

راهبرد

ماهنامه علمی، خبری و پژوهشی مدیریت تحقیقات
سازمان آب و برق خوزستان



شماره هفدهم

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

◀ بررسی شاخص های ناهمگنی داده های اندازه گیری منحنی دبی اشل در ایستگاه های
هیدرومتری (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری عبدالخان، حوضه آبریز کرخه)

◀ تحلیل سری زمانی درجه حرارت سالانه کلانشهر اهواز و پیش دید روند آبی آن



سازمان آب و برق خوزستان

هیات تحریریه: داریوش بهارلویی، محمدجواد نصر اصفهانی

سپیده بینا

همکاران: جواد ظهیری، احمدجعفری، میترا چراغی، محمدجواد

نصر اصفهانی، زینب حدادیان، علی شهبازی، هادی علی بخشی،

کاظم حمادی، لیلا نوذریان

ارتباط با ما :

☎۰۶۱۳۳۱۵۲۱۷۹ 🌐rnd.kwpa.ir

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

Javad Zahiri^{1*}  | 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@asnruk.ac.ir
2. Department of Water Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: ajafari@asnruk.ac.ir
3. Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran. E-mail: mitra.cheraghi@asnruk.ac.ir
4. Head of Innovation and Technology Development - Khuzestan Water and Power Authority, Khuzestan, Iran. E-mail: mo.isfahani@gmail.com

▶ 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 (O), 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

* Coresponding author

(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.

Impact of DEM Resolution on Flood Inundation Mapping (Case study: Karun River)

► ABSTRACT

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.

Keywords: Digital elevation map (DEM), Flood, HEC-RAS, Threat Score

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. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: j.zahiri@asnruk.ac.ir

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

۳. گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: mitra.Cheraghi@asnruk.ac.ir

۴. رئیس گروه نوآوری و توسعه فناوری- سازمان آب و برق خوزستان، خوزستان، ایران. رایانامه: mo.isfahani@gmail.com

چکیده

یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی سیلاب، مدل رقومی ارتفاع بستر رودخانه و دشت‌های سیلابی آن است. 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 بستر رودخانه کارون و محدوده‌های اطراف آن در بازه ملائانی 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 ملائانی، 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 پهنه بندی 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 تجزیه‌وتحلیل‌های فرامنطقه‌ای مفید است. به‌طور کلی، یافته‌ها بر اهمیت استفاده از وضوح مدل رقومی متناسب با اهداف و محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی سیلاب تأکید دارند.

کلیدواژه‌ها: امتیاز تهدید، سیلاب، مدل رقومی ارتفاع، HEC-RAS.

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 (Mercuryeva 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 MIKE11، MIKE2D، CCHE2D، MIKE21 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، باین‌حال 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 صورت‌گرفته 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 بزرگ‌مقیاس 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. (Zeleňáková 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 (Ogania 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 پهنه بندی 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 غیرماندگار 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.

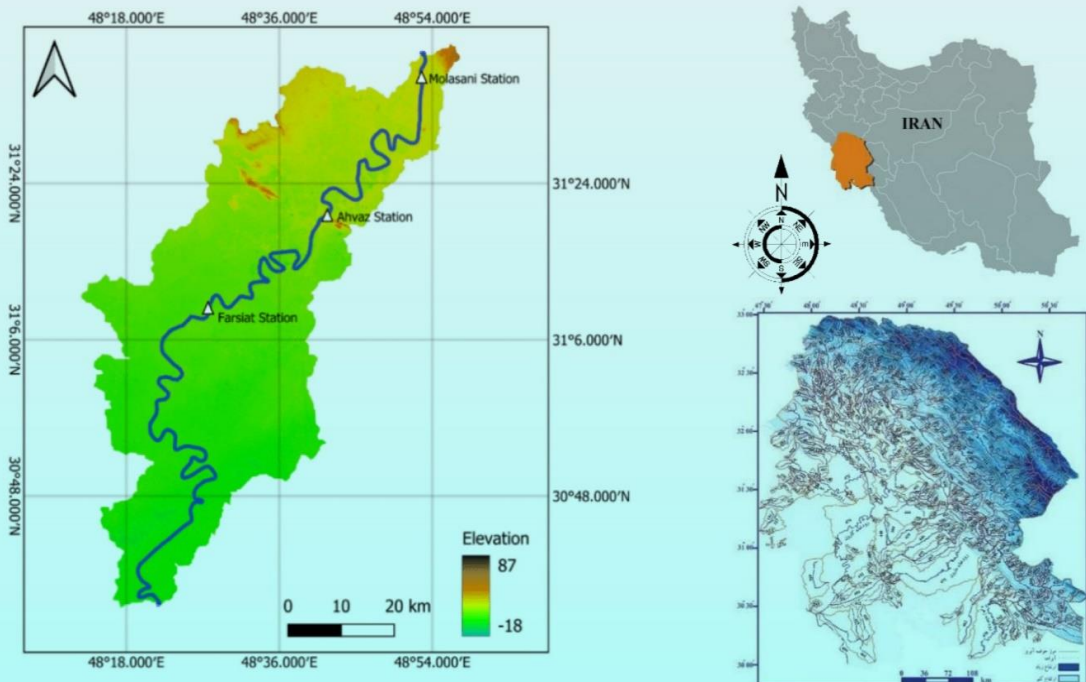
¹ River Derwent

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 گتوند، به سمت جنوب جریان می‌یابد. در شوشتر، توسط بند میزان، رودخانه به دو شاخه شطیپ یا دجیل و گرگر تقسیم می‌شود. در بند قیر دو شاخه مذکور به علاوه 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 ملاثانی و فارسیات به عنوان شرایط مرزی در بالادست و پایین‌دست در نظر گرفته شدند و ایستگاه اهواز به عنوان ایستگاه شاهد جهت صحت‌سنجی 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	ملاثانی	هیدروگراف	۲۹۸۶۴۹	۳۴۹۶۲۵۵	۲۵
۲	اهواز	هیدروگراف و اشل	۲۷۹۵۸۲	۳۴۶۸۸۶۳	۲۰
۳	فارسیات	اشل	۲۶۲۸۹۴	۳۴۵۱۵۵۲	۱۱



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

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 ملاثانی، اهواز و فارسیات است. برای مدل‌سازی در محیط HEC-RAS، در دسترس بودن نقشه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه لازم است. بدین منظور نقشه ارتفاعی رودخانه کارون از داده‌های نقشه‌برداری 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 برداشت‌شده توسط سازمان آب و برق خوزستان در قسمت‌های مختلف رودخانه کارون مورد استفاده قرار گرفتند. این مقاطع شامل نقاط ارتفاعی از بازه ایستگاه آب‌سنجی ملاثانی تا فارسیات هستند که سواحل و بستر رودخانه را در برمی‌گیرند. در این مطالعه جهت بررسی تأثیر کیفیت مدل‌های رقمی 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.

مدل‌سازی جریان با استفاده از مدل هیدرودینامیکی دوبعدی HEC-RAS

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی جریان در رودخانه کارون از مدل دوبعدی HEC-RAS که توسط گروه مهندسی مشاور ارتش آمریکا توسعه یافته است، استفاده گردید. در سال‌های اخیر شبیه‌سازی دوبعدی جریان نیز به مدل HEC-RAS اضافه شد که قابلیت‌های فراوانی را در زمینه مدل‌سازی جریان در اختیار مهندسان هیدرولیک قرار داده و از انعطاف‌پذیری بالایی برخوردار است. مدل دوبعدی HEC-RAS جریان را به صورت ناپایدار شبیه‌سازی 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 می‌باشند:

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

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

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

رابطه (۱) معادله پیوستگی و روابط (۲) و (۳) معادله اندازه حرکت را نشان می‌دهند. در این روابط H تراز سطح آب، h عمق جریان، t زمان، u و v مؤلفه‌های 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 می‌باشد.

پس از تهیه نقشه‌های رقمی منطقه مورد مطالعه، عملیات مدل‌سازی در نرم‌افزار HEC-RAS انجام گردید. بدین منظور ابتدا نقشه‌های مورد نظر به محیط RAS Mapper فراخوانی شده سپس عملیات شبکه‌بندی، 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 محدوده‌های مختلف بین ۰/۰۲۶ تا ۰/۰۵ در نظر گرفته شد (ظهیری و آشناور، ۱۳۹۸). پس از این مراحل می‌توان اقدام به شبیه‌سازی شرایط هیدرولیکی جریان و تهیه نقشه پهنه‌بندی سیلاب به‌ازای نقشه‌های مختلف توپوگرافی نمود. نمونه‌ای از نقشه توپوگرافی با رزولوشن ۳۰ متر و مش‌بندی ایجاد شده در محیط HEC-RAS در شکل ۲ ارائه شده است.

پیش‌بینی‌های کاملاً درست نمره یک دریافت می‌کنند (زیرا $b = c = 0$ ، یا به طور دیگر، $F = 0$ و $H = 1$). پیش‌بینی‌های تصادفی 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؛ به طوری که 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، درحالی که 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 آنجا که 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 پژوهش

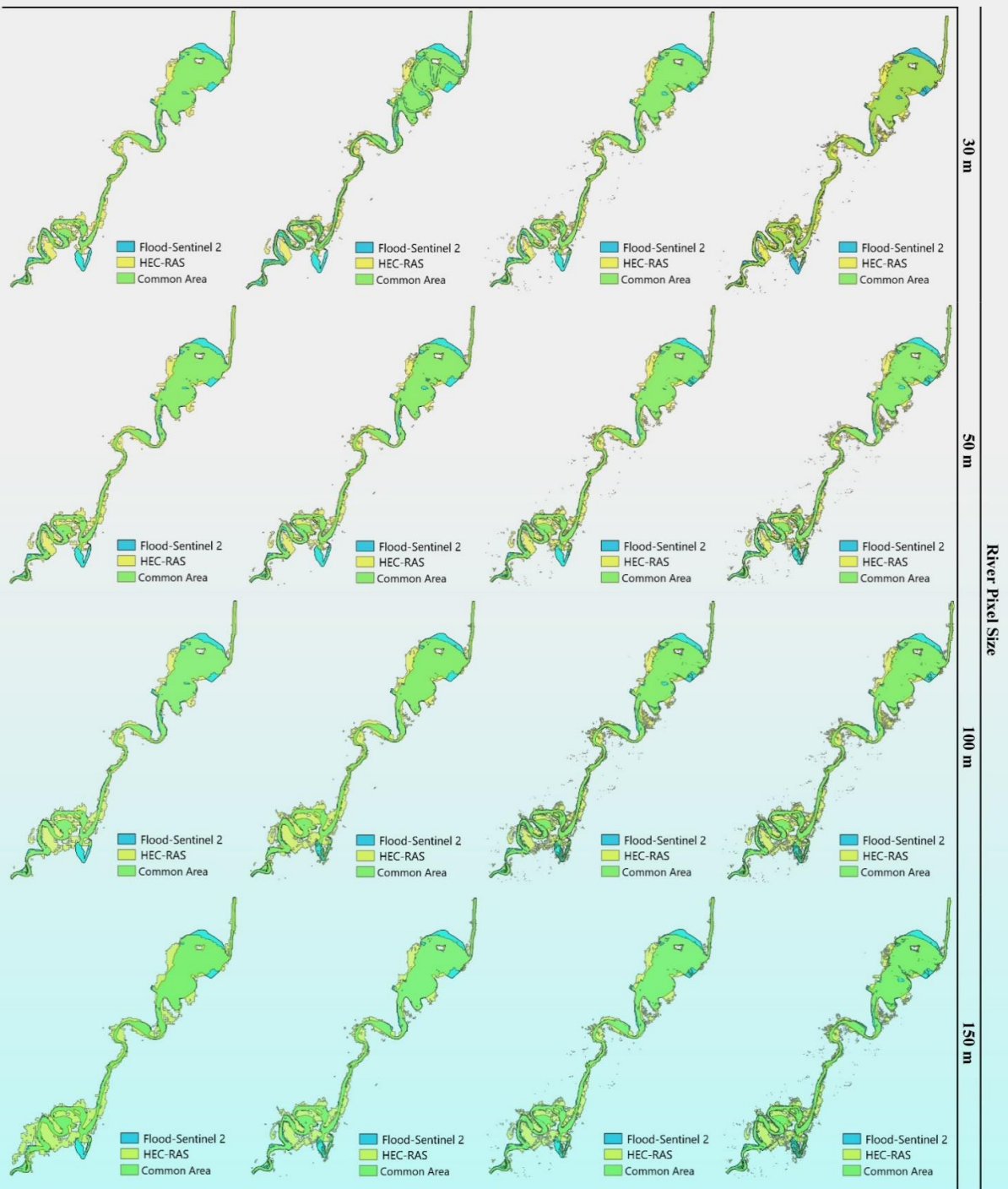
در این تحقیق از ۴ اندازه مختلف برای پیکسل‌های رودخانه و دشت‌های سیلابی استفاده گردید که در مجموع ۱۶ نقشه توپوگرافی متفاوت در محیط QGIS تهیه شد. پس از تهیه نقشه‌های توپوگرافی رودخانه و دشت‌های سیلابی و ترکیب کردن آن‌ها از مدل دو بعدی HEC-RAS جهت شبیه‌سازی دو بعدی سیلاب استفاده شد. بر اساس سناریوهای مختلف، 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 دوعبدهی HEC-RAS در جدول ۲ ارائه شده است.

Foodplain Pixel Size			
150 m	100 m	50 m	30 m

¹ Gilbert Skill Score

² Odds Ratio



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

جدول ۲. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته بر روی سناریوهای مختلف

River pixel size (m)	Floodplain pixel size (m)	PC	TS	θ	Bias	FAR	H	F	EDI	HSS	PSS	GSS	Q
۳۰	۳۰	۰/۷۹	۰/۶۷	۱۷/۶۹	۱/۱۳	۰/۲۴	۰/۸۶	۰/۲۵	۰/۸۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۴۳	۰/۸۹

۳۰	۵۰	۰/۷۹	۰/۶۷	۱۷/۶۰	۱/۱۳	۰/۲۴	۰/۱۸۶	۰/۲۶	۰/۱۸۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۴۳	۰/۸۹
۳۰	۱۰۰	۰/۷۹	۰/۶۷	۱۷/۵۵	۱/۱۴	۰/۲۴	۰/۱۸۶	۰/۲۶	۰/۱۸۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۴۳	۰/۸۹
۳۰	۱۵۰	۰/۷۹	۰/۶۷	۱۷/۵۱	۱/۱۴	۰/۲۴	۰/۱۸۶	۰/۲۶	۰/۱۸۰	۰/۶۰	۰/۶۰	۰/۴۳	۰/۸۹
۵۰	۳۰	۰/۷۹	۰/۶۶	۱۶/۳۰	۱/۱۵	۰/۲۶	۰/۱۸۶	۰/۲۷	۰/۱۷۹	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۴۱	۰/۸۸
۵۰	۵۰	۰/۷۸	۰/۶۶	۱۵/۸۵	۱/۱۶	۰/۲۶	۰/۱۸۶	۰/۲۸	۰/۱۷۹	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۸۸
۵۰	۱۰۰	۰/۷۸	۰/۶۶	۱۵/۸۸	۱/۱۶	۰/۲۶	۰/۱۸۶	۰/۲۸	۰/۱۷۹	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۸۸
۵۰	۱۵۰	۰/۷۸	۰/۶۶	۱۵/۵۶	۱/۱۷	۰/۲۷	۰/۱۸۶	۰/۲۹	۰/۱۷۹	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۴۰	۰/۸۷
۱۰۰	۳۰	۰/۷۶	۰/۶۴	۱۴/۱۹	۱/۲۴	۰/۲۹	۰/۱۸۸	۰/۳۳	۰/۱۷۹	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۳۷	۰/۸۶
۱۰۰	۵۰	۰/۷۶	۰/۶۴	۱۳/۵۷	۱/۲۶	۰/۳۰	۰/۱۸۸	۰/۳۵	۰/۱۷۸	۰/۵۲	۰/۵۳	۰/۳۵	۰/۸۶
۱۰۰	۱۰۰	۰/۷۰	۰/۵۹	۹/۵	۱/۲۸	۰/۳۶	۰/۱۸۸	۰/۴۶	۰/۱۷۳	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۲۷	۰/۸۰
۱۰۰	۱۵۰	۰/۶۹	۰/۵۸	۸/۵۲	۱/۴۰	۰/۳۷	۰/۱۸۹	۰/۴۸	۰/۱۷۲	۰/۴۰	۰/۴۱	۰/۲۵	۰/۷۹
۱۵۰	۳۰	۰/۷۶	۰/۶۴	۱۴/۱۴	۱/۲۷	۰/۳۰	۰/۱۸۸	۰/۳۵	۰/۱۷۹	۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۳۶	۰/۸۶
۱۵۰	۵۰	۰/۷۳	۰/۶۱	۱۱/۴۸	۱/۳۴	۰/۳۴	۰/۱۸۹	۰/۴۱	۰/۱۷۷	۰/۴۷	۰/۴۸	۰/۳۱	۰/۸۴
۱۵۰	۱۰۰	۰/۷۳	۰/۶۲	۱۱/۹۴	۱/۳۴	۰/۳۳	۰/۱۸۹	۰/۴۱	۰/۱۷۷	۰/۴۷	۰/۴۸	۰/۳۱	۰/۸۴
۱۵۰	۱۵۰	۰/۶۶	۰/۵۶	۷/۳	۱/۵۰	۰/۴۰	۰/۱۹۰	۰/۵۵	۰/۱۶۹	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۲۰	۰/۷۵

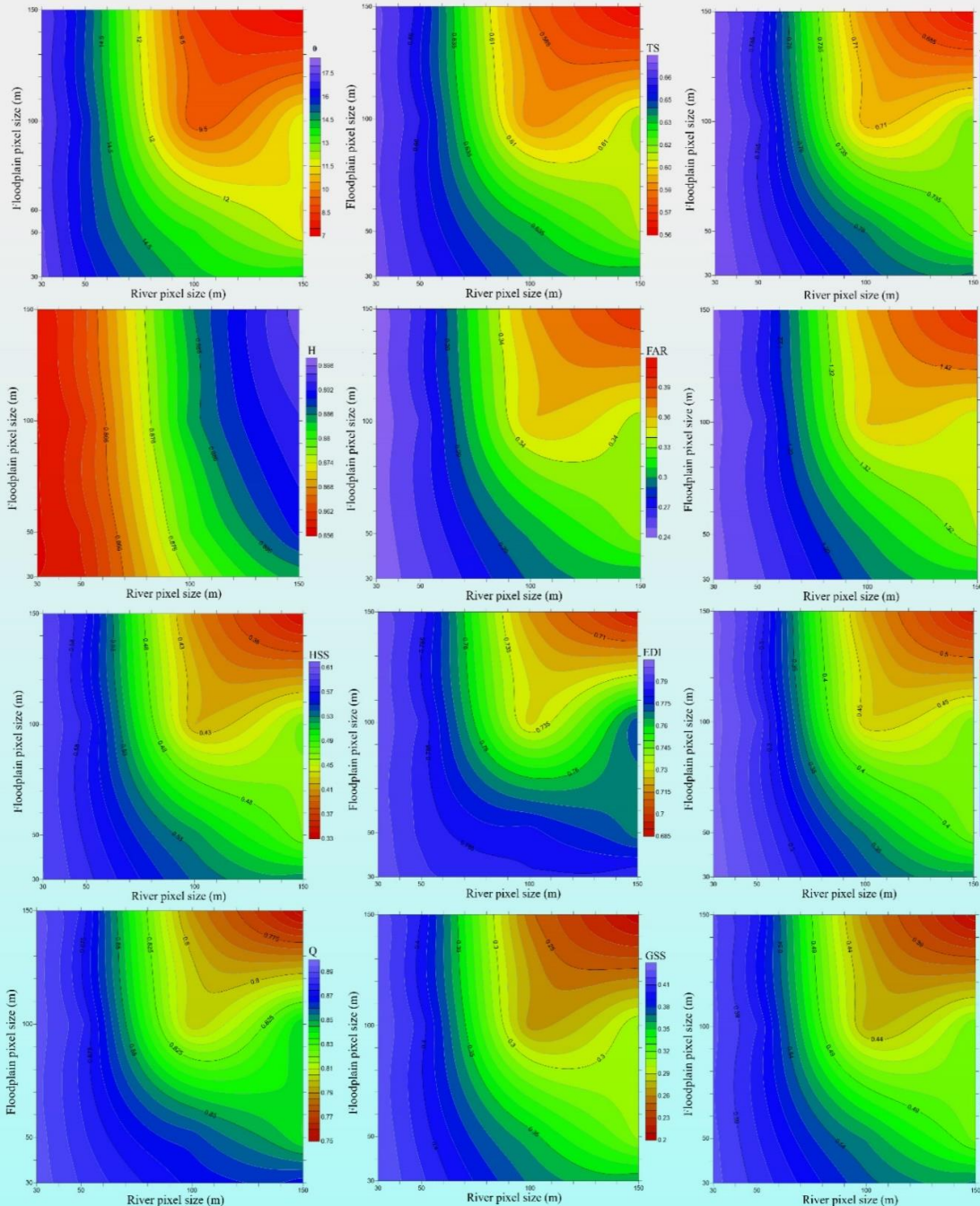
نتایج تحلیل عملکرد ۱۶ سناریو با مدل HEC-RAS با وضوح پیکسلی مختلف برای رودخانه و دشت سیلابی با تمرکز بر معیار نسبت صحیح نشان داد که مدل‌هایی با اندازه پیکسل کوچک‌تر رودخانه (۳۰ و ۵۰) به طور مداوم بالاترین PC را به دست آورده‌اند. با افزایش اندازه پیکسل رودخانه به ۱۰۰ متر، کاهش قابل توجهی در PC مشاهده می‌شود. 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) به طور 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 (0) 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 ۳۰×۳۰ یا ۳۰×۵۰)

مقادیر بایاس بین ۱/۱۳-۱/۱۷ را حفظ می‌کنند، در حالی که اندازه‌های بزرگتر (مثلاً ۱۰۰×۱۰۰ یا ۱۵۰×۱۵۰) مقادیر بایاس تا ۱/۵۰ را نشان می‌دهند. علاوه بر این، با افزایش اندازه پیکسل رودخانه، افزایش قابل‌توجهی 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 ۱۰۰×۱۰۰ یا ۱۵۰×۱۵۰) 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 (۳۰×۳۰ یا ۵۰×۳۰) 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 رودخانه و دشت سیلابی (۳۰×۳۰ یا ۵۰×۳۰) 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 ۱۰۰×۱۰۰ نرخ هشدار اشتباه به ۰/۴۶ تا ۰/۴۸ افزایش می‌یابد و در بزرگ‌ترین اندازه‌ها (مانند ۱۵۰×۱۵۰) 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 بالاتر، مقادیر HSS و PSS به طور مداوم حدود ۰/۶ باقی می‌ماند که نشان‌دهنده عملکرد پایدار و قوی مدل در پیش‌بینی رویدادهای سیلابی است. این موضوع نشان می‌دهد که اندازه‌های کوچک‌تر پیکسل به طور مؤثری دینامیک سیلاب را ثبت کرده و تغییرات کمی را در پیکربندی‌های مختلف به همراه دارند. با افزایش اندازه پیکسل هر دو معیار HSS و PSS به طور قابل توجهی کاهش می‌یابند که نشان‌دهنده کاهش دقت و مهارت پیش‌بینی است. تحلیل نمره مهارت گیلبرت (GSS) نشان می‌دهد که اندازه پیکسل‌های کوچک‌تر رودخانه و دشت سیلابی به مقادیر GSS نسبتاً بالا و ثابتی بین ۰/۴ تا ۰/۴۳ منجر می‌شود که بیانگر عملکرد پایدار و دقیق در پیش‌بینی سیلاب است. این وضوح بالاتر به مدل کمک می‌کند تا وقایع مثبت سیلاب را بهتر تشخیص دهد و هشدارهای اشتباه و وقایع ازدست‌رفته را به حداقل برساند، و بدین ترتیب عملکرد مدل را با کمترین تغییرات در پیکربندی‌ها تضمین می‌کند. در مقابل، با افزایش اندازه پیکسل‌ها مقادیر GSS به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که کاهش مهارت پیش‌بینی را نشان می‌دهد. تحلیل امتیاز مهارت نسبت شانس (ORSS) نشان می‌دهد که اندازه‌های کوچک‌تر پیکسل‌های رودخانه و دشت سیلاب به طور مداوم مقادیر بالای ORSS را دارند که بین ۰/۸۷۹ تا ۰/۸۹۳ متغیر است. این نشان‌دهنده ارتباط قوی بین رویدادهای پیش‌بینی شده و مشاهدات سیلاب است و عملکرد خوبی را در شناسایی صحیح رویدادهای مثبت واقعی بازتاب می‌دهد. عملکرد مدل در اندازه‌های پیکسل کوچک پایدار است و نشان می‌دهد که رزولوشن‌های دقیق‌تر توانایی مدل را در پیش‌بینی دقیق رویدادهای سیلاب افزایش می‌دهند. با افزایش اندازه پیکسل‌ها مقادیر ORSS کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش اندک در مهارت پیش‌بینی مدل است.

جهت بررسی دقیق‌تر تأثیر اندازه پیکسل‌های رودخانه و دشت‌های سیلابی بر روی شاخص‌های مورد استفاده در این مطالعه از نقشه‌های کانتور استفاده شده است. در شکل ۶ تغییرات شاخص‌های آماری مختلف براساس اندازه پیکسل‌های رودخانه و دشت‌های سیلابی رودخانه کارون برای سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرودینامیکی دو بعدی HEC-RAS به‌ازای سیلاب سال ۱۳۹۸ به صورت نقشه‌های کانتور ارائه شده است.



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

نقشه‌های کانتور ارائه شده در شکل ۶ تأثیر اندازه‌های مختلف پیکسل‌های رودخانه و دشت سیلابی را بر معیارهای ارزیابی مدل‌سازی سیلاب نشان می‌دهند. در تمامی نقشه‌های کانتور، اندازه پیکسل دشت‌های سیلابی تأثیر ملموسی بر روی شاخص‌های مورد استفاده به ازای پیکسل رودخانه ۳۰ متر نداشته است. با افزایش اندازه پیکسل رودخانه، تأثیر 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 تأثیرگذار 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 پهنه بندی 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 قابل‌توجهی 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 (100×100) یا 150×150) کاهش قابل‌توجهی 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 0.35 می‌رسد) و افزایش مقادیر Bias (تا $1/38$) 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 قابل‌اطمینانی 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 (50×50 یا 50×100 متر) می‌توانند دقت معقولی را با کاهش محاسبات فراهم کنند. این تعادل به‌ویژه برای مطالعات در مقیاس منطقه‌ای یا تجزیه‌وتحلیل‌های فرامنطقه‌ای مفید است.

ضریب تهدید محاسبه شده توسط Horritt & Bates (2001) که از مدل LISFLOOD-FP جهت شبیه‌سازی پهنه سیلاب با رزولوشن‌های مختلف استفاده نمودند، به‌ازای رزولوشن ۵۰ متر برابر با $72/2$ درصد و به‌ازای رزولوشن ۲۵۰ متر برابر با $61/2$ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده 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 به‌ازای رزولوشن ۳۰ متری به ۵۶ درصد به‌ازای رزولوشن ۱۵۰ متری رسیده است که نشان‌دهنده کاهش ۱۱ درصدی به‌ازای کاهش ۵ برابری رزولوشن نقشه توپوگرافی بوده است. مقایسه نتایج مطالعه حاضر با تحقیق صورت‌گرفته توسط Cook & Merwade (2009) حاکی از مطابقت نتایج دو مطالعه است. در مطالعه ذکر شده از نقشه‌های با رزولوشن ۳۰ متر و ۱۰ متر جهت پهنه‌بندی 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 پیکسل‌ها داشته است. در مطالعه حاضر ضریب تهدید در رزولوشن ۳۰ متر برابر با ۶۷ درصد و

¹ Strouds Creek

برای رزولوشن ۱۰۰ متر، ۵۹ درصد محاسبه گردید که نشان می‌دهد با افزایش اندازه پیکسل‌ها، 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 به‌ازای رزولوشن ۵۰ متری حدود ۰/۶ محاسبه گردید که نسبت به تحقیق حاضر کمتر محاسبه شده است. عوامل مختلفی می‌تواند در این زمینه موثر باشد که از آن جمله می‌توان به تفاوت در شرایط توپوگرافی دو منطقه مورد مطالعه اشاره نمود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه تأثیر اندازه‌های پیکسل رودخانه و دشت‌های سیلابی بر روی شبیه‌سازی پهنه سیلاب توسط مدل دوبعدی 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 به‌ویژه برای اندازه‌های پیکسل دشت سیلابی ۱۰۰ و ۱۵۰ متر کاهش می‌یابد. امتیازهای مهارتی هایدک، پیرس و گیلبرت با افزایش اندازه پیکسل رودخانه کاهش می‌یابند. امتیاز مهارتی گیلبرت به‌ویژه برای پیکسل‌های بزرگ‌تر رودخانه کاهش شدیدی نشان می‌دهد، که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر پیش‌بینی سیل در وضوح‌های پایین‌تر است. با افزایش اندازه پیکسل رودخانه، بایاس افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده تمایل به پیش‌بینی بیش از حد است. نسبت هشدار اشتباه نیز روند افزایشی مشابهی را نشان می‌دهد. براساس بررسی اثر اصلی اندازه پیکسل دشت سیلابی، نسبت صحیح و امتیاز تهدید با افزایش اندازه پیکسل دشت سیلابی به‌ویژه برای اندازه‌های پیکسل رودخانه‌ای ۱۰۰ و ۱۵۰ متر کاهش می‌یابند. کاهش در امتیاز تهدید نشان می‌دهد که وضوح پایین‌تر دشت سیلابی توانایی مدل در پیش‌بینی دقیق سیل را کاهش می‌دهد. همه امتیازهای مهارتی با افزایش اندازه پیکسل دشت سیلابی به‌ویژه در سناریوهای پیکسل رودخانه‌ای ۱۰۰ و ۱۵۰ متر کاهش می‌یابند. با افزایش وضوح دشت سیلابی، بایاس افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده تمایل بیشتر به پیش‌بینی بیش از حد در وضوح‌های پایین‌تر دشت سیلابی است. بررسی تأثیرات متقابل نشان می‌دهد که ترکیب وضوح پایین برای هر دو پیکسل رودخانه و دشت سیلابی (مثلاً ۱۰۰ × ۱۵۰ متر) منجر به پایین‌ترین امتیازهای مهارتی می‌شود ($HSS = 0.34$, $GSS = 0.20$ برای 150×150 متر) که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر مدل است. بایاس و نسبت هشدار اشتباه برای ترکیبات اندازه پیکسل‌های بزرگ رودخانه و دشت سیلابی (مثلاً 150×150 متر) بالاترین هستند، که منعکس‌کننده روند پیش‌بینی بیش از حد است. مقادیر EDI برای وضوح پایین دشت سیلابی و اندازه‌های بزرگ‌تر پیکسل رودخانه بالاترین هستند، که نشان‌دهنده چالش‌های بیشتر در پیش‌بینی است. بر اساس اثرات اصلی هر دو اندازه پیکسل رودخانه و دشت سیلابی بر شاخص‌ها تأثیر دارند، اما تأثیر اندازه پیکسل دشت سیلابی برجسته‌تر است. اندازه‌های پیکسل بزرگ‌تر منجر به کاهش دقت و امتیازهای مهارتی، افزایش بایاس و نسبت هشدار اشتباه می‌شوند. بر اساس اثرات متقابل نیز ترکیب وضوح پایین برای هر دو پیکسل رودخانه و دشت سیلابی منجر به بیشترین کاهش عملکرد در تمام شاخص‌ها می‌شود. به‌طور کلی، یافته‌ها بر اهمیت استفاده از وضوح مدل رقومی متناسب با اهداف و محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی سیلاب تأکید دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان بابت تأمین هزینه‌های طرح پژوهشی کاربردی با کد قرارداد ۱/۴۱۱/۱۰۷۸ کمال تشکر را دارند.

فهرست منابع

ظهیری، جواد و آشناور، مهران (۱۳۹۸). مدل‌سازی دوبعدی هیدرولیک جریان در رودخانه کارون. *نشریه نشریه علوم آب و خاک*، ۲۳ (۴)، ۳۳۱-۳۴۴.

ظهیری، جواد و آشناور، مهران (۱۴۰۰). کارایی HEC-RAS و GIS در شبیه‌سازی یک‌بعدی 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., & Lektuaers, 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.ENVSFT.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>.

بررسی شاخص های ناهمگنی داده های اندازه گیری منحنی دبی اشل در ایستگاه های هیدرومتری (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری عبدالخان، حوضه آبریز کرخه)

زینب حدادیان*^۱، علی شهبازی^۲، هادی علی بخشی^۳

۱- سازمان آب و برق خوزستان

۲- سازمان آب و برق خوزستان

۳- شرکت بهره برداری از شبکه های آبیاری کرخه و شاوور

ایمیل نویسنده مسئول: zcinab.hadadian@yahoo.com

چکیده فارسی

یکی از وظایف اصلی هیدرولوژیست ها ترسیم بهترین منحنی و استخراج دقیقترین رابطه بین دبی و اشل است که کاربردهای متعددی در مسائل عملی هیدرولوژیکی دارد. کیفیت منحنی به میزان قابل توجهی به دقت اندازه گیری های هیدرومتری و دقت در تعیین رابطه بین دبی و اشل (سطح آب) بستگی دارد. هدف این مقاله بررسی شاخصهای ناهمگنی داده های هیدرومتری اندازه گیری شده و شبیه سازی شده منحنی دبی اشل با استفاده از مدل هیدرودینامیک MIKE در ایستگاه هیدرومتری عبدالخان در حوضه آبریز کرخه می باشد. تجزیه و تحلیل بر روی داده های هیدرومتری اندازه گیری شده با طول آمار ۳۰ ساله انجام شده است. مدل رگرسیون غیرخطی برای برازش منحنی دبی اشل و استخراج رابطه مورد استفاده قرار گرفته است. از شاخصهای ناش- ساتکیلف، ناش- ساتکیلف نسبی و میانگین خطای نسبی برازش برای بررسی همگنی داده ها استفاده شده است. بر اساس نتایج مشاهده شد که ضرایب مذکور برای داده های هیدرومتری اندازه گیری به ترتیب برابر ۰,۵۵۱ و ۰,۹۴۸ و ۰,۱۶۸ و برای منحنی شبیه سازی شده با مدل هیدرودینامیک به ترتیب برابر ۰,۹۹۳ و ۰,۹۹۱ و ۰,۰۲۲ بدست آمد که نشان دهنده عملکرد رضایت بخش مدل رگرسیون غیرخطی و تناسب خوب منحنی دبی اشل با مجموعه داده است.

کلید واژه ها: هیدرولوژی، منحنی دبی اشل، مجموعه داده های ناهمگن، اندازه گیری های هیدرومتری، مدل هیدرودینامیک، شاخص نش ساتکیلف.

مقدمه

برآورد دقیق ترین منحنی دبی اشل ممکن یکی از اصلی ترین و دشوارترین کارهای پیش رو هیدرولوژی معاصر است. این چالش برای پیش بینی شرایط و رویدادهای سیلابی، مدیریت منابع آب، طراحی سازه های هیدرولیکی که در آنها مقادیر حدی جریان به عنوان استاندارد طراحی در نظر گرفته می شوند (Ozga-Zieliński et al, 2014) و همچنین مناطق در معرض خطر سیل بر اساس حداکثر جریان و اشل های مربوطه اش (Radczuk et al, 2001) اهمیت اساسی دارد. منحنی دبی اشل همچنین مبنایی برای تعیین معیارهای هیدرولوژیکی است (Eagelson 1978) مانند جریان متوسط و شدید فصلی و سری های زمانی برای تخمین پاسخ حوضه آبریز در شرایط کم آبی و پرابی است. همچنین منحنی دبی اشل که به درستی ترسیم شده باشد نیز می تواند مرجعی برای تخمین حداکثر جریان های سالیانه باشد (Szulczewski et al, 2018). مشکل ارزیابی دقیق منحنی دبی اشل قبلاً در تحقیقات و نشریات متعددی مطرح شده است. عدم قطعیت منحنی های دبی اشل از دو منبع نشأت می گیرد (Westerberg, McMillan 2015). اول اندازه گیری های هیدرومتری هستند که منحنی دبی اشل بر اساس آنها ترسیم می گردد. دقت اندازه گیری ها برای تخمین منحنی دبی اشل خوب بسیار مهم است و خطاها در داده های جریان رودخانه قابل چشم پوشی نیستند (Di Baldassarre and Montanari 2009). منبع دوم که معمولاً مهمتر است صحت و دقت رابطه بین دبی و اشل تعیین شده است. خطاهای ناشی از هر دوی این منابع با روش های مختلف در مطالعات متعدد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند. لانگ و همکاران (۲۰۱۰) استفاده از روش های استنباط بیزی را در ترکیب با فرآیند مونت کارلو زنجیره مارکوف (MCMC) برای تجزیه و تحلیل مشکل پیشنهاد می کند. در این مطالعه به عنوان پیش زمینه تحلیل پیشرفته، اندازه گیری های تاریخی برای شناسایی خطاهای ناشی از اندازه گیری های نادرست و تغییرات در مقطع عرضی کانالها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. تجزیه و تحلیل های پیشرفته بر روی یک مجموعه داده کاهش یافته مناسب انجام شد. نتیجه گیری پس از مطالعه توسط لانگ و همکاران (۲۰۱۰) نشان داد که عدم تجزیه و تحلیل خطاها در منحنی های دبی اشل می تواند منجر به عدم دقت در تخمین منحنی ها شود. برون یابی داده ها ذاتاً با عدم دقت همراه است. Reitan and Petersen-Overleir (۲۰۰۹) با استفاده از روش های مشابه، تخمین منحنی قطعه ای را پیشنهاد می کنند که دقت بهتری را برای رژیم های جریانی که به ندرت اندازه گیری می شوند را ارائه می کند. در تفسیر منحنی دبی اشل، به ویژه در مورد تخمین خطر سیل، باید خطاهای احتمالی تخمین در نظر گرفته شود (Singh and Strupczewski 2002; Haque et al, 2014). برازش مناسب منحنی های دبی اشل را می توان با شاخص های مختلفی آنالیز کرد. مقایسه یازده شاخص در مقاله ای توسط Krause و همکاران (۲۰۰۵). نویسندگان نشان می دهند که شاخص های برازش مناسب که اغلب به کار می روند ممکن است بهترین نتایج را نداشته باشند، و حتی مقادیر بالای فیت لزوماً به معنای منحنی مناسب نیست.

منحنی دبی-اشل یک تابع غیرخطی به شکل $H = f(Q)$ است که رابطه بین اشل H و دبی Q را نشان می دهد. این منحنی بر اساس اندازه گیری های هیدرومتری ترسیم شده است که به دلیل سطح دقت، می تواند یکی از منابع عدم قطعیت آن نیز باشد. (Domeneghetti et al, 2012). منحنی دبی اشل را می توان با استفاده از فرمول ها و روش های مختلف رسم و توصیف کرد. فرمول های رایج شامل فرمول های شزی و مانینگ هستند که میانگین سرعت جریان آب را در یک مقطع با تنش مماسی در محیط خیس شده مرتبط می کنند (Strupczewski 1996; Fenton and Keller 2001). این فرمول ها در مورد جریان یکنواخت در یک کانال باز به خوبی کار می کنند. مطالعه ای توسط لئونارد و همکاران. (۲۰۰۰) نشان داد که چنین رویکردی را می توان با موفقیت در مورد رودخانه هایی با مقاطع متغیر به کار برد. با این حال، استفاده مستقیم از فرمول شزی و مانینگ به دلیل تعداد پارامترها می تواند خسته کننده. علاوه بر این، برخی از متغیرها به طور جداگانه برای قسمت های کانال آب و سیلاب دشت و برخی دیگر به صورت توصیفی تعیین می شوند (Szkutnicki et al, 2007). تفسیر نادرست هر یک از این پارامترها می تواند منجر به ارزیابی اشتباه مقدار جریان شود.

رابطه جهانی برای منحنی دبی اشل، رابطه هارلاچر (Byczkowski 1999) است که اشل آب را مستقیماً با حجم جریان عبوری از مقطع داده شده مرتبط می کند. علاوه بر این، رابطه هارلاچر رابطه ای مخالف و به شکل $Q = f(H)$ را توصیف می کند، که محاسبات و تفسیر نتایج را ساده می کند. این فرمول به شکل رابطه (۱) بیان می شود:

$$Q = \alpha(H - B)^n \quad (1)$$

که α و n پارامتر هستند و B حالت جریان صفر است (Szkutnicki et al, 2007). ثابت B را می توان از سطح مقطع پایین یا نیمرخ طولی جریان آب یا با روش های تحلیلی گرافیکی و گرافیکی (Dębski 1955) تعیین کرد (Byczkowski 1999). با این حال، در عمل اغلب فرض می شود که $B = 0$. این فرض، معادله منحنی دبی اشل به شکل رابطه (۲) است:

$$Q = a(H)^b$$

(۲)

که در آن a و b پارامترها هستند. در مطالعات (Dębski 1955, Szkutnicki et al, 2007) تعیین پارامترهای a و b را از طریق خطی سازی معادله بالا با استفاده از مدل لگاریتمی پیشنهاد می‌شود. منحنی دبی اشل به شکل مستقیم بر اساس پارامترهای تعیین شده تعیین می‌شود که با این روش، تفسیر آسانی دارد و شکل آن به طور منحصربه‌فردی با شکل پروفیل کانال توصیف می‌شود (Ozga-Zieliński et al, 2014). با این حال، منحنی لگاریتمی به دلیل پراکندگی گسترده داده‌ها، دقت لازم را ارائه نمی‌دهد. مقایسه روش لگاریتمی تعیین منحنی دبی اشل با روش‌های تاریخی مبتنی بر برازش چندجمله‌ای درجه دوم و مکعبی داده‌ها توسط Muttil و Sivapragasam (۲۰۰۵) ارائه شده است. مطالعه آنها نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده با روش‌های مرسوم را می‌توان با استفاده از رویکردهای جایگزین برای مشکلی که پیشنهاد می‌کنند، بهبود بخشید. Muttil و Sivapragasam (۲۰۰۵) از روش‌های SVM (ماشین بردار پشتیبانی) و ANN (شبکه عصبی مصنوعی) برای تعیین رابطه دبی اشل را استفاده کردند. با این حال، روش آنها، با توجه به پیچیدگی‌ش، هنوز به سختی کاربرد عملیاتی دارد. روش جایگزین دیگری برای تخمین منحنی دبی اشل توسط Dottori و همکاران ارائه شده است. (۲۰۰۹). این روش بر اساس یک معادله دیفرانسیل سهموی است که کاهش سطح آب در کانال را به سرعت محلی و همرفتی در جریان مربوط می‌کند. روش پیشنهادی نتایج بسیار خوبی می‌دهد و امکان برون یابی منحنی را در مواردی که عدم اندازه گیری در ناحیه دبی بالا وجود دارد، می‌دهد. تمام مطالعات ذکر شده در بالا بر روی داده‌های هیدرومتری جمع آوری شده در طول سری اندازه گیری چند ساله انجام شد. در بیشتر موارد، هیچ اطلاعاتی مبنی بر اینکه آیا داده‌ها قبل از تجزیه و تحلیل به هیچ وجه تغییر کرده‌اند یا خیر وجود ندارد. بنابراین، می‌توان فرض کرد که آنها مجموعه‌های همگن را تشکیل نمی‌دهند. ناهمگونی داده‌های اندازه گیری می‌تواند دلایل متعددی داشته باشد. این می‌تواند ناشی از تغییر مکان اندازه گیری، همانطور که در بالا توضیح داده شد، باشد، اما همچنین به عنوان مثال، از تغییر در روش جمع آوری داده‌ها، حرکت گیج آب به مکان دیگر، تغییر جهت قائم ۰ گیج آب یا سایر عوامل انسانی و طبیعی (Ozga-Zielińska and Brzeziński 1994). مشکل ناهمگونی نیز توسط Jakubowski و Szulczewski (۲۰۱۸) مورد توجه قرار گرفت. این نویسندگان نشان می‌دهند که تحلیل دقیق‌تری از مجموعه داده‌ها را می‌توان با فرض پیشینی ناهمگونی آنها و استفاده از ترکیبی از دو توزیع احتمال مختلف برای توصیف آنها انجام داد. منابع مهم ناهمگونی مجموعه داده‌ها عبارتند از مکان اندازه گیری و روشی که با آن اندازه گیری شده است (Bartink and Jokiel 1997). هدف این مقاله بررسی شاخص‌های ناهمگونی داده‌های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده منحنی دبی اشل از مدل هیدرودینامیک در ایستگاه هیدرومتری عبدالخان در حوضه آبریز کرخه می‌باشد.

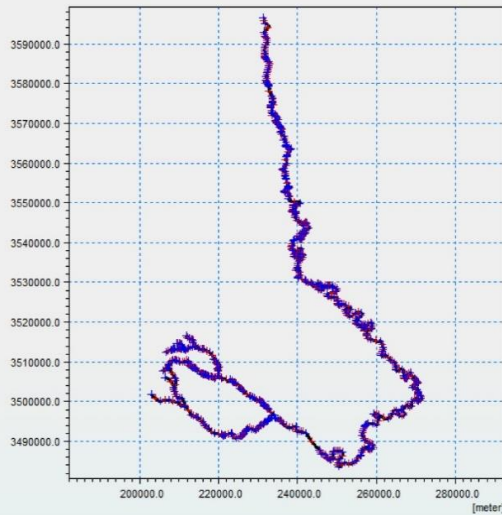
مواد و روش‌ها

تجزیه و تحلیل بر روی داده‌های اندازه گیری ایستگاه هیدرومتری عبدالخان در حوضه آبریز کرخه ارائه شده توسط دفتر ایستگاه‌های سنجش آب و هواشناسی، سازمان آب و برق خوزستان از سال ۱۳۷۲ تا سال ۱۴۰۳ انجام شد. ایستگاه هیدرومتری عبدالخان در شکل ۱ نشان داده شده است. اندازه‌گیری‌های هیدرومتری عموماً شامل مشخصات جریان آب مانند اشل H (cm)، دبی Q (m³/s)، میانگین و حداکثر سرعت V_{avg} و V_{max} (m/s)، سطح مقطع خیس شده F (m²) می‌باشد. خلاصه اطلاعات داده‌های دبی و اشل اندازه گیری شده در جدول شماره ۱ آورده شده است.

از مدل تجاری MIKE برای شبیه سازی رودخانه کرخه حد فاصل بین سد کرخه تا تالاب هورالعظیم برای شبیه سازی منحنی دبی اشل در ایستگاه هیدرومتری عبدالخان استفاده شده است. شماتیک هندسی مدل در شکل نشان داده شده است.

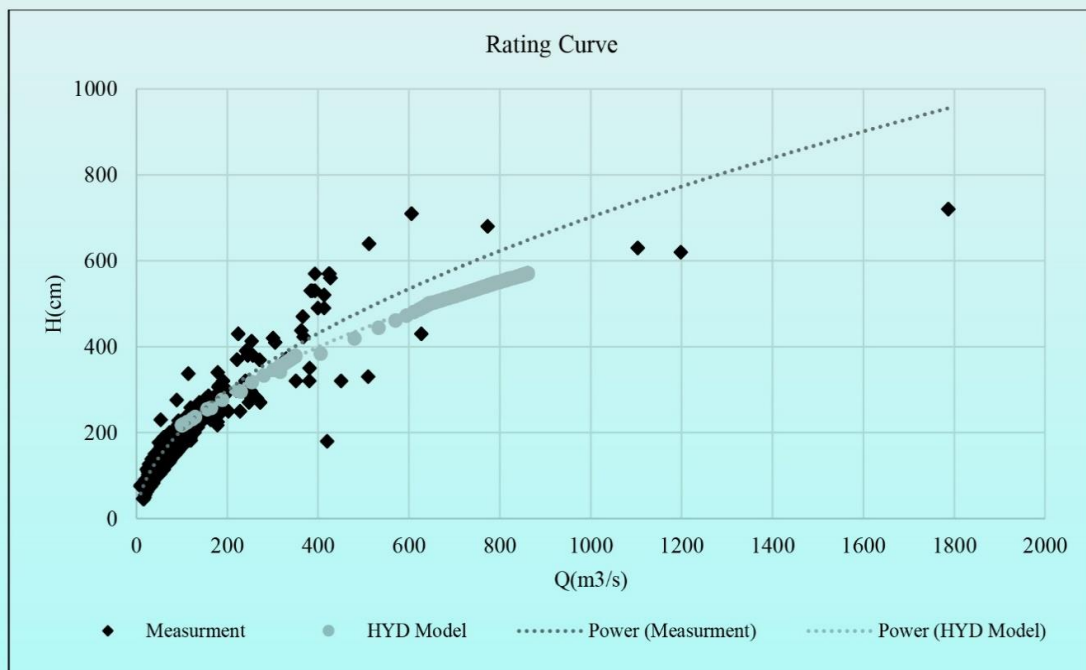
جدول ۱ خلاصه اطلاعات هیدرومتری اندازه گیری شده ایستگاه هیدرومتری عبدالخان

ایستگاه	نوع داده	رودخانه	سال	بازه اشل (سانتی متر)	بازه دبی (مترمکعب در ثانیه)
عبدالخان	اندازه گیری شده	کرخه	۱۳۷۲-۱۴۰۳	۴۵-۷۲	۱۰-۱۷۸۷



شکل ۱ موقعیت ایستگاه هیدرومتری عبدالخان

بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، منحنی‌های دبی اشل برای داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی مدل هیدرودینامیک در شکل ۲ ترسیم شده است. برای محاسبه پارامترهای a و b از مدل رگرسیون غیر خطی استفاده شده است.



شکل ۲ منحنی دبی اشل ترسیم شده برای ایستگاه هیدرومتری عبدالخان بر اساس داده‌های اندازه‌گیری و داده‌های شبیه‌سازی

مناسب بودن برازش منحنی ها با مجموعه داده ها با شاخص ضریب کارایی مدل نش- ساتکلیف با استفاده از رابطه (۳) توصیف می شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (Q_m^n - Q_o^n)^2}{\sum_{n=1}^N (Q_m^n - \bar{Q}_o)^2} \quad (3)$$

که در آن Q_m به معنای مقدار نظری حجم دبی محاسبه شده از معادله است. Q_o مقداری است که در اندازه گیری ها مشاهده می شود، و \bar{Q}_o مقدار میانگین از اندازه گیری ها است. مقدار $NSE = 1$ نشان دهنده برازش ایده آل منحنی با داده های هیدرومتری است. مقدار NSE زیر صفر نشان می دهد که مقدار میانگین سری زمانی مشاهده شده پیش بینی کننده بهتری نسبت به مدل بوده است (Krause et al. 2005). این شاخص یکی از رایج ترین آماره های است که برای ارزیابی مدل های هیدرولوژیکی استفاده می شود. این شاخص حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاهاست که نسبت واریانس باقیمانده به واریانس دبی ها را نشان می دهد. مقدار این شاخص از منفی ∞ تا $1+$ متغیر است. مقدار بهینه این شاخص $1+$ است که نشان می دهد که خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب $1:1$ نزدیک می باشد. تاکنون هیچ معیار خاصی به طور دقیق در مورد مقادیر مناسب برای این پارامتر ارائه نگردیده است. ولی به طور کلی اگر این شاخص بیشتر از 0.7 باشد عملکرد مدل عالی، اگر بین 0.3 تا 0.7 باشد عملکرد رضایت بخش و اگر کمتر از 0.3 باشد عملکرد غیر قابل قبول فرض می شود (Liu et al., 2009).

با اشاره به مطالعه Krause و همکاران (۲۰۰۵)، شاخص NSE با دو معیار برازش دیگر از برازش مناسب مقایسه شد. یکی از آنها که توسط نویسندگان مطالعه مورد استناد پیشنهاد شده است، شکل اصلاح شده آن شاخص به نام شاخص نسبی NSE_{rel} است که با رابطه (۴) مشخص می شود:

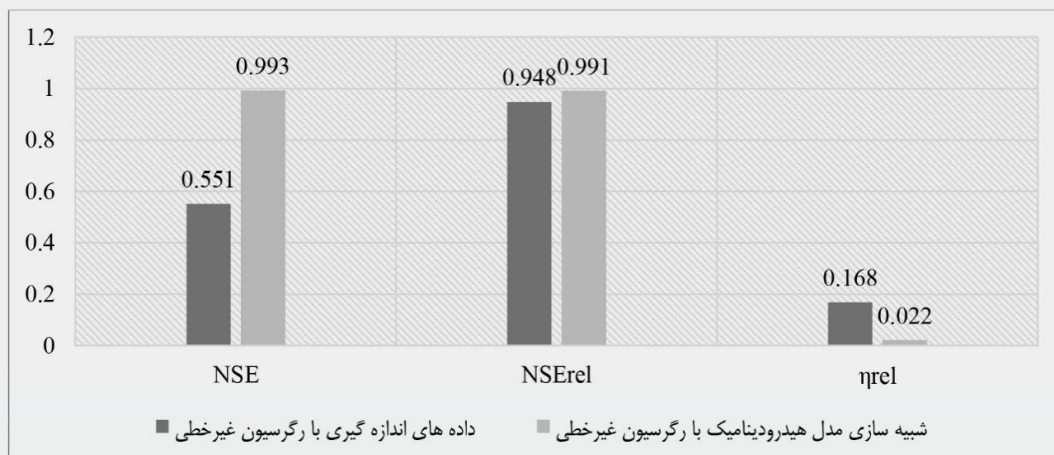
$$NSE_{rel} = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N \left(\frac{Q_m^n - Q_o^n}{Q_o^n} \right)^2}{\sum_{n=1}^N \left(\frac{Q_m^n - \bar{Q}_o}{\bar{Q}_o} \right)^2} \quad (4)$$

که در آن نمادها و تفسیر مقدار حاصل مانند مورد NSE کلاسیک است. معیار دیگر میانگین خطای نسبی برازش η_{rel} است که به صورت رابطه (۵) تعریف می شود. لازم به ذکر است که مقادیر پایین ضریب η_{rel} نشان دهنده تناسب خوب منحنی دبی اشل با مجموعه داده است.

$$\eta_{rel} = \frac{1}{N} - \sum_{n=1}^N \frac{|Q_m^n - Q_o^n|}{Q_o^n} \quad (5)$$

بحث و نتیجه گیری

مقادیر محاسبه شده پارامترهای برازش (NSE ، NSE_{rel} و η_{rel}) به ترتیب برای داده های اندازه گیری و داده های شبیه سازی شده با مدل هیدرودینامیک در شکل (۳) آورده شده است.



شکل ۳ نتایج شاخص های آماری محاسبه شده

بر اساس نتایج بدست آمده از شکل ۳ می توان گفت برای داده های اندازه گیری هیدرومتری با رگرسیون غیرخطی شاخص کارایی ضریب ناش ساتکیلف مقداری بین ۰,۳ تا ۰,۷ داشته و در نتیجه می توان گفت عملکرد مدل رگرسیون رضایت بخش تلقی می گردد، همچنین مقدار شاخص نش ساتکیلف نسبی برابر با ۰,۹۴۸ عددی بسیار خوب می باشد. در مورد میانگین خطای نسبی برازش هرچه این مقدار کمتر و نزدیک به صفر باشد نشان دهنده تناسب خوب منحنی دبی اشل با مجموعه داده ها است که مقدار ۰,۱۶۸ نشان دهنده همین موضوع می باشد. برای داده های شبیه سازی مدل هیدرودینامیک با رگرسیون غیرخطی مقدار شاخص کارایی ضریب ناش ساتکیلف برابر ۰,۹۹۳ و بسیار نزدیک به مقدار ۱ می باشد. مقدار ۱ برای این شاخص مقدار بهینه بوده که نشان می دهد خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده تا چه مقدار به خط رگرسیون با شیب ۱:۱ نزدیک می باشد. با توجه به اینکه مقدار ۰,۹۹۳ بزرگتر از مقدار ۰,۷ می باشد عملکرد مدل عالی تلقی می شود. همچنین مقدار شاخص نش ساتکیلف نسبی برابر با ۰,۹۹۱ و نزدیک به مقدار ۱ بوده که بسیار خوب می باشد. در مورد میانگین خطای نسبی برازش هرچه این مقدار کمتر و نزدیک به صفر باشد نشان دهنده تناسب خوب منحنی دبی اشل با مجموعه داده ها است که مقدار ۰,۰۲۲ و نزدیک به صفر نشان دهنده همین موضوع می باشد. به طور کل می توان گفت نتایج حاصل نشان دهنده عملکرد رضایت بخش مدل رگرسیون غیرخطی و تناسب خوب منحنی دبی اشل با مجموعه داده هستند.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم میدانند از حمایت سازمان آب و برق خوزستان و شرکت بهره برداری از شبکه های آبیاری کرخه و شاور در انجام این پژوهش قدرانی کنند.

- 1- Bartnik A., Jokiel P., 1997, Zmiany odpływu na obszarze Polski w latach 1971-1990 w świetle analiz jednorodności szeregów przepływu rzek, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, XX (XLI), 4.
- 2- Byczkowski A., 1999, Hydrologia, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- 3- Dębski K., 1955, Hydrologia kontynentalna. Hydrometria, Wydawnictwo Komunikacyjne, Warszawa.
- 4- Di Baldassarre G., Montanari A., 2009, Uncertainty in river discharge observations: a quantitative analysis, Hydrology and Earth System Sciences, 13 (6), 913-921, DOI: 10.5194/hess-13-913-2009.
- 5- Domeneghetti A., Castellarin A., Brath A., 2012, Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration, Hydrology and Earth System Sciences, 16 (4), 1191-1202, DOI: 10.5194/hess-16-1191-2012.
- 6- Dottori F., Martina M.L.V., Todini E., 2009, A dynamic rating curve approach to indirect discharge measurement, Hydrology and Earth System Sciences, 13 (6), 847-863, DOI: 10.5194/hess-13-847-2009.
- 7- Egelson P.S., 1978, Hydrologia dynamiczna, PWN, Warszawa.
- 8- Fenton J.D., Keller R.J., 2001, The calculation of streamflow from measurements of stage, Technical Report 01/6, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, available online <https://johndfenton.com/Papers/Calculation-of-streamflow-from-measurements-of-stage.pdf> (data access 19.06.2023).
- 9- Haque M.M., Rahman A., Haddad K., 2014, Rating curve uncertainty in flood frequency analysis: a quantitative assessment, Journal of Hydrology and Environment Research, 2 (1), 50-58.
- 10- Krause P., Boyle D.P., Base F., 2005, Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment, Advances in Geosciences, 5, 89-97, DOI: 10.5194/adgeo-5-89-2005.
- 11- Lang M., Pobanz K., Renard B., Renouf E., Sauquet E., 2010, Extrapolation of rating curves by hydraulic modelling, with application to flood frequency analysis, Hydrological Sciences Journal, 55 (6), 883-898, DOI: 10.1080/02626667.2010.504186.
- 12- Leonard J., Mietton M., Najib H., Gourbesville P., 2000, Rating curve modelling with Manning's equation to manage instability and improve extrapolation, Hydrological Sciences Journal, 45 (5), 739-750, DOI: 10.1080/02626660009492374.
- 13- Liu, Y., Xu, Y., Li, D. Z., Shi, Y., & Ye, M. (2009). Comparison of S100B and NSE between cardiac surgery and interventional therapy for children. Pediatric cardiology, 30, 893-897.
- 14- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J., 1994, Hydrologia stosowana, PWN, Warszawa.
- 15- Ozga-Zieliński B., Szkutnicki J., Chudy Ł., 2014, Krzywa natężenia przepływu a przepływy ekstremalne, Przegląd Geofizyczny, LIX (3-4), 85-110.

- 16- Radczuk L., Szymkiewicz R., Jełowicki J., Zyszkowska W., Brun J.F., 2001, Wyznaczenie stref zagrożenia powodziowego, Wrocław: Biuro Koordynacji Projektu Banku Światowego, SAFEGE.
- 17- Reitan T., Petersen-Overleir A., 2009, Bayesian methods for estimating multi-segment discharge rating curves, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 23, 627-642, DOI: 10.1007/s00477-008-0248-0.
- 18- Singh V.P., Strupczewski W.G., 2002, On the status of flood frequency analysis, Hydrological Processes, 16 (18), 3737-3740, DOI: 10.1002/hyp.5083.
- 19- Sivapragasam C., Muttill N., 2005, Discharge rating curve extension – a new approach, Water Resources Management, 19, 505-520, DOI: 10.1007/s11269-005-6811-2.
- 20- Strupczewski W.G., 1996, Warning of application of the Chezy-Manning formula regardless of channel shape, Proceedings of the International Conference on Hydrology and Water Resources, 371-383, DOI: 10.1007/978-94-011-0389-3_24.
- 21- Szkutnicki J., Kadhubowski A., Chudy Ł., 2007, Metody wyznaczania krzywej natężenia przepływu, IMGW, Warszawa.
- 22- Szulczewski W., Jakubowski W., 2018, The application of mixture distribution for the estimation of extreme floods in controlled catchment basins, Water Resources Management, 32, 3519-3534, DOI: 10.1007/s11269-018-2005-6.
- 23- Szulczewski W., Jakubowski W., Tokarczyk T., 2018, An analysis of the hydrological regime as a factor influencing on the distributions of maximum annual flows, ITM Web of Conferences, 23, 00034, DOI: 10.1051/itmconf/20182300034.
- 24- Westerberg I.K., McMillan H.K., 2015, Uncertainty in hydrological signatures, Hydrology and Earth System Sciences, 19 (9), 3951-3968, DOI: 10.5194/hess-19-3951-2015.

Investigating non-homogeneity indices of measurement data in the rating curve of hydrometry stations (Case study: AbdulKhan Hydrometry Station, Karkheh Basin)

Zeinab Hadadian*¹, Ali Shahbazi², Hadi Alibakhshi³

- 1- Khuzestan Water and Power Authority
- 2- Khuzestan Water and Power Authority
- 3- Karkheh and Shavoor Irrigation Networks Co.

* Corresponding author Email: zeinab.hadadian@yahoo.com

► ABSTRACT

One of the main tasks of contemporary hydrology is to plot the best possible rating curve, which has numerous applications in practical hydrological problems. The quality of the curve depends to a significant degree on the precision of hydrometric measurements and the precision in determining the relationship between discharge and the stage (water level). This study focuses on investigate the non-homogeneity indices of measured and simulated (using the MIKE hydrodynamic model) hydrometric data of the rating curve at the Abdul Khan hydrometric station in the Karkheh basin. The analysis was performed on hydrometric data measured over a 30-year period. Nonlinear regression model has been used to fit the rating curve and extract the relationship. Nash-Sutcliffe, relative Nash-Sutcliffe, and relative mean error of fit indices were used to examine data homogeneity. Based on the results, it was observed that the aforementioned coefficients were obtained for the measured hydrometric data as 0.551, 0.948, and 0.168, respectively, and for the curve simulated with the hydrodynamic model as 0.993, 0.991, and 0.022, respectively, which indicates the satisfactory performance of the nonlinear regression model and the good fit of the rating curve with the data set.

► **Keywords:** Hydrology, Rating Curve, non-homogeneity Data Sets, Hydrometric Measurements, Hydrodynamic Model, Nash-Sutcliffe Index.



تحلیل سری زمانی درجه حرارت سالانه کلانشهر اهواز و پیش دید روند آبی آن

کاظم حمادی^۱، لیلا نوزاریان^۲

- 1- مدیریت مطالعات پایه منابع آب، سازمان آب و برق خوزستان
- 2- رئیس گروه مطالعات آبهای سطحی، سازمان آب و برق خوزستان

leila_nozarian1383@yahoo.com

Analysis of the Annual Temperature Time Series of Ahvaz Metropolis and Forecasting its Future Trend

Kazem Hemadi¹, Leila Nozarian²

- 1- Director of Water Resources Studies, Khuzestan Water and Power Authority
- 2- Head of Department of Surface Water Studies, Khuzestan Water and Power Authority

* Email: leila_nozarian1383@yahoo.com

چکیده

اقلیم یک عامل مهم زیست محیطی است که تغییرات آن مهمترین تهدید برای توسعه پایدار است. تغییرات اقلیمی که عمدتاً ناشی از فعالیت های انسانی است، در دهه های اخیر منجر به تغییر در بخش های مختلف اکوسیستم شده است. بررسیهای مختلف نشان میدهد که این پدیده میتواند بر سیستم های مختلف منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، صنعت و اقتصاد اثرات منفی داشته باشد. پیش بینی کمیت و کیفیت تحولات اقلیمی یکی از مسائل پیچیده ای است که ذهن اقلیم شناسان را به خود مشغول کرده است. روشن شدن این وضعیت برای منطقه اهواز بدلیل تراکم صنایع نفت، پتروشیمی، فولاد و برق، قطب شبکه های آبیاری و زهکشی و اراضی زراعی سنتی وسیع و همچنین به دلیل مسایل زیست محیطی که تاثیر مستقیم در معیشت مردم منطقه دارد مهم می باشد. در این تحقیق از آمار 67 ساله دمای اهواز با بررسی کفایت طول سری زمانی آن استفاده شده است. با بکارگیری تئوری سری های زمانی استوکاستیک همراه با روند نسبت به پیش دید شرایط آبی و شبیه سازی آن برای 33 سال آتی مشخص شد روند افزایشی درجه حرارت در کلانشهر اهواز برابر 4.5 درجه در 100 سال می باشد که از متوسط روند افزایشی جهانی بالاتر است.

کلید واژه ها: سری های زمانی دما، روند افزایشی درجه حرارت، مدل سازی آماری دما، اهواز

مقدمه

اقلیم یک عامل مهم زیست محیطی است که تغییرات آن مهمترین تهدید برای توسعه پایدار است. تغییرات اقلیمی که عمدتاً ناشی از فعالیت های انسانی است، در دهه های اخیر منجر به تغییر در بخش های مختلف اکوسیستم شده است. شناخت ناهنجاریهای اقلیمی مؤثر در تشدید شرایط بیابانی که موجب فاصله گرفتن شرایط اقلیمی در محدود مکانی و زمانی خاص از شرایط نرمال درازمدت میشود، به عنوان عامل اصلی یا زمینه ساز تشدید فعالیت های انسانی

امری ضروری است. بررسیهای مختلف نشان میدهد که این پدیده میتواند بر سیستمهای مختلف منابع آب، کشاورزی، محیطزیست، صنعت و اقتصاد اثرات منفی داشته باشد. پیش بینی کمیت و کیفیت تحولات اقلیمی یکی از مسائل پیچیده ای است که ذهن اقلیم شناسان را به خود مشغول کرده است. اکنون به مدد دستیابی به فناوریهای نوین و در اختیار داشتن سریهای متعدد داده های لازم از متغیرهای اقلیمی و به یاری دانش درک روابط بین این متغیرها، گامهای اساسی در درک و پیش بینی روندهای اقلیمی پدیدار شده است. تحقیقات انجام شده در کشور که در مرور منابع به آن ها اشاره خواهد شد نشانگر افزایش چشمگیر درجه حرارت سالانه است. روشن شدن این وضعیت برای منطقه اهواز بدلیل تراکم صنایع نفت، پتروشیمی، فولاد و برق، قطب شبکه های آبیاری و زهکشی و اراضی زراعی سنتی وسیع و همچنین به دلیل مسایل زیست محیطی مهم می باشد. ناسا روز ۲۲ تیر ماه ۱۴۰۱ با انتشار تصویری گرمترین نقاط کره زمین را معرفی کرد که اهواز در جنوب ایران با ثبت دمای ۴۶٫۵ درجه سانتیگراد بالای صفر تا کنون گرمترین نقطه کره زمین بوده است. اتین کاپیکیان؛ کارشناس آژانس هواشناسی فرانسه در تویتر خود نوشت اهواز با ۵۳٫۷ درجه سانتیگراد (۱۲۸٫۷ درجه فارنهایت) رکورد گرمترین روز در ایران و گرمترین روز ماه ژوئن در آسیا را شکسته است. کریستوفر بارت؛ تحلیلگر تاریخ هواشناسی در وبسایت Weather Underground به طور جامع و کامل، نهایت دمای جهان را تحلیل کرده و می گوید دمای اهواز تنها با دو مورد دیگر در جهان قابل مقایسه است؛ ۲۱ جولای ۲۰۱۶ در «مطربه» در کویت و ۳۰ ژوئن ۲۰۱۳ در «دره مرگ» در کالیفرنیا. به طور رسمی دره مرگ، گرمترین دمای ثبت شده در جهان را در ۱۰ جولای ۱۹۱۳ ثبت کرد؛ دمایی معادل ۱۳۴ درجه فارنهایت (۵۷ درجه سانتیگراد). استیون پائوسون؛ یکی از مدیران ناسا رکورد شکنی های گرما و گرمای شدید را به دلیل انتشار گازهای گلخانه ای از سوی انسان برشمرد و گفت: «فعالیت انسان موجب تغییرات آب و هوایی می شود که بر شرایط زندگی اثر می گذارد». بنابراین این تحقیق می تواند پاسخگوی این سوال باشد که آیا دما در منطقه اهواز روند روبه افزایش دارد. این روند از لحاظ آماری معنی دار است. اگر چنین باشد مقدار افزایش آن تا چه حدودی است. این تحقیق با هدف تحلیل مقدماتی سری زمانی درجه حرارت سالانه اهواز صورت می گیرد تا ضمن مشخص نمودن مولفه های سری های زمانی به ویژه مولفه روند میزان سهم و تغییرات آن ها را نیز روشن نماید؛ سپس با بکارگیری تئوری سری های زمانی استوکاستیک همراه با روند نسبت به پیش دید شرایط آتی و شبیه سازی آن برای ۳۳ سال آتی اقدام می نماید. به منظور کفایت طول سری زمانی برای مبحث پیش بینی های اقلیمی ضریب هرست (Hurst Coefficient) محاسبه گردید. این ضریب برای سری زمانی مورد استفاده به مدت ۶۷ سال برابر ۰.۹۳۶ می باشد که نشان دهنده حافظه تاریخی مناسب به منظور انجام پیش بینی ها می باشد.

تئوری و پیشینه تحقیق

برای درک فرآیندها و شناخت الگوهای سری زمانی نیاز به روش های خاصی است مدل های سری زمانی شامل مدل ضربی و جمعی، مدل رگرسیونی و مدل اتورگرسیون و میانگین متحرک می باشند. مدل ضربی و جمعی یکی از الگوهای کلاسیک سری های زمانی است و بر اساس تجزیه و تحلیل سری به مولفه های دیگر صورت می گیرد. این مدل شامل چهار مولفه روند (Trend)، چرخه ای (Cyclical)، فصلی (Seasonal) و غیرمنظم یا تصادفی (Irregular) است. مدل جمع و ضربی به صورت زیر نوشته می شود:

$$Y = T + C + S + I \quad (1)$$

$$Y = T.C.S.I \quad (2)$$

در این تحقیق از مدل ضربی استفاده شد بر همین مبنا چگونگی ساخت مولفه ها در مدل ضربی شرح داده می شود. مولفه روند (T): تابع روند ممکن است خطی، نمایی، خم رشد و... باشد. سری زمانی Y_n را در نظر گرفته می شود. اگر X_n کد عددی باشد که به زمان یا دوره نسبت داده شود، به کمک روش کوچکترین مجموع مربعات، یک خط را برای سری واقعی (متغیر وابسته) برازش می شود. مولفه روند برای پیش بینی کوتاه مدت کاربرد دارد به شرط آن که مولفه ترکیبی دوره ای نامنظم زیاد بزرگ نباشد. در غیر این صورت در درجه اول به این مولفه توجه می شود به خصوص برای پیش بینی های دراز مدت که اول به مولفه دوره ای نامنظم و سپس به مولفه روند توجه می شود. مولفه فصلی (S): ابتدا سری اصلی را همواره نموده و مقادیر هموار شده، مولفه روند- دوره ای، T.C، است. سپس از تقسیم سری بر این مولفه یعنی $Y/(T.C) = \%$ مولفه نامنظم- فصلی به دست می آید که اگر این مولفه پایدار باشد با متوسط گیری از این مولفه، مولفه فصلی بدست می آید. مولفه فصلی برای پیش بینی کوتاه مدت به کار می رود. در صورتی که اثر فصل را در فرآیند نادیده گرفته شود مولفه $Y/S = C.T.I$ حاصل می شود همچنین مولفه $C.S.I/S = C.I$ در تشخیص محل دوره کمک می کند.

مولفه دوره ای (C): این مولفه دوره‌های متغیر را نشان می‌دهد این مولفه هم از لحاظ مدت و هم دامنه، تغییر می‌کند برای بسیاری از فرایندهای تجاری و اقتصادی یا کشاورزی الگوهای تغییر دوره‌ای مشخصی (پیشرو، تاخیری و...) وجود دارد. کاربرد مولفه دوره‌ای در تشخیص وضعیت فعلی و دوره‌های بازگشت است (دوره‌ای تغییر جهت). بنابر این با ارجاع به این الگوهای موجود دوره‌ای و مقایسه با مولفه دوره‌ای سری واقعی، می‌توان گفت در کدام دوره قرار گرفته اند و یا پیش بینی کوتاه مدتی از تغییرات آتی کرد.

مولفه نامنظم (I): بعد از محاسبه مولفه چرخه‌ای، فصلی و روند مانده‌ها و تاثیر عوامل دیگر را مولفه نامنظم گویند. برخی اوقات تفکیک این مولفه از مولفه دوره‌ای دشوار است؛ بنابراین هر دو مولفه را یکی می‌گیرند.

بررسی روند تغییر اقلیم و ارزیابی جامع تاثیر و پیامدهای آن به یک نگرانی اساسی در بین کشورها تبدیل شده است. (زارعیان و همکاران، 1403)، اثر تغییر اقلیم بر دمای بیشینه و بیشینه بارش روزانه در ۱۶ ایستگاه هواشناسی واقع در حوضه آبریز سفیدرود، در دوره زمانی سال های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲ بررسی نمود. بدین منظور ۱۰ مدل AOGCM مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC(CMIP6) بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه سازی دما و بارش دوره تاریخی (سال های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴) رتبه بندی کرد. سپس خروجی دمای بیشینه و بارش روزانه مربوط به بهترین مدل در هر ایستگاه، با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG تحت سه سناریوی انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 در دوره زمانی سال های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲ استخراج شدند. همچنین از آزمون من - کندال (در سطح آماری ۹۵ درصد) برای بررسی روند تغییر در متوسط سالانه دما و بارش بیشینه استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل های مختلف AOGCM در نواحی مختلف حوضه، دارای دقت های متفاوتی در شبیه سازی دمای بیشینه و بارش هستند و دقت های آن‌ها در شبیه سازی دما بهتر از شبیه سازی بارش بودند. نتایج نشان دادند که متوسط سالانه دمای بیشینه در سناریوهای انتشار مختلف بین 0.9 تا 2.8 درجه سانتی گراد افزایش خواهد یافت. (نوبخت دلیر و همکاران، 1403) به بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر روند دما و بارش ایستگاه سینوپتیک خرم آباد واقع در حوضه آبریز کشکان در غرب ایران تحت دو سناریوی SSP126 و SSP585 با استفاده از نرم افزار LARS-WG ریزمقیاس شده در آینده می پردازد. نتایج نشان داد که دمای حداقل و حداکثر در هر دو سناریو روند افزایشی دارند و مقدار بارش روند صعودی ملایمی دارد. (هرزندجدیدی و همکاران، 1403) با استفاده از جدیدترین داده های مدل‌های اقلیمی که در گزارش سال ۲۰۲۱ هیات بین الدول تغییر اقلیم استفاده شده است، مولفه های اقلیمی استان آذربایجان شرقی (شامل بارش، دمای میانگین) تحت سه سناریوی خوشبینانه (SSP126)، میانی (SSP245) و بدبینانه (SSP585) برای دوره پایه (گذشته)، آینده نزدیک (۲۰۴۰ - ۲۰۲۱)، آینده میانی (۲۰۶۰ - ۲۰۴۱) و آینده دور (۲۰۸۱ - ۲۰۶۰) مورد بررسی قرار داده است. سه مدل ACCESS-CM2، MICRO-ES2L، MRI-ESM2 و براساس کارایی آنها در شبیه سازی اقلیم گذشته استان انتخاب شده و بر روی منطقه مقیاس کاهی گردیدند. از برونداد مقیاس کاهی شده مدل های مذکور برای پیش نگری اقلیم آینده استان بر روی ایستگاه هواشناسی تبریز دارای طول دوره آماری در حد نرمال ۲۰ ساله مشاهداتی به عنوان دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) استفاده شد. نتایج آشکارا نشان از تغییر اقلیم در سطح استان آذربایجان شرقی است به طوری که دمای ۵ ایستگاه انتخابی در سطح استان برای هر سه مدل و در هر سه دوره آینده دارای روند افزایشی است. همچنین بارش در ماه های پر بارش روند کاهشی و در ماههای کم بارش روند افزایشی داشته است که خود نشان از تغییر الگوی بارشی استان است. (یوهنگی فرد و همکاران، 1403) با هدف بررسی شرایط شهر اردبیل تحت تاثیر چهار سناریو از مجموعه سناریوهای گزارش ششم IPCC در سه بازه زمانی آینده کوتاه مدت (۲۰۵۰-۲۰۲۴)، آینده میان مدت (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده بلند مدت (۲۰۷۶-۲۱۰۰) با دو مدل گردش عمومی جو NOR-ESM2-MM و MPI-ESM1-2-HR از مدل SDSM برای مقیاس کاهی استفاده کرد. نتایج نشان دهنده توانایی خوب این مدل بود. در این تحقیق مدل MPI-ESM1-2-HR تطابق بیشتری در دوره پایه با داده های مشاهداتی داشت. بررسی سناریوها برای تمامی دوره های زمانی حاکی از افزایش بارش ها در منطقه بود. که این افزایش با گذشت زمان کمتر می گردد. همچنین سناریوها نشان می دهند که در مقیاس ماهانه، مقادیر حدی پارامترهای دما شدیدتر می گردند به بیان دیگر ماه های گرم و ماه های سرد شدیدتری تجربه خواهند شد که این تغییرات در دوره آینده بلند مدت (۲۱۰۰-۲۰۷۶) مشهودتر خواهد بود. (سلیمانی ساردو و مصباح زاده، 1399) نشان داد که مقادیر بارش در دوره آتی نسبت به حالت پایه در ایستگاه سینوپتیک بیم به میزان 32.7 و 46.8 میلی متر به ترتیب در سناریو A2 و سناریو B2 (سناریوهای تغییر اقلیم) افزایش می یابد. از طرفی در ایستگاه سینوپتیک جیرفت متوسط دمای فصل‌ها در سناریوی A2 (48.5، -79.24، 88.8، 38.17) درصد افزایش دما در فصل بهار و تابستان و کاهش دما در فصل پاییز و زمستان هست و این مقادیر در سناریو B2 به ترتیب (27.6، -65.16، 10.8، 41.26) درصد افزایش دما در فصل بهار و تابستان و کاهش دما در فصل پاییز و زمستان است. (پارسا و همکاران، 1403) به منظور بررسی ویژگی های دما و بارش و روند تغییرات آن‌ها در افغانستان و دو حوضه هیرمند و هریرود از داده های شبکه ای MSWX در یک دوره ۴۰ ساله (۱۹۸۱-۲۰۲۰) استفاده نمود. جهت بررسی پیش نگری های آینده از برونداد پنج مدل CMIP6 در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) استفاده و به منظور کاهش عدم قطعیت مدل های منفرد، یک چندمدلی همدادی تولید کرد. بررسی متوسط پهنه ای بارش نشان داد که از بارش افغانستان، حوضه های هیرمند و هریرود در چهار دهه اخیر کاسته شده است. در مقابل، متوسط پهنه‌ای دما 0.45، 0.43 و 0.57 درجه



سازمان آب برق و خورشید



دانشگاه شیراز

اولین همایش ملی هیدرولوژی و منابع آب ایران

1st National Conference on Hydrology and Water Resources of Iran

۲۴-۲۳ بهمن ماه ۱۴۰۳ - اهواز

اولین همایش ملی
هیدرولوژی و منابع آب ایران

سلسیوس/دهه به ترتیب در افغانستان، هیرمند و هریرود افزایش یافته است. (حمادی و نوذریان، 1396) با هدف تحلیل مقدماتی سری زمانی درجه حرارت سالانه اهواز ضمن مشخص نمودن مولفه‌های سری‌های زمانی به ویژه مولفه روند میزان سهم و تغییرات آن‌ها با بکارگیری تئوری سری‌های زمانی استوکاستیک همراه با روند نسبت به پیش دید شرایط آبی و شبیه سازی آن برای 58 سال آتی اقدام نمودند و نتایج نشان داد روند افزایشی درجه حرارت برابر $3.8^{\circ}\text{C}/100 \text{ years}$ می‌باشد. (سایج و همکاران، 2018) تغییرات آب و هوایی را به عنوان یک پدیده مصنوعی معرفی می‌کند که بر مردم ساکن در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. تحقیق ارائه شده دمای تاریخی دو شهر ایالات متحده را تجزیه و تحلیل می‌کند تا نشان دهد که تغییرات آب و هوایی در سراسر ایالات متحده مشهود است. تقریباً 90 سال داده دمای ماهانه در روچستر، نیویورک و بیش از 60 سال داده دمای ماهانه در سیاتل، واشنگتن را بررسی کرد. نتایج این مطالعه به وضوح یک روند گرمایشی را نشان می‌دهد که دو شهر بسیار دور را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق مقادیر درجه حرارت ماهانه و سالانه شهر اهواز از سال 1957 تا سال 2023 میلادی به مدت 67 سال از سازمان هواشناسی استان خوزستان دریافت و مورد تجزیه و تحلیل قرار داده شد. به منظور سازماندهی و تجزیه و تحلیل داده‌ها از صفحه گسترده اکسل و نرم افزار آماری SPSS استفاده شده است. آمار دریافتی بر حسب تقویم میلادی بوده که بدلیل تامین اهداف این تحقیق برگرداندن آن به تقویم شمسی صورت نگرفت. البته به منظور تحلیل سری زمانی در مقیاس فصلی، تبدیل‌های لازم بر مبنای تقویم شمسی انجام شد. گام‌های این پژوهش مطابق ذیل صورت گرفت.

الف) جمع آوری داده‌ها و آمار درجه حرارت ماهانه و سالانه شهر اهواز و تحلیل آن‌ها با استفاده از نرم افزار آماری SPSS.

ب) استخراج شاخص داده‌های خام، میانگین متحرک و تغییرپذیری

ج) تعیین مولفه‌های مختلف سری زمانی دما با استفاده از تئوری‌ها و تکنیک‌های سری زمانی

د) استفاده از مدل آماری استوکاستیک به همراه روند و پیش دید وضع آتی

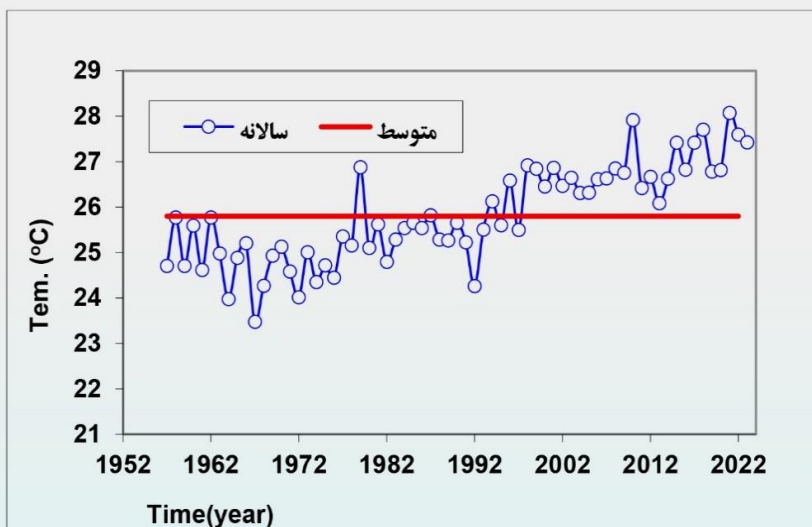
نتایج و بحث

نتایج تحلیل سری زمانی دمای متوسط سالانه

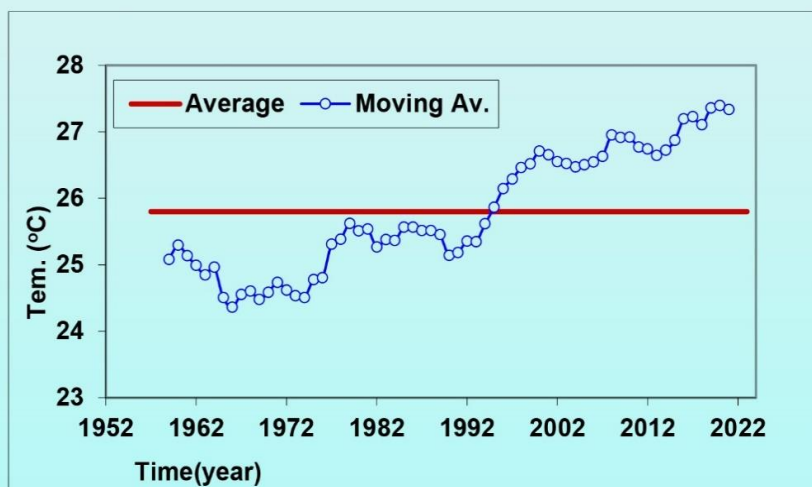
به منظور تحلیل سری زمانی درجه حرارت ابتدا نمایه‌های گرافیکی سری زمانی یعنی شاخص داده‌های خام، اسموت (هموار) شده، میانگین متحرک و تغییر پذیری، همچنین نمایه‌های اصلی سری‌های زمانی نظیر مولفه روند (Trend)، چرخه‌ای (Cyclical)، فصلی (Seasonal) و غیرمنظم یا تصادفی (Irregular) از داده‌های اصلی استخراج گردید. جهت شناخت رفتار درجه حرارت ایستگاه سینوپتیک اهواز دمای متوسط سالانه توسط نرم افزار SPSS تحلیل شد. نتایج تغییرات درجه حرارت متوسط سالانه یا شاخص مشاهدات خام نیز محاسبه و در شکل (1) نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود متوسط درجه حرارت سالانه $25/8$ و تغییرات آن بین حداقل $23/5$ تا حداکثر $28/1$ درجه سانتی گراد است. انحراف معیار طول دوره آماری حدود یک درجه سانتی‌گراد و چولگی معادل 0.07 می‌باشد، که این موضوع دال بر همخوانی داده‌ها و تقارب آن‌ها با توزیع نرمال است. با میانگین‌گیری متوالی از سری داده‌های مشاهداتی، نوسانات سالانه درجه حرارت تعدیل و در واقع شاخص اسموت شده مشخص گردید. با میانگین‌های گروهی مکرر از داده‌های مشاهداتی شاخص میانگین متحرک محاسبه شده شاخص تغییرپذیری از دیگر نمایه‌ها است که در تحلیل مقدماتی سری زمانی بکار می‌رود و نشان‌دهنده الگوی تغییرات سالانه داده می‌باشد. شکل (2) شاخص میانگین متحرک 5 ساله را نشان می‌دهد. در ادامه این تحقیق به منظور تحلیل دقیق‌تر مشاهدات درجه حرارت مولفه‌های اصلی سری زمانی درجه حرارت شامل روند، چرخه‌ای، فصلی و غیرمنظم مورد توجه قرار گرفت و مولفه‌ها با استفاده از مدل ریاضی حاصل ضرب جداسازی گردید. برای این کار ابتدا مولفه روند به روش حداقل مربعات سری مشاهداتی محاسبه سپس مولفه چرخه‌ای سری محاسبه شد. از سویی با توجه به اینکه مشاهدات سالانه درجه حرارت معمولاً فاقد اثرات فصلی هستند مولفه غیرمنظم با توجه به روشن شدن دو مولفه روند و چرخه‌ای براحتی قابل دست‌یابی است. نتیجه این محاسبات در شکل‌های (3) تا (5) ارائه شده است. همانگونه که قبلاً اشاره شد مولفه نامنظم بعد از محاسبه مولفه چرخه‌ای، فصلی و روند مانده‌ها و تاثیر عوامل دیگر را مولفه نامنظم گویند. برخی اوقات تفکیک این مولفه از مولفه دوره‌ای دشوار است؛ بنابراین هر دو مولفه را یکی می‌گیرند. در این پژوهش نیز تفاوت تغییرات این دو مولفه بسختی قابل تشخیص است.

به منظور استخراج مولفه فصلی از روش ضریب میانگین متحرک استفاده شد. در این روش ابتدا مشاهدات از طریق میانگین متحرک مرکزی هموارسازی گردید. نتیجه این کار انعکاس حاصل ضرب مولفه‌های روند و چرخه‌ای در سری زمانی است در گام بعدی مقدار حاصل ضرب مولفه‌ها، فصلی و نامنظم با

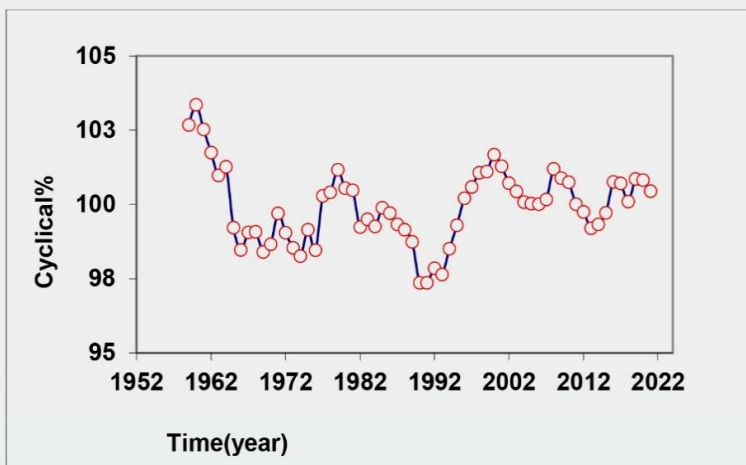
استفاده از معادله (2) بدست می‌آید. در قدم سوم، مقدار مولفه فصلی موجود از طریق خارج نمودن تاثیرات مولفه نامنظم از معادله به روش میانگین‌گیری استخراج شد.



شکل (1): تغییرات درجه حرارت متوسط سالانه اهواز (شاخصی مشاهدات خام)



شکل (2): شاخص میانگین متحرک 5 ساله درجه حرارت متوسط سالانه اهواز

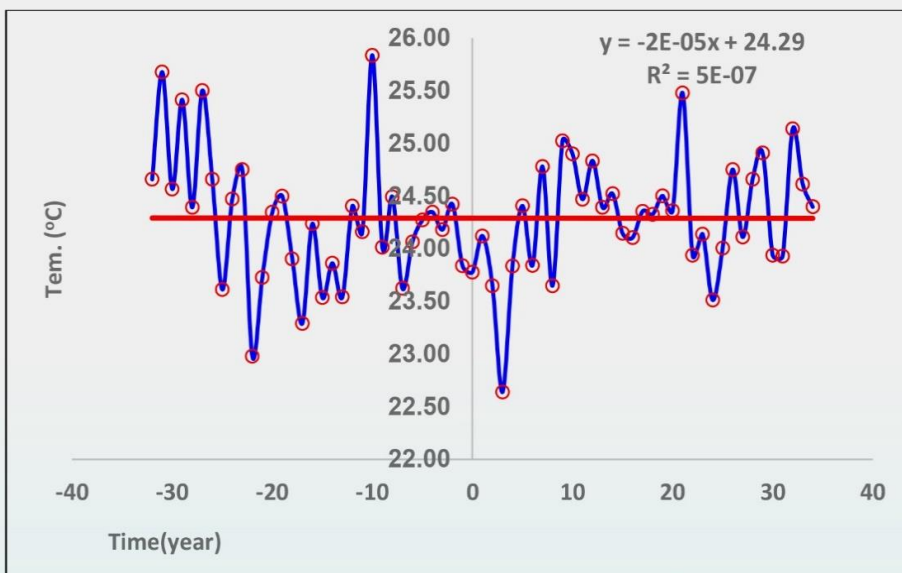


شکل (5): درصد تغییرات مولفه چرخه‌ای درجه حرارت متوسط سالانه اهواز

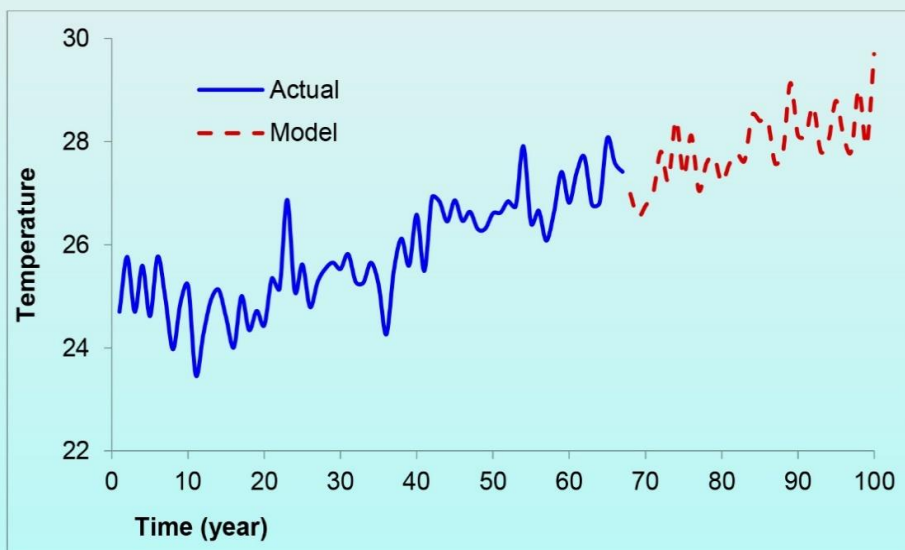
نتایج شبیه سازی آماری دمای متوسط سالانه

همانگونه که اشاره شد در این تحقیق مقادیر درجه حرارت ماهانه و سالانه شهر اهواز از سال 1957 تا سال 2023 میلادی به مدت 67 سال مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت سپس با بکارگیری تئوری سری‌های زمانی استوکاستیک همراه با روند نسبت به پیش دید شرایط آبی و شبیه سازی آن برای 33 سال آتی اقدام گردید. بدین منظور سری زمانی دمای متوسط سالانه به صورت خالص در آورده شد. شکل (6) سری زمانی خالص درجه حرارت متوسط سالانه اهواز را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود ضریب همبستگی بین توالی زمانی مشاهدات برابر صفر می‌باشد که دلیلی محکم برای حذف مولفه روند است. سپس مقادیر خود همبستگی در گامهای تأخیری مختلف محاسبه شد. در ادامه با استفاده از مقادیر خود همبستگی، واریانس و میانگین سری حاضر به پیش دید وضع آتی اقدام گردید. شبیه سازی سری درجه حرارت متوسط سالانه اهواز طی 67 سال گذشته و 33 سال آتی در شکل (7) نمایش داده شده است. بالاخره آمار دمای ماهانه تولید و یک مدل رگرسیونی نمایی بین دمای متوسط و مطلق ماهیانه برازش داده شد. ضرایب مدل و ضریب تعیین مدل در سطح یک درصد معنی دار است. با بکارگیری این مدل نسبت به برآورد درجه حرارت مطلق در دوره 33 ساله آتی اقدام شد. همبستگی بین درجه حرارت متوسط و مطلق ماهیانه دراهواز در شکل (8) و مقایسه دمای متوسط ماهیانه دو دوره 67 و 33 ساله گذشته و آتی در جدول (1) منعکس شده است. نتایج ارایه شده در جدول (1) نشان می‌دهد که درجه حرارت متوسط سالانه دوره 67 ساله گذشته 25.8 و دوره 33 ساله آتی به 27.9 درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. به عبارتی نرخ افزایش دمای متوسط سالانه در اهواز برابر 4.51 درجه سانتی‌گراد در 100 سال مورد انتظار می‌باشد. اما درجه حرارت مطلق دوره 67 ساله گذشته برابر 54 درجه سانتی‌گراد بوده است. این واقعه در 15 ژوئای 1967 مصادف با 24 تیرماه 1346 به ثبت شده بود. پیش بینی می‌شود چنانچه روند افزایش دما با این نرخ ادامه یابد، در دوره 33 ساله آتی درجه حرارت مطلق به فراتر از 54 درجه سانتی‌گراد در تیرماه برسد. شایان ذکر است که مدل استفاده شده آماری است و نمی‌تواند سال وقوع همچون دمایی را دقیقاً بیان کند اما نتایج مدل حکایت از رخداد این دما در دوره 33 ساله آتی دارد. مسلماً شناسن وقوع آن به سمت پایان دوره 33 سال آتی بیشتر می‌شود.

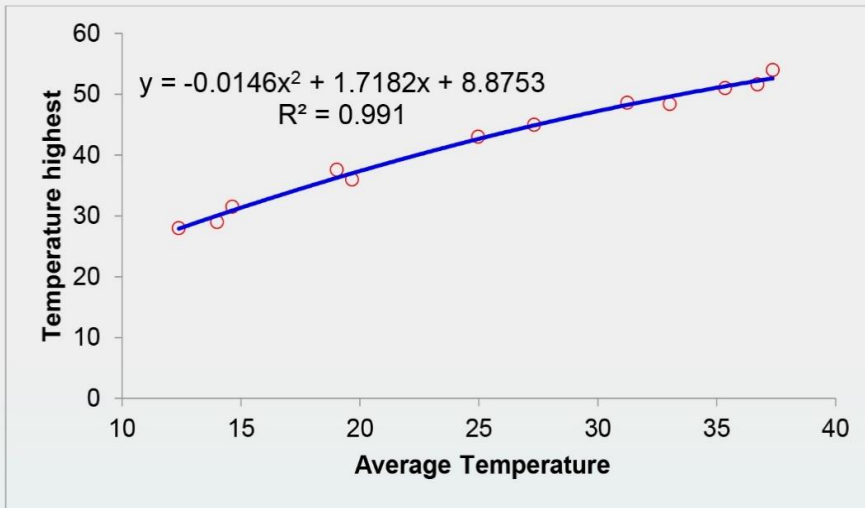
به منظور کفایت طول سری زمانی برای مبحث پیش‌بینی‌های اقلیمی ضریب هرست (Hurst Coefficient) محاسبه گردید. این ضریب برای سری زمانی مورد استفاده به مدت 67 سال برابر 0.936 می‌باشد که نشان‌دهنده حافظه تاریخی مناسب به منظور انجام پیش‌بینی‌ها می‌باشد.



شکل (6): نمایش سری زمانی نسبتاً خالص ($r=0$) درجه حرارت متوسط سالانه اهواز



شکل (7): شبیه سازی سری درجه حرارت متوسط سالانه اهواز (67 سال گذشته و 33 سال آتی)



شکل (8) : همبستگی بین درجه حرارت متوسط و مطلق ماهیانه در اهواز

جدول (1) : مقایسه دمای متوسط ماهیانه دو دوره 67 ساله گذشته و 33 ساله آتی

ماه	متوسط دوره های 67 ساله		حداکثر مطلق دوره های 33 ساله	
	فعلی	آتی	اختلاف	اختلاف
jan	12.66	13.39	28.00	29.26
feb	15.00	15.86	31.50	32.46
mar	19.29	20.40	37.60	37.85
apr	25.23	26.68	43.00	44.33
may	31.47	33.28	48.60	49.89
jun	35.65	37.70	51.00	52.90
jul	37.58	39.75	52.20	54.10
aug	36.98	39.11	51.60	53.74
sep	33.28	35.20	48.40	51.27
oct	27.59	29.18	45.00	46.58
nov	19.90	21.05	36.00	38.57
dec	14.24	15.06	29.00	31.44
annual	25.80	27.30	52.20	54.10

جمع بندی نتایج پژوهش

- ✓ نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که سری‌های زمانی در مقیاس سالانه و فصلی دارای نوسانات و تغییرات قابل ملاحظه‌ای نسبت به زمان هستند به نحوی که شاخص تغییرپذیری درجه حرارت بین 95/6-104/9، مولفه چرخه‌ای 97/36-103/35 و مولفه‌ای نامنظم 95/62-104/9 می‌باشند. همچنین شاخص میانگین متحرک 5 ساله تغییرات درجه حرارت متوسط سالانه را بین 24/4-27/4 درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد.
- ✓ تحلیل مولفه‌های مختلف سری زمانی درجه حرارت سالانه بیانگر روند صعودی این پارامتر می‌باشد. مطابق شکل (4) رابطه روند افزایشی درجه حرارت نسبت به زمان به صورت $Y_T = 0.045T + 24.29$ می‌باشد از این رابطه می‌توان چنین استنباط نمود که روند افزایشی درجه حرارت برابر $4.5^{\circ}\text{C}/100$ years می‌باشد.
- ✓ درجه حرارت متوسط سالانه دوره 67 ساله گذشته 25/8 و دوره 33 ساله آتی به 27/9 درجه سانتی‌گراد خواهد رسید. به عبارتی نرخ افزایش دمای متوسط سالانه در اهواز برابر 1.5 درجه سانتی‌گراد در 33 سال مورد انتظار می‌باشد.
- ✓ درجه حرارت مطلق دوره 67 ساله گذشته برابر 54 درجه سانتی‌گراد بوده است. این واقعه در 15 ژوئای 1967 مصادف با 24 تیرماه 1346 ثبت شده بود. پیش بینی می‌شود چنانچه روند افزایش دما با این نرخ ادامه یابد، در دوره 33 ساله آتی درجه حرارت مطلق از 54 درجه سانتی‌گراد نیز تجاوز کند. اضافه می‌شود که مدل استفاده شده آماری است و نمی‌تواند سال وقوع همچون دمایی را دقیقاً بیان کند اما نتایج مدل حکایت از رخداد این دما در دوره 33 ساله آتی دارد. مسلماً شانس وقوع آن به سمت پایان دوره 33 سال آتی بیشتر می‌شود.

مراجع

- 1- زارعیان، محمد جواد و سراج ابراهیمی، رضا و دهبان، حسین، 1403، بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر حدی دما و بارش در حوضه سفیرود بر اساس مدل های CMIP6
- 2- نوبخت دلیر، افسانه و جوادی، بهزاد و زارعی، عرفان و نصیری صالح، فرزین، 1403، بررسی اثر تغییر اقلیم بر روند دما و بارش ایستگاه سینوپتیک خرم آباد بر اساس داده‌های CMIP6، چهاردهمین کنگره ملی مهندسی عمران، زنجان
- 3- هرزندجیدی، رقیه و عابدینی، یوسفعلی و تقی‌لو، مرتضی، 1403، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش در استان آذربایجان شرقی، هشتمین کنفرانس بین المللی فیزیک، ریاضی و توسعه علوم پایه، تهران
- 4- یوهنگی فرد، عاطفه و نجایی، آرزو و مرادی غیاث آبادی، بهناز، 1403، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش با استفاده از نرم افزار SDSM براساس گزارش ششم IPCC، اولین همایش ملی ایده‌ها و راهکارهای نوین در توسعه پایدار حوضه آبریز دریاچه ارومیه، تبریز.
- 5- سلیمانی ساردو، فرشاد و مصباح زاده، طیبه، 1399، پیش بینی دما و بارش با استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم و مدل‌های ریزمقیاس نمایی آماری (مطالعه موردی: جنوب استان کرمان)
- 6- پارسا، سمیه و زرین، آذر و مفیدی، عباس و داداشی رودباری، عباسعلی، 1403، پیامدهای تغییر اقلیم بر دما و بارش کشور افغانستان با تاکید بر حوضه های هیرمند و هریرود.
- 7- حمادی، کاظم و نوذریان، لیلیا (1396)، " تحلیل و مدل سازی آماری (پیش بینی) سری زمانی درجه حرارت شهر اهواز"، شانزدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه محقق اردبیلی.

8- Ethan Savage , Laurie Savage , Corey Skinner, Increasing Average Yearly Temperature in Two U.S. Cities Shows Evidence for Climate Change, Journal of Emerging Investigators, 2018, 10.59720/17-011

9- Pant, G.B., Rupa Kumar, K., Borgaonkar, H.P., 1999. "Climate and its long-term variability over the Western Himalaya during the past two Centuries". In: Dash, S.K.,

- 10-Fowler, H.J., Archer, D.R., 2006. "Conflicting signals of climatic change in the Upper Indus Basin". *Journal of Climate* 19, 4276-4293.
- 11- Fernando, D.A.K., and Jayawardena, A.W. (1994) Generation and Forecasting of Monsoon Rainfall Data. 20th WEDC Conference, Colombo, Sri Lanka, 310-313.
- 12-Venema, H.D., Schiller, E.J., and Adamowski, K. (1996) Evidence of Climate Change in The Senegal River Basin, *Water Resources Development*, 12, 531-546.
- 13-Yurekli,k,and kurnc,A. (2005). , "performances of stochastic Approaches in Generating low stream flow Data for Drought Analysis", *Journal of Spatial Hydrology*, vol5 no.1,20-32 .

► Abstract

Climate is an important environmental factor, and its changes are the most important threat to sustainable development. Climate change, which is mainly caused by human activities, has led to changes in various parts of the ecosystem in recent decades. Various studies show that this phenomenon can have negative effects on various water resource systems, agriculture, environment, industry, and economy. Predicting the quantity and quality of climate changes is one of the complex issues that has occupied the minds of climatologists. Clarifying this situation is important for the Ahvaz region due to the concentration of oil, petrochemical, steel, and electricity industries, the hub of irrigation and drainage networks, and vast traditional agricultural lands, as well as environmental issues that directly affect the livelihoods of the people of the region. In this study, 67-year temperature statistics of Ahvaz were used by examining the adequacy of the length of its time series. By applying stochastic time series theory along with the trend toward predicting future conditions and simulating it for the next 33 years, it was determined that the temperature increase trend in the Ahvaz metropolis is 4.5 degrees per 100 years, which is higher than the average global increase trend.

Keywords: temperature time series, temperature increment trend, temperature statistical modeling, Ahvaz.

RAAHBORD

SCIENTIFIC, NEWS AND RESEARCH
JOURNAL OF RESEARCH MANAGEMENT
KHUZESTAN WATER AND POWER AUTHORITY (KWPA)



NO:15