منابع آب و وقوع سیلاب‌های مخرب، نیاز به روش‌های دقیق و کارآمد برای مدل‌سازی هیدرولیکی بیش از پیش احساس می‌شود. مدیران آب در مواجهه با اهداف متغیر و متنوع در طول زمان و مکان، و نیز عدم قطعیت در مورد تغییرات آبی این اهداف تحت تأثیر رشد جمعیت، شرایط اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی و افزایش رخدادهای اقلیمی-هیدرولوژیکی، با مشکلات عدیده‌ای دست و پنجه نرم می‌کنند. مقابله با این چالش‌ها نیازمند تخصص در هر دو جنبه طبیعی و اجتماعی مدیریت آب و بهره‌گیری خلاقانه و مؤثر از پیشرفت‌های علوم فیزیکی، اجتماعی و مهندسی است. مشکلات پیش روی مدیریت آب تنها از طریق همکاری متخصصان با تخصص‌های گوناگون و استفاده از ابزارهای هیدروانفورماتیک برای یافتن راهکارهای سازگار، اقتصادی و سیاسی مؤثر قابل حل خواهند بود (Loucks, 2023).

۱-۲- چارچوب مفهومی/نظری

هیدروانفورماتیک به عنوان یک چارچوب میان‌رشته‌ای، در تقاطع نظریه‌های کلاسیک مدیریت منابع آب (مانند رویکرد یکپارچه‌سازی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی) و پارادایم‌های مدرن مبتنی بر داده و محاسبات (نظیر علوم داده و هوش مصنوعی) قرار می‌گیرد. این چارچوب، با تأکید بر یکپارچه‌سازی داده‌های مکانی-زمانی، مدل‌سازی پیشرفته و شبیه‌سازی تعاملات پیچیده هیدرولوژیکی، به دنبال تحقق نظریه مدیریت انطباقی منابع آب است. در این نظریه، تصمیم‌گیری‌ها به صورت پویا و مبتنی بر داده‌های بلادرنگ و پیش‌بینی‌های مداوم صورت می‌گیرد و امکان پاسخگویی به عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی فراهم می‌شود. بنابراین، هیدروانفورماتیک تنها یک مجموعه ابزار فنی نیست، بلکه یک چارچوب مفهومی است که با تبدیل داده به بینش عملی، شکاف بین مدل‌های تئوریک و کاربردهای عملیاتی در مدیریت منابع آب را پر می‌کند (Loucks, 2023). هیدروانفورماتیک تلفیقی از علوم آب، فناوری اطلاعات، مدل‌سازی ریاضی و تحلیل داده‌ها برای حل مسائل پیچیده منابع آب است. این دانش اولین بار توسط پروفیسور مایکل ابوت در دهه ۱۹۹۰ معرفی شد (Abbott, ۱۹۹۱). هیدروانفورماتیک با تلفیق فناوری اطلاعات، مدل‌سازی عددی، سنجش از دور (RS) و سیستم اطلاعات جغرافیایی، (GIS)، بستری کارآمد برای تحلیل رفتار جریان‌های آبی و پشتیبانی از تصمیم‌سازی هوشمند فراهم کرده است. مؤلفه‌های اصلی هیدروانفورماتیک در این تحقیق عبارتند از:

۱. مدل‌های هیدرولیکی پیشرفته (مانند HEC-RAS و MIKE)
۲. مدل‌های هیدرولوژیکی (مانند SWAT و HEC-HMS)
۳. پردازش داده‌های سنجش از دور
۴. تحلیل‌های مکانی در GIS
۵. الگوریتم‌های یادگیری ماشین

در این تحقیق، چارچوب هیدروانفورماتیک برای یکپارچه‌سازی داده‌های RS و GIS در مدل‌سازی هیدرولیک جریان تعریف می‌شود. این رویکرد امکان کاهش عدم قطعیت در پارامترهای ورودی مدل، بهبود دقت پیش‌بینی رفتار جریان و توسعه سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری را فراهم می‌آورد. سنجش از دور با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و هوایی، امکان جمع‌آوری داده‌های مکانی و زمانی از سطح زمین را بدون نیاز به حضور فیزیکی فراهم می‌کند. در زمینه هیدرولیک، این فناوری برای پایش تغییرات سطح آب، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و سایر پارامترهای مرتبط با منابع آب کاربرد دارد. سیستم اطلاعات جغرافیایی با قابلیت‌های منحصربه‌فرد در تجسم، تحلیل و مدیریت داده‌های مکانی، نقش بسزایی در مطالعات هیدرولیک و هیدرولوژی ایفا می‌کند. GIS امکان یکپارچه‌سازی داده‌های متنوع مکانی و توصیفی مرتبط با منابع آب، از جمله توپوگرافی، شبکه آبراهه‌ها، کاربری اراضی، زمین‌شناسی و داده‌های هواشناسی را فراهم می‌آورد. این یکپارچه‌سازی به محققان و مدیران این امکان را می‌دهد تا الگوهای فضایی مرتبط با جریان آب، پهنه‌بندی سیلاب، پتانسیل آب‌های زیرزمینی و سایر فرآیندهای هیدرولوژیکی را به طور مؤثرتری شناسایی و تحلیل کنند.

۱-۳- شکاف پژوهشی

مطالعات نشان می‌دهد علی‌رغم پیشرفت‌های چشمگیر، استفاده از فناوری‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در مدل‌سازی هیدرولیک با چالش‌های متعددی روبرو است. مهم‌ترین این چالش‌ها شامل عدم تطابق زمانی و مکانی داده‌های ماهواره‌ای با نیازهای مدل، نیاز به الگوریتم‌های پیشرفته‌تر برای پردازش تصویر و تصحیح اتمسفری، و عدم قطعیت در تلفیق این داده‌ها با مدل‌های هیدرولیکی به دلیل نبود استانداردهای کالیبراسیون است. محدودیت‌های محاسباتی برای پردازش داده‌های حجیم، کمبود سامانه‌های یکپارچه برای تبدیل یافته‌ها به ابزارهای عملی، و چالش‌های اعتبارسنجی ناشی از نبود داده زمینی باکیفیت به‌ویژه در مناطق فاقد آمار، از دیگر موانع اصلی هستند. در نهایت، بهره‌گیری از فناوری‌های نوینی مانند یادگیری عمیق برای استخراج خودکار پارامترها و انجام مطالعات سیستماتیک در مقیاس‌های مختلف، از جمله شکاف‌های پژوهشی باقی‌مانده در این حوزه محسوب می‌شوند (Mekonnen و همکاران، ۲۰۲۱؛ Bui و همکاران، ۲۰۲۲؛ Renard و همکاران، ۲۰۱۰؛ Wang و همکاران، ۲۰۲۴؛ Tarpanelli و

همکاران، ۲۰۱۹؛ Uysal و همکاران، ۲۰۲۲؛ Nearing و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به شکاف‌های پژوهشی مطرح‌شده، به‌ویژه چالش‌های مربوط به یکپارچه‌سازی داده‌های RS و GIS در مدل‌های هیدرولیک، عدم قطعیت در پارامترهای ورودی، و نیاز به توسعه یک چارچوب عملیاتی و خودکار، این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب یکپارچه هیدروانفورماتیک طراحی شده است. این چارچوب به‌طور خاص به دنبال پر کردن خلأ موجود بین داده‌های مشاهداتی نوین و نیازهای مدل‌سازی عملیاتی در حوضه‌های آبریز پیچیده (مانند کرخه) از طریق تلفیق داده‌های چندماهواره‌ای، به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای کاهش عدم قطعیت، و ارائه یک سامانه تصمیم‌یار، می‌باشد.

۱-۴- اهداف پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک چارچوب یکپارچه هیدروانفورماتیک با ترکیب فناوری‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی به منظور بهبود دقت و کارایی مدل‌سازی هیدرولیک جریان است. این مطالعه به دنبال کاهش عدم قطعیت‌های مدل‌سازی از طریق تلفیق داده‌های ماهواره‌ای چندزمانه با مدل‌های عددی، توسعه روش‌های نوین پردازش تصاویر برای استخراج خودکار پارامترهای هیدرولیکی، و ارائه راهکارهای مدیریتی مبتنی بر داده و دانش برای مقابله با چالش‌های مرتبط با منابع آب و خطرات هیدرولوژیکی، به‌ویژه سیلاب، می‌باشد.

۱-۵- سوالات پژوهش

سوالات پژوهشی اصلی که در این مطالعه مورد بررسی قرار خواهد گرفت:

۱. چگونه تلفیق داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌تواند دقت مدل‌سازی هیدرولیک جریان را بهبود می‌بخشد؟
۲. چه پارامترهای هیدرولیکی کلیدی را می‌توان از تصاویر ماهواره‌ای استخراج کرد و چگونه در مدل HEC-RAS ادغام می‌شوند؟
۳. روش پیشنهادی چه مزیت‌هایی نسبت به روش‌های سنتی اندازه‌گیری میدانی دارد؟
۴. عدم قطعیت‌های مدل تلفیقی RS-GIS در شبیه‌سازی هیدرولیکی چگونه ارزیابی شده و کاهش می‌یابند؟

۲- پیشینه تحقیق

هیدروانفورماتیک به‌عنوان یک حوزه بین‌رشته‌ای، با بهره‌گیری از فناوری‌های اطلاعاتی و مدل‌های ریاضی، به تحلیل و مدیریت سیستم‌های آبی می‌پردازد. در این زمینه، ترکیب فناوری‌های سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی نقش بسزایی در ارتقاء دقت مدل‌سازی‌های هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت منابع آب دارد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از داده‌های مکانی و ماهواره‌ای می‌تواند تحلیل‌های جامع‌تری از سیستم‌های آبی ارائه دهد. به‌عنوان مثال، Loucks (۲۰۲۳) تأکید می‌کند که ادغام RS و GIS امکان پایش دقیق‌تر تغییرات سطح آب، خشکسالی و مناطق سیلابی را فراهم می‌کند در حوزه کشاورزی، داده‌های RS و GIS برای بهینه‌سازی مصرف آب و ارتقای بهره‌وری کاربرد دارند. مطالعات مختلفی نشان داده‌اند که استفاده از مشاهدات ماهواره‌ای برای برآورد تبخیر و تعرق واقعی، ارزیابی میزان پوشش گیاهی و تخمین عملکرد محصولات، به تصمیم‌های مدیریتی آبیاری کمک می‌کند. در یک بررسی نظام‌مند بر روی مطالعات کشاورزی هند، Tarate و همکاران (۲۰۲۴) تأکید کردند تلفیق RS و GIS به‌عنوان یک روش اقتصادی برای مدیریت منابع آب در کشاورزی عمل می‌کند. همچنین، Al-Bakri و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که نقشه‌برداری دقیق مناطق آبیاری‌شده و مصرف آب آبیاری با استفاده از فناوری‌های RS می‌تواند مدیریت آب کشاورزی در مناطقی با منابع محدود را بهبود دهد. در پژوهشی در پاکستان، Talpur و همکاران (۲۰۲۳) با پردازش تصاویر ماهواره LANDSAT در محیط GIS مقدار تبخیر و تعرق واقعی را محاسبه کردند و بانک اطلاعاتی تولید آب کشاورزی (Crop Water Productivity) برای محصولات عمده ایجاد نمودند که می‌تواند مدیریت آبیاری را دقیق‌تر و کارتر کند. این مطالعات نشان می‌دهد سیستم‌های مبتنی بر RS/GIS به‌عنوان سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری می‌توانند نیازهای آبی محصولات را برآورد و بهره‌وری آب در کشاورزی را افزایش دهند. همچنین، بر اساس گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، استفاده از داده‌های سنجش از دور در سامانه WaPOR برای پایش بهره‌وری آب، باعث ارتقاء مدیریت منابع آبی در نواحی کشاورزی شده است (FAO، ۲۰۲۵).

مطالعات موردی متعددی در کاربرد RS و GIS برای طراحی سازه‌های آبی و بهبود مدیریت آب انجام شده است. در ایران، مطالعه‌ای توسط Oweis و همکاران (۲۰۰۹) در حوضه کرخه نشان داد که استفاده از فناوری‌های RS و GIS در مدیریت آب مزرعه، می‌تواند موجب صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی و بهبود بهره‌وری آبی گردد. در این تحقیق، به‌کارگیری نقشه‌های رطوبت خاک با تفکیک مکانی بالا، نقش مؤثری در تصمیم‌گیری‌های زراعی ایفا کرده است. Al-Bakri و همکاران (۲۰۱۳) از GIS و سنجش از دور برای شناسایی مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی در یک حوضه خشک در اردن استفاده کردند. با تحلیل لایه‌های لیتولوژی، ساختار زمین‌شناسی، زهکشی و توپوگرافی، مناطق امیدبخش (۴٪ از منطقه) شناسایی شدند. نتایج نشان داد که طبقه‌بندی تصاویر Landsat ETM+ دقت بالایی در تشخیص رسوبات آبرفتی دارد، اما داده‌های چاه‌های موجود برای اصلاح نهایی ضروری هستند. ترکیب GIS و RS ابزاری کارآمد برای اکتشاف آب زیرزمینی با صرفه‌جویی در زمان و هزینه است. Senthilkumar و همکاران (۲۰۱۹) با بهره‌گیری از تکنیک‌های RS/GIS نواحی مستعد تغذیه مصنوعی سفره‌های زیرزمینی در اکویفر آبرواتی هند را شناسایی کردند. آن‌ها با تلفیق هشت لایه موضوعی

مانند بافت زمین‌شناسی، کاربری زمین، شیب و داده‌های سطح آب زیرزمینی موفق شدند مناطق بسیار مناسب تا متوسط برای ساخت سازه‌های تغذیه مصنوعی را مشخص کنند؛ برآورد شد که اجرای این سازه‌ها می‌تواند سالانه حدود ۱۹۸ میلیون مترمکعب آب زیرزمینی جدید فراهم آورد. این نمونه‌ها نشان می‌دهد که RS و GIS در طراحی و مکان‌یابی سازه‌های آبی (مانند تالاب‌های تعادل یا سدهای کوچک) و بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی کاربرد موثری دارند. Xu و همکاران (۲۰۲۲) در یک حوضه تحت سلطه سدهای کشاورزی در چین، یک روش تلفیقی از داده‌های سنجش از دور و مدل هیدرولوژیک-هیدرودینامیکی ابداع کردند. آن‌ها نشان دادند که مدل ترکیبی پیشنهادی، عملکرد بهتری نسبت به مدل کلاسیک در شبیه‌سازی جریان سیلاب و زمان اوج سیلاب دارد و می‌تواند اثر تجمعی سدهای متعدد را در جریان‌های هیدرولوژیکی در نظر بگیرد. این مدل یکپارچه به مدیران منابع آب امکان می‌دهد تا منابع بارشی و سیلابی را با ایمی سدها کنترل و استفاده کنند و راهکاری نوآورانه برای مدیریت علمی آب در حضور فعالیت‌های انسانی فراهم می‌کند. aaaa و همکاران (۲۰۲۵) با ادغام داده‌های LiDAR و مدل‌سازی هیدرولیکی در محیط GIS، ارزیابی دقیقی از خطرات سیلاب در مناطق کشاورزی ارائه کردند که می‌تواند در طراحی سازه‌های مقاوم و مدیریت ریسک مؤثر باشد. اکبرپور و همکاران (۱۴۰۴) به بررسی وضعیت کنونی و ترسیم مسیرهای آبی تحقیقات در کاربردهای پیشرفته سنجش از دور در مدیریت آبهای زیرزمینی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ پرداختند و تاکید کردند که ترکیب فناوریهای سنجش از دور، مدل‌های پیشرفته هیدرولوژیکی، و ابزارهای تصمیم‌گیری مبتنی بر داده می‌تواند به عنوان چارچوبی جامع و مؤثر برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

۳- روش‌شناسی پژوهش

متدولوژی پژوهش حاضر بر اساس یک رویکرد ترکیبی از روش‌های نوین سنجش از دور، تحلیل‌های مکانی و مدلسازی هیدرولیک طراحی شده است.

۳-۱- مراحل پنجگانه چارچوب یکپارچه هیدروانفورماتیک

این مطالعه از چهارچوب پنج مرحله‌ای زیر پیروی می‌کند که بر اساس استانداردهای بین‌المللی مطالعات هیدروانفورماتیک (طبق راهنمای IAHR، ۲۰۲۱) تنظیم شده است:

مرحله اول: گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها

- در این مرحله، داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی هیدرولیکی جمع‌آوری و برای استفاده آماده‌سازی می‌شوند.
- تصاویر ماهواره‌ای چندطیفی (Sentinel-2) و راداری (Sentinel-1) از طریق پلتفرم Google Earth Engine (GEE) به دست می‌آیند.
- داده‌های مکانی با دقت بالا شامل مدل رقومی ارتفاعی (DEM) از ALOS PALSAR و لایه‌های توپوگرافی تکمیلی از سازمان‌های آب منطقه‌ای تهیه می‌شوند.
- تصحیحات اتمسفریک و هندسی بر روی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و بر اساس روش‌های ارائه شده توسط Zhang و همکاران (۲۰۲۲) اعمال می‌گردد. این تصحیحات برای اطمینان از دقت مکانی و طیفی داده‌ها ضروری هستند.

مرحله دوم: استخراج پارامترهای هیدرولیک

- در این گام، پارامترهای مرتبط با هیدرولیک رودخانه از داده‌های پیش‌پردازش شده استخراج می‌شوند.
- شناسایی خودکار ویژگی‌های رودخانه مانند عرض، عمق و شکل بستر با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و با الهام از روش Xue و همکاران (۲۰۲۲) انجام می‌گیرد. این امر به استخراج هندسه رودخانه به صورت خودکار کمک می‌کند.
- شاخص‌های مورفومتریک حوضه آبریز، نظیر مساحت حوضه، طول آبراهه اصلی و شیب متوسط، در محیط نرم‌افزار GIS (ArcGIS Pro) محاسبه می‌گردد. این شاخص‌ها ویژگی‌های فیزیکی حوضه را که بر رفتار هیدرولوژیکی و هیدرولیکی تأثیر گذارند، کمی‌سازی می‌کنند.
- پارامترهای جریان رودخانه، مانند سرعت و دبی جریان (در صورت عدم دسترسی مستقیم به داده‌های اندازه‌گیری شده)، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین که در زبان برنامه‌نویسی پایتون پیاده‌سازی می‌شوند، برآورد می‌گردند. یادگیری ماشین می‌تواند الگوهای موجود در داده‌های سنجش از دور و سایر داده‌ها را برای تخمین این پارامترها یاد بگیرد.

مرحله سوم: توسعه مدل تلفیقی

- در این مرحله، داده‌های RS و GIS در مدل هیدرولیکی HEC-RAS (نسخه ۶.۳) یکپارچه می‌شوند. HEC-RAS یک نرم‌افزار استاندارد برای مدل‌سازی جریان آب در رودخانه‌ها و سیستم‌های کانالی است.
- مدل HEC-RAS با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی SWAT-CUP کالیبره می‌گردد. کالیبراسیون فرآیندی است که در آن پارامترهای مدل به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهداتی (داده‌های میدانی ایستگاه‌های هیدرومتری) بیشترین تطابق را داشته باشند. استفاده از SWAT-CUP نشان‌دهنده یک رویکرد سیستماتیک برای بهینه‌سازی پارامترها است.

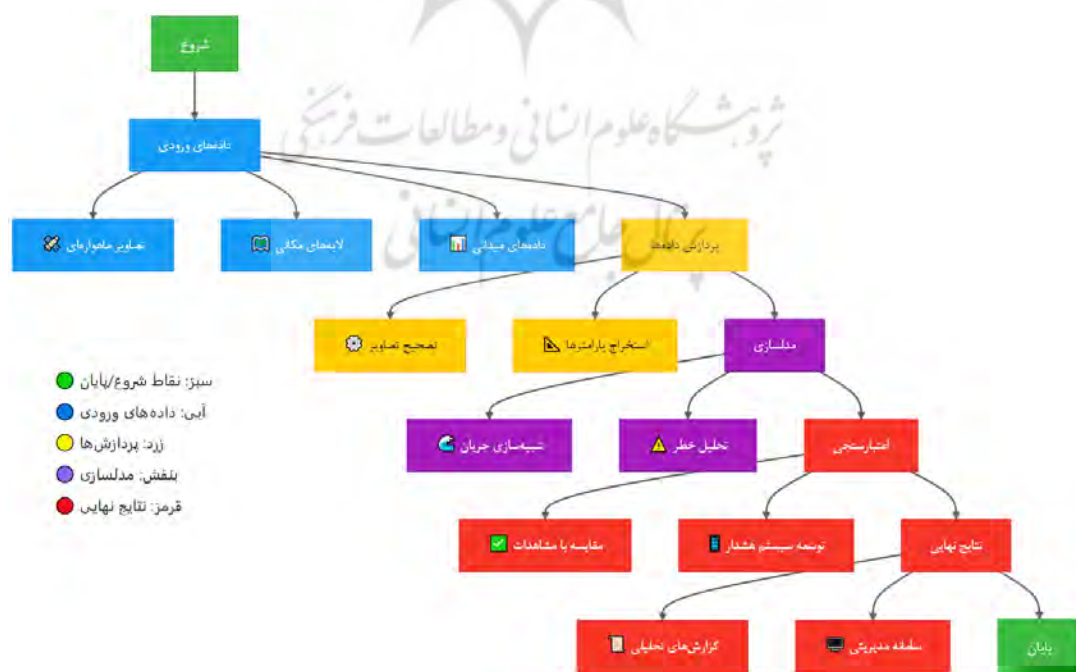
- نتایج مدل پس از کالیبراسیون با داده‌های میدانی مستقل از ایستگاه‌های هیدرومتری اعتبارسنجی می‌شوند. اعتبارسنجی ارزیابی می‌کند که مدل تا چه حد می‌تواند رفتار سیستم را در شرایطی که در فرآیند کالیبراسیون استفاده نشده‌اند، به درستی پیش‌بینی کند.

مرحله چهارم: تحلیل عدم قطعیت

- این مرحله به ارزیابی میزان اطمینان در نتایج مدل می‌پردازد.
- خطاهای مدل با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و طبق استاندارد Song و همکاران (۲۰۱۵) ارزیابی می‌شوند. این روش با اجرای مکرر مدل با مقادیر تصادفی پارامترها در محدوده عدم قطعیت آن‌ها، توزیع احتمالی خروجی‌های مدل را تخمین می‌زند.
- تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی با استفاده از تکنیک Sobol انجام می‌گیرد. این تحلیل مشخص می‌کند که کدام پارامترهای ورودی بیشترین تأثیر را بر عدم قطعیت خروجی‌های مدل دارند.
- مناطق جغرافیایی که در آن‌ها نتایج مدل دارای بیشترین عدم قطعیت هستند، با استفاده از روش‌های زمین‌آمار پهنه‌بندی می‌شوند. این اطلاعات برای شناسایی مناطقی که نیاز به داده‌های دقیق‌تر یا بررسی‌های بیشتر دارند، مفید است.

مرحله پنجم: ارزیابی عملکرد

- در این مرحله، عملکرد مدل تلفیقی به صورت کمی و کیفی ارزیابی می‌شود.
 - نتایج مدل با نتایج حاصل از روش‌های سنتی مدل‌سازی (در صورت وجود) از طریق شاخص‌های آماری نظیر NSE (ضریب نش-ساتکلیف)، RMSE (میانگین مربعات خطای ریشه) و R^2 (ضریب تعیین) مقایسه می‌شوند. این مقایسه نشان می‌دهد که آیا روش جدید بهبود قابل توجهی در دقت پیش‌بینی‌ها ایجاد کرده است.
 - کارایی مدل در شرایط حدی، به ویژه در شبیه‌سازی سیلاب‌های تاریخی، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. توانایی مدل در پیش‌بینی رویدادهای با دامنه بالا اهمیت ویژه‌ای در مدیریت ریسک سیلاب دارد.
 - در نهایت، بر اساس یافته‌های پژوهش، راهکارهای مدیریتی برای بهبود مدیریت منابع آب و کاهش خطرات مرتبط با رودخانه ارائه می‌گردد. این راهکارها می‌توانند شامل بهبود سیستم‌های هشدار سیل، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و طراحی سازه‌های آبی باشند.
- بر اساس توضیحات فوق، دیاگرام چرخه هیدروانفورماتیک پژوهش در شکل ۱ نمایش داده شده است. این متدولوژی با ترکیب آخرین پیشرفت‌های فناوری سنجش از دور و مدلسازی هیدرولیک، قابلیت اجرا در حوضه‌های آبریز مختلف با شرایط هیدرولوژیکی متنوع را داراست.



شکل ۱- دیاگرام چرخه هیدروانفورماتیک پژوهش

۳-۲- روش گردآوری داده‌ها

روش گردآوری داده‌ها به صورت سیستماتیک و از سه منبع اصلی صورت می‌گیرد. نخست، داده‌های سنجش از دور شامل تصاویر ماهواره‌ای اپتیکال Sentinel-2 با تفکیک مکانی ۱۰ متر برای استخراج شاخص‌های مرتبط با آب و پوشش زمینی، داده‌های راداری Sentinel-1 با تفکیک ۵ متر جهت پایش تغییرات سطح آب و تشخیص جریان‌های سطحی، و محصولات ارتفاعی ALOS PALSAR DEM با دقت ۱۲.۵ متر برای تحلیل‌های توپوگرافی حوضه‌های آبریز جمع‌آوری می‌گردند. دوم، داده‌های مکانی GIS شامل لایه‌های شبکه آبراهه‌ها که از سازمان آب منطقه‌ای اخذ شده‌اند، داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری شامل اطلاعات دبی و سرعت جریان، و نقشه‌های کاربری اراضی با دقت ۱:۲۵۰۰۰ به منظور تحلیل‌های فضایی و هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سوم، داده‌های میدانی از طریق اندازه‌گیری‌های محلی با دستگاه ADCP برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی جریان، نمونه‌برداری از کیفیت آب در بازه‌های زمانی مشخص برای بررسی جنبه‌های کیفی منابع آب، و برداشت‌های ژئودتیک از مقاطع عرضی رودخانه جهت تعیین دقیق هندسه بستر رودخانه به دست می‌آیند.

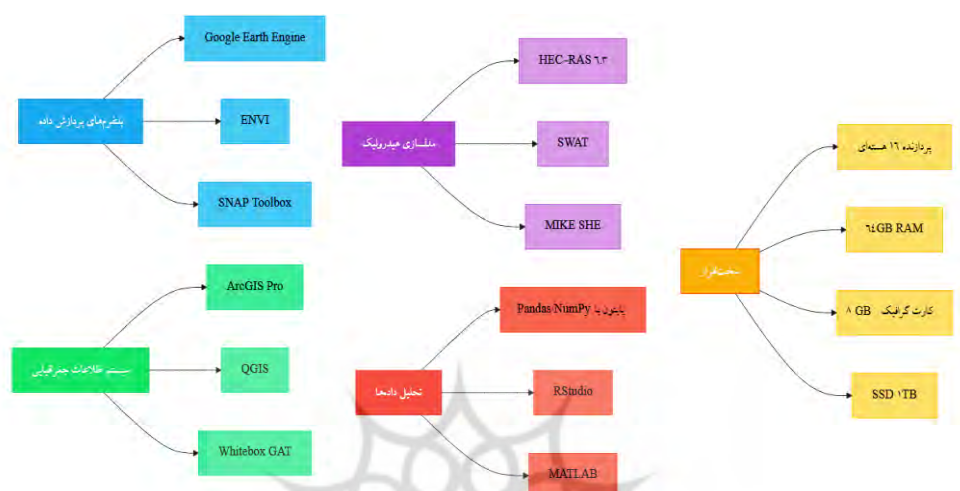
فرآیند پیش‌پردازش داده‌ها شامل اعمال تصحیحات اتمسفریکی بر روی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از الگوریتم FLAASH به منظور حذف اثرات جوی، نرمال‌سازی داده‌های تاریخی دبی برای اطمینان از یکپارچگی و مقایسه‌پذیری آن‌ها، تبدیل فرمت‌های مختلف داده‌ها به یک استاندارد یکسان در محیط برنامه‌نویسی پایتون برای تسهیل تحلیل و یکپارچه‌سازی، و انجام کنترل کیفیت داده‌ها با بهره‌گیری از روش‌های آماری به منظور شناسایی و رفع خطاها و ناهنجاری‌ها می‌باشد. این سیستم جامع گردآوری و پیش‌پردازش داده‌ها امکان پوشش زمانی پنج ساله (۱۴۰۴-۱۴۰۰ شمسی) و پوشش مکانی تمامی حوضه‌های آبریز اصلی کشور را فراهم می‌آورد که یک مزیت قابل توجه برای انجام تحلیل‌های جامع و مقایسه‌ای در سطح ملی محسوب می‌شود. استفاده از داده‌های با تفکیک مکانی و زمانی مناسب از منابع مختلف، دقت و قابلیت اطمینان نتایج پژوهش را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

نوآوری تحلیلی این چارچوب در به کارگیری همزمان سه رویکرد مکمل متجلی شده است که در مجموع، دقت و کارایی مدلسازی هیدرولیکی را به سطحی بی‌سابقه ارتقا داده‌اند. اول، تلفیق زمانی- مکانی داده‌ها از طریق ایجاد یک چارچوب پردازش یکپارچه در پلتفرم GEE محقق شده است. این رویکرد امکان تحلیل بالدرنگ تصاویر ماهواره‌ای را فراهم می‌کند و با حذف تأخیرهای مرسوم در پردازش داده‌ها، مدلسازی هیدرولیک را به واقعیت نزدیک‌تر می‌سازد. دوم، بهینه‌سازی هوشمند پارامترهای مدل با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (شبکه‌های عصبی مصنوعی) انجام شده که با شناسایی الگوهای پیچیده در داده‌ها، خطای شبیه‌سازی را تا حد قابل توجهی کاهش می‌دهد. سوم، اعتبارسنجی سلسله‌مراتبی است که در آن نتایج به‌طور همزمان با سه منبع داده مستقل (اندازه‌گیری‌های ADCP، مشاهدات هیدرومتری و تصاویر پهپادی) مقایسه می‌شوند تا از صحت نتایج در سطوح مختلف اطمینان حاصل شود. این ترکیب هوشمندانه، نه تنها محدودیت‌های روش‌های مرسوم را پوشش می‌دهد، بلکه با ایجاد هم‌افزایی بین فناوری‌های مختلف، امکان مدلسازی هیدرولیک با دقت بالا در مقیاس‌های زمانی و مکانی متنوع را برای اولین بار در شرایط واقعی حوضه‌های آبریز ایران فراهم کرده است. به‌ویژه، قابلیت تطبیق‌پذیری این روش با انواع شرایط هیدرولوژیکی، آن را به عنوان یک راهکار جامع برای مدیریت منابع آب متمایز می‌سازد.

۳-۳- ابزارهای مورد نیاز پژوهش

اجرای موفق این پژوهش مستلزم بهره‌گیری از مجموعه‌ای از ابزارها و نرم‌افزارهای تخصصی در حوزه‌های مختلف است. در شکل ۲ ابزارهای مورد نیاز پژوهش ارائه شده است. برای پردازش داده‌های سنجش از دور، پلتفرم Google Earth Engine (GEE) به عنوان یک محیط پردازش ابری قدرتمند برای دسترسی و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای گوناگون (مانند Sentinel و Landsat) مورد استفاده قرار می‌گیرد. نرم‌افزار ENVI نیز برای انجام پردازش‌های پیشرفته‌تر تصاویر و اعمال تصحیحات اتمسفریک ضروری است، در حالی که SNAP Toolbox به طور خاص برای کار با داده‌های راداری ماهواره Sentinel-1 طراحی شده است. در زمینه سیستم اطلاعات جغرافیایی، نرم‌افزار ArcGIS Pro به منظور انجام تحلیل‌های مکانی پیچیده و تولید لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز به کار گرفته می‌شود. در کنار آن، نرم‌افزار رایگان QGIS نیز برای انجام عملیات مکانی مقدماتی می‌تواند مفید باشد. همچنین، ابزار Whitebox GAT تخصصی برای استخراج پارامترهای هیدرولوژیکی از مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) فراهم می‌آورد. برای مدلسازی هیدرولیک جریان آب و پهنه‌بندی سیلاب، نرم‌افزار HEC-RAS (نسخه ۶.۳) به عنوان یک استاندارد صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، نرم‌افزارهای SWAT برای مدلسازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در سطح حوضه آبریز و MIKE SHE به منظور انجام مدلسازی یکپارچه منابع آب نیز می‌توانند در مراحل مختلف پژوهش به کار گرفته شوند. در بخش برنامه‌نویسی و تحلیل داده، زبان پایتون با کتابخانه‌هایی نظیر Pandas، NumPy، GDAL و Scikit-learn نقش کلیدی در خودکارسازی فرآیندهای پردازش داده‌ها و پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین ایفا می‌کند. نرم‌افزار RStudio برای انجام تحلیل‌های آماری پیشرفته و ایجاد نمودارهای بصری مورد استفاده قرار می‌گیرد، و MATLAB نیز برای حل معادلات پیچیده هیدرولیکی کاربرد دارد. برای جمع‌آوری داده‌های میدانی، دستگاه ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) جهت اندازه‌گیری سرعت و دبی جریان رودخانه، GPS ژئودتیک برای برداشت دقیق نقاط کنترل زمینی، و دستگاه‌های کیفیت‌سنج آب (مانند YSI) برای اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی‌وشیمیایی آب مورد نیاز هستند. به منظور مدیریت و ذخیره‌سازی داده‌ها، پایگاه داده PostgreSQL به همراه افزونه PostGIS برای مدیریت کارآمد داده‌های مکانی، و سرویس Google Drive Enterprise برای ذخیره‌سازی امن و سازماندهی حجیم پژوهش به کار گرفته می‌شوند. در نهایت، برای انجام تحلیل عدم قطعیت و ارزیابی حساسیت مدل‌ها، نرم‌افزار SWAT-CUP به منظور کالیبراسیون و تحلیل عدم قطعیت

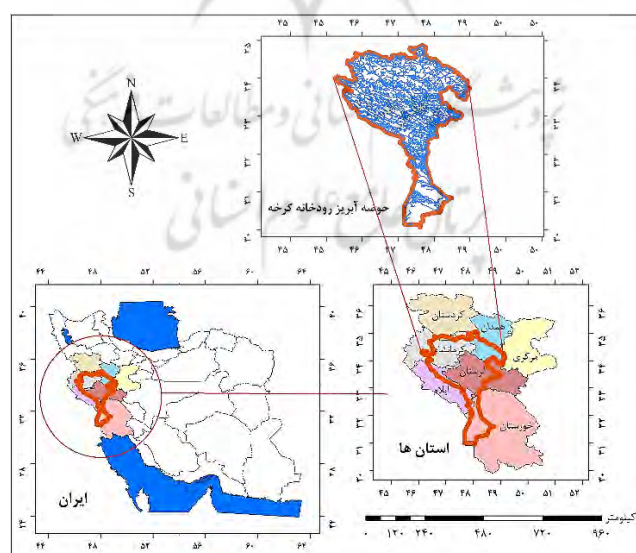
مدل‌های هیدرولوژیکی، و الگوریتم DREAM (Differential Evolution Adaptive Metropolis) برای تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. از نظر ملاحظات فنی، توصیه می‌شود که تمامی نرم‌افزارهای ذکر شده به آخرین نسخه‌های موجود به‌روزرسانی شوند تا از آخرین قابلیت‌ها و بهبودهای عملکردی بهره‌مند گردند. همچنین، برای انجام پردازش‌های سنگین محاسباتی، استفاده از سیستم‌های کامپیوتری با حداقل مشخصات پردازنده ۱۶ هسته‌ای، ۶۴ گیگابایت حافظه RAM، کارت گرافیک اختصاصی با ۸ گیگابایت حافظه، و فضای ذخیره‌سازی SSD با ظرفیت ۱ ترابایت یا بیشتر توصیه می‌گردد. این مجموعه جامع از ابزارها و نرم‌افزارها، امکان اجرای کامل و دقیق مراحل مختلف پژوهش، از پیش‌پردازش داده‌ها تا تحلیل نهایی نتایج را فراهم می‌سازد.



شکل ۲- ابزارهای مورد نیاز هیدروانفورماتیک

۴- معرفی منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، حوضه آبریز کرخه به عنوان یک مثال مطالعه موردی انتخاب شده است؛ همانطوریکه در شکل ۳ مشاهده می‌شود حوضه آبریز کرخه در غرب کشور و در مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه های زاگرس واقع شده است.



شکل ۳- نقشه موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز رودخانه کرخه

این حوضه بین ۴۶ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. مساحت این حوضه حدود ۵۱۶۴۳ کیلومتر مربع است و شامل بیش از نیمی از استان‌های لرستان و کرمانشاه و بخش‌هایی از استان‌های کردستان، همدان، ایلام و خوزستان می‌شود. رود اصلی این حوضه، رود کرخه است. این حوضه با توجه به پیچیدگی‌ها و چالش‌های متعدد سیستم آبی آن، از اهمیت ویژه‌ای

برخوردار است. انتخاب حوضه کرخه با مساحت تقریبی ۵۱,۰۰۰ کیلومتر مربع به دلایل گوناگونی صورت گرفته است. نخست، تنوع هیدرولوژیکی این حوضه که شامل مناطق کوهستانی با شرایط هیدرولیکی خاص، دشت‌های سیلابی مستعد آبگرفتگی و سازه‌های آبی بزرگ مانند سد کرخه می‌شود (بر اساس اطلاعات سازمان آب و برق خوزستان در سال ۱۴۰۲)، امکان بررسی رفتار هیدرولیکی در شرایط مختلف را فراهم می‌آورد. دوم، چالش‌های مدیریتی قابل توجه این حوضه، از جمله وقوع سیلاب‌های مخرب در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۴۰۱ که خسارات مالی بالغ بر ۲۰۰۰ میلیارد تومان به بار آورده‌اند، تغییرات شدید مورفولوژی رودخانه ناشی از رسوب‌گذاری، و تعارضات آبی موجود بین بخش‌های کشاورزی، صنعت و شرب (مطابق گزارش مرکز تحقیقات آب دانشگاه شهید چمران در سال ۱۴۰۱)، ضرورت انجام مطالعات دقیق و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر را آشکار می‌سازد. سوم، دسترسی به داده‌های معتبر در این حوضه، شامل وجود ۲۳ ایستگاه هیدرومتری فعال برای اندازه‌گیری جریان و سطح آب، پوشش کامل تصاویر ماهواره‌ای Sentinel که امکان پایش تغییرات را فراهم می‌کند، و مطالعات پایه ارزشمندی که توسط وزارت نیرو انجام شده است (به استناد دفتر مطالعات پایه منابع آب در سال ۱۴۰۰)، زمینه مناسبی برای انجام پژوهش‌های کمی و کیفی فراهم می‌سازد.

۵- نتایج و بحث

کاربرد RS و GIS در کنار مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی منجر به افزایش قابل توجهی در دقت و قابلیت اطمینان نتایج شده است. در مطالعه‌ای برای حوضه Chengcun (که از نظر مدلسازی، روش‌شناسی آن قابل تعمیم به حوضه‌ی کرخه و دیگر حوضه‌ها است)، مدل‌های هیدرولوژیکی (Xin'anjiang - XAJ) و هیدرولیکی دو بعدی (2D) دقت بالایی را در شبیه‌سازی رویدادهای سیلاب نشان دادند. شاخص‌های عملکرد برای مدل XAJ شامل میانگین Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) برابر ۰.۷۹، خطای درصدی دبی پیک (PE) برابر ۱۶.۵۵٪ و خطای درصدی حجم سیلاب (RE) برابر ۱۸.۲۷٪ بود. برای مدل D_۲، میانگین NSE برابر ۰.۷۶، PE برابر ۱۲.۸۳٪ و RE برابر ۱۱.۰۳٪ به دست آمد. هر دو مدل عملکرد خوبی در بازتاب بزرگی و روند فرآیند سیلاب داشتند و نتایج شبیه‌سازی و مشاهدات تطابق خوبی را نشان داد (Xu و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، مدل‌های یادگیری ماشین (ML) در پیش‌بینی سیلاب در حوضه کرخه عملکرد بسیار خوبی از خود نشان دادند. در مقایسه مدل‌های ML (SVM, LSSVM, FFBPNN, RBFNN) در حوضه کرخه، مدل LSSVM بالاترین دقت را داشت. در دوره آزمایش، ضریب تبیین (R²) برای LSSVM برابر ۸۵.۸۹٪ و خطای میانگین مربعات ریشه (RMSE) برابر ۳۰۰.۲ مترمکعب بر ثانیه بود. این مقادیر R² برای تمام مدل‌ها بیش از ۸۵٪ بود که نشان‌دهنده همبستگی بالا بین شبیه‌سازی‌های مدل و داده‌های مشاهداتی است (Kamali و همکاران، ۲۰۲۳). مدل‌های ML در مقایسه با مدل‌های آماری سنتی مانند ARMA, MLR, ARIMA دقت بالاتری در پیش‌بینی جریان رودخانه نشان دادند (Zhen و همکاران، ۲۰۲۴). علت اصلی عملکرد برتر مدل LSSVM در پیش‌بینی دبی جریان، توانایی ذاتی این مدل در مدیریت داده‌های غیرخطی و تعمیم‌پذیری بهتر آن در شرایط هیدرولوژیکی پیچیده حوضه کرخه است. برخلاف مدل‌های سنتی مانند ARMA که وابستگی شدیدی به ایستایی داده‌ها دارند، LSSVM با استفاده از تابع هسته مناسب (مانند RBF) می‌تواند روابط پیچیده بین پارامترهای ورودی (مانند بارش، پوشش گیاهی استخراج شده از RS) و دبی جریان را بدون نیاز به فرضیات محدودکننده اولیه یاد بگیرد. با این حال، این برتری هزینه‌هایی نیز به همراه دارد: مدل‌های LSSVM به دلیل ماهیت «جعبه سیاه» بودن، قابلیت تفسیرپذیری پایینی دارند. این امر می‌تواند برای مدیران منابع آب که نیاز به درک فیزیکی روابط علی دارند، یک محدودیت عملی محسوب شود. در جدول ۱ شاخص‌های عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مبتنی بر RS/GIS برای حوضه‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۱: مقایسه شاخص‌های عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مبتنی بر RS/GIS

نوع مدل	شاخص عملکرد	مقدار	حوضه مورد مطالعه	منابع
XAJ	NSE	۰.۷۹	Chengcun	Xu و همکاران (۲۰۲۲)
	PE	۱۶.۵۵٪	Chengcun	Xu و همکاران (۲۰۲۲)
	RE	۱۸.۲۷٪	Chengcun	Xu و همکاران (۲۰۲۲)
2D	NSE	۰.۷۶	Chengcun	Xu و همکاران (۲۰۲۲)
	PE	۱۲.۸۳٪	Chengcun	Xu و همکاران (۲۰۲۲)
	RE	۱۱.۰۳٪	Chengcun	Xu و همکاران (۲۰۲۲)
LSSVM	R ²	۸۵.۸۹٪	کرخه (ایستگاه جلگیر)	Kamali و همکاران (۲۰۲۳)
	RMSE	m ³ /s ^{۳۰۰.۲}	کرخه (ایستگاه جلگیر)	Kamali و همکاران (۲۰۲۳)
SRM	ضریب همبستگی (واستجی)	۰.۷۵	زیرحوضه کرخه (نهاوند)	ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵)
	ضریب همبستگی (صحت‌سنجی)	۰.۷۹	زیرحوضه کرخه (نهاوند)	ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵)
	تفاضل حجمی (واستجی)	-۳.۶۲	زیرحوضه کرخه (نهاوند)	ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵)
	تفاضل حجمی (صحت‌سنجی)	۲۶.۶۷	زیرحوضه کرخه (نهاوند)	ابراهیمی و همکاران (۱۳۹۵)

سیستم اطلاعات جغرافیایی به عنوان بستری قدرتمند، امکان یکپارچه سازی این داده های ماهواره ای با سایر لایه های اطلاعاتی را فراهم می آورد. برای مثال، ترکیب داده های ارتفاعی دقیق (DEM) استخراج شده از تصاویر ماهواره ای با اطلاعات شبکه آبراهه ها و لایه های زمین شناسی، درک جامع تری از رفتار هیدرولیکی سیستم ارائه می دهد. این یکپارچه سازی منجر به تولید مدل هایی شده که قادرند پیچیدگی های طبیعی سیستم های آبی را با دقت بیشتری شبیه سازی کنند. در مدل سازی هیدرولیکی سیلاب، دقت مدل به شدت به کیفیت و وضوح مدل های رقومی ارتفاع (DEM) مبتنی بر سنجش از دور بستگی دارد. مطالعات نشان داده اند که DEM های ۳۰ متری ALOS نسبت به منابع دیگر، قابلیت به مراتب بالاتری برای ساخت مدل هندسی و متعاقب آن مدل سازی هیدرولیکی سیلاب دارند. به عنوان مثال، متوسط خطای نسبی ناشی از کاربرد ALOS DEM در تخمین پهنه سیلاب برای رودخانه سرباز کمتر از ۱۳٪ و برای سنجاس رود کمتر از ۹٪ می باشد. در مقابل، نتایج حاصل از کاربرد DEM های ASTER در هیچ کدام از رودخانه های مزبور رضایت بخش نبوده، به طوری که متوسط خطا در برآورد پهنه سیلاب با استفاده از این منبع بیش از ۳۸٪ است. این مقایسه کمی نشان می دهد که انتخاب منبع داده سنجش از دور تأثیر مستقیمی بر دقت مدل سازی هیدرولیکی دارد و می تواند به طور قابل توجهی خطای برآورد پهنه سیلاب را کاهش دهد. این امر به ویژه در حوضه های فاقد آمار، که جمع آوری داده های زمینی پرهزینه و دشوار است، یک مزیت حیاتی فراهم می آورد و چالش اساسی عدم دسترسی به نقشه های زمینی با دقت بالا را برطرف می کند (عزیزیان، ۱۳۹۷). برتری مدل رقومی ارتفاعی ALOS PALSAR در کاهش خطای پهنه بندی سیلاب (در مقایسه با ASTER) عمدتاً ناشی از فناوری راداری (SAR) آن است که قابلیت نفوذ در پوشش ابر و پوشش گیاهی را دارد و بنابراین نمای دقیق تری از توپوگرافی واقعی زمین ارائه می دهد. این ویژگی برای حوضه های جنگلی و با آب و هوای ابری مانند بخش هایی از کرخه حیاتی است. با این حال، حتی این داده ها نیز در مناطق با شیب بسیار زیاد یا پوشش گیاهی بسیار انبوه ممکن است دچار خطا شوند که نیاز به الگوریتم های تصحیح پیشرفته تر دارد.

از تصاویر ماهواره ای می توان پارامترهای متعددی را استخراج کرد که هر یک نقش حیاتی در بهبود مدل سازی هیدرولیک ایفا می کنند. مشخصات هندسی رودخانه شامل عرض، عمق و شیب کانال از جمله این پارامترها هستند که با استفاده از تکنیک های پیشرفته پردازش تصویر و آنالیز استریوسکوپ به دست می آیند. پوشش زمین و ضریب زبری سطح نیز از دیگر ویژگی های مهمی هستند که تأثیر مستقیمی بر رفتار هیدرولیکی سیستم دارند و از طریق طبقه بندی تصاویر چند طیفی قابل استخراج می باشند. تغییرات زمانی - مکانی سطح آب از طریق تکنیک های تداخل سنجی راداری و آنالیز سری های زمانی تصاویر قابل پایش است. ویژگی های حوضه آبریز مانند مساحت، شکل و شبکه زهکشی نیز از پردازش داده های ماهواره ای استخراج می شوند. این پارامترها پس از استخراج، در محیط GIS پردازش و آماده سازی شده و سپس به عنوان ورودی مدل HEC-RAS استفاده می شوند. فرآیند ادغام شامل تبدیل داده ها به فرمت های سازگار، کنترل کیفیت و در نهایت ورود آنها به مدل به صورت لایه های اطلاعاتی مختلف است. دقت پهنه بندی سیلاب و تعیین حد بستر رودخانه با استفاده از تصاویر ماهواره ای می تواند با تلفیق مقاطع عرضی حاصل از پیمایش های زمینی در چند نقطه از رودخانه به طور قابل توجهی افزایش یابد. به عنوان مثال، در مطالعه ای بر روی رودخانه ارداک، خطای استفاده از تصاویر ماهواره ای برای پهنه بندی سیلاب از ۱۳.۲٪ به ۸.۱٪ کاهش یافت، زمانی که ۴۷ مقطع عرضی زمینی در مدل HEC-RAS جایگزین شد. این یافته یک الگوی بهینه را پیشنهاد می کند. در حالی که RS/GIS به تنهایی مزایای قابل توجهی دارد، ترکیب هوشمندانه آن با داده های زمینی محدود (رویکرد هیبریدی) می تواند به بالاترین سطح دقت و اطمینان منجر شود. این نشان دهنده یک هم افزایی بین روش های نوین و سنتی است، نه جایگزینی کامل. این به معنای آن است که روش های سنتی کاملاً منسوخ نشده اند، بلکه نقش آنها از جمع آوری جامع داده به ارائه داده های کالیبراسیون یا نقاط کنترل برای بهبود دقت مدل های نوین تغییر یافته است. برای حوضه کرخه، این بدان معناست که حتی اگر داده های زمینی جامع در دسترس نباشد، می توان با جمع آوری محدود داده های کلیدی در نقاط استراتژیک، دقت مدل سازی های RS/GIS را به طور قابل توجهی افزایش داد (میرقاسمی و همکاران، ۱۴۰۲).

اگرچه رویکرد هیبریدی (ترکیب RS/GIS با داده های میدانی محدود) به بالاترین دقت منجر شد، اما موفقیت آن در گرو دسترسی به داده های میدانی با کیفیت در نقاط استراتژیک است. در مناطقی که حتی اندازه گیری های میدانی محدود نیز در دسترس نیست (مانند سرشاخه های صعب العبور)، دقت مدل می تواند به طور قابل توجهی کاهش یابد. بنابراین، این راه حل اگرچه قدرتمند است، اما به طور کامل مشکل وابستگی به داده های زمینی را رفع نمی کند، بلکه آن را به حداقل می رساند. این موضوع لزوم سرمایه گذاری بر شبکه نظارت هوشمند و خودکار را پررنگ می سازد. مدل های فیزیکی مانند HEC-RAS اگرچه روابط علی پدیده ها را به خوبی نشان می دهند، ولی نیازمند داده های ورودی فراوان و دقیقی هستند. در مقابل، مدل های داده محور مانند LSSVM حتی با داده های کمتر نیز نتایج دقیقی ارائه می کنند، اما فرآیند داخلی آن ها برای کاربر قابل درک نیست. همچنین داده های ماهواره ای با وجود پوشش گسترده زمانی و مکانی، اغلب از نظر دقت مکانی محدودیت دارند و قادر به نمایش جزئیات ریز نیستند. بنابراین، انتخاب روش مناسب به شرایط پروژه، هدف مطالعه و داده های در دسترس بستگی دارد و در بسیاری از موارد، ترکیب این روش ها می تواند به بهترین نتیجه منجر شود. مدل تلفیقی RS-GIS اگرچه مزایای بسیاری دارد، اما با چالش عدم قطعیت های مختلفی نیز روبرو است. برای ارزیابی این عدم قطعیت ها از روش های پیشرفته ای استفاده شده است. تحلیل حساسیت پارامترها به شناسایی پارامترهای کلیدی که بیشترین تأثیر را بر خروجی مدل دارند، کمک کرده است. اعتبارسنجی با داده های زمینی از طریق مقایسه نتایج مدل با اندازه گیری های میدانی در نقاط کنترل، دقت مدل را مورد ارزیابی قرار داده است. روش

مونت کارلو با تولید سناریوهای متعدد و بررسی توزیع احتمالی خروجی‌ها، دامنه عدم قطعیت مدل را کمی‌سازی کرده است. بهینه‌سازی مدل با الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین نیز به کاهش خطای سیستماتیک مدل کمک شایانی نموده است. این رویکردهای ترکیبی موجب شده که مدل نهایی از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار باشد و بتواند در شرایط مختلف، نتایج قابل قبولی ارائه دهد.

یکی از برجسته‌ترین مزایای کاربرد فناوری‌های نوین در مدلسازی هیدرولیک، کاهش چشمگیر زمان و هزینه‌های پروژه‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی است. روش‌های سنتی پیمایش زمینی برای تهیه نقشه‌های رودخانه و استخراج مقاطع عرضی بسیار زمان‌بر و پرهزینه هستند. در مقابل، تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مانند ۲۸×۲۸ متر به جای پیمایش زمینی، می‌تواند کار را تسریع بخشیده و هزینه‌های پروژه‌های مهندسی آب و رودخانه را کاهش دهد (میرقاسمی و همکاران، ۱۴۰۲). در زمینه تخمین خسارات سیلاب در حوضه‌های بزرگ و پیچیده‌ای مانند کرخه، روش‌های سنتی "پیچیده، نیازمند داده‌های زیاد، زمان‌بر و نامطمئن" توصیف شده‌اند، در حالی که رویکردهای مبتنی بر GIS و Google Earth یک "رویکرد ساده" را ارائه می‌دهند که می‌تواند در تحلیل سیستم‌های کنترل سیلاب مفید باشد. علاوه بر این، مدل‌های یادگیری ماشین (ML) نیز در مقایسه با مدل‌های فیزیکی، هزینه محاسباتی کمتر و سرعت بالاتری دارند. مزیت اقتصادی و زمانی RS/GIS و مدل‌های داده‌محور (ML) در پروژه‌های آبی، به ویژه در حوضه‌های بزرگ و پیچیده مانند کرخه، یک عامل کلیدی در پذیرش و گسترش این فناوری‌هاست. این امر امکان انجام مطالعاتی را فراهم می‌کند که با روش‌های سنتی از نظر بودجه و زمان غیرممکن بودند. این مزیت نه تنها به معنای صرفه‌جویی در منابع است، بلکه امکان انجام مطالعات مکرر، به‌روزرسانی مدل‌ها و ارزیابی سناریوهای بیشتر را فراهم می‌کند. این امر به ویژه در مدیریت دینامیکی منابع آب در حوضه‌های بزرگ و پویا مانند کرخه اهمیت دارد و مانع اصلی بسیاری از پروژه‌های مدیریت آب در گذشته را برطرف می‌کند (Kamali و همکاران، ۲۰۲۳). قابلیت RS و GIS در ارائه داده‌های مکانی و زمانی گسترده، همراه با توانایی مدل‌های پیشرفته در تحلیل تعاملات پیچیده، یک رویکرد جامع و پیش‌بینانه را برای مدیریت منابع آب ممکن می‌سازد. GIS و RS امکان پایش و ارزیابی بلادرنگ خشکسالی‌ها را فراهم می‌کنند و داده‌های ارزشمندی در مورد شدت و مدت آن‌ها ارائه می‌دهند. این امر برای درک توزیع مکانی و پویایی خشکسالی‌ها، که تحت تأثیر ویژگی‌های حوضه و تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی است، ضروری است. این فناوری‌ها همچنین در مطالعات یکپارچه حوضه آبریز برای تحلیل و پیش‌بینی تعاملات آب‌های زیرزمینی و سطحی (GW-SW) نقش حیاتی دارند (Singh و همکاران، ۲۰۲۳). تلفیق داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی موجب تحلیلی اساسی در دقت مدلسازی هیدرولیک جریان شده است. این پیشرفت عمده ناشی از قابلیت‌های منحصر به فردی است که این فناوری‌ها در کنار هم ارائه می‌دهند. تصاویر ماهواره‌ای با پوشش وسیع مکانی خود امکان بررسی مناطق گسترده‌ای را فراهم می‌کنند که پیش از این به دلیل محدودیت‌های دسترسی یا هزینه‌های بالای برداشت میدانی، مورد مطالعه دقیق قرار نمی‌گرفتند. از سوی دیگر، تناوب زمانی بالای تصویربرداری ماهواره‌ای این امکان را ایجاد کرده که تغییرات پویای سیستم‌های آبی با جزئیات بی‌سابقه‌ای رصد شوند. در جدول ۲ مقایسه روش‌های هیدروانفورماتیک و روش‌های سنتی با تمرکز در حوضه کرخه ارائه شده است.

جدول ۲: مقایسه روش‌های هیدروانفورماتیک و روش‌های سنتی با تمرکز در حوضه کرخه

معیار	روش‌های هیدروانفورماتیک (GIS/RS)	روش‌های سنتی	منابع
پوشش مکانی	جامع و پیوسته (تصاویر ماهواره‌ای)	محدود و نقطه‌ای (ایستگاه‌ها)	Muthuwatta و همکاران (۲۰۱۰)
دقت و جزئیات مکانی	بالا (داده‌های دیجیتال دقیق)	محدود (نقشه‌های دستی، اندازه‌گیری میدانی)	Muthuwatta و همکاران (۲۰۱۰)
تکرارپذیری و به‌روزرسانی زمانی	بالا (پایش مستمر و خودکار)	پایین (اندازه‌گیری‌های دوره‌ای، زمان‌بر)	Ahmad و همکاران (۲۰۰۹)
زمان اجرا	کم	زیاد	میرقاسمی و همکاران (۱۴۰۲)
هزینه و نیروی انسانی	پایین (اتوماسیون و کاهش نیروی انسانی)	بالا و زمان‌بر (نیاز به نیروی انسانی زیاد)	Ahmad و همکاران (۲۰۰۹)
توانایی مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده	بالا (مدل‌های پیچیده و یکپارچه)	محدود (مدل‌های تجربی ساده‌تر)	Kamali و همکاران (۲۰۲۳)
پشتیبانی از تصمیم‌گیری	بالا (تحلیل‌های چندمعیاره و بصری‌سازی)	پایین (داده‌های خام، گزارش‌های متنی)	Kamali و همکاران (۲۰۲۳)

همانطور که در جدول ۲ ارائه شده است، روش پیشنهادی که مبتنی بر تلفیق سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی است، مزایای متعددی نسبت به روش‌های سنتی اندازه‌گیری میدانی دارد. در روش‌های سنتی، محدودیت‌های دسترسی به مناطق مختلف، هزینه‌های بالای اجرای طرح‌های میدانی (از نظر هزینه و نیروی انسانی) و خطرات ناشی از شرایط محیطی، همواره چالش‌های اساسی محسوب می‌شدند. در مقابل، روش پیشنهادی با حذف نیاز به حضور فیزیکی در محل، هم هزینه‌ها را به میزان قابل توجهی کاهش داده و هم ایمنی بیشتری را برای کارشناسان فراهم می‌آورد. از نظر زمان اجرا، روش جدید امکان دسترسی سریع به داده‌های به‌روز را فراهم می‌کند، در حالی که در روش‌های سنتی، به‌روزرسانی داده‌ها معمولاً به فاصله چند سال انجام می‌شد. توانایی مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده در روش پیشنهادی بسیار بالا است و امکان ایجاد مدل‌های پیچیده و یکپارچه را فراهم می‌کند. این

در حالی است که روش‌های سنتی از این نظر محدود هستند و عمدتاً به مدل‌های تجربی ساده‌تر متکی می‌باشند. همچنین، روش تلفیق RS و GIS پشتیبانی از تصمیم‌گیری را به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد و از طریق تحلیل‌های چندمعیاره و قابلیت‌های بصری‌سازی، به مدیران و برنامه‌ریزان کمک می‌کند. در مقابل، روش‌های سنتی عمدتاً داده‌های خام و گزارش‌های متنی ارائه می‌دهند که قدرت تحلیل و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در آن‌ها پایین است. پوشش بهتر مناطق صعب‌العبور از دیگر مزایای چشمگیر این روش است، چرا که تصاویر ماهواره‌ای بدون توجه به موانع فیزیکی، تمامی نقاط حوضه آبریز را پوشش می‌دهند. قابلیت تکرارپذیری و امکان تولید داده‌های تاریخی برای مطالعات مقایسه‌ای نیز از ویژگی‌های منحصر به فرد این روش محسوب می‌شود که در روش‌های سنتی یا وجود نداشت یا بسیار پرهزینه بود.

۶- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر اثربخشی یک چارچوب هیدروانفورماتیک تلفیقی مبتنی بر سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی را در مدلسازی هیدرولیک حوضه کرخه نشان داد. این پژوهش گامی مؤثر در جهت عملیاتی‌سازی راهکارهای هیدروانفورماتیک برای مدیریت پایدار منابع آب در ایران محسوب می‌شود. مهم‌ترین یافته‌ها عبارتند از:

- **دقت برتر مدلسازی:** تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با مدل‌های هیدرولیک به کاهش خطای پهنه‌بندی سیلاب به کمتر از ۱۳٪ و دستیابی به R^2 بالای ۰.۸۵ در پیش‌بینی دبی منجر شد.
- **کارایی عملیاتی:** روش پیشنهادی کاهش چشمگیر زمان و هزینه مطالعات میدانی را در مقایسه با روش‌های سنتی نشان داد.
- **پشتیبانی از تصمیم‌گیری:** سامانه یکپارچه توسعه‌یافته امکان شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی و تحلیل چندمعیاره را فراهم کرد.
- **جبران کمبود داده:** چارچوب پیشنهادی شکاف داده‌ای موجود را با استفاده بهینه از داده‌های ماهواره‌ای پوشش داد.
- **تأکید بر رویکرد هیبریدی:** گرچه فناوری‌های نوین مزایای محوری داشتند، اما نتایج نشان داد که ترکیب آن‌ها با داده‌های میدانی محدود و کلیدی (به عنوان مثال برای کالیبراسیون) به بهینه‌ترین سطح دقت و قابلیت اطمینان می‌انجامد.

۷- محدودیت‌های پژوهش

محدودیت‌های این تحقیق عمدتاً ناشی از چالش‌های فنی و عملیاتی در تلفیق فناوری‌های نوین با شرایط واقعی حوضه‌های آبریز بوده است. نخست، تأخیر زمانی در دریافت داده‌های ماهواره‌ای (به‌ویژه در شرایط آبریز) باعث کاهش کارایی سیستم در پیش‌بینی سیلاب‌های ناگهانی شده است (که برای این امر ترکیب سنجش‌گرهای راداری و اپتیکال می‌تواند مفید باشد). دوم، تفکیک مکانی محدود تصاویر ماهواره‌ای رایگان (مانند Sentinel-2 با دقت ۱۰ متر) برای شناسایی دقیق ویژگی‌های هیدرولیکی در رودخانه‌های باریک کافی نبوده است چون بسیاری از رودخانه‌های ایران (به‌ویژه در مناطق کوهستانی) عرضی کمتر از ۱۰ متر دارند. سوم، کمبود داده‌های میدانی با کیفیت برای اعتبارسنجی نتایج در برخی بازه‌های زمانی، عدم قطعیت مدل را افزایش داده است. چهارم، پیچیدگی محاسباتی مدل‌های تلفیقی باعث شده پردازش داده‌های حجیم ماهواره‌ای به سخت‌افزارهای پیشرفته و زمان‌بر نیاز داشته باشد. در نهایت، تفاوت در شرایط هیدروژئومورفولوژیکی حوضه‌های مختلف، تعمیم‌پذیری نتایج به سایر مناطق را با چالش مواجه کرده است. این محدودیت‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم مزایای چشمگیر فناوری‌های جدید، هنوز نیاز به توسعه روش‌های تکمیلی و بهبود زیرساخت‌های پشتیبان احساس می‌شود.

۸- پیشنهادات برای پژوهش‌های آینده

پیشنهاد می‌شود توسعه این پژوهش با تمرکز بر یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی و یادگیری عمیق برای پردازش خودکار تصاویر ماهواره‌ای، افزایش دقت مدل‌ها در شرایط حدی (مانند سیلاب‌های ناگهانی)، و طراحی سامانه‌های هشدار چندمرحله‌ای با قابلیت پیش‌بینی ۷۲ ساعته ادامه یابد. همچنین، ضروری است تا با ایجاد چارچوب‌های استاندارد ملی برای گردآوری و پردازش داده‌های ماهواره‌ای، امکان تعمیم این روش به سایر حوضه‌های آبریز پرخطر کشور فراهم شود. پژوهش‌های آتی می‌توانند با ترکیب داده‌های اجتماعی-اقتصادی در مدل‌های هیدروانفورماتیک، به سمت توسعه راهکارهای جامع‌تر برای مدیریت یکپارچه منابع آب حرکت کنند. این مسیر پژوهشی نه تنها دانش فنی را ارتقا می‌دهد، بلکه با کاهش وابستگی به روش‌های پرهزینه میدانی، گامی اساسی در جهت تحقق مدیریت پایدار منابع آب در ایران خواهد بود.

۹- فهرست منابع

۱. ابراهیمی، راضیه؛ حمزه، سعید؛ معروفی، صفر. (۱۳۹۵). مدل‌سازی سطح پوشش و رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده تلفیقی از مدل هیدرولوژیکی SRM و تصاویر ماهواره‌ای. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، (۳)، ۶۶-۷۷.
۲. اکبرپور، ابوالفضل؛ توسن، معین؛ شمشیرگران، راضیه. (۱۴۰۴). روندهای نوظهور در ادغام سنجش از دور و یادگیری ماشین در مدیریت منابع آب زیرزمینی: یک مطالعه علم‌سنجی. تحقیقات منابع آب ایران، (۱)، ۱۴۸-۱۲۷.

۳. دفتر مطالعات پایه منابع آب، (۱۴۰۰). مطالعات جامع هیدرولوژی حوضه کرخه، تهران: وزارت نیرو.
۴. دفتر مطالعات پایه منابع آب، وزارت نیرو، (۱۴۰۰). گزارش جامع مطالعات پایه حوضه آبریز کرخه، تهران: انتشارات وزارت نیرو.
۵. عزیزیان، اصغر. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور جهت کاربرد در مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۴(۲)، ۳۱۹-۳۳۱.
۶. مرکز تحقیقات آب دانشگاه شهید چمران، (۱۴۰۱). تحلیل تغییرات هیدرولوژیکی در حوضه کرخه، اهواز: انتشارات دانشگاه شهید چمران.
۷. میرقاسمی، سیدحمید؛ بانژاد، حسین؛ فریدحسینی، علیرضا. (۱۴۰۲). کاربرد سنجش از دور در مدل‌سازی هیدرولیکی و تعیین حد بستر رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه ارداک)، نشریه سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۴(۱)، ۹-۱۲.
8. Abbott, M. B. (1991). *Hydroinformatics: Information Technology and the Aquatic Environment*. Aldershot, UK/Brookfield, USA: Ashgate.
9. Ahmad, M. ud D., Islam, Md. A., Masih, I., Muthuwatta, L., Karimi, P., & Tural, H. (2009). Mapping basin-level water productivity using remote sensing and secondary data in the Karkheh River Basin, Iran. *Water International*, 34(1), 119–133. <https://doi.org/10.1080/02508060802663903>.
10. Al-Bakri, J. and Al-Jahmany, Y. (2013) Application of GIS and Remote Sensing to Groundwater Exploration in Al-Wala Basin in Jordan. *Journal of Water Resource and Protection*, 5, 962-971. doi: 10.4236/jwarp.2013.510099.
11. Al-iiii i .. , UU,, , aa laaa , hhhhhhhh , ttt aaaw,, , .. , & rrr eeee , ..))))) ee ttt e iiiii ii rrr Agricultural Water Management in Jordan. *Remote Sensing*, 15(1), 235. <https://doi.org/10.3390/rs15010235>.
12. llllll ll u, .. , & eee n, L. 2222.. cccccccg tee eeee eeee r aaaaaaaa yy rr iiaaaaa iiiiii i nnee sssssss s Wae,, 16(9), 1248. <https://doi.org/10.3390/w16091248>.
13. Bui, Q.-T., Jamet, C., Vantrepotte, V., Mériaux, X., Cauvin, A., & Mognane, M. A. (2022). Evaluation of Sentinel-2/MSI Atmospheric Correction Algorithms over Two Contrasted French Coastal Waters. *Remote Sensing*, 14(5), 1099. <https://doi.org/10.3390/rs14051099>.
14. ccccc c,, , M,, , .. , oo aaaa,, , .. , ccccc cc.. , ll eenn, .. -B., iiiii ii i, .. , rr tt nn, A., eeeee ee. V., Ciii c, .. , & aaaaa a, ..))))) SSS-Based Flood Assessment Using Hydraulic Modeling and Open-Source Data: An Example of Application. *Applied Sciences*, 15(5), 2520. <https://doi.org/10.3390/app15052520>.
15. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *Enhancing knowledge and collaboration for sustainable development through WaPOR*. <https://openknowledge.fao.org/items/e801a6c5-31cc-47a5-9622-12d56aea5cbb>.
16. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research. (2021). *Hydroinformatics application for water resources and risk management*. IAHR Publications.
17. Kamali, S., Saedi, F., & Asghari, K. (2023). Prediction of flood in Karkheh basin using data-driven methods. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4 (W1), 349–354. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-349-2023>.
18. Loucks, D. P. (2023). *Hydroinformatics: A review and future outlook*. *Cambridge Prisms: Water*, 1, e10. <https://doi.org/10.1017/wat.2023.10>.
19. Mekonnen, K., Melesse, A. M., & Woldeesenbet, T. A. (2021). Effect of Temporal Sampling Mismatches between Satellite Rainfall Estimates and Rain Gauge Observations on Modelling Extreme Rainfall in the Upper Awash Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 598(7), 126467. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126467>.
20. Muthuwatta, L. P., Ahmad, M. u. D., Bos, M. G., & Amer, S. A. (2010). Assessment of water availability and consumption in the Karkheh River Basin, Iran—Using remote sensing and geo-statistics. *Water Resources Management*, 24(2), 459–484. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9455-9>.
21. Nearing, G. S., Kratzert, F., Sampson, A. K., Pelissier, C. S., Klotz, D., Frame, J. M., Prieto, C., & Gupta, H. V. (2021). What role does hydrological science play in the age of machine learning? *Water Resources Research*, 57(3), e2020WR028091. <https://doi.org/10.1029/2020WR028091>.
22. Oweis, T., Farahani, H., Qadir, M., Anthofer, J., Siadat, H., Abbasi, F., & Bruggeman, A. (2009). Improving on-farm agricultural water productivity in the Karkheh River Basin. *International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA)*. <https://www.researchgate.net/publication/267025362>.
23. Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., Thyer, M., & Franks, S. W. (2010). Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. *Water Resources Research*, 46(5), W05521. <https://doi.org/10.1029/2009WR008328>.
24. Senthilkumar, M., Gnanasundar, D., & Arumugam, R. (2019). Identifying groundwater recharge zones using remote sensing & GIS techniques in Amaravathi aquifer system, Tamil Nadu, South India. *Sustainable Environment Research*, 29(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0014-7>.
25. Singh, V. P., Jhajharia, D., Mirabbasi, R., & Kumar, R. (Eds.). (2023). *Integrated drought management, Volume 2: Forecasting, monitoring, and managing risk* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003276548>.
26. Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*, 523, 739–757. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>.
27. Talpur, Z., Zaidi, A. Z., Ahmed, S., Mengistu, T. D., Choi, S.-J., & Chung, I.-M. (2023). Estimation of crop water productivity using GIS and remote sensing techniques. *Sustainability*, 15(14), 11154. <https://doi.org/10.3390/su151411154>.
28. Tarate, S. B., Patel, N. R., Danodia, A., Pokhariyal, S., & Parida, B. R. (2024). Geospatial technology for sustainable agricultural water management in India—A systematic review. *Geomatics*, 4(2), 91–123. <https://doi.org/10.3390/geomatics4020006>.

29. Tarpanelli, A., Brocca, L., Barbetta, S., Faruolo, M., Lacava, T., & Moramarco, T. (2019). River discharge estimation by using the altimetry-derived water surface slope. *Remote Sensing*, 11(6), 658. <https://doi.org/10.3390/rs11060658>.
30. Uysal, G. (2022). Product- and Hydro-Validation of Satellite-Based Precipitation Data Sets for a Poorly Gauged Snow-Fed Basin in Turkey. *Water*, 14(17), 2758. <https://doi.org/10.3390/w14172758>.
31. aa ,,, .. , tt a.. (..... rrrrr rrrr ed llllllllllll iiiiii ii ii hhPcccccccccccc eee p ee nnn::: : eeee aal aaamkkkkk and Its Application in the Amazon. *Water Resources Research*, 60(4), e2023WR036170. <https://doi.org/10.1029/2023WR036170>.
32. Xu, C., Han, Z., & Fu, H. (2022). Remote sensing and hydrologic-hydrodynamic modeling integrated approach for rainfall-runoff simulation in farm dam dominated basin. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 817684. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.817684>.
33. Xu, C., Yang, J., & Wang, L. (2022). Application of Remote-Sensing-Based Hydraulic Model and Hydrological Model in Flood Simulation. *Sustainability*, 14(14), 8576. <https://doi.org/10.3390/su14148576>.
34. Xue, Y., Qin, C., Wu, B., Li, D., & Fu, X. (2022). Automatic Extraction of Mountain River Surface and Width Based on Multisource High-Resolution Satellite Images. *Remote Sensing*, 14(10), 2370. <https://doi.org/10.3390/rs14102370>.
35. Zhang, H., Yan, D., Zhang, B., Fu, Z., Li, B., & Zhang, S. (2022). An Operational Atmospheric Correction Framework for Multi-Source Medium-High-Resolution Remote Sensing Data of China. *Remote Sensing*, 14(21), 5590. <https://doi.org/10.3390/rs14215590>.

