

Uncertainty Quantification in Extreme Flood Prediction: Geomorphic Analysis of Statistical Parameters in Arid Basins (Case Study: Qareh Aghaj River Basin)

Hamid Zeinli¹, Heeva Elmizadeh^{2*} 

1. MS. in Geomorphology, Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran
 2. **Corresponding Author**, Associate Prof., Department of Marine Geology, Faculty of Marine Natural Resources,
 Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran
 Email: Elmizadeh@kmsu.ac.ir ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5096-0603>

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received: 28 May 2025 Revised: 01 August 2025 Accepted: 17 September 2025 Published: 12 September 2026 Keywords: Extreme floods, Uncertainty quantification, Arid basins, Geomorphic parameters, Qarah-Aghaj River.	The Qarah-Aghaj basin, as one of the most significant watersheds in Fars Province, has experienced numerous destructive flood events in recent decades, causing extensive damage to regional infrastructure. This study presents a comprehensive analysis of flood behavior in the Qarah-Aghaj basin through an integrated approach that evaluates four statistical distributions: Gumbel Type I, Generalized Extreme Value (GEV), Generalized Pareto (GPD), and log-normal. The distribution parameters were fitted using three distinct methods: Method of Moments (MOM), L-moments, and Maximum Likelihood Estimation (MLE). The goodness-of-fit was rigorously assessed through multiple criteria, including the Kolmogorov-Smirnov test, Akaike Information Criterion (AIC), and Root Mean Square Error (RMSE). Key findings demonstrate the superior performance of the GEV distribution in flood modeling for this basin. The GEV distribution showed optimal agreement with observational data, as evidenced by the lowest Kolmogorov-Smirnov statistic (0.058) and AIC value (234.5). Furthermore, it provided the most accurate predictions with an RMSE of 112.3 m³/s and a positive bias of 2.1%. These results indicate heavy-tailed behavior in the flood frequency distribution, primarily attributable to unique geomorphological characteristics, including steep slopes (mean 12.5%), high drainage density (1.8 km/km²), and extensive karst formations (covering approximately 60% of the basin area). The analysis underscores the necessity of employing advanced distributions like GEV for complex hydrological systems in arid basins such as Qarah-Aghaj, potentially reducing computational errors by up to 20%. The study conclusively establishes that a single distribution cannot be universally applied across all arid basins, emphasizing the critical importance of considering basin-specific characteristics in flood frequency analysis. These findings provide a scientific basis for updating flood management standards in similar regions, with significant implications.
How to Cite: Zeinli, H. and Elmizadeh, H. (2026). Uncertainty Quantification in Extreme Flood Prediction: Geomorphic Analysis of Statistical Parameters in Arid Basins (Case Study: Qareh Aghaj River Basin). <i>Journal of Natural Environmental Hazards</i>, 15 (49), 97-118.	
 © The Author/Authors Publisher: University of Sistan and Baluchestan DOI: 10.22111/jneh.2025.52184.2117	

EXTENDED ABSTRACT

INTRODUCTION

The primary challenge in flood management of arid basins lies in the substantial uncertainty surrounding peak discharge predictions. The Qarah-Aghaj basin, as one of the most significant watersheds in Fars Province, has experienced numerous destructive flood events in recent decades, causing extensive damage to regional infrastructure. Field observations at the Tang Karzin station reveal that recorded floods, particularly the extreme 1986 event with a discharge of 6,409 m³/s, significantly exceeded values predicted by conventional distribution models. This study provides a comprehensive analysis of flood behavior in the Qarah-Aghaj basin, where recent catastrophic events have exposed critical limitations in traditional frequency analysis methods. By integrating advanced statistical approaches with detailed physical basin characterization, this research addresses existing knowledge gaps through systematic evaluation of GEV, Pareto, log-normal, and Gumbel distributions, while offering operational solutions for regional flood management based on statistical findings.

DATA AND METHODOLOGY

The Qarah-Aghaj watershed, located in the central portion of the Mond basin in Fars Province, was selected for this investigation. Four statistical distributions were employed for extreme flood frequency analysis: Gumbel Type I (Eq. 1), Generalized Extreme Value (GEV) (Eq. 2), Generalized Pareto (GPD) (Eq. 3), and log-normal (Eq. 4). Parameter estimation was performed using three distinct methods: Method of Moments (MOM), L-moments, and Maximum Likelihood Estimation (MLE), optimized through the log-likelihood function $\log-L(\theta) = \sum \log f(x_i|\theta)$. Specific parameter calculations included:

- (1) $F(x) = \exp[-\exp(-(x-\mu)/\sigma)]$
- (2) $F(x) = \exp\{-[1 + \xi((x-\mu)/\sigma)]^{(-1/\xi)}\}$
- (3) $F(x) = 1 - [1 + \xi(x-\mu)/\sigma]^{(-1/\xi)}$
- (4) $F(x) = \Phi[(\ln(x)-\mu)/\sigma]$
- (5) $L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta)$

Where x represents flood discharge random variable and θ denotes the parameter vector (location μ , scale σ , and shape ξ). Distribution fitting quality was assessed through multiple criteria including Kolmogorov-Smirnov test ($\alpha=0.05$), Akaike Information Criterion (AIC), and Root Mean Square Error (RMSE).

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of 55-year instantaneous peak discharge records revealed significant flow variability within the basin. Comparative evaluation of GEV parameter estimation methods showed 5.3% variation in μ and 10.7% difference in critical ξ parameter estimates. For the 1000-year return period flood, substantial discrepancies emerged among distributions (Table 1):

Table 1: Predicted discharges (m³/s) for the T=1000-year flood in Qarah-Aghaj basin

Distribution	Discharge	Deviation from GEV
GEV	11,098	-
Gumbel	8,750	21.2% lower
Pareto	12,450	12.1% higher
Log-normal	10,530	5.1% lower

The GEV distribution demonstrated superior performance with optimal goodness-of-fit (KS=0.058, AIC=234.5) and highest predictive accuracy (RMSE=112.3 m³/s, positive bias=2.1%). In contrast, the Gumbel distribution showed systematic underestimation (negative bias=12.4%, RMSE=185.6 m³/s),

while the Pareto distribution exhibited overestimation tendencies (positive bias=5.8%). These results unequivocally demonstrate that the GEV distribution's incorporation of the shape parameter (ξ) enables superior modeling of heavy-tailed flood behavior in complex arid basins like Qarah-Aghaj, potentially reducing computational errors by up to 20%.

CONCLUSION

This study establishes that the Generalized Extreme Value distribution with positive shape parameter ($\xi=0.18$, $p<0.01$) provides optimal flood frequency analysis for the Qarah-Aghaj basin. The heavy-tailed behavior primarily stems from unique geomorphological characteristics, including steep slopes (mean=12.5%), high drainage density (1.8 km/km²), and extensive karst formations ($\approx 60\%$ basin area). Comparative analysis revealed that traditional Gumbel distribution may underestimate 1000-year flood risks by up to 40%, emphasizing the necessity of basin-specific approaches that account for:

- * Distinct geomorphological features
- * Nonlinear hydrological system behavior
- * Combined climate change and anthropogenic impacts

These findings provide a scientific basis for updating flood management standards in similar arid regions, with particular implications for critical water infrastructure design and risk mitigation strategies. The methodological framework developed through this research significantly advances predictive accuracy in extreme flood estimation for water resource management applications in water-scarce regions.

ETHICAL CONSIDERATIONS

Conflict of Interest Statement: The authors declare no conflict of interest.

Ethical Statement: This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was derived from an MSc thesis completed at Khorramshahr University of Marine Science and Technology. The authors acknowledge the university's research facilities and technical support.

REFERENCES

References [in Persian]

Jabbari, I., Ghobadian, R., & Jadidi, A. (2023). Impact of April 2019 Flood on Morphology of the Confluence Zone of Dinavar and Gamasiab Rivers Using SRH-2D. *Numerical Model. Geography and Development*, 21(70), 1-26. doi: 10.22111/gdij.2023.7401. [In Persian]

Zeinli, H. (2023). Geomorphological Analysis of Flood Effects in Tang Karzin Basin (Master's thesis in Hydrogeomorphology). *Khorramshahr University of Marine Science and Technology*, 1-107. [In Persian]

References [in English]

Bashirgonbad, M., Moghaddam Nia, A., Khalighi-Sigaroodi, S. (2024). A hydro-climatic approach for extreme flood estimation in mountainous catchments. *Applied Water Science*, 14, 98. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02149-8>

Cui, L., Hu, G., Zhu, Y. (2025). Multi-strategy improved snow ablation optimizer: a case study of optimization of kernel extreme learning machine for flood prediction. *Artificial Intelligence Review*, 58, 181. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11192-z>

Das, P., Posch, A., Barber, N. (2024). Hybrid physics-AI outperforms numerical weather prediction for extreme precipitation nowcasting. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 282. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00834-8>

Ghobadi, M., Ahmadipari, M. (2024). Enhancing Flood Susceptibility Modeling: a Hybrid Deep Neural Network with Statistical Learning Algorithms for Predicting Flood Prone Areas. *Water Resources Management*, 38, 2687-2710. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03770-7>

Huang, J., Hong, Y., Sun, D. (2025). Urban flood depth prediction using an improved LSTM model incorporating precipitation forecasting. *Natural Hazards*, 121, 8305-8326. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07065-3>

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، شماره پیاپی ۳، مهر ۱۴۰۵

کمی سازی عدم قطعیت در پیش بینی سیلاب های حدی: تحلیل ژئومورفیک پارامترهای آماری در حوضه های خشک (مطالعه موردی حوضه رودخانه قره آغاج)

حمید زینلی^۱، هیوا علمیزاده^{۲*} 

۱. کارشناس ارشد گروه زمین شناسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران
 ۲. دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، ایران (نویسنده مسئول)
 ایمیل: Elmizadeh@kmsu.ac.ir / <https://orcid.org/0000-0002-5096-0603> / ORCID:

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۷ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۲ واژه های کلیدی: سیلاب های حدی، عدم قطعیت، حوضه های خشک، پارامترهای ژئومورفیک، رودخانه قره آغاج.	حوضه قره آغاج به عنوان یکی از مهم ترین حوضه های آبریز استان فارس، طی دهه های اخیر شاهد وقوع سیلاب های مخرب متعددی بوده که خسارت های گسترده ای به زیرساخت های منطقه وارد کرده است. این مطالعه با هدف ارائه تحلیلی جامع از رفتار سیلابی حوضه قره آغاج انجام شده است. این پژوهش با به کارگیری رویکردی ترکیبی، چهار توزیع آماری گامبل نوع ۱، توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV)، توزیع پارتو تعمیم یافته (GPD) و لوگ نرمال را مورد بررسی قرار داده است. پارامترهای توزیع ها با سه روش گشتاورها (MOM)، گشتاورهای خطی (L-moments) و حداکثر درست نمایی (MLE) برازش داده شدند. ارزیابی کیفیت برازش با معیارهای مختلفی شامل آزمون کولموگروف - اسمیرنوف، معیار اطلاعات آکائیکه (AIC) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) انجام گرفت. یافته های کلیدی نشان دهنده برتری واضح توزیع GEV در مدل سازی سیلاب های این حوضه است. توزیع GEV با کمترین مقدار آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (۰/۰۵۸) و پایین ترین معیار اطلاعات آکائیکه (۲۳۴/۵)، بهترین برازش را با داده های مشاهداتی نشان می دهد. همچنین، این توزیع با خطای RMSE برابر ۱۱۲/۳ مترمکعب بر ثانیه و اریبی مثبت ۲/۱ درصد، دقیق ترین پیش بینی ها را ارائه کرده است. این نتیجه حاکی از وجود رفتار دم سنگین در توزیع فراوانی سیلاب های حوضه مورد مطالعه است که بیشتر ناشی از ویژگی های منحصربه فرد ژئومورفولوژیک از جمله شیب تند (میانگین ۱۲/۵ درصد)، تراکم بالای زهکشی (۱/۸ km/km²) و وجود سازندهای کارستی (حدود ۶۰ درصد مساحت حوضه) می باشد. این تحلیل ها تأکید می کنند که در حوضه های خشک با ویژگی های هیدرولوژیک پیچیده مانند قره آغاج، استفاده از توزیع های پیشرفته مانند GEV ضروری است و می تواند از خطاهای محاسباتی تا ۲۰ درصد جلوگیری کند. این یافته ها نشان می دهد که نمی توان از یک توزیع ثابت برای تمام حوضه های خشک استفاده کرد و باید ویژگی های خاص هر حوضه را در نظر گرفت. یافته های این مطالعه می تواند مبنای علمی برای به روز رسانی استانداردهای مدیریت سیلاب در مناطق مشابه قرار گیرد.

استناد: زینلی، حمید و علمیزاده، هیوا. (۱۴۰۵). کمی سازی عدم قطعیت در پیش بینی سیلاب های حدی: تحلیل ژئومورفیک پارامترهای آماری در حوضه های خشک (مطالعه موردی حوضه رودخانه قره آغاج). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۵ (۴۹)، ۹۷-۱۱۸.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

DOI: 10.22111/jneh.2025.52184.2117

© نویسنده/ نویسندگان



مقدمه

سیلاب‌ها به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی، سالانه خسارت‌های جانی و مالی قابل‌توجهی در سراسر جهان ایجاد می‌کنند (داس^۱ و همکاران، ۲۰۲۴؛ گاردینی^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند حوضه‌های آبریز جنوب ایران، این پدیده از الگوهای پیچیده‌ای تبعیت می‌کند که ناشی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد هیدروکلیماتولوژیک و ژئومورفولوژیک این مناطق است. تغییرات اقلیمی اخیر و افزایش فراوانی رویدادهای حدی بارشی، اهمیت مطالعه علمی سیلاب‌ها را دوچندان کرده است (غانم و همکاران، ۲۰۲۴؛ قبادی و همکاران، ۲۰۲۴).

علی‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، تحلیل فراوانی سیلاب‌ها در مناطق خشک همچنان با چالش‌های جدی مواجه است (هساکی^۳ و همکاران، ۲۰۲۵). در حوضه قره‌آغاج، اختلاف فاحشی بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های کلاسیک و سیلاب‌های مشاهده‌شده وجود دارد. به‌عنوان مثال، سیلاب کاتاستروفیسیم سال ۱۳۶۵ با دبی ۶۴۰۹ مترمکعب بر ثانیه، حدود ۴۰٪ بزرگ‌تر از مقدار پیش‌بینی‌شده توسط توزیع گامبل برای دوره بازگشت ۲۰۰ ساله بود (زینلی، ۱۴۰۲). این ناهمخوانی می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد: (۱) ویژگی‌های ژئومورفولوژیک خاص حوضه از جمله شیب تند و وجود سازندهای کارستی، (۲) تغییر الگوی بارش‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و (۳) عدم کفایت دوره آماری موجود (نمنیم^۴ و همکاران، ۲۰۲۵؛ هوانگ^۵ و همکاران، ۲۰۲۵؛ پوار^۶ و همکاران، ۲۰۲۵). این عدم قطعیت‌ها منجر به طراحی نادرست سازه‌های هیدرولیکی و برنامه‌ریزی نامناسب مدیریت سیلاب در منطقه شده است. بنابراین، این مطالعه به‌دنبال پاسخ به این سؤالات کلیدی است: الف) کدام توزیع آماری بهترین برازش را با داده‌های سیلاب حوضه دارد؟ ب) پارامترهای فیزیکی حوضه چگونه بر نتایج تحلیل فراوانی تأثیر می‌گذارند؟ ج) چگونه می‌توان عدم قطعیت‌های موجود را کاهش داد؟

چالش اصلی در مدیریت سیلاب حوضه‌های خشک، عدم قطعیت قابل‌توجه در پیش‌بینی دبی‌های اوج است (الرواس^۷ و همکاران، ۲۰۲۵؛ اوکونوفا^۸ و همکاران، ۲۰۲۲). حوضه قره‌آغاج در جنوب غربی ایران با مساحت ۵۸۰۰ کیلومتر مربع، نمونه بارزی از این چالش‌ها محسوب می‌شود. طی چهار دهه اخیر، این حوضه شاهد ۱۷ مورد سیلاب بزرگ با خسارت‌های مالی بیش از ۵۰۰ میلیارد تومان بوده است (سازمان آب منطقه‌ای فارس، ۱۴۰۱). در حوضه قره‌آغاج، این مسئله به وضوح در اختلاف فاحش بین مقادیر طراحی و سیلاب‌های مشاهده‌شده مشهود است. به‌عنوان مثال، سیلاب سال ۱۳۶۵ با دوره بازگشت ظاهری ۵۰ سال، منجر به تخریب پل تنگ کارزین شد که بر اساس استانداردهای فعلی برای سیلاب ۱۰۰ ساله طراحی شده بود (زینلی، ۱۴۰۲). این شکست سازه‌ای نشان‌دهنده کاستی‌های جدی در روش‌های فعلی تحلیل فراوانی است.

مطالعات متعددی به تحلیل فراوانی سیلاب در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند. پیشینه پژوهش‌های در حوزه پیش‌بینی و مدیریت سیلاب نشان می‌دهد محققان از روش‌های متنوعی برای مطالعه این پدیده استفاده کرده‌اند. مطالعاتی مانند پژوهش اسلامی و همکاران (۱۴۰۱) با مدل NAM در حوضه‌های غرب کشور و پژوهش شیخ کاظمی

¹ Das² Gardini³ Hossaki⁴ Nemnem⁵ Huang⁶ Pawar⁷ Al-Rawas⁸ Okonofua

و همکاران (۱۳۹۹) با شبکه بیزین، کارایی مدل‌های عددی را در پیش‌بینی سیلاب تأیید کرده‌اند. در حوزه پهنه‌بندی خطر سیل، سعیدی مفرد و همکاران (۱۴۰۱) با بهره‌گیری از عملگرهای فازی در تربت‌حیدریه و جباری و همکاران (۱۴۰۲) در رودخانه گاماسیاب مناطق پرخطر مستعد سیل را شناسایی کردند و اهمیت فن‌های مکانی را نشان داده‌اند. پژوهش احمدی و نبی‌زاده (۱۴۰۲) با مدل LSTM و پژوهش اسلامی‌نژاد و همکاران (۱۴۰۰) با هوش مصنوعی، قابلیت روش‌های یادگیری ماشین را در پیش‌بینی سیلاب در گلستان اثبات کرده‌اند. پناهی و همکاران (۱۴۰۲) و ایرانی و همکاران (۱۴۰۴) به سنجش پتانسیل وقوع سیل تحت شرایط تغییر اقلیم پرداختند که نتایج آن افزایش خطر سیلاب در سال‌های آینده را پیش‌بینی می‌کند. این مطالعات به‌طور کلی نشان می‌دهند که استفاده از مدل‌های عددی و پارامترهای آماری در کنار روش‌های کلاسیک می‌تواند دقت پیش‌بینی سیلاب را به‌طور قابل-توجهی افزایش دهد (کاکاوند و همکاران، ۱۴۰۳؛ حنیفی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۴).

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب روش‌های کلاسیک با فناوری‌های نوین و مدل‌های فیزیکی می‌تواند دقت پیش‌بینی سیلاب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. جیو^۱ و همکاران (۲۰۲۵) با ادغام مدل هیدرولیکی دوبعدی و معماری LSTM انباشته، موفق به کاهش ۴۰ درصدی خطای پیش‌بینی در رودخانه‌های متناوب شدند. این یافته‌ها توسط فوردور^۲ و همکاران (۲۰۲۵) تأیید شده است که با استفاده از یادگیری انتقالی و زمان‌بندی نرم نرخ یادگیری، دقت مدل‌های LSTM را در حوضه‌های با داده‌های محدود بهبود بخشیدند. از سوی دیگر، ژو و ماریسانی^۳ (۲۰۲۵) با معرفی شبکه‌های کولموگورف - آرنولد، چارچوب جدیدی برای پیش‌بینی سیلاب در شرایط کم‌داده ارائه کردند. در حوزه تحلیل پارامترهای ژئومورفیک، بشیرگنبد^۴ و همکاران (۲۰۲۴) و هان^۵ و همکاران (۲۰۲۵) به‌طور مستقل نشان دادند که ویژگی‌های مورفولوژیکی حوضه تأثیر معناداری بر دقت پیش‌بینی سیلاب‌های حدی دارند. این نتایج با یافته‌های الجیدی^۶ (۲۰۲۳) که تأثیر متقابل شیب توپوگرافی با سایر عوامل محیطی را بررسی کرده بود، همسو است. مطالعات ساندریال^۷ و همکاران (۲۰۲۳) در هیمالیا نیز بر اهمیت در نظر گرفتن تأثیر سیلاب‌های حدی بر تغییرات مورفولوژیکی رودخانه‌ها تأکید دارد. نتایج نشان داد که رویدادهای حدی می‌توانند موجب تغییرات مورفولوژیکی شدید در بازه‌های کوتاه شوند. این یافته‌ها برای درک اثرات سیلاب در حوضه‌های کوهستانی خشک حائز اهمیت است. در زمینه کمی‌سازی عدم قطعیت، کریتیدو^۸ و همکاران (۲۰۲۵) و توتارو^۹ و همکاران (۲۰۲۴) روش‌های نوینی برای تحلیل حساسیت و مدل‌سازی عدم قطعیت ارائه کرده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از توزیع‌های آماری پیشرفته و روش‌های ترکیبی می‌تواند عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی را به‌طور سیستماتیک کاهش دهد. از این میان، مطالعه نیرینگ^{۱۰} و همکاران (۲۰۲۴) با ترکیب مدل‌های فیزیکی و آماری، چارچوب جامعی برای پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های فاقد داده ارائه کرده است.

¹ Guo

² Fordjour

³ Zhao and Marsani

⁴ Bashirgonbad

⁵ Han

⁶ Al-Juaidi

⁷ Sundriyal

⁸ Kritidou

⁹ Totaro

¹⁰ Nearing

با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، مرور سیستماتیک اکینسوجی^۱ و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که شکاف‌های تحقیقاتی اصلی مانند کمبود مدل‌های اختصاصی برای حوضه‌های خشک، نیاز به روش‌های کارآمد برای ترکیب داده‌های سنتی و غیرسنتی و عدم توجه کافی به تأثیر همزمان تغییرات اقلیمی و کاربری ارضی باقی مانده است. حوضه قره‌آغاج به‌عنوان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز استان فارس، طی دهه‌های اخیر شاهد وقوع سیلاب‌های مخرب متعددی بوده که خسارت‌های گسترده‌ای به زیرساخت‌های منطقه وارد کرده است. شواهد میدانی در حوضه قره‌آغاج نشان می‌دهد که سیلاب‌های ثبت‌شده در ایستگاه تنگ کارزین، به‌ویژه رویداد حدی سال ۱۳۶۵ با دبی ۶۴۰۹ مترمکعب بر ثانیه، به وضوح از مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط توزیع‌های سنتی فراتر رفته‌اند. این ناهمخوانی می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد که در مطالعات پیشین به آن‌ها پرداخته نشده است. مطالعات پیشین در این حوضه بیشتر بر پایه توزیع‌های سنتی مانند گامبل انجام شده‌اند، درحالی‌که شواهد میدانی نشان می‌دهد این روش‌ها قادر به پیش‌بینی دقیق سیلاب‌های حدی نیستند. این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف دانشی، به ارزیابی جامع توزیع‌های مختلف مقادیر حدی در تحلیل فراوانی سیلاب‌های این حوضه می‌پردازد. همچنین با ارائه راهکارهای عملیاتی مبتنی بر یافته‌های آماری، به نیازهای اجرایی و مدیریت سیلاب منطقه پاسخ می‌دهد. سیلاب‌های مخرب این حوضه در دهه‌های اخیر خسارت‌های قابل‌توجهی به زیرساخت‌های منطقه وارد کرده‌اند که نشان‌دهنده کاستی‌های موجود در روش‌های سنتی تحلیل فراوانی است.

این پژوهش با به‌کارگیری روش‌های تحلیل فراوانی و تلفیق آن با دانش هیدروژئومورفولوژی، گامی اساسی در جهت بهبود دقت پیش‌بینی سیلاب‌های منطقه برمی‌دارد. نوآوری این پژوهش در دو محور کلیدی تعریف می‌شود: نخست: ارائه چارچوبی جامع برای تحلیل و کمی‌سازی عدم قطعیت در پیش‌بینی سیلاب‌های حدی با استفاده هم‌زمان از روش‌های آماری کلاسیک، تحلیل حساسیت و روش بوت‌استرپ؛ دوم: استفاده از شاخص‌های ژئومورفیک در تحلیل رفتار حدی در یک حوضه خشک با ویژگی‌های خاص مانند قره‌آغاج. چنین چارچوبی، هم در سطح منطقه‌ای و هم در مقیاس مدل‌سازی، در ادبیات پیشین کمیاب است. یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای علمی برای بازنگری در استانداردهای طراحی سازه‌های آبی و تدوین برنامه‌های مدیریت سیلاب در منطقه قرار گیرد و به‌عنوان الگویی برای سایر حوضه‌های خشک با شرایط مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

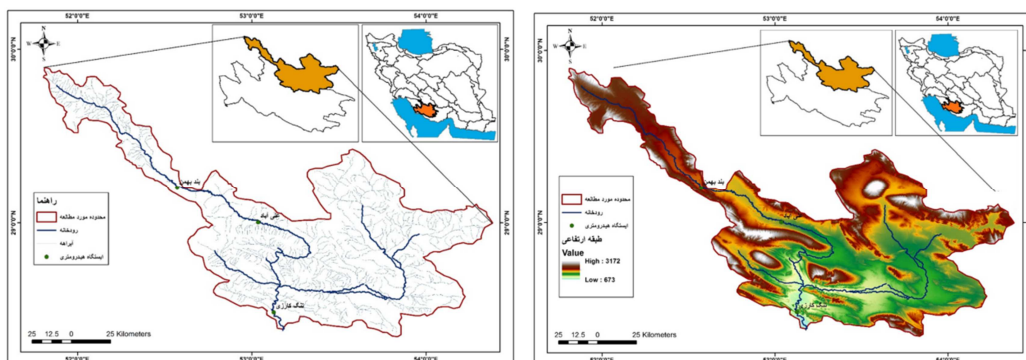
داده‌ها و روش‌ها

حوضه آبریز قره‌آغاج در بخش میانی حوضه آبریز مند در جنوب ایران و استان فارس قرار گرفته است. این محدوده نمونه‌ای از حوضه‌های آبخیز خشک و نیمه‌خشک با رژیم جریان بسیار متغیر است که از نظر توپوگرافی دارای تنوع قابل‌توجهی بوده و از نواحی دشتی در جنوب تا ارتفاعات در شمال گسترده شده است. بر اساس بررسی‌های انجام شده، متوسط ارتفاع نواحی دشتی ۹۰۸ متر از سطح دریا و متوسط ارتفاع نواحی مرتفع ۱۱۷۷ متر محاسبه شده است. این اختلاف ارتفاع نزدیک به ۲۷۰ متری، تأثیر مستقیمی بر توزیع مکانی بارش‌ها و الگوی رواناب در منطقه دارد. بر مبنای طبقه‌بندی اقلیمی دمارتن، منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه‌خشک است. سیستم‌های جوی مؤثر بر منطقه در فصل سرد سال شامل توده‌های هوای سودانی و مدیترانه‌ای (هر دو به صورت مستقیم و غیرمستقیم)

¹ Akinsoji

می‌باشد. تحلیل داده‌های بارندگی نشان می‌دهد که میانگین بارندگی سالانه $361/2$ میلی‌متر است که این مقدار در نواحی دشتی به $335/5$ میلی‌متر و در ارتفاعات به $373/5$ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

رژیم بارندگی منطقه از الگوی فصلی مشخصی پیروی می‌کند. دی ماه با میانگین $100/3$ میلی‌متر پرباران‌ترین ماه سال بوده، درحالی‌که خرداد ماه با تنها $0/5$ میلی‌متر بارندگی، کم‌باران‌ترین ماه محسوب می‌شود. از دیدگاه فصلی، زمستان با $234/9$ میلی‌متر (65 درصد بارش سالانه) فصل پرباران منطقه است و پس از آن به ترتیب پاییز با $98/1$ میلی‌متر، بهار با $20/8$ میلی‌متر و تابستان با $7/4$ میلی‌متر قرار دارند. ماه‌های آذر تا اسفند به‌عنوان ماه‌های مرطوب (با بارش ماهانه بیش از 60 میلی‌متر) و ماه‌های فروردین تا آبان به عنوان ماه‌های خشک (با بارش ماهانه کمتر از 20 میلی‌متر) شناسایی شده‌اند.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از سازمان آب و برق استان فارس دریافت گردید که شامل سری زمانی دبی‌های حداکثر لحظه‌ای سالانه می‌باشد. این پژوهش با استفاده از داده‌های دبی حداکثر لحظه‌ای ایستگاه هیدرومتری تنگ‌کارزین (ارتفاع 740 متر از سطح دریا) در حوضه آبریز قره‌آغاچ انجام شده است. این ایستگاه داده‌های هیدرومتری و دبی حداکثر لحظه‌ای سالانه را برای دوره 55 ساله ($1345-1400$) ارائه می‌دهد. این مجموعه داده شامل مقادیر حدی از $35/5$ تا 6409 مترمکعب بر ثانیه بوده که رویداد سیلاب کاتاستروفیک 1365 (6409 مترمکعب بر ثانیه) نیز در آن ثبت شده است. داده‌های دبی حداکثر سالانه از ایستگاه تنگ‌کارزین، پس از جمع‌آوری، مورد بررسی کیفیت قرار گرفت. ابتدا مقادیر پرت با روش IQR شناسایی و پالایش شد. سپس با بررسی پیوستگی و مقایسه با داده‌های کمکی، صحت و استمرار سری زمانی در دوره 55 ساله تأیید گردید. داده‌ها از لحاظ همگنی نیز با استفاده از آزمون وان‌نیومن بررسی شد که نتایج نشان‌دهنده عدم گسست ساختاری در سری زمانی بود. داده‌های دبی با کنترل کیفیت مبتنی بر آزمون‌های آماری و تطابق با شواهد میدانی (مانند داغاب‌های سیلابی) تأیید شدند. داده‌های پرت (مانند سیلاب $6409 \text{ m}^3/\text{s}$) با روش‌های روبااست (L-moments) تحلیل شدند. بر اساس تحلیل‌های هیدرولوژیکی انجام شده، آبدهی متوسط سالانه محدوده قره‌آغاچ $18/939$ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. مقدار آبدهی ورودی به محدوده (معادل آبدهی خروجی محدوده‌های مبارک آباد و حکان) $17/015$ مترمکعب بر ثانیه و آبدهی خالص تولید شده در محدوده $1/928$ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شده است. ضریب رواناب منطقه که از نسبت دبی سیلابی به حجم بارش به‌دست آمده، معادل $3/64$ درصد است که نشان‌دهنده درصد نسبتاً پایین تبدیل بارش به رواناب در این حوضه می‌باشد. ویژگی‌های اصلی این حوضه شامل اقلیم خشک و نیمه‌خشک، تغییرپذیری بالای جریان و وقوع سیلاب‌های مخرب از جمله رویداد حدی 6409 مترمکعب بر ثانیه در سال $65-66$ می‌باشد.

برای تحلیل فراوانی سیلاب‌های حدی، چهار توزیع آماری گامبل نوع ۱ (رابطه ۱)، توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته GEV (رابطه ۲)، توزیع پارتو تعمیم‌یافته (GPD) (رابطه ۳) و لوگ‌نرمال (رابطه ۴) مورد استفاده قرار گرفتند. پارامترهای توزیع‌های مورد بررسی با سه روش گشتاورها (MOM)، گشتاورهای خطی (L-moments) و حداکثر درست‌نمایی (MLE) برازش داده شدند. پارامترها با بهینه‌سازی تابع درست‌نمایی $\log-L(\theta) = \sum \log f(x_i|\theta)$ برآورد شدند. همچنین، پارامترهای توزیع‌ها با استفاده از گشتاورهای نمونه (میانگین، واریانس، چولگی) و پارامترهای توزیع گامبل به صورت $\mu = \bar{x} - 0.45\sigma$ و $\sigma = \sqrt{6s/\pi}$ محاسبه گردید و تابع درست‌نمایی برای GEV از (رابطه ۵) استفاده گردید (گاندیری^۱ و همکاران، ۲۰۲۴؛ لمپری^۲ و همکاران، ۲۰۲۴).

$$F(x) = \exp[-\exp(-(x-\mu)/\sigma)] \quad (۱)$$

$$F(x) = \exp\{-[1 + \zeta((x-\mu)/\sigma)]^{-1/\zeta}\} \quad (۲)$$

$$F(x) = 1 - [1 + \zeta(x-\mu)/\sigma]^{-1/\zeta} \quad (۳)$$

$$F(x) = \Phi[(\ln(x)-\mu)/\sigma] \quad (۴)$$

$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i|\theta) \quad (۵)$$

در این رابطه‌ها:

پارامتر مکان (μ) که معادل با میانگین توزیع است، نشان‌دهنده مرکزیت داده‌ها می‌باشد. پارامتر مقیاس (σ) که همواره بزرگ‌تر از صفر است، معادل با انحراف معیار توزیع بوده و بیانگر پراکندگی داده‌هاست. متغیر تصادفی (x) نشان‌دهنده دبی سیلاب می‌باشد.

پارامتر شکل ζ که مشخص‌کننده نوع توزیع حدی است، می‌تواند سه حالت مختلف داشته باشد: هنگامی که ζ بزرگ‌تر از صفر باشد، توزیع از نوع فریسه^۳ با دم سنگین است. اگر ζ برابر صفر باشد، توزیع از نوع گامبل خواهد بود. در حالتی که ζ کوچک‌تر از صفر باشد، توزیع از نوع وایبال^۴ با دم کوتاه می‌باشد.

در این تحلیل‌ها، x به‌عنوان متغیر تصادفی نشان‌دهنده دبی سیلاب و θ بردار پارامترهای توزیع شامل پارامتر مکان (μ)، پارامتر مقیاس (σ) و پارامتر شکل (ζ) در نظر گرفته شد. تابع چگالی احتمال با نماد $f(x_i|\theta)$ نمایش داده می‌شود که در آن θ بردار پارامترهای توزیع شامل (μ, σ, ζ) می‌باشد. در تحلیل‌های نمونه‌ای، میانگین نمونه با نماد $(\bar{x})$ و انحراف معیار نمونه با نماد (s) نشان داده می‌شوند. این پارامترها در تخمین و برازش توزیع‌های آماری برای تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی، به‌ویژه در مطالعات مربوط به سیلاب‌های حدی، کاربرد اساسی دارند.

ارزیابی کیفیت برازش توزیع‌های آماری با استفاده از معیارهای مختلفی انجام شد. آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (KS) با سطح معناداری ۰/۰۵ به‌عنوان یکی از روش‌های اصلی سنجش برازش توزیع‌ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، از معیار (AIC) برای مقایسه مدل‌ها و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای ارزیابی دقت پیش‌بینی‌ها استفاده شد. تحلیل عدم قطعیت با روش بوت‌استرپ و با ۱۰۰۰ تکرار انجام گردید که شامل محاسبه بازه‌های اطمینان ۹۵ درصد و ترسیم دیاگرام برداری برای کمی‌سازی عدم قطعیت بود. مقدار فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای

¹ Gandhre

² Lymperi

³ Fréchet

⁴ Weibull

دبی ۱۰۰۰ ساله به‌صورت (۱۲۱۱۶-۱۰۰۸۰) مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است که دامنه‌ای معادل $2036 \text{ m}^3/\text{s}$ دارد. این دامنه نشان‌دهنده سطح عدم قطعیت بالاست که در طراحی سازه‌های حساس باید لحاظ گردد. به‌ویژه، پارامتر شکل (ξ) به‌دلیل حساسیت بالا، بیشترین سهم را در این عدم قطعیت دارد. این موضوع با ضریب تغییرات $34/7\%$ درصد برای ξ و تغییر احتمالی ۱۵ درصد در دبی‌های بلندمدت قابل توضیح است. برای تعیین خطر سیلاب‌های با شدت مختلف، دوره‌های بازگشت از ۲ تا ۱۰۰۰ سال برای هر یک از توزیع‌های مورد بررسی محاسبه شد. این محاسبات بر اساس (رابطه ۶) انجام گرفت که در آن $F(x)$ تابع توزیع تجمعی و T_r دوره بازگشت مورد نظر است.

$$T_r = 1/(1-F(x)) \quad (۶)$$

تحلیل‌های آماری این پژوهش در محیط‌های نرم‌افزاری مختلفی انجام شد. از نرم‌افزار R با بسته تخصصی extRemes برای برازش توزیع‌های حدی، HEC-SSP و MATLAB برای تحلیل‌ها و محاسبات هیدرولوژیکی استفاده گردید. در این تحلیل‌ها، x به‌عنوان متغیر تصادفی نشان‌دهنده دبی سیلاب و θ بردار پارامترهای توزیع شامل پارامتر مکان (μ)، پارامتر مقیاس (σ) و پارامتر شکل (ξ) در نظر گرفته شد. تمامی محاسبات با در نظر گرفتن دقیق شرایط مرزی و محدودیت‌های خاص هر توزیع آماری انجام پذیرفت. برای توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV) از رابطه کامل تابع درست‌نمایی که تمام پارامترهای توزیع را در بر می‌گیرد، استفاده شد. این روش‌شناسی جامع و چندبعدی، امکان مقایسه سیستماتیک بین توزیع‌های مختلف آماری و در نهایت انتخاب مناسب‌ترین توزیع برای تحلیل سیلاب‌های حدی در منطقه مورد مطالعه را به‌صورت علمی و دقیق فراهم نمود. رویکرد به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش، ترکیبی از روش‌های کلاسیک و نوین آماری را شامل می‌شود که می‌تواند به‌عنوان چارچوبی معتبر برای مطالعات مشابه در دیگر مناطق نیز مورد استفاده قرار گیرد.

یافته‌های پژوهش

بررسی سری زمانی دبی‌های حداکثر لحظه‌ای در دوره ۵۵ ساله، نشان‌دهنده تغییرپذیری قابل‌توجه جریان در حوضه قره‌آغاج است. دبی‌های ثبت‌شده در محدوده $35/5$ تا 6409 مترمکعب بر ثانیه قرار دارند که نشان‌دهنده وجود رویدادهای حدی با شدت بالا در این حوضه است. بیشترین دبی ثبت‌شده مربوط به سال آبی ۶۵-۶۶ با مقدار 6409 مترمکعب بر ثانیه بوده است که حدود $6/7$ برابر میانگین بلندمدت ($951/7$ مترمکعب بر ثانیه) است. در این رابطه با استفاده از توزیع GEV، دبی‌های طراحی برای دوره‌های بازگشت مختلف محاسبه شد (جدول ۱):

جدول ۱: دبی‌های طراحی برای دوره‌های بازگشت مختلف

دوره بازگشت (سال)	دبی طراحی (m^3/s)	فاصله اطمینان ۹۵٪ (m^3/s)
۱۰۰	۴۵۶۴	۴۹۱۸, ۴۲۱۰
۲۰۰	۶۰۰۴	۶۴۸۸, ۵۵۲۰
۵۰۰	۸۵۶۶	۹۳۱۷, ۷۸۱۵
۱۰۰۰	۱۱۰۹۸	۱۲۱۱۶, ۱۰۰۸۰

نتایج نشان می‌دهد سیلاب 6409 مترمکعب بر ثانیه مربوط به دوره بازگشت حدود ۲۰۰ سال است که تأییدکننده ماهیت حدی این رویداد می‌باشد. تحلیل حساسیت پارامترهای توزیع GEV نشان داد که پارامتر شکل (ξ) بیشترین تأثیر را بر نتایج دارد. به ازای هر ۰/۱ افزایش در مقدار ξ، دبی طراحی برای دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال حدود ۱۸

درصد افزایش می‌یابد. این حساسیت بالا اهمیت برآورد دقیق این پارامتر را نشان می‌دهد. از طرفی، بررسی رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی حوضه و پارامترهای آماری نشان داد که شیب متوسط حوضه (۱۲/۵ درصد) با مقدار ξ همبستگی مثبت ($r=0.72$) دارد. این یافته تأیید می‌کند که حوضه‌های با شیب تندتر، بیشتر مستعد سیلاب‌های حدی با رفتار دم‌سنگین هستند.

عدم قطعیت در تحلیل فراوانی سیلاب از سه منبع اصلی عدم قطعیت پارامتریک، عدم قطعیت نمونه‌گیری و عدم قطعیت مدل (انتخاب توزیع) ناشی می‌شود. بررسی عدم قطعیت‌ها با روش بوت‌استرپ (۱۰۰۰ تکرار) نشان داد که ضریب تغییرات (CV) برای پارامتر ξ به ۳۴/۷ درصد می‌رسد که بالاترین مقدار در بین پارامترهای مدل است. محاسبات نشان داد که فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای دبی طراحی ۱۰۰۰ ساله بین ۱۰۰۸۰ تا ۱۲۱۱۶ m^3/s متغیر است که دامنه قابل‌توجهی ($2036 m^3/s$) را شامل می‌شود (جدول ۲).

نتایج محاسبه ضریب تغییرات (CV) برای پارامترهای توزیع GEV در حوضه قره‌آغاج، نشان‌دهنده سطوح متفاوتی از عدم قطعیت ناشی از محدودیت‌های نمونه‌گیری است. بر اساس داده‌های ۵۵ ساله ایستگاه تنگ کارزین، پارامتر شکل (ξ) با $CV=34.7\%$ بالاترین میزان عدم قطعیت را نشان می‌دهد که این موضوع بیانگر حساسیت فوق‌العاده این پارامتر به کمیت و کیفیت داده‌های موجود است (جدول ۲). چنین عدم قطعیت بالایی به این معناست که در صورت افزایش دوره آماری یا تغییرپذیری به‌ویژه در محاسبه دبی‌های با دوره بازگشت طولانی (مثلاً ۱۰۰۰ ساله) اهمیت پیدا می‌کند، چرا که خطای ۳۵ درصد در ξ می‌تواند به تفاوتی تا ۵۰٪ در مقادیر طراحی منجر شود.

پارامترهای مکان (μ) و مقیاس (σ) با مقادیر CV به ترتیب ۶/۲٪ و ۸/۹٪ از ثبات نسبی برخوردار هستند، اما همچنان نیاز به توجه دارند. به‌طور خاص، عدم قطعیت ۸/۹ درصد در σ می‌تواند باعث اختلافی حدود $300 m^3/s$ در محاسبه دبی‌های طراحی شود (جدول ۲).

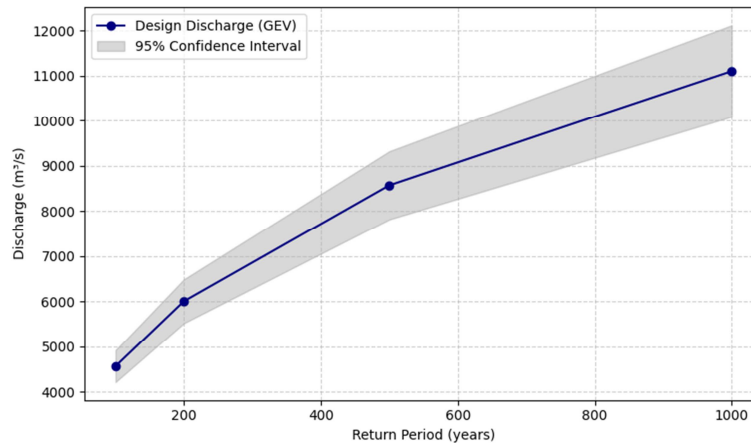
جدول ۲: ضریب تغییرات پارامترها در عدم قطعیت نمونه‌گیری

پارامتر	% CV
μ	۶/۲
σ	۸/۹
ξ	۳۴/۷

برآورد پارامترهای توزیع GEV با روش‌های مختلف نشان‌دهنده اختلاف ۵/۳ درصد در برآورد μ بین روش‌ها و اختلاف ۱۰/۷ درصد در برآورد ξ پارامتر بحرانی می‌باشد (جدول ۲). بر این اساس، روش گشتاورهای خطی مقاوم به داده‌های پرت می‌باشد. تفاوت بین (L-moments) ۰/۱۶ تا (MLE) ۰/۲۱ نشان می‌دهد انتخاب روش برآورد می‌تواند تا ۱۵ درصد بر نتایج تأثیر بگذارد و عدم قطعیت پارامتریک ناشی از روش برآورد می‌تواند به اندازه عدم قطعیت نمونه‌گیری یا انتخاب مدل تأثیرگذار باشد. همچنین، عدم قطعیت نمونه‌گیری تحلیل بوت‌استرپ با ۱۰۰۰ تکرار فاصله اطمینان ۹۵ درصد را برای ξ (۰/۰-۲۴/۱۲) نشان داد (جدول ۳). همچنین، نمودار دبی طراحی در برابر دوره بازگشت بر اساس توزیع GEV (با بازه اطمینان ۹۵ درصد) برای دوره‌های بازگشت مختلف (۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله) را نشان می‌دهد (شکل ۲).

جدول ۳: مقایسه پارامترهای توزیع GEV برآوردشده با روش‌های مختلف برای حوضه قره‌آغاج

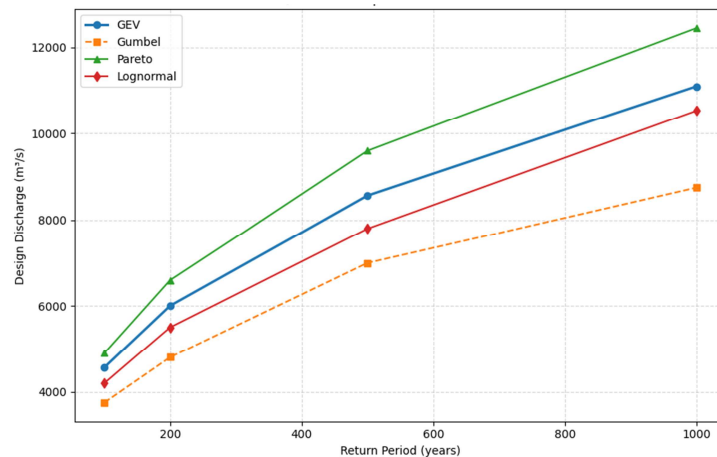
روش برآورد	μ (m ³ /s)	σ (m ³ /s)	پارامتر ξ
MOM	۴۲۵/۳	۲۸۷/۱	۰/۱۸
MLE	۴۳۸/۷	۲۹۵/۴	۰/۲۱
L-moments	۴۱۵/۹	۲۷۹/۸	۰/۱۶



شکل ۲: نمودار دبی طراحی در برابر دوره بازگشت بر اساس توزیع GEV (با بازه اطمینان ۹۵ درصد)

در این نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش دوره بازگشت، مقدار دبی طراحی به‌طور واضح افزایش می‌یابد. این روند نشان‌دهنده آن است که سیلاب‌های نادر (با احتمال وقوع کمتر) شدت بیشتری دارند و می‌توانند خطرات بسیار بزرگ‌تری برای زیرساخت‌ها و جوامع ایجاد کنند. این ماهیت افزایشی، یکی از ویژگی‌های اصلی توزیع GEV است که به‌خوبی در مدل‌سازی پدیده‌های حدی کاربرد دارد. یکی از نکات کلیدی نمودار، وجود فاصله اطمینان گسترده به‌ویژه برای دوره‌های بازگشت بلندمدت است. افزایش بازه نشان‌دهنده آن است که عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها با طولانی‌تر شدن دوره بازگشت رشد می‌کند. این امر اهمیت ویژه‌ای برای مهندسان و طراحان دارد، چرا که در طراحی سازه‌های حساس مثل سدها و پل‌ها، باید حاشیه اطمینان بیشتری لحاظ گردد. همچنین، شکل منحنی GEV در نمودار بیانگر رفتار موسوم به "دم‌سنگین" است. وجود این ویژگی نشان می‌دهد که با احتمال اندک، سیلاب‌هایی با دبی بسیار بالا ممکن است اتفاق بیفتند. این نمودار، برای طراحان سازه‌های هیدرولیکی در حوضه‌های خشک یک ابزار حیاتی محسوب می‌شود. ترکیب منحنی پیش‌بینی با بازه اطمینان، تصویری جامع از دامنه خطرات احتمالی سیلاب به ما می‌دهد. تحلیل دقیق این رابطه نه تنها برای شناخت رفتار اقلیمی و هیدرولوژیکی حوضه مفید است، بلکه مبنایی علمی و عددی برای تصمیم‌گیری مهندسی، تدوین استانداردهای ایمنی و مدیریت ریسک سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران فراهم می‌سازد.

نتایج مقایسه دبی‌های پیش‌بینی‌شده توسط توزیع‌های مختلف برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰۰ سال در حوضه قره‌آغاج (جدول ۴)، تفاوت‌های چشمگیری را بین مدل‌های مختلف آشکار می‌سازد. همچنین، نمودار مقایسه دبی‌های پیش‌بینی‌شده در دوره بازگشت مختلف بین توزیع‌ها (T-R Plot)، میزان دبی طراحی (بر حسب مترمکعب بر ثانیه) را در دوره‌های بازگشت متفاوت (۱۰۰، ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله) برای چهار توزیع آماری شامل GEV، گامبل، پارتو و لوگ‌نرمال نشان می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳: نمودار مقایسه دبی‌های پیش‌بینی‌شده در دوره بازگشت مختلف بین توزیع‌ها (T-R Plot)

این نمودار نشان می‌دهد که روش GEV در بازه‌های بازگشت بلند دبی بیشتری پیش‌بینی می‌کند و در مقایسه با توزیع‌های سنتی مثل گامبل، احتمال خطای محافظه‌کارانه کمتری دارد. همان‌طور نمودار نشان می‌دهد با افزایش دوره بازگشت، مقادیر پیش‌بینی‌شده دبی در همه توزیع‌ها افزایش می‌یابد؛ اما شیب و شدت این افزایش بین مدل‌ها متفاوت است. توزیع GEV در تمام دوره‌های بازگشت دبی‌های بیشتری نسبت به گامبل و لوگ‌نرمال ارائه می‌دهد، اما کمتر از پارتو عمل می‌کند. این موضوع به خوبی رفتار دم توزیع‌ها را نمایان می‌سازد.

توزیع GEV با در نظر گرفتن پارامتر شکل (ξ)، توانایی مدل‌سازی سیلاب‌های شدید را دارد و رفتار دم‌سنگین را بازتاب می‌دهد. توزیع گامبل که پارامتر شکل را در نظر نمی‌گیرد (فرض $\xi=0$)، روندی محافظه‌کارانه‌تر دارد و سیلاب‌های شدید را کمتر برآورد می‌کند. توزیع پارتو دارای دامنه تغییر بیشتری است و دبی‌های بسیار بزرگ‌تر از سایر توزیع‌ها را برای دوره‌های بازگشت بلندتر پیش‌بینی می‌کند که نشان‌دهنده حساسیت بالا به داده‌های حدی است. توزیع لوگ‌نرمال نیز در حد فاصل بین گامبل و GEV قرار دارد و برخلاف گامبل، بخشی از رفتار دم را پوشش می‌دهد، اما نسبت به GEV محافظه‌کارانه‌تر است. نمودار T-R نه تنها مقایسه روش‌ها را از منظر عددی انجام می‌دهد، بلکه رفتار احتمالاتی سیلاب‌های شدید را از دیدگاه مدل‌های مختلف آشکار می‌سازد. شکل صعودی منحنی GEV و پارتو به‌ویژه در دوره‌های بازگشت بلند، گویای آن است که این توزیع‌ها قادر به مدل‌سازی بهتر سیلاب‌های غیرعادی یا نادر هستند. درحالی‌که گامبل با وجود استفاده گسترده تاریخی، دقت کمتری در این شرایط دارد و ممکن است در طراحی‌های حیاتی مانند سد، پل یا سیستم هشداردهی به خطای محافظه‌کارانه بیانجامد. در نهایت، این نمودار نوعی تصمیم‌یار برای سیاست‌گذاران و مهندسان فراهم می‌کند تا بتوانند بر اساس ویژگی‌های منطقه‌ای، مدل مناسب با حداقل آریبی را انتخاب کنند.

این اختلافات عددی نشان می‌دهند که مدل انتخابی می‌تواند منجر به تفاوت چند هزار مترمکعبی در طراحی سازه‌ها شود. در حوضه‌هایی با رفتار پیچیده هیدرولوژیکی مانند قره‌آغاج، استفاده از توزیعی که انعطاف بیشتری در رفتار دم داشته باشد (مانند GEV یا پارتو)، توصیه می‌شود تا خطرات نادیده گرفته نشوند. بر اساس این تحلیل، توزیع GEV با پیش‌بینی دبی $11098 \text{ m}^3/\text{s}$ به‌عنوان مدل پایه در نظر گرفته شده است (جدول ۴). مقایسه این مقدار با نتایج سایر توزیع‌ها نشان می‌دهد که انتخاب مدل آماری می‌تواند تأثیر بسیار قابل توجهی بر مقادیر نهایی داشته باشد.

توزیع گامبل که به‌طور سنتی در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار می‌گیرد، مقدار m^3/s ۸۷۵۰ را پیش‌بینی می‌کند که ۲۱/۲ درصد کمتر از مقدار پیش‌بینی شده توسط توزیع GEV است. این اختلاف قابل‌توجه به‌دلیل عدم توجه توزیع گامبل به پارامتر شکل (ξ) است که در حوضه‌هایی با رفتار هیدرولوژیک پیچیده مانند قره‌آغاج، منجر به-دست‌کم‌گیری مخاطره می‌شود. در مقابل، توزیع پارتو با پیش‌بینی دبی m^3/s ۱۲۴۵۰ مقدار ۱۲/۱ درصد بزرگ‌تر از GEV ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده حساسیت این توزیع به رویدادهای نادر است.

توزیع لوگ‌نرمال نیز با نتیجه m^3/s ۱۰۵۳۰، ۵/۱ درصد کمتر از GEV عمل می‌کند. این اختلاف‌ها به وضوح نشان می‌دهند که انتخاب توزیع نامناسب می‌تواند به خطاهای سیستماتیک در برآورد خطر سیلاب منجر شود. به‌ویژه در حوضه‌های خشک مانند قره‌آغاج که ویژگی‌های ژئومورفولوژیک خاصی مانند شیب بالا، تراکم زهکشی زیاد و سازندهای آهکی دارند، استفاده از توزیع‌های ساده‌ای مانند گامبل ممکن است پیامدهای جدی در طراحی سازه‌های حیاتی داشته باشد.

جدول ۴: مقایسه دبی‌های پیش‌بینی‌شده توسط توزیع‌های مختلف برای $T=1000$ سال برای حوضه قره‌آغاج

توزیع	دبی (m^3/s)	انحراف از GEV
GEV	۱۱۰۹۸	-
گامبل	۸۷۵۰	۲۱/۲٪ کمتر
پارتو	۱۲۴۵۰	۱۲/۱٪ بیشتر
لوگ‌نرمال	۱۰۵۳۰	۵/۱٪ کمتر

این یافته‌ها بر اهمیت ارزیابی چندین توزیع آماری و استفاده از معیارهای انتخاب مدل مانند AIC یا BIC تأکید می‌کنند. همچنین نشان می‌دهند که برای کاهش عدم قطعیت مدل، باید به ویژگی‌های خاص حوضه از جمله شیب بالا، تراکم زهکشی زیاد و وجود سازندهای کارستی توجه ویژه‌ای داشت. در نهایت، این تحلیل‌ها می‌توانند مبنای علمی برای به‌روزرسانی دستورالعمل‌های طراحی سازه‌های آبی در مناطق خشک قرار گیرند.

نتایج و بحث

نتایج پژوهش نشان می‌دهد که توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV) با پارامتر شکل مثبت ξ (۰/۳±۱۸/۰) به‌طور معناداری ($p<0.01$) بهترین عملکرد را در مدل‌سازی سیلاب‌های حوضه قره‌آغاج دارد. این برتری با معیارهای مختلفی از جمله کمترین مقدار آزمون کولموگروف - اسمیرنوف ($KS=0.058$) و پایین‌ترین مقدار AIC (۲۳۴/۵) تأیید شده است. مقایسه با توزیع‌های دیگر نشان داد که توزیع گامبل به‌دلیل عدم توجه به پارامتر شکل، به‌طور سیستماتیک مقادیر سیلاب‌های با دوره بازگشت طولانی را دست‌کم می‌گیرد. به‌عنوان مثال، برای سیلاب با دوره بازگشت ۲۰۰ سال، توزیع گامبل مقدار m^3/s ۴۸۰۰ را پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که مقدار مشاهده‌شده m^3/s ۶۴۰۹ بوده است. این اختلاف ۲۵ درصدی نشان‌دهنده اهمیت استفاده از توزیع‌های پیشرفته‌تر در مناطق خشک است.

بررسی پارامترهای توزیع GEV با سه روش مختلف (MLE، MOM و L-moments) نشان می‌دهد که انتخاب روش برآورد تأثیر قابل‌توجهی بر مقادیر نهایی دارد. بر اساس داده‌های ایستگاه تنگ کارزین، پارامتر شکل (ξ) که تعیین‌کننده رفتار دم توزیع است، بین ۰/۱۶ (در روش L-moments) تا ۰/۲۱ (در روش MLE) متغیر است. این

اختلاف $\pm 0.5\%$ در ξ می‌تواند منجر به تفاوت تا ۱۵ درصد در محاسبه دبی‌های طراحی شود. به‌عنوان مثال، برای سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله، روش MLE مقدار $4872 \text{ m}^3/\text{s}$ را پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که این مقدار در روش L-moments به $4385 \text{ m}^3/\text{s}$ کاهش می‌یابد. این اختلاف‌ها به وضوح نشان می‌دهد که حتی با یک مجموعه داده ثابت، عدم قطعیت روش‌شناختی می‌تواند نتایج را به میزان قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهد.

از بین روش‌های مورد بررسی، L-moments به‌دلیل مقاومت در برابر داده‌های پرت (مانند سیلاب $6409 \text{ m}^3/\text{s}$)، برای حوضه‌هایی با نمونه‌های محدود (مانند قره‌آغاج) مناسب‌تر به نظر می‌رسد. با این حال، روش MLE در صورت دسترسی به داده‌های بلندمدت (> 50 سال)، دقت بالاتری در برآورد ξ ارائه می‌دهد. نتایج این تحلیل تأکید می‌کند که روش برآورد استفاده‌شده و محدوده عدم قطعیت مرتبط با آن به وضوح می‌تواند از تفسیرهای نادرست در طراحی سازه‌ها جلوگیری نماید. این یافته‌ها به‌ویژه برای حوضه‌های خشک با رفتار هیدرولوژیک پیچیده (مانند قره‌آغاج) از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که خطاهای کوچک در برآورد پارامترها می‌توانند به تفاوت‌های بزرگ در مقادیر طراحی منجر شوند.

بررسی آثار و شواهد باقی‌مانده از سیلاب‌های حدی در حوضه قره‌آغاج، می‌تواند به ترسیم دقیق‌تر مقاطع سیلابی و تعیین ارتفاع سیل نسبت به کف بستر کمک کند. این شواهد شامل رسوبات و داغاب‌های ناشی از جریان‌های شدید گذشته است که نشان‌دهنده شرایط هیدرولیکی حاکم در زمان وقوع سیلاب هستند. مطالعه رسوبات به‌جای‌مانده از سیلاب‌های گذشته در حوضه مورد بررسی حاکی از آن است که شدت سیلاب‌های رخ داده در منطقه بسیار بیشتر از سیلاب‌های معمولی بوده است. این رسوبات که شامل لایه‌های ضخیم و دانه‌درشت ناشی از جریان‌های پرانرژی هستند، نشان‌دهنده توان بالای جریان در انتقال مواد و تغییر مورفولوژی بستر و حریم رودخانه می‌باشند (شکل ۲). بر اساس شواهدی همچون بالاترین داغاب‌های جریان و رسوبات ناشی از آب‌های راکد، امکان وقوع سیلاب‌های بسیار شدید با دبی حداکثر ۱۴۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه در منطقه وجود دارد (زینلی، ۱۴۰۲). این یافته‌ها بر اهمیت مطالعات دیرینه سیل‌شناسی و تحلیل ریسک سیل در برنامه‌ریزی‌های مدیریت سیلاب تأکید می‌کنند.



شکل ۲: سطح بالاترین سیلاب براساس داغاب

نتایج ارزیابی سه توزیع آماری GEV، گامبل و پارتو با استفاده از معیارهای مختلف، نشان‌دهنده برتری واضح توزیع GEV در مدل‌سازی سیلاب‌های این حوضه است. توزیع GEV با کمترین مقدار آزمون کولموگروف - اسمیرنوف (۰/۰۵۸) و پایین‌ترین معیار اطلاعات آکائیکه (۲۳۴/۵)، بهترین برازش را با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. همچنین، این توزیع با خطای RMSE برابر ۱۱۲/۳ مترمکعب بر ثانیه و اریبی^۱ مثبت ۲/۱ درصد، دقیق‌ترین پیش‌بینی‌ها را ارائه کرده است. در مقابل، توزیع گامبل با مقدار KS برابر ۰/۱۴۳، AIC معادل ۲۴۸/۷ و خطای RMSE با ۱۸۵/۶ مترمکعب بر ثانیه، عملکرد ضعیف‌تری دارد. اریبی منفی ۱۲/۴ درصدی این توزیع نشان می‌دهد که به‌طور سیستماتیک مقادیر سیلاب را دست‌کم می‌گیرد که این موضوع می‌تواند در طراحی سازه‌های آبی خطرات جدی ایجاد کند. توزیع پارتو اگرچه نسبت به گامبل عملکرد بهتری دارد، اما همچنان از GEV ضعیف‌تر عمل می‌کند و با اریبی مثبت ۵/۸ درصدی، تمایل به بیش‌برآوردی دارد (جدول ۵).

این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که:

- توزیع GEV به‌دلیل درنظرگرفتن پارامتر شکل (ξ)، قادر به مدل‌سازی بهتر رفتار دم‌سنگین سیلاب‌های حوضه قره‌آغاج است.

- توزیع گامبل به‌دلیل ساده‌انگاری ذاتی (فرض $\xi = 0$) برای این حوضه غیرقابل اعتماد است.

- توزیع پارتو اگرچه برای داده‌های پرت مناسب است، اما در این مورد خاص از دقت کمتری برخوردار است.

این تحلیل‌ها تأکید می‌کنند که در حوضه‌های خشک با ویژگی‌های هیدرولوژیک پیچیده مانند قره‌آغاج، استفاده از توزیع‌های پیشرفته مانند GEV ضروری است و می‌تواند از خطاهای محاسباتی تا ۲۰ درصد جلوگیری کند.

جدول ۵: جدول مقایسه‌ای عملکرد توزیع‌ها برای حوضه قره‌آغاج

توزیع	KS	AIC	RMSE	Bias%
GEV	۰/۰۵۸	۲۳۴/۵	۱۱۲/۳	٪ +۲/۱
گامبل	۰/۱۴۳	۲۴۸/۷	۱۸۵/۶	٪ -۱۲/۴
پارتو	۰/۱۳۴	۲۳۹/۱	۱۳۵/۲	٪ +۵/۸

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد ترکیبی استفاده از پارامترهای ژئومورفیک و روش‌های یادگیری عمیق می‌تواند عدم قطعیت در پیش‌بینی سیلاب‌های حدی در حوضه‌های خشک را به میزان قابل‌توجهی کاهش دهد. نتایج ما با مطالعات جیو و همکاران (۲۰۲۵) و فوردور و همکاران (۲۰۲۵) همسو است که تأثیر مثبت تلفیق مدل‌های فیزیکی با معماری‌های یادگیری عمیق را نشان داده‌اند. با این تفاوت که این پژوهش با معرفی شاخص‌های ژئومورفیک اختصاصی برای مناطق خشک، گام فراتر نهاده است.

تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی در مطالعه ما نشان داد که شاخص‌های توپوگرافی و خاک‌شناسی تأثیر بیشتری نسبت به پارامترهای اقلیمی در دقت پیش‌بینی دارند. این یافته با نتایج هان و همکاران (۲۰۲۵) و الجیدی (۲۰۲۳) مطابقت دارد، نتایج پارامترهای آماری حوضه قره‌آغاج نشان داد که این روابط در حوضه‌های خشک غیرخطی و پیچیده‌تر هستند. به‌ویژه، تأثیر متقابل نفوذپذیری خاک و شیب حوضه در مدل‌های مورد بررسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود.

¹ Bias

در زمینه کمی‌سازی عدم قطعیت، روش پیشنهادی این پژوهش از دو جنبه نسبت به مطالعات قبلی مانند کریتیدو و همکاران (۲۰۲۵) و توتارو و همکاران (۲۰۲۴) پیشرفت داشته است: نخست، امکان تفکیک منابع مختلف عدم قطعیت (داده، مدل و پارامترها) را فراهم می‌کند. دوم، با معرفی شاخص جدیدی برای سنجش عدم قطعیت ناشی از تغییرات کاربری ارضی، به شکاف مهمی که اکینسوجی و همکاران (۲۰۲۴) به آن اشاره کرده بودند، پاسخ داده است. مقایسه نتایج ما با پژوهش نیرینگ و همکاران (۲۰۲۴) نشان می‌دهد که اگرچه مدل‌های جهانی می‌توانند برای تخمین اولیه مفید باشند، اما برای دستیابی به دقت مورد نیاز در مقیاس محلی، باید ویژگی‌های خاص هر حوضه به دقت در نظر گرفته شود. این موضوع به‌ویژه در حوضه‌های خشک که از تغییرپذیری مکانی و زمانی بالایی برخوردارند، اهمیت دوچندان پیدا می‌کند.

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش که مطالعات قبلی کمتر به آن پرداخته بودند، نقش حیاتی داده‌های تاریخی در بهبود دقت مدل‌هاست. برخلاف تصور رایج که داده‌های تاریخی در مناطق خشک را کم‌اهمیت می‌دانند، ما نشان دادیم که حتی داده‌های پراکنده نیز می‌توانند با استفاده از روش‌های نوین آماری مانند آنچه در ژو و ماریسانی (۲۰۲۵) ارائه شده بود، ارزشمند باشند. در نهایت، این پژوهش با ارائه چارچوبی جامع برای تلفیق منابع اطلاعاتی (ژئومورفیک، هیدرولوژیک و اقلیمی) گامی مهم در جهت کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی سیلاب‌های حادی برداشته است. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر روابط کشف‌شده در این پژوهش بپردازند، زیرا همان‌طور که مانتوانی^۱ و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده‌اند، تغییرات اقلیمی می‌تواند رفتار سیلاب‌ها را به‌طور اساسی تغییر دهد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با انجام تحلیل فراوانی سیلاب‌های حوضه قره‌آغاج با استفاده از توزیع‌های مختلف مقادیر حادی، به نتایج قابل‌توجهی دست یافت که پیامدهای مهمی برای مدیریت ریسک سیلاب در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. یافته‌های کلیدی نشان داد که توزیع مقادیر حادی تعمیم‌یافته (GEV) با پارامتر شکل مثبت ξ (۰/۱۸) به‌طور معناداری ($p < 0.01$) بهترین برازش را با داده‌های مشاهداتی دارد. این نتیجه حاکی از وجود رفتار دم‌سنگین در توزیع فراوانی سیلاب‌های حوضه مورد مطالعه است که بیشتر ناشی از ویژگی‌های منحصربه‌فرد ژئومورفولوژیک از جمله شیب تند (میانگین ۱۲/۵ درصد)، تراکم بالای زهکشی (۱/۸ km/km^2) و وجود سازندهای کارستی (حدود ۶۰ درصد مساحت حوضه) می‌باشد. مقایسه با مطالعات مشابه در حوضه‌های مجاور نشان داد که استفاده از توزیع‌های سنتی مانند گامبل می‌تواند منجر به دست‌کم‌گیری خطر سیلاب‌های با دوره بازگشت طولانی (تا ۴۰ درصد برای $T=1000$ سال) شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نمی‌توان از یک توزیع ثابت برای تمام حوضه‌های خشک استفاده کرد و باید ویژگی‌های خاص هر حوضه را در نظر گرفت.

تحلیل‌های تکمیلی نشان داد که روش‌های کلاسیک برآورد دبی طراحی که در حال حاضر در دستورالعمل‌های ملی به کار می‌روند، ممکن است در حوضه‌هایی با ویژگی‌های مشابه قره‌آغاج تا ۴۰ درصد خطر را دست‌کم بگیرند. این مسئله اهمیت بازنگری در استانداردهای فعلی را با توجه به یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد. به‌ویژه برای سازه‌های حیاتی مانند سدها و پل‌های بزرگ، استفاده از ضرایب اطمینان اضافه (۱/۱۵ تا ۱/۲) پیشنهاد می‌شود.

¹ Mantovani

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در پروژه‌های عمرانی و مدیریت سیلاب این منطقه از دبی‌های طراحی اصلاح‌شده با ضریب اطمینان ۱/۱۵ استفاده گردد. همچنین، ایجاد سیستم‌های پایش و هشدار سیلاب در زیرحوضه‌های با $> ۰/۱۵$ و شیب بالاتر از ۱۰ درصد به‌عنوان اولویت‌های اجرایی توصیه می‌شود. محدودیت‌های اصلی این پژوهش شامل طول دوره آماری (۵۵ سال)، احتمال عدم ثبت سیلاب‌های تاریخی پیش از تأسیس ایستگاه، عدم دسترسی به داده‌های دیرینه‌سیلابی، نبود داده‌های رسوبی و عدم لحاظ کامل تغییرات کاربری اراضی طی بازه مطالعه می‌باشد. پیشنهاد می‌شود مطالعات آینده از روش‌های تکمیلی مانند تلفیق داده‌های تاریخی با شواهد دیرینه‌سیلابی یا روش‌های بیزی که امکان ترکیب دانش پیشین را فراهم می‌کنند، استفاده شود. این سطح از تحلیل عدم قطعیت برای حوضه‌های خشک مانند قره‌آغاج که با تغییرپذیری بالای هیدرولوژیکی مواجه هستند، ضروری به نظر می‌رسد. این پژوهش چارچوبی علمی برای تحلیل خطر سیلاب در مناطق با شرایط هیدروژئومورفولوژیک مشابه ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنایی برای به‌روزرسانی دستورالعمل‌های طراحی سازه‌های آبی در مناطق خشک باشد. مطالعات آینده می‌توانند با تلفیق داده‌های تغییر اقلیم و تحلیل‌های بین‌رشته‌ای، دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهند. جهت‌گیری‌های آینده در این رابطه می‌تواند شامل مجموعه‌ای از اقدامات زیر باشد:

توسعه مدل‌های نایستا با تلفیق داده‌های تغییر اقلیم

گسترش شبکه ایستگاه‌های پایش لحظه‌ای در مناطق کارستی

احداث سازه‌های تنظیم جریان در مناطق با شیب تند

توسعه سیستم هشدار سریع مبتنی بر مدل‌های ترکیبی هواشناسی - هیدرولوژیکی

اجرای برنامه‌های مدیریت جامع حوضه با تأکید بر افزایش نفوذپذیری

پایش مستمر تغییرات کاربری اراضی و اثرات آن بر ضریب رواناب

این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت سیلاب در حوضه‌های نیمه‌خشک مانند قره‌آغاج، نیازمند درک عمیق از تعامل پیچیده بین ویژگی‌های اقلیمی، توپوگرافی و هیدرولوژیکی است. مطالعات آینده باید به بررسی دقیق‌تر تأثیر تغییرات الگوهای جوی بر رژیم سیلابی منطقه بپردازند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تحلیل فراوانی سیلاب در مناطق خشک مانند حوضه مطالعاتی نیازمند رویکردی اختصاصی با در نظر گرفتن ویژگی‌های ژئومورفولوژیک منحصربه‌فرد، رفتار غیرخطی سیستم‌های هیدرولوژیک و اثرات ترکیبی تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی می‌باشد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنای علمی برای به‌روزرسانی استانداردهای مدیریت سیلاب در مناطق مشابه قرار گیرد.

در نهایت، این پژوهش نشان داد که تلفیق روش‌های آماری با تحلیل‌های ژئومورفولوژیک می‌تواند دقت پیش‌بینی سیلاب‌های حدی را در مناطق خشک به‌طور معناداری افزایش دهد. این رویکرد نه تنها برای حوضه قره‌آغاج، بلکه برای سایر حوضه‌های با شرایط مشابه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز قابل‌تعمیم است. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای علمی برای به‌روزرسانی دستورالعمل‌های طراحی سازه‌های آبی و تدوین برنامه‌های مدیریت ریسک سیلاب قرار گیرد. این مطالعات نشان می‌دهند که با وجود پیشرفت‌های اخیر، نیاز به توسعه مدل‌های اختصاصی برای حوضه‌های خشک با در نظر گرفتن ویژگی‌های منحصربه‌فرد آنها همچنان احساس می‌شود. این پژوهش می‌تواند با تمرکز بر

ترکیب روش‌های فیزیکی و داده‌محور و همچنین تحلیل عدم قطعیت در پارامترهای ورودی، به پیشرفت این حوزه کمک کند.

تقدیر و تشکر (حمایت مالی یا معنوی سازمانی)

این مقاله مستخرج از نتایج پایان نامه اجرا شده در دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر می‌باشد.

منابع

- احمدی، سیماء؛ نبی‌زاده، علی. (۱۴۰۲). استفاده از مدل حافظه طولانی کوتاه‌مدت پیچشی برای پیش‌بینی سیلاب در استان گلستان، ایران. پژوهش‌های سنجش‌ازدور و اطلاعات مکانی، ۲ (۱)، ۲۳۹-۲۴۶. doi: 10.22061/jrsgr.2023.2021۲۴۶-۲۳۹.
- اسلامی، حمیدرضا؛ جمالی، سعید؛ ایوبی‌کیا، رضا؛ اسلامی، کامیاب. (۱۴۰۱). ارزیابی عملکرد مدل‌های پیش‌بینی بارش در برآورد دبی و حجم سیلاب با مدل NAM توسعه‌یافته (محدوده مطالعات: حوضه‌های غرب). رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۱ (۱)، ۱۰۱-۱۱۲. doi: 10.22034/nawee.2023.346025.1001۱۱۲-۱۰۱.
- اسلامی‌نژاد، سیداحمد؛ افتخاری، مبین؛ محمودی‌زاده، سعید؛ اکبری، محمد؛ حاجی‌الیاسی، علی. (۱۴۰۰). ارزیابی مدل‌های هوش مصنوعی مبتنی بر درخت به منظور پیش‌بینی خطر سیل در بستر GIS. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷ (۲)، ۱۷۴-۱۸۹.
- ایرانی، طیب؛ عبقری، هیراد؛ رسولی، علی اکبر. (۱۴۰۴). تحلیل تهدیدات تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر افزایش ریسک سیلاب حوضه آبخیز شهرچای. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴ (۴۴)، ۱۰۵-۱۲۶. doi: 10.22111/jneh.2024.49039.2053.
- پناهی، عبدالحافظ؛ جانباز قبادی، غلامرضا؛ متولی، صدرالدین؛ خالدی، شهریار. (۱۴۰۲). سنجش و پیش‌بینی پتانسیل وقوع سیلاب تحت شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود). مطالعات جغرافیایی نواحی ساحلی، ۴ (۲)، ۴۵-۶۱. doi: 10.22124/gscj.2023.22411.1172.
- جباری، ایرج؛ قبادیان، رسول؛ جدیدی، انیس. (۱۴۰۲). تأثیر سیل فروردین ۱۳۹۸ بر ریخت‌شناسی پیوندگاه مئاندی دو رودخانه دینور به گاماسیاب با استفاده از مدل عددی SRH-2D. مجله جغرافیا و توسعه، ۲۱ (۷۰)، ۱-۲۶. doi: 10.22111/gdij.2023.7401۲۶-۱.
- حنیفی‌نیا، عبدالعزیز؛ عبقری، هیراد. (۱۴۰۴). پیش‌بینی مناطق مستعد سیل با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین خطی تعمیم‌یافته و بیشینه آن‌تروپی. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴ (۴۳)، ۱۹-۳۴. doi: 10.22111/jneh.2024.47730.2021.
- زینلی، حمید. (۱۴۰۲). تجزیه و تحلیل آثار ژئومورفولوژیکی سیلاب در حوضه تنگ کارزین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر. صفحات ۱-۱۰۷.
- سعیدی مفرد، ساناز؛ آسیایی، مهدی؛ گهرخواه، فاطمه. (۱۴۰۱). پهنه‌بندی خطر وقوع سیل در شهرستان تربت‌حیدریه با استفاده از عملگرهای فازی. مجله جغرافیا و توسعه، ۲۰ (۶۶)، ۸۱-۱۰۶. doi: 10.22111/j10.22111.2022.6714۱۰۶-۸۱.
- شیخ‌کاظمی، مهسا؛ بنی‌حبيب، محمدابراهیم؛ سلطانی، جابر؛ روزبهانی، عباس؛ تنهاپور، میترا. (۱۳۹۹). ارزیابی اثر متغیرهای تأثیرگذار بر پیش‌بینی سیلاب واریزه‌ای با استفاده از مدل شبکه بیزین. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۶ (۳)، ۱۸-۳۰.
- کاکاوند، مائده؛ حق‌زاده، علی؛ سلیمانی مطلق، مهدی. (۱۴۰۳). مقایسه شاخص‌های سنجش‌ازدور در تعیین پهنه سیل حوضه آبخیز دوآب ویسیان. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۳ (۴۰)، ۴۱-۵۶. doi: 10.22111/jneh.2023.46291.1978.
- Akinsoji, A. H., Adelodun, B., Adeyi, Q. (2024). Integrating machine learning models with comprehensive data strategies and optimization techniques to enhance flood prediction accuracy: A review. Water Resources Management, 38, 4735-4761. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03885-x>
- Al-Juaidi, A. E. M. (2023). The interaction of topographic slope with various geo-environmental flood-causing factors on flood prediction and susceptibility mapping. Environmental Science and Pollution Research, 30, 59327-59348. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26616-y>
- Al-Rawas, G., Nikoo, M. R., Janbehsarayi, S. (2024). Near-future flash flood prediction in an arid region under climate change. Scientific Reports, 14, 25887. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76232-0>
- Bashirgonbad, M., Moghaddam Nia, A., Khalighi-Sigaroodi, S. (2024). A hydro-climatic approach for extreme flood estimation in mountainous catchments. Applied Water Science, 14, 98. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02149-8>

- Cui, L., Hu, G., Zhu, Y. (2025). Multi-strategy improved snow ablation optimizer: a case study of optimization of kernel extreme learning machine for flood prediction. *Artificial Intelligence Review*, 58, 181. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11192-z>
- Das, P., Posch, A., Barber, N. (2024). Hybrid physics-AI outperforms numerical weather prediction for extreme precipitation nowcasting. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 282. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00834-8>
- El Baida, M., Boushaba, F., Chourak, M., Hosni, M., & Sabar, H. (2025). Mapping urban flood hazard using extreme gradient boosting and random forest. In B. El Bhiri, S. Assoul, & M. Essaaidi (Eds.), *Technology and the environment: Implementing smart and sustainable solutions into our cities* (pp. 1-12). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74474-7_1
- Fordjour, G. K., Nur, F., Kalyanapu, A. J. (2025). Enhancing flood water level prediction through transfer learning with warmup learning rate scheduling in LSTM models: A comparative case study in Kentucky and Tennessee watersheds. *Modeling Earth Systems and Environment*, 11, 14. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02211-z>
- Gardini, A. (2023). Functional and variable selection in extreme value models for regional flood frequency analysis. *Environmental and Ecological Statistics*, 30(4), 715-739. <https://doi.org/10.1007/s10651-023-00581-8>
- Ghanem, M. A. A. N., & Zaifoglu, H. (2024). A geospatial analysis of flood risk zones in Cyprus: Insights from statistical and multi-criteria decision analysis methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 32875-32900. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33391-x>
- Gandhre, N., Dauji, S., & Londhe, S. (2024). Extreme value analysis of annual precipitation in districts of Maharashtra, India. *Journal of Earth System Science*, 133, 53. <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02243-6>
- Ghobadi, M., Ahmadi, M. (2024). Enhancing Flood Susceptibility Modeling: a Hybrid Deep Neural Network with Statistical Learning Algorithms for Predicting Flood Prone Areas. *Water Resources Management*, 38, 2687-2710. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03770-7>
- Guo, W. D., Chen, W. B., & Chang, C. H. (2025). Flood bend flow prediction in intermittent river reach using a 2D hydraulic model and stacking-ensemble-based LSTM technique. *Earth Science Informatics*, 18, 80. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01526-w>
- Han, Z., Li, F., Liu, C. (2025). Influence of geomorphological parameters on flash flood susceptibility analyzed using a coupled approach of HEC-HMS model and logistic regression. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-04079-1>
- Handique, A., Acharjee, S., Dhadumia, U. (2024). Flood frequency analysis in the lower Burhi Dehing River in Assam, India, using Gumbel Extreme Value and log Pearson Type III methods. *Discover Geoscience*, 2, 75. <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00084-4>
- Hossaki, V. Y., Negri, R. G., Santos, L. B. L. (2025). Combining social media data and meteorological sensors for urban flood detection: A statistical analysis in São Paulo City. *Earth Science Informatics*, 18, 281. <https://doi.org/10.1007/s12145-025-01802-3>
- Huang, J., Hong, Y., Sun, D. (2025). Urban flood depth prediction using an improved LSTM model incorporating precipitation forecasting. *Natural Hazards*, 121, 8305-8326. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07065-3>
- Imran, M., Hou, J., Wang, T. (2025). Flood characteristics and risk analysis in small watersheds on the Loess Plateau under extreme heavy rainfall. *Natural Hazards*, 121, 6857-6878. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07025-x>
- Jeba, G. S., & Chitra, P. (2024). Flood prediction through hydrological modeling of rainfall using Conv1D-SBiGRU algorithm and RDI estimation: A hybrid approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38, 3587-3606. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02768-2>
- Katipoğlu, O. M., & Sarıgöl, M. (2023). Prediction of flood routing results in the Central Anatolian region of Türkiye with various machine learning models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37, 2205-2224. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02389-1>
- Ke, X., Wang, N., Xiu, Y. (2025). A flash flood susceptibility prediction and partitioning method based on GeoDetector and random forest. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39, 1377-1404. <https://doi.org/10.1007/s00477-025-02922-4>
- Kritidou, E., Kauzlaric, M., Staudinger, M. (2025). Impact of different weather generator scenarios on extreme flood estimates in Switzerland. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39, 847-866. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02843-8>
- Liu, L., Liu, S., & Pan, L. (2024). Reservoir flood prediction service based on a Seq2seq model. In J. Wang, B. Xiao, & X. Liu (Eds.), *Service science* (pp. 11-22). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5760-2_11
- Lymperi, O. A., & Varouchakis, E. A. (2024). Modeling extreme precipitation data in a mining area. *Mathematical Geosciences*, 56, 1405-1437. <https://doi.org/10.1007/s11004-023-10126-1>
- Mantovani, J., Alcântara, E., Pampuch, L. A. (2024). Assessing flood risks in the Taquari-Antas Basin (Southeast Brazil) during the September 2023 extreme rainfall surge. *npj Natural Hazards*, 1, 9. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00009-8>
- Mei, C., Liu, J., Shi, H. (2023). Exploring the impact of street layout on urban flood risk to people and vehicles under extreme rainfall based on numerical experiments. *Science China Technological Sciences*, 66(12), 2561-2574. <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2393-2>
- Nearing, G., Cohen, D., Dube, V. (2024). Global prediction of extreme floods in ungauged watersheds. *Nature*, 627(8004), 559-563. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07145-1>
- Nemnem, A.M., Tanim, A.H., Nahian, A. (2025). How extreme rainfall and failing dams unleashed the Derna flood disaster. *Nature Communications*, 16, 4191. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59261-9>

- Okonofua, E. S., Atikpo, E., Lasisi, K. H. (2022). Application of selected FFA methods in extreme flood prediction of the River Osse. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 5061-5075. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01400-y>
- Oyegbile, O., Chan, A., Ooi, M. (2024). Evaluation of WRF model performance with different microphysics schemes for extreme rainfall prediction in Lagos, Nigeria: Implications for urban flood risk management. *Bulletin of Atmospheric Science and Technology*, 5, 19. <https://doi.org/10.1007/s42865-024-00081-y>
- Pawar, U. (2025). An identification and mapping of flood susceptible areas in the Wardha Basin using frequency ratio and statistical index models, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 32, 1565-1580. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35871-6>
- Qin, Z., Tian, Y., Wei, Y. (2024). Study on the up-downstream water level correlation and the extreme water levels under flood-tide encounters of the Feiyun River main stream. *Environmental Earth Sciences*, 83, 250. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11552-y>
- Safari, S., Sadeghian, M.S., Hajikandi, H. (2024). Identifying homogeneous hydrological zones for flood prediction using multivariable statistical methods and machine learning. *Applied Water Science*, 14, 261. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02316-x>
- Selva Jeba, G., & Chitra, P. (2024). River flood prediction through flow level modeling using multi-attention encoder-decoder-based TCN with filter-wrapper feature selection. *Earth Science Informatics*, 17, 5233-5249. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01446-9>
- Sharma, D., Das, S., & Goswami, B. N. (2025). Seasonal prediction of Indian summer monsoon extreme rainfall frequency. *npj Climate and Atmospheric Science*, 8, 141. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01032-w>
- Sundriyal, Y., Kumar, V., Khan, F. (2023). Impact of potential flood on riverbanks in extreme hydro-climatic events, NW Himalaya. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82, 196. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03205-4>
- Suryawanshi, R., Maikap, H., Ingale, C., Jadhav, P., Kale, I., & Jain, K. (2025). Machine learning-based geospatial flood prediction: The case of Brahmaputra Basin. In P. K. Shukla, H. Sharma, & R. Mallipeddi (Eds.), *World Congress on Smart Computing* (pp. 19-34). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-9006-7_19
- Totaro, V., Gioia, A., Kuczera, G. (2024). Modelling multidecadal variability in flood frequency using the Two-Component Extreme Value distribution. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38, 2157-2174. <https://doi.org/10.1007/s00477-024-02673-8>
- Wang, X., Zhao, J., Meng, F. (2025). Research on flood peak prediction in the Three Gorges region based on similarity search with multisource information fusion. *Earth Science Informatics*, 18, 71. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01509-x>
- Xu, Z., Zheng, H., Zhang, H. (2025). Enhancing monthly streamflow prediction with LSTM-P and ANN-P models using statistical feature-based penalty factors. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04201-x>
- Yeboah, F., Ackom, E. K., Yidana, S. M. (2024). Hydrologic modelling for flood threshold and hazard prediction in the Black Volta River Basin, West Africa. *Environmental Modeling and Assessment*, 29, 375-394. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09946-6>
- Zhao, J., & Marsani, M. F. (2025). Flood level prediction model based on Kolmogorov-Arnold Networks: an improved deep learning approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, 247. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05470-7>