



An Automatic Method for Flood Event Selection and Characterization: A Case Study of Kajo River Basin, Iran

Fatemeh Ganji Gohari ¹, Hamid Nazaripour ^{1*}, Mohammad Reza Poodineh ¹,
Mohsen Hamidianpour ¹, Ali Reza Ghaemi ¹, Reza Teimouri ²

¹ Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

² Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural and Natural Resources, Gorgan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 01 January 2026

Revised: 11 March 2026

Accepted: 13 March 2026

Available Online:

14 March 2026

Keywords:

Flood Events Selection

Peak Discharges Over
Threshold (POT)

Flood Event
Characterization

Master Recession Curve
(MRC)

Automatic Flood Analysis

ABSTRACT

The selection of flood events and determination of their characteristics (such as start and end times, peak discharge, volume, and duration) are crucial initial steps in flood analysis. In this study, to accurately extract key flood information, the automated Peaks Over Threshold (POT) model was used for flood sampling, and an automated method based on the Master Recession Curve (MRC) analysis was developed to determine flood characteristics. This process was implemented using a graphical user interface (GUI) and a toolbox in MATLAB. Results demonstrated that the proposed method performs well in the Kajo River basin, despite its variable hydrological regime. The developed toolbox can be easily applied to other watersheds for flood sampling and event description, thereby helping to reduce uncertainties in subsequent flood analyses, such as multivariate frequency and trend analyses. The practical applications of this approach in flood management, hydraulic structure design, flood risk assessment, and climate change studies in river basins are significant. However, the method's dependence on the quality and continuity of daily flow data, the need to adjust threshold parameters and independence criteria in basins with different hydroclimatic conditions, and challenges related to accurate baseflow separation are notable limitations of this research. For future studies, it is recommended that this method be validated in basins with diverse hydrological regimes, including snow-dominated basins and areas affected by human activities such as dam construction.

* Corresponding author: Hamid Nazaripour

E-mail address: h.nazaripour@gep.usb.ac.ir

How to cite this article: Ganji Gohari, F., Nazaripour, H., Poodineh, M. R., Hamidianpour, M., Ghaemi, A. R., & Teimouri, R. (2026). An Automatic Method for Flood Event Selection and Characterization: A Case Study of Kajo River Basin, Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(2), 1-26. <https://doi.org/10.22067/geoe.2026.97442.1642>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Floods rank among the most devastating natural disasters, causing extensive financial and human losses worldwide, including in Iran. Climate change and the increased frequency of extreme climatic events have further underscored the importance of accurate flood analysis and risk management. The core of any flood analysis whether multivariate frequency analysis, trend assessment, or hydraulic structure design depends on the precise identification of individual flood events and the quantitative extraction of their key characteristics (flood features). These features typically include the event's start and end time, peak discharge (peak), total direct runoff volume, and flood duration. Conventional methods for extracting these features are often based on manual or semi-automated procedures that rely on the analyst's subjective judgment, posing challenges such as time consumption, lack of full reproducibility, and difficulty in transferability to different watersheds. Particularly when dealing with large volumes of streamflow time-series data, these methods become inefficient and prone to introducing systematic uncertainties in subsequent analytical stages. The two main methodological challenges in this path are the objective and optimal selection of flood events from continuous data series and the accurate separation of the flood hydrograph from baseflow to calculate the true volume. The common approach for flood sampling is the Peaks Over Threshold method, which itself heavily depends on determining an optimal threshold and criteria for event independence. On the other hand, simplified methods such as connecting a straight line between start and end points are often used to define event bounds and calculate volume, which lack sufficient accuracy. Therefore, the development of an automatic, objective, and generic method that can standardize the complete process of event selection and feature extraction with minimal user intervention is a research and operational necessity. This study aims to address this methodological gap by proposing a comprehensive automatic framework and testing it in a basin with a complex and variable hydrological regime the Kajo River basin in southeastern Iran. The Kajo basin, influenced by two distinct rainfall systems (Mediterranean and Monsoonal), the presence of an upstream dam, and a history of destructive floods, provides an ideal testing ground for evaluating the efficiency and robustness of the proposed method.

Material and Methods

This research was conducted using an integrated and automated methodological framework that covers all stages from flood event selection to feature extraction. The study area is the Kajo River basin in southeastern Iran, with an approximate area of 6,178 square kilometers. The primary data used were daily streamflow time series from two hydrometric stations, Chandokan (located in the upstream section) and Pirsohrab (located in the downstream section), over a 50-year period. The methodological core is based on two main pillars. The first stage is the automatic selection of flood events using the Peaks Over Threshold model. To eliminate the inherent subjectivity in threshold determination, an automated algorithm based on the Anderson-Darling goodness-of-fit test was implemented. This algorithm systematically evaluates candidate thresholds and selects as optimal the threshold for which the exceedance series shows the best fit with the Generalized Pareto Distribution. Simultaneously, the well-known independence criteria from the United States Water Resources Council were applied to distinguish independent events, and the validity of the final extracted flood sample was evaluated using Kendall's correlation coefficient test and the calculation of the Dispersion Index. The second stage is the automatic identification of characteristics for each flood event, which itself comprises two key processes: first, the start and end times of each flood are determined algorithmically based on ratios of the peak discharge and a fixed time window; subsequently, for the precise separation of the net flood hydrograph from baseflow and calculation of the actual volume, the Master Recession Curve method is employed. In this step, using the matching strip method, the master recession curve is extracted from the entire data period and fitted with Wittenberg's analytical equation. Deep baseflow is defined as the average of minimum flows during the dry period and is used as a baseline. Finally, this complex methodological framework is implemented

in a user-friendly toolbox with a graphical interface in the MATLAB software environment, named SFE_IFC, to make the analysis process fully automated and executable on large datasets.

Results and Discussion

The application of the proposed framework to the Kajo River basin data yielded significant quantitative and qualitative results. The optimal flood thresholds for the Chandokan (upstream) and Pirsohrab (downstream) stations were calculated as 52 and 177.6 m³/s, respectively. This significant difference clearly illustrates the impact of increasing basin area and hydrological changes along the river course. Statistical evaluations confirmed the correct performance of the algorithm; Dispersion Index values close to one and non-significant Kendall's correlation coefficients at the 95% confidence level validated the assumption of event independence and the adequacy of the modeling. Over the 50-year period, 102 flood events were automatically identified at the Chandokan station and 82 events at the Pirsohrab station. Analysis of the extracted features revealed a strong positive correlation between flood volume and its duration. The coefficient of determination for this relationship was approximately 0.61 for the Pirsohrab station and 0.36 for the Chandokan station. This result indicates that flood volume is a primary determinant of the flood duration period in this basin. One of the important findings of this research was elucidating the role of different rainfall regimes on flood characteristics. Results showed that approximately 84% of floods at Pirsohrab and 65% at Chandokan occurred during the Mediterranean rainfall season (cold season). The visual outputs from the toolbox (separated hydrographs) clearly demonstrated that the proposed method can correctly identify start and end times for both single-peak and complex multi-peak floods. Furthermore, the fit of the master recession curve with a coefficient of determination greater than 0.9 proved the method's high accuracy in modeling the recession limb and, consequently, in calculating volume. Despite the construction of the Zirdan Dam upstream, the observation of large floods downstream (at the Pirsohrab station) indicates the intensity of flood processes in this basin and the necessity for considering complementary management measures.

Conclusion

This study successfully developed and validated a generic automatic method for the objective selection of flood events and the accurate extraction of their characteristics from daily streamflow data. The presented framework, by integrating an automatic optimal threshold selection algorithm within the Peaks Over Threshold model and the Master Recession Curve method, systematically addresses two major methodological problems in flood analysis. Implementing this framework in a user-friendly MATLAB toolbox has transformed it into a powerful operational tool for researchers and engineers, capable of drastically reducing analysis time while simultaneously enhancing reproducibility and transparency. Applying the method in the Kajo River basin not only proved its efficacy in a complex hydrological environment influenced by two climatic regimes but also provided valuable hydrological insights into the occurrence patterns and characteristics of floods in this important basin, including the dominance of cold-season floods in terms of frequency and the superiority of warm-season floods in terms of volume and duration. The findings emphasize the urgent need for focused attention on flood management and the development of flood control infrastructure in basins similar to Kajo. While the proposed method represents an important step toward standardization, its dependence on the quality and continuity of input data and the need for empirical adjustment of some parameters for basins with vastly different conditions remain its limitations. For future studies, validation of the method in basins with diverse hydroclimatic regimes, its integration with radar rainfall data and rainfall-runoff models for causal analysis, and investigation of the impacts of climate change on flood characteristics using this framework are recommended.



روش خودکار برای انتخاب رویدادهای سیلاب و شناسایی ویژگی‌های آن‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کاجو، ایران)

فاطمه گنجی گوهری^۱، حمید نظری پور^{۱*}، محمدرضا پودینه^۱، محسن حمیدیان پور^۱

علیرضا قائمی^۱، رضا تیموری^۲

^۱ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
^۲ گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۲ کلمات کلیدی: انتخاب رویدادهای سیلابی دبی های اوج بالاتر از آستانه (POT) ویژگی یابی سیلاب منحنی فروکش اصلی (MRC) تحلیل خودکار سیلاب	انتخاب رویدادهای سیلاب و تعیین ویژگی‌های آن (مانند تاریخ شروع و پایان، دبی اوج، حجم و مدت زمان) نخستین گام‌های حیاتی برای تحلیل‌های سیلاب محسوب می‌شوند. در این بررسی، برای به دست آوردن اطلاعات دقیق کلیدی سیلاب، از مدل خودکار آستانه‌ای، برای نمونه‌برداری از سیلاب‌ها استفاده شد و یک روش خودکار برای تعیین ویژگی‌های سیلاب با به کارگیری روش تحلیل منحنی فروکش اصلی ارائه گردید. همچنین از یک رابط کاربری گرافیکی و جعبه ابزار برای این فرآیند در متلب استفاده شده است. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی برای حوضه آبریز رودخانه کاجو با رژیم هیدرولوژیکی متغیر، عملکرد خوبی دارد. جعبه ابزار توسعه یافته را می‌توان به راحتی در سایر حوضه‌های آبریز برای نمونه‌برداری سیلاب و توصیف وقایع سیلاب به کار برد، و در نتیجه به کاهش عدم قطعیت در تحلیل‌های بعدی سیلاب، مانند تحلیل‌های فراوانی و روند سیلاب چند متغیره، کمک کرد. کاربرد عملی این رویکرد در تحلیل‌های مدیریت سیلاب، طراحی سازه‌های هیدرولیکی، ارزیابی ریسک سیل و مطالعات تغییر اقلیم در حوضه‌های آبریز قابل توجه است. با این حال، وابستگی روش به کیفیت و پیوستگی داده‌های جریان روزانه، نیاز به تنظیم پارامترهای آستانه و معیارهای استقلال در حوضه‌های با شرایط هیدرواقليمی متفاوت، و چالش‌های مربوط به تفکیک دقیق جریان پایه از جمله محدودیت‌های قابل توجه این پژوهش محسوب می‌شوند. برای پژوهش‌های آینده، پیشنهاد می‌شود این روش در حوضه‌های با رژیم‌های هیدرولوژیکی متنوع (از جمله حوضه‌های برف‌خیز و مناطق تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی مانند سدها) اعتبارسنجی گردد.

مقدمه

سیل یک پدیده طبیعی و جدی است که خسارت‌های قابل توجهی وارد کرده و میلیون‌ها نفر را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kauffeldt, Wetterhall, Pappenberger, Salamon & Thielen, 2016; De Bruijn et al., 2019; Qiu, Du, Zhu & Fan, 2017). علاوه بر این، با افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت جو در اثر گرمایش جهانی، رویدادهای هواشناسی شدید، به ویژه سیل‌ها، با فراوانی بیشتری رخ می‌دهند (Blöschl et al., 2019; Adhikari et al., 2010; Tanoue, Hirabayashi & Ikeuchi, 2016). برای کاهش خسارات سیل و زیان‌های اقتصادی، بررسی دقیق تغییرپذیری رویدادهای سیل و ارزیابی ریسک سیلاب ضروری است (Zeng, 2020). همچنین به خوبی شناخته شده است که انتخاب دقیق رویدادهای سیل و شناسایی ویژگی‌های سیلاب از داده‌های جریان روزانه، حیاتی‌ترین گام‌ها برای پژوهش‌های بعدی مرتبط با سیل به شمار می‌روند (مانند تحلیل فراوانی چند متغیره سیل‌ها و تحلیل روند) (Karahacane, Meddi, Chebana & Saaed, 2020). با این حال، چنین کارهایی هنوز فاقد رویکردهای جامع و عملی هستند. بنابراین اهمیت توسعه چارچوبی برای انتخاب رویدادهای سیل و شناسایی ویژگی‌های سیل برجسته می‌شود. سیل یک پدیده تصادفی چند متغیره است که عموماً با متغیرهایی مانند اوج سیل، حجم سیل و مدت سیل توصیف می‌شود (Mediero, Jimenez-Alvarez & Garrote, 2010). اگر چه در مطالعات قبلی از روش‌های ساده شده مختلفی برای به دست آوردن ویژگی‌های سیل استفاده شده است، اما تعیین ویژگی‌های سیل هنوز به طور جامع مورد مطالعه قرار نگرفته است (Vittal, Singh, Kumar & Nadarajah & Shiau, 2005; Karmakar, 2015; Jeong, Sushama, Khaliq & Roy, 2014). برای شناسایی دقیق و عینی ویژگی‌های سیل، سه چالش اصلی باید در نظر گرفته شود: انتخاب نمونه‌های مناسب سیل، شناسایی دقیق تاریخ شروع و پایان وقایع سیل و گسترش فرآیند فروکش کردن برای جداسازی وقایع سیل از دبی مشاهده شده است.

روش سری حداکثر سالانه (Annual Maximum Series) و روش اوج بالاتر از آستانه (Peak Over Threshold) که به اختصار و به ترتیب، (AMS) و (POT) بیان می‌گردند، به طور گسترده برای نمونه‌برداری سیل استفاده می‌شوند (Solari, Eguen, Polo & Losada, 2012). روش POT که می‌تواند اطلاعات بیشتری در مورد فرآیندهای سیل استخراج شده از داده‌های جریان روزانه رودخانه را ثبت کند و عدم قطعیت تحلیل فراوانی سیل را کاهش دهد (Lang, Ouarda & Bobee, 1999)، در چند دهه گذشته به طور گسترده برای تخمین خطر سیل مورد استفاده قرار گرفته است (Durocher, Mostofizadeh, Burn & Ashkar, 2018; Durocher, 2012; Burn & Ashkari, 2019; Aissia et al., 2012). با این حال، نمونه‌های سیلاب به دست آمده با استفاده از مدل POT تا حد زیادی به انتخاب آستانه وابسته هستند. روش‌های انتخاب آستانه قابل اعتماد، مانند چارک ثابت (Jeong et al., 2014)، میانگین تعداد رویدادهای فراتر از آستانه (Brunner et al., 2018, Brunner, Hingray, Zappa & Favre, 2019)، میانگین تجاوز از آستانه (Davison & Smith, 1990; Lang et al., 1999) و روش انتخاب خودکار آستانه (Liang, Shao, Shao & Lee, 2019) می‌توانند به یک نمونه سیلاب مناسب منجر شوند. روش‌های خودکار، بر اساس درجه برازش بین توزیع فرضی و نمونه سیلاب، آستانه را به صورت خودکار تعیین می‌کنند (Solari, Eguen, Polo & Losada, 2017; Durocher et al., 2018). بر اساس مقایسه کارایی روش‌های مختلف انتخاب آستانه، مشخص شده است که انتخاب خودکار آستانه مبتنی بر آزمون نیکویی برازش (GOF) می‌تواند به طور عینی‌تر به یک آستانه بهینه معقول دست یابد (Durocher et al., 2018).

تعیین تاریخ شروع و پایان وقایع سیل، کلید توصیف فرآیند سیل است. یکی از روش‌های پرکاربرد برای پرداختن به این موضوع، رویکرد گرافیکی مفهومی است که در آن تاریخ شروع معمولاً با افزایش ناگهانی هیدروگراف مشخص می‌شود و تاریخ پایان را می‌توان با مسطح شدن شاخه فروکش هیدروگراف تعیین کرد (Tosunoglu, Gurbuz & Ispirli, 2020; Liu, Li, Ma, Jia & Su, 2020; Yue, 2000). با این حال، در تعیین تاریخ‌های شروع و پایان، درجه‌ای از ذهنیت دخیل است. برای کاهش تأثیر تصمیمات انسانی، شمار زیادی از مطالعات مرتبط از رویکردهای ساده شده استفاده کرده‌اند (Vittal et al., 2015; Brunner et al., 2019; Mediero et al., 2010). به عنوان مثال، پیشنهاد شده است که که تقاطع‌های خط آستانه با هیدروگراف جریان، متناظر با نقاط شروع و پایان یک

رویداد سیل هستند (Vittal et al., 2015). تا کنون، به دلیل پیچیدگی رویدادهای سیلاب، هیچ روش عینی بدون نیاز به مداخله انسانی برای حل این مشکل ارائه نشده است.

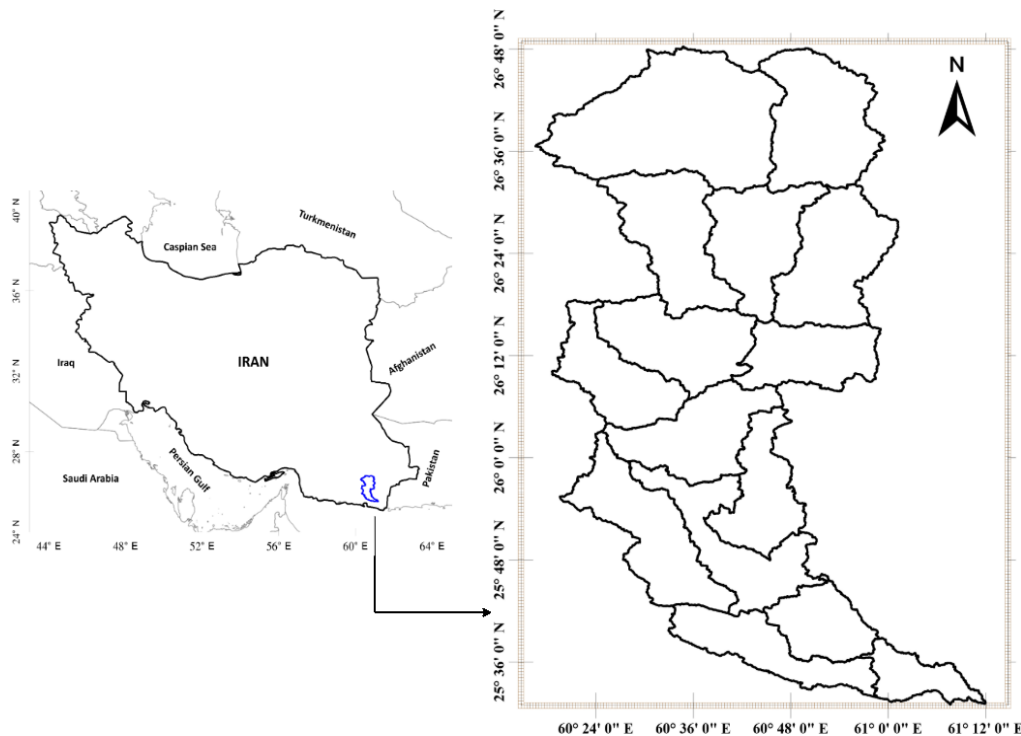
علاوه بر این، برای تعیین حجم سیل و هیدروگراف سیلاب، لازم است رویدادهای سیل از هیدروگراف جریان پایه با استفاده از روش‌های تفکیک جریان پایه استخراج شوند (Tallaksen, 1995; Sujono, Shikasho & Hiramatsu, 2004; Smakhtin, 2001). هر چند روش‌های پیچیده مانند فیلتر دیجیتال (Güngör & Ozkaya, 2025; Helfer et al., 2025) برای جداسازی جریان پایه موجود است؛ به طور کلی، از روش‌های ساده شده می‌توان برای تفکیک هیدروگراف سیل استفاده کرد. به عنوان مثال، حجم سیل را می‌توان به سادگی با استفاده از یک خط راست برای تفکیک رواناب مستقیم از جریان پایه برآورد کرد (Tosunoglu et al., 2020; Aissia et al., 2012; Yue, 2000). علاوه بر این، منحنی فروکش اصلی، به عنوان یک روش گرافیکی، به طور گسترده برای توصیف رابطه دبی-ذخیره حوضه‌های آبریز مورد استفاده قرار گرفته است و برخی از محققان مدل‌های تابعی متفاوتی مانند رابطه خطی (Sujono et al., 2004) و رابطه توانی (Carlotto & Chaffe 2019) را برای به دست آوردن منحنی اصلی فروکش پیشنهاد کرده‌اند. علاوه بر این، این روش با گسترش فرآیند فروکش، امکان استخراج چندین رویداد سیل را در یک دوره طولانی فراهم می‌کند (Beven, Smith & Wood, 2011; Lamb & Keith, 1997; Sujono et al., 2004)؛ با این حال، به دلیل پیچیدگی آن، کاربرد کمی در توصیف رویدادهای سیل (مانند محاسبه حجم سیل) دارد.

هر دو فرآیند انتخاب رویدادهای سیلاب و تعیین ویژگی‌های سیل اغلب به صورت دستی انجام می‌شوند که کاری خسته‌کننده و نیازمند تخصص است. همچنین باعث عدم قطعیت‌های زیادی در تحلیل‌های بعدی سیل می‌شود. علاوه بر این، روش دستی در صورت اعمال بر روی حجم زیادی از داده‌ها بسیار ناکارآمد خواهد بود (Arciniega- Solari et al., 2017; Carlotto & Chaffe 2019; Esparza, Brena-Naranjo, Pedrozo-Acuna & Appendini, 2017; Durocher et al., 2018). بنابراین، لازم است یک روش عمومی خودکار برای انتخاب وقایع سیل و شناسایی ویژگی‌های سیل با حداقل دخالت انسان ایجاد شود که بتواند به‌طور مؤثر برای داده‌های گسترده اعمال شود. از این رو، روش عمومی خودکار توسعه یافته است که به طور عینی، آستانه را برای نمونه‌گیری سیلاب بر اساس روش POT انتخاب می‌کند و ویژگی‌های سیل را مطابق با روش منحنی اصلی فروکش شناسایی می‌نماید (Zhang et al., 2021). این رویکرد، یک روش استانداردسازی شده تعمیم‌یافته است که می‌تواند برای تمامی حوضه‌های آبریز با ویژگی‌های متنوع به کار گرفته شود. یک رابط کاربری گرافیکی (GUI)، امکان استفاده از این روش را سهل و سریع می‌نماید. این روش با استفاده از داده‌های MOPEX آزمایش و اعتبارسنجی شده است (Duan et al., 2006). روش مزبور، انتخاب رویدادهای سیل و تعیین ویژگی‌های سیل را بهبود و در نتیجه عدم قطعیت‌ها را در تحلیل‌های بعدی سیل، مانند تحلیل‌های فراوانی سیل چند متغیره و روند سیل، کاهش می‌دهد.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش، حوضه آبریز رودخانه کاجو (شکل ۱) را در برمی‌گیرد. حوضه آبریز رودخانه کاجو با مساحت ۶۱۷۸ کیلومتر مربع در بخش غربی حوضه آبریز بزرگ باهوکلالت و یکی از مهمترین سرشاخه‌های رودخانه باهوکلالت در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی به شمار می‌رود. این رودخانه از ارتفاعات رشته کوه مکران در جنوب غربی ایرانشهر سرچشمه و در جلگه دشتیاری به رودخانه باهوکلالت می‌پیوندد. طول آبراهه اصلی این حوضه آبریز ۳۰۲ کیلومتر، زمان تمرکز آن ۴۳/۵ ساعت و ضریب گراویلوس آن ۲/۸۶ می‌باشد. رودخانه کاجو یکی از بسترهای سیلابی مهم در جنوب شرق ایران شناخته می‌شود (Moradi & Ranjbar Saadat, 2015; Abadi, 2020; Nazaripour, 2015) و سد مخزنی زیردان بر روی آبراهه اصلی آن احداث شده است. تفاوت زیاد مرتفع‌ترین (۲۰۶۲ متر) و پست‌ترین (۱۶ متر) نقطه حوضه آبریز، شیب زیاد (متوسط ۱۶٪)، خشکی محیط جغرافیایی (فقدان پوشش گیاهی) و کافی نبودن اقدامات کنترلی، منجر به رخداد سیلاب‌های سهمگین می‌گردد که خسارات‌های قابل توجهی را به بار می‌آورد.

حوضه آبریز رودخانه کاجو از نظر آب و هواشناختی تحت تأثیر دو رژیم بارشی متفاوت قرار داد. رژیم موسمی با جهت جریان جنوب شرقی از اواخر بهار تا اواخر تابستان و رژیم مدیترانه‌ای که با جهت جریان جنوب غربی از میانه پاییز تا میانه بهار حاکم است (Aryanmanesh, Nazaripour, Mahmoodi & Khosravi, 2024). داده‌های تکمیل شده جریان روزانه رودخانه برای دو ایستگاه هیدرومتری واقع بر روی رودخانه کاجو، شامل ایستگاه پیرسهراب در بخش پایاب و ایستگاه چندوکان در بخش سرآب (بالادست سد زبردان) مبنای این بررسی است. ایستگاه پیرسهراب در موقعیت طول جغرافیایی $60^{\circ}17'$ و عرض جغرافیایی $25^{\circ}75'$ و ایستگاه چندوکان در موقعیت طول جغرافیایی $60^{\circ}55'$ و عرض جغرافیایی $26^{\circ}15'$ قرار دارد. دوره آماری مورد استفاده هر دو ایستگاه از سال آبی $1352/1351$ تا $1400/1401$ می‌باشد.



شکل ۱- نقشه حوضه آبریز رودخانه کاجو و ایستگاه‌های آب‌سنجی آن در جنوب شرق ایران
Fig. 1. Map of the Kajo River basin and the hydrometric stations in southeastern Iran

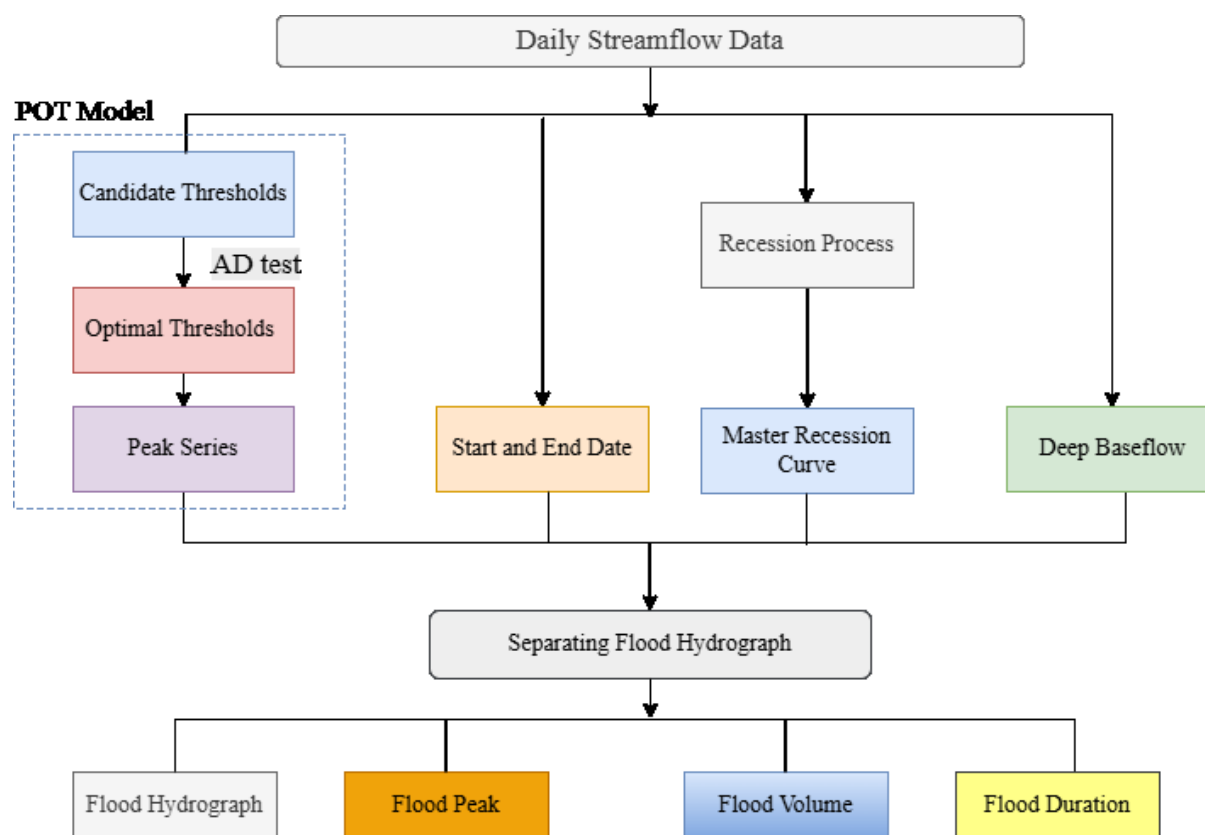
مواد و روش‌ها

یک فلوچارت از روش عمومی خودکار برای انتخاب رویدادهای سیل و شناسایی ویژگی‌های سیل در شکل (۲) نشان داده شده است. جزئیات هر روش در بخش‌های بعدی توضیح داده شده است.

مدل آستانه فراتر از اوج

مدل آستانه فراتر از اوج (POT) سابقه‌ای طولانی در کاربرد در تحلیل‌های هیدرولوژیکی، مانند تحلیل فراوانی و روند سیلاب، از طریق انتخاب دقیق رویدادهای سیلابی دارد (Ribatet, Sauquet, Gresillion & Ouarda, 2007; Mostofizadeh, Durocher, Burn & Ashkari, 2019; Onoz & Bayazit 2001). دستورالعمل عملیاتی دقیق برای مدل POT توسط (Lang et al., 1999) ارائه شده است. با این حال، دو مسئله وجود دارد که پیش از استفاده از این مدل باید حل شوند: (۱) استقلال سری‌های اوج انتخابی و (۲)

انتخاب آستانه‌ای مناسب (Mazas & Hamm, 2011; Bernardara, Mazas, Kergadallan & Hamm, 2014; Nazaripour & Hamidianpour, 2025). در ادامه، رویکردهای مورد استفاده در این مطالعه برای رسیدگی به این دو مشکل ارائه شده است.



شکل ۲- فلوچارت شمانیک استخراج ویژگی‌های سیلاب با استفاده از روش عمومی خودکار. اختصارات POT و AD به ترتیب نشان دهنده آستانه فراتر از اوج و آزمون نیکویی برازش اندرسون-دارلینگ

Fig. 2. Flowchart for flood characteristics using the automatic generic procedure. The abbreviations POT and AD represent the peaks over threshold and the Anderson-Darling (AD) GOF test, respectively

معیارهای استقلال

مدل آستانه فراتر در این مطالعه، از روش رایج خوشه‌بندی غیر متمرکز که توسط شورای منابع آب ایالات متحده در سال ۱۹۷۶ پیشنهاد شده، برای بررسی استقلال سری‌های اوج استفاده می‌گردد (Durocher et al., 2018). برای این منظور، رویدادهای سیلاب متوالی باید دو پیش شرط (رابطه ۱) را داشته باشند:

$$\theta > 5 + \ln\left(\frac{A}{1.609^2}\right) \text{ and } X_{\min} < \frac{3}{4} \min(Q_1, Q_2) \quad (1)$$

در اینجا، θ نشان‌دهنده فاصله زمانی بین دو اوج متوالی (روز)، A مساحت حوضه به کیلومتر مربع و Q_1 و Q_2 دبی جریان اوج متوالی (m^3/s) و $X_{\min}$ حداقل دبی جریان میانی برحسب مترمکعب بر ثانیه است.

انتخاب آستانه خودکار

برای کاهش ذهنیت‌گرایی و عدم قطعیت در انتخاب آستانه، رویکردی مبتنی بر آزمون نیکویی برازش برای انتخاب خودکار آستانه ارائه شده است (Solari et al., 2017) که امکان انجام تحلیل‌های هیدرولوژیکی کارآمد بر روی مجموعه داده‌های حجیم را فراهم می‌سازد. از این رو، این روش برای انتخاب آستانه بهینه مدل POT به کار گرفته می‌شود. هر چند روش‌های متعدد گرافیکی مانند نمودار میانگین باقیمانده عمر (MRLP)، نمودار پایداری آستانه (TS) نیز در تعیین آستانه‌ها موجود است (Oktaviana, Syafei, 2025; Kuswanto & Hermana, 2025). کاملاً مشخص است که سری‌های کران انتخابی POT باید از توزیع تعمیم یافته پارتو پیروی کنند (Bernardara et al., 2014; Mazas & Hamn, 2011)؛ بنابراین، آستانه‌های مختلفی برای به دست آوردن نمونه‌های مختلف سیل انتخاب می‌شوند. از توزیع پارتو تعمیم یافته برای برازش هر دنباله حدی استفاده می‌شود و نمونه‌ای که بهترین عملکرد را داشت، با آستانه بهینه مطابقت می‌یابد. تابع توزیع تجمعی توزیع پارتو تعمیم یافته را می‌توان به صورت رابطه (۲) ارائه داد:

$$F_n(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + k \frac{x-u}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}} & \text{if } k \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{x-u}{\sigma}\right) & \text{if } k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

در این جا، $F_n(x)$ تابع توزیع تجمعی، k پارامتر شکل، σ پارامتر مقیاس و u پارامتر مکان می‌باشد. این توزیع برای بازه $x \geq u$ در صورت مثبت بودن پارامتر شکل ($k > 0$) معتبر است و برای بازه $-1 \leq \frac{x-u}{\sigma} \leq 0$ در صورت منفی بودن آن ($k < 0$)، صدق می‌کند. هنگامی که $k = 0$ باشد، توزیع پارتو تعمیم یافته به یک توزیع نمایی تبدیل می‌شود. برای تخمین پارامترها از روش حداکثر درست‌نمایی استفاده می‌شود (Harville, 1977). اهمیت توصیف درجه برازش بین توزیع فرضی و سری‌های فرین (افراطی) برای انتخاب آستانه بهینه غیرقابل انکار است. مطالعات قبلی به طور گسترده از آزمون‌های نیکویی برازش برای انتخاب آستانه‌های بهینه استفاده کرده‌اند (Solari et al., 2017; Durocher et al., 2018). در این پژوهش، از آزمون اندرسون-دارلینگ (AD) برای تعیین آستانه بهینه استفاده می‌شود. آزمون AD نوعی آزمون نیکویی برازش (رابطه ۳) است و بر اساس آماره تابع توزیع تجربی A^2 بنا شده است که فاصله بین توزیع تجربی به دست آمده از نمونه و توزیع فرضی را اندازه‌گیری می‌کند (Choulakian & Stephens 2001; Heo, Shin, Nam, Om & Jeong, 2013):

$$A^2 = n \int_{-\infty}^{+\infty} (F_n(x) - F(x))^2 \omega(x) dF(x) \quad (3)$$

در این جا، A^2 ارزش آماره آزمون AD است و هر چه مقدار AD به صفر نزدیک‌تر باشد، سری‌های اوج مربوطه به توزیع فرضی نزدیک‌تر است، n تعداد نقطه‌های داده در نمونه، $F_n(x)$ یک توزیع فرضی (به عنوان نمونه، توزیع پارتو تعمیم یافته در این مطالعه)، $F(x)$ تابع توزیع تجربی، و $\omega(x)$ یک تابع وزن‌دهی روی مقادیر نمونه مرتب $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ شده است (رابطه ۴):

$$\omega(x) = [F(x)(1 - F(x))]^{-1} \quad (4)$$

روش خودکار انتخاب آستانه مورد استفاده در این مطالعه به شرح زیر است:

(۱) سری اولیه دبی‌های اوج سیلاب، در گام اول با در نظر گرفتن آستانه‌ای معادل صدک ۸۰ام از سری داده‌های جریان استخراج می‌گردد. طبق مطالعات قبلی، این مقدار صدک برای شناسایی تمام وقایع سیل برای حوضه‌هایی با ویژگی‌های مختلف مناسب در نظر گرفته شده است (Brunner et al., 2019; Solari et al., 2017). استقلال اوج‌های سیل با استفاده از معیارهای استقلال ارائه شده در معادله (۱) بررسی می‌گردد. سپس، مجموعه‌ای از مقادیر اوج‌های مستقل $\{P_i; i = 1, \dots, n_p\}$ به ترتیب صعودی مرتب می‌شوند، به عبارت دیگر $P_1 \leq \dots \leq P_{n_p}$.

(۲) از سری‌های اوج P_i ، یک زیر سری $\{P_{i_k}; k = 1, \dots, n_u\}$ ، که آستانه‌های کاندید محسوب می‌شوند، با حذف مقادیر تکراری ($n_u \leq n_p$) استخراج می‌گردد. از توزیع پارتو تعمیم یافته برای برآزش نمونه متناظر به هر آستانه کاندید استفاده و سپس آماره AD برای هر آستانه محاسبه می‌گردد. آستانه‌ای که با کمترین مقدار آماره‌های AD متناظر باشد، به عنوان آستانه بهینه انتخاب می‌گردد. بر اساس مطالعات پیشین، طول نمونه سیل تعیین شده متناظر با آستانه بهینه باید از تعداد سال‌های ثبت‌شده بیشتر باشد (Lang et al., 1999; Durocher et al., 2018).

روش‌های اعتبارسنجی

برای ارزیابی قابل قبول بودن سری‌های اوج سیلاب انتخاب شده با روش‌های فوق، از آزمون τ کندال و شاخص پراکندگی، I_d (نسبت واریانس به میانگین) استفاده می‌شود (Cunnane, 1979; Lang et al., 1999). آزمون τ کندال که ضریب همبستگی رتبه‌ای کندال نیز نامیده می‌شود، برای تأیید استقلال سری‌های اوج مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای سری‌های اوج $\{P_i; i = 1, \dots, n_p\}$ این آزمون به منظور تشخیص وابستگی سریالی مرتبه اول به کار گرفته شده است. آماره‌های τ کندال به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شوند:

$$\tau = \frac{2 \sum_{i=1}^{n_p-2} \sum_{j=i+1}^{n_p-1} \text{sign}(P_i - P_j) * \text{sign}(P_{i+1} - P_{j+1})}{(n_p - 1)(n_p - 2)} \quad (5)$$

در این جا، $\text{sign}(\cdot)$ تابع علامت است. مقادیر آماره τ می‌تواند از -۱ تا ۱ متغیر باشد. مقادیر مطلق آماره τ بزرگتر، وابستگی قوی‌تری به سری اوج نشان می‌دهند.

معمولاً فرض می‌شود که توزیع تعداد اوج‌ها در سال از توزیع پواسون پیروی می‌کند. استفاده از شاخص پراکندگی برای آزمایش کفایت توزیع پواسون توسط (Cunnane, 1979) توصیه شده است. از آن جایی که میانگین و واریانس در توزیع پواسون برابر هستند، می‌توان از نسبت واریانس مشاهده شده به میانگین مشاهده شده تعداد اوج‌ها در سال به عنوان آماره آزمون استفاده نمود (یعنی، شاخص پراکندگی). برای تعداد سالانه سیل $\{m_i; i = 1, \dots, Y\}$ ، شاخص پراکندگی به صورت رابطه (۶) تعریف می‌گردد:

$$I_d = \frac{\sum_{i=1}^Y \left(m_i - \frac{1}{Y} \sum_{i=1}^Y m_i \right)^2}{\sum_{i=1}^Y m_i} \quad (6)$$

که در آن، Y تعداد سال‌های ثبت شده و I_d شاخص پراکندگی است که هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، دنباله به توزیع پواسون نزدیک‌تر است.

تعیین ویژگی‌های سیلاب

برای به دست آوردن سری‌های زمانی سیل، یک روش عمومی خودکار برای شناسایی تاریخ‌های شروع و پایان سیل با حداقل دخالت انسان توسعه داده شده است. برای به دست آوردن حجم سیل و هیدروگراف، از روش منحنی فروکش اصلی استفاده می‌شود (Carlotto & Chaffe 2019). بخش فرعی زیر، فرآیند تعیین ویژگی‌های سیلاب را با استفاده از روش‌های پیش‌گفته تشریح می‌کند و شکل (۲)، نمودارهای شماتیک مربوط به تعیین ویژگی‌های سیلاب (تاریخ‌های شروع و پایان، دبی اوج، حجم و مدت‌زمان) را نشان می‌دهد.

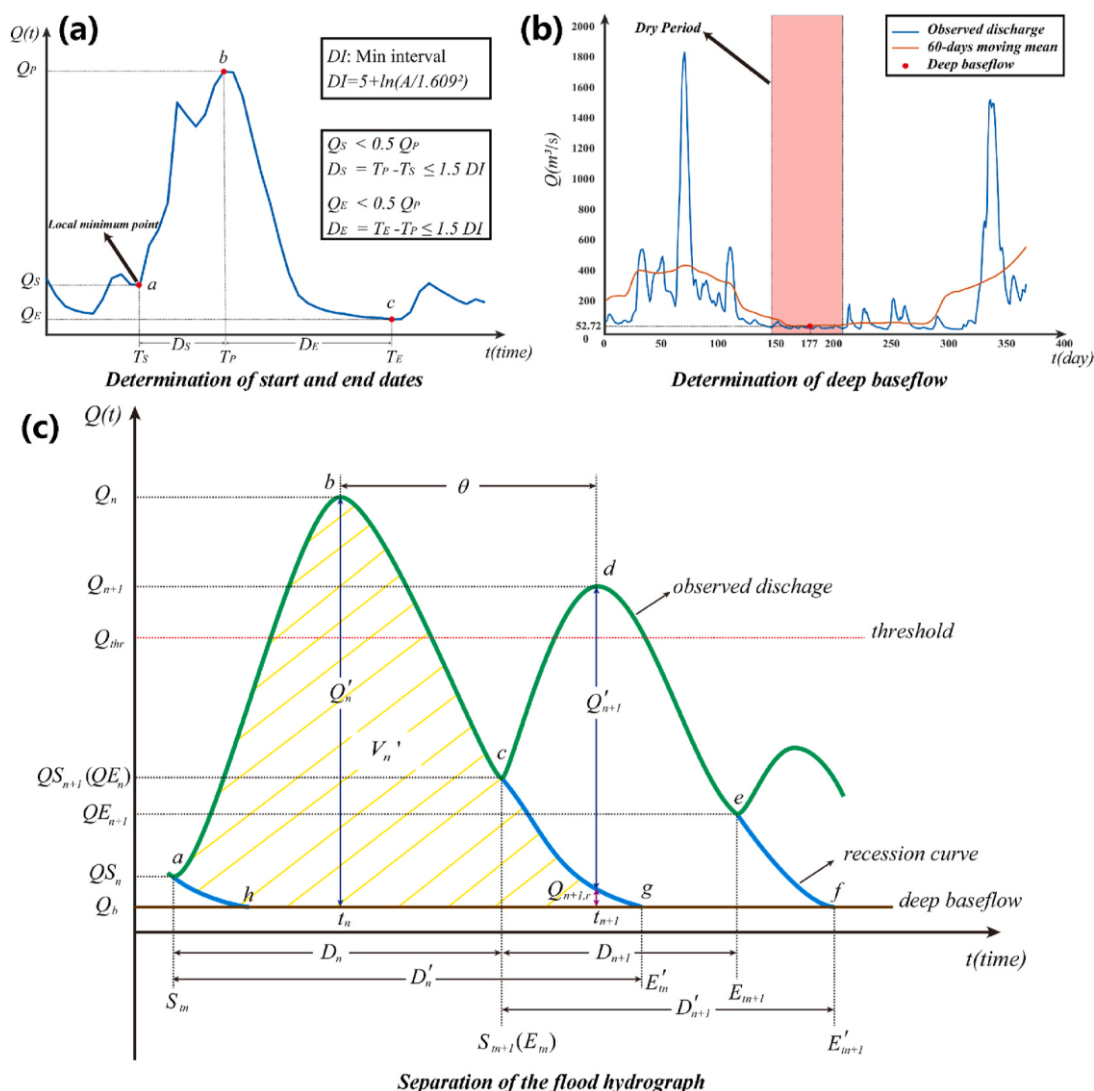
تعیین تاریخ‌های آغاز و پایان

در این مطالعه، یک رویکرد کلی برای تعیین تاریخ شروع و پایان دوره‌های سیل با ارجاع به مطالعات قبلی توسعه داده شده است (Nadarajah & Shiau 2005; Vittal et al., 2015; Claps & Laio 2003; Ombadi, Nguyen, Sorooshian & Hsu, 2018; Yue,)

2000). با در نظر گرفتن تمام جریان‌ها در بازه b برابر حداقل فاصله قبل از اوج، تاریخ شروع یک رخداد سیل به عنوان زمانی تعریف می‌شود که دبی برای اولین بار به کمتر از a برابر دبی اوج برسد و در آن نقطه، کمینه محلی باشد (رابطه ۷) (شکل ۳a).

$$Q_S \leq aQ_P \text{ and } T_P - T_S \leq b \left(5 + \ln \left(\frac{A}{1.6092} \right) \right) \quad (7)$$

که در آن، Q_P و Q_S به ترتیب دبی اوج سیل و جریان مربوط به تاریخ شروع سیل، T_P و T_S به ترتیب تاریخ اوج سیل و تاریخ شروع رویداد سیل، a و b پارامترهای تجربی هستند و a باید در محدوده $(0, 1)$ و b باید در محدوده $(1, 2)$ باشد. عرض بازه بین نقطه اوج و نقطه شروع باید تا حد امکان کوتاه باشد و از b برابر حداقل فاصله زمانی لازم برای مستقل نگه داشتن دو اوج متوالی کمتر باشد.



شکل ۳- فلوچارت شماتیک جدا سازی هیدروگراف سیلاب و تعیین ویژگی‌های سیلاب (زمان‌های شروع و پایان، اوج، حجم و دوام). (a) تعیین تاریخ‌های شروع و پایان (b) تعیین جریان پایه عمیق؛ (c) جداسازی هیدروگراف سیلاب

Fig. 3. Schematic diagrams for separation of the flood hydrograph and determination of flood characteristics (start/end dates, peak, volume, and duration). (a) Determination of start and end dates; (b) determination of deep baseflow; (c) separation of the flood hydrograph (Zhang et al., 2021)

بر اساس مطالعات قبلی، مقادیر $a = 0.5$ و $b = 1.5$ در معادله (۷) برای تعیین نقطه شروع رویداد سیل برای حوضه‌هایی با ویژگی‌های مختلف مناسب می‌باشند (Brunner et al., 2019). پارامتر $1/5$ تضمین می‌کند که نقاط شروع واقعی اکثریت قریب به اتفاق رویدادهای سیل در دوره زمانی گنجانده شده و با استفاده از معادله (۷) قابل بازیابی هستند. تاریخ پایان سیل با استفاده از روشی مشابه با تاریخ شروع تعیین می‌شود (رابطه ۸):

$$Q_E \leq aQ_P \text{ and } T_E - T_P \leq b \left(5 + \ln \left(\frac{A}{1.609^2} \right) \right) \quad (8)$$

که در آن، T_P و T_E به ترتیب تاریخ پایان سیل و دبی مربوطه هستند. در مورد رویکرد فوق‌الذکر برای تعیین تاریخ شروع و پایان وقایع سیل، باید به چند نکته کلیدی توجه شود. اولاً، باید تأکید شود که این روش صرف نظر از اینکه سیل تک قله‌ای یا چند قله‌ای باشد، قابل اجرا است. برای مثال، در شکل (۳a)، نقاط شروع و پایان به دست آمده را می‌توان برای سیلاب‌های چند اوجی نیز به طور دقیق شناسایی کرد. دوم، اگر هیدروگراف جریان در حداقل بازه زمانی $1/5$ ، کاملاً یکنواخت باشد، نقطه شروع (پایان) به عنوان نقطه حداقل جریان تعریف می‌شود.

تحلیل منحنی فروکش اصلی

پس از تعیین تاریخ شروع و پایان وقایع سیل، هیدروگراف‌های اولیه سیل از هیدروگراف دبی مشاهده‌ای استخراج می‌شوند. با این حال، روند فروکش کردن یک رویداد سیل همیشه به جریان پایه کاهش نمی‌یابد، یعنی سیل دوم قبل از اینکه روند فروکش کردن سیل اول به جریان پایه کاهش یابد، رخ خواهد داد (شکل ۳c). این نشان می‌دهد که T_E ممکن است تاریخ پایان واقعی یک رویداد سیل نباشد. بنابراین، برای حل این مسئله و تعیین تاریخ پایان واقعی و سایر ویژگی‌های سیل مانند حجم سیل، باید روش‌هایی برای جداسازی هیدروگراف سیل اتخاذ شود. در این مطالعه، روش منحنی فروکش اصلی به کار گرفته شد که یک مدل مفهومی ذخیره حوضه آبریز با مکانیسمی فیزیکی برای نمایش رابطه‌ی دبی-ذخیره است (Duncan, 2019).

تحلیل منحنی فروکش اصلی، یک روش گرافیکی برای جداسازی هیدروگراف است که با استخراج چندین منحنی در یک دوره زمانی گسترده، بر تغییرپذیری موجود در هر دوره فروکش انفرادی، غلبه می‌کند (Tallaksen, 1995). برای تعیین منحنی فروکش اصلی، از روش نوار تطبیقی استفاده می‌شود که یک روش گرافیکی مبتنی بر همپوشانی منحنی‌ها است که در آن فروکش‌های انفرادی رسم و تنظیم می‌شوند تا یک منحنی فروکش واحد را تشکیل دهند که نماینده یک سری داده‌های طولانی است (Beven et al., 2011; Lamb & Keith, 1997; Carlotto & Chaffe, 2019). علاوه بر این، یک روش خودکار برای به دست آوردن منحنی فروکش اصلی، بدون دخالت انسان اتخاذ شده است (Nathan & McMahon, 1990; Carlotto & Chaffe, 2019). چهار روش منحنی فروکش اصلی زیر، برای به دست آوردن منحنی فروکش استفاده شده‌اند:

(۱) معادله نمایی مایلت (Hall, 1968) فرض می‌کند که رابطه تخلیه-ذخیره خطی است ($S = kQ$)، بنابراین منحنی فروکش را می‌توان با یک مدل نمایی به صورت رابطه (۹) توصیف کرد:

$$Q_t = Q_0 e^{-\frac{1}{k}t} \quad (9)$$

که در آن، Q_t دبی در زمان t ، Q_0 دبی اولیه و k پارامتر است.

(۲) کوتان (Coutange, 1948) طبق رابطه (۱۰) در نظر می‌گیرد که $\frac{dQ}{dt} = -aQ^b$ که جواب تحلیلی آن وقتی $b \neq 1$ به صورت زیر داده می‌شود:

$$Q_t = [Q_0^{1-b} - (1-b)at]^{1/(1-b)} \quad (10)$$

که در آن، a و b پارامترهایی هستند که باید تعیین شوند. وقتی $b = 1$ ، جواب تحلیل همان معادله (۹) است.

(۳) ویتنبرگ (Wittenberg, 1999) نیز طبق رابطه (۱۱) فرض می‌کند که $S = aQ^b$ و هنگامی که $b \neq 1$ باشد، راه‌حل تحلیلی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$Q_t = Q_0 \left[1 + \frac{(1-b)Q_0^{(1-b)}}{ab} t \right]^{1/(1-b)} \quad (11)$$

که در آن، a و b پارامترهایی هستند که باید تعیین شوند. وقتی $b = 1$ ، جواب تحلیل همان معادله (۹) است. (۴) علاوه بر سه روش پارامتری، یک روش ناپارامتری که از درون‌یابی اسپلاین مکعبی برای داده‌های منحنی فروکش اصلی استفاده می‌کند نیز در این مطالعه به کار گرفته شده است، این روش نیاز ندارد که رابطه ذخیره - تخلیه از پیش فرض شود (Carlotto & Chaffe, 2019). به طور کلی، روش‌های ناپارامتری فرایند فروکش را بهتر از روش‌های پارامتری برازش می‌دهند، اما اشکال اساسی آن‌ها ناتوانی در برون‌یابی داده‌های منحنی فروکش اصلی است.

تعریف جریان پایه عمیق

جریان پایه یک جزء ذاتی مهم جریان رودخانه است. در طول فصل خشک سال، دبی جریان رودخانه کاملاً از جریان پایه تأمین می‌گردد (Tallaksen, 1995; Smakhtin, 2001). با این حال، تعریف دقیق جریان پایه یا تفکیک قابل اعتماد آن از جریان رودخانه دشوار است (Nathan & McMahon, 1990). روش‌های قطعه‌بندی فعلی اغلب عینی نیستند زیرا جریان‌های پایه را نمی‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد (Duncan, 2019)؛ در عوض، جریان پایه عمیق به عنوان میانگین مقدار دبی در دوره خشک یک سال تعریف شد که یک مقدار ایستا است. جریان پایه عمیق را می‌توان با محاسبه مقدار میانگین حداقل یک پنجره متحرک سالانه ۶۰ روزه از داده‌های جریان روزانه رودخانه به دست آورد (شکل ۳b).

جداسازی هیدروگراف سیلاب

ویژگی‌های سیل (اوج، حجم و مدت) را می‌توان متعاقباً با جداسازی هیدروگراف سیل تعیین کرد. در شکل (۳c)، خط سبز رنگ نشان‌دهنده دبی مشاهده شده، خط آبی پررنگ نشان‌دهنده فرایند فروکش گسترده با استفاده از روش منحنی فروکش اصلی و خط قهوه‌ای رنگ نشان‌دهنده جریان پایه عمیق است. برای اولین سیلاب در نمودار، a نقطه شروع، c نقطه پایانی خام، g نقطه پایانی اصلاح‌شده، منحنی ah فرایند فروکش گسترده آخرین سیل، و cg فرایند رگرسیون سیل فعلی است. Q'_n اوج سیلاب، V'_n حجم سیلاب، که ناحیه احاطه شده توسط $abcgha$ (ناحیه هاشور خورده زرد) است و مدت سیل با D'_n بیان می‌شود. معادلات به شرح روابط (۱۲، ۱۳ و ۱۴) هستند:

$$Q'_n = Q_n - Q_b \quad (12)$$

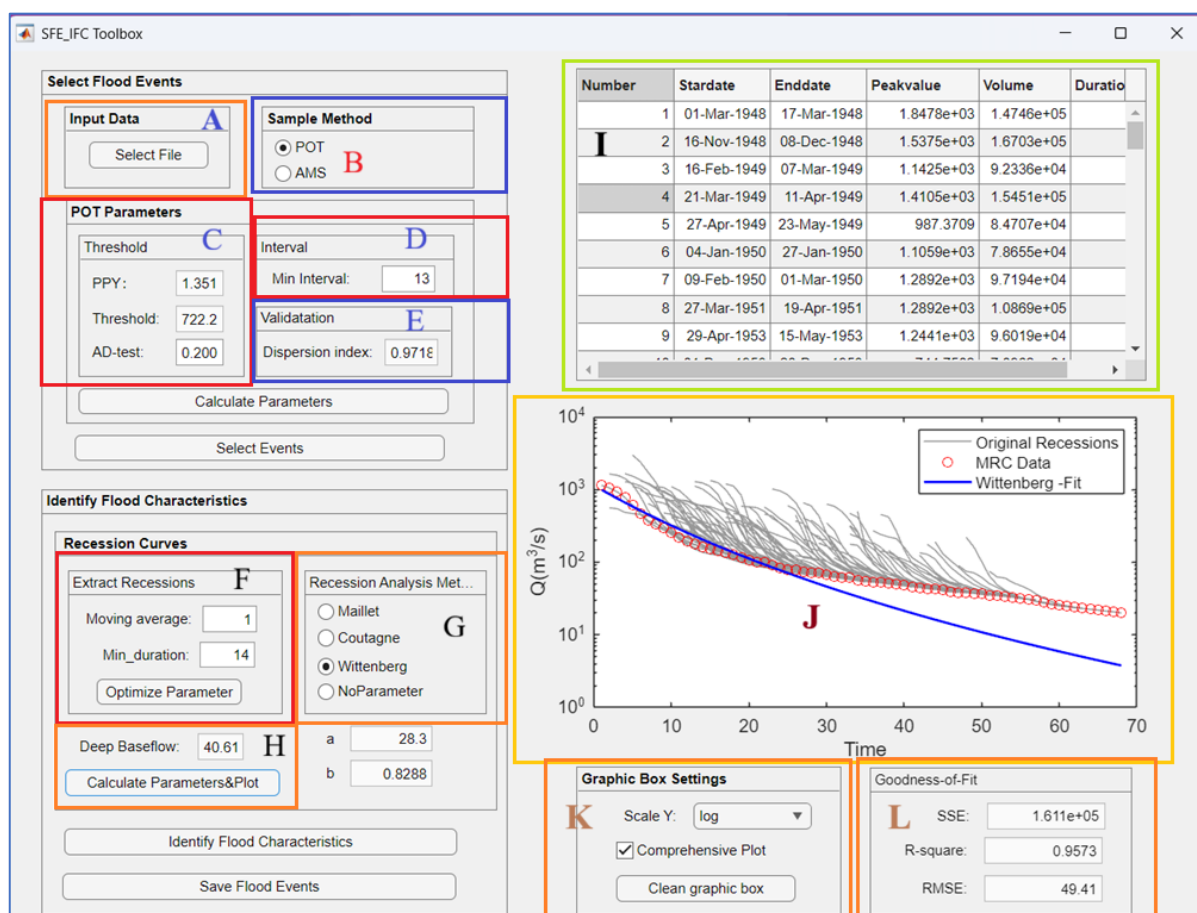
$$D'_n = E'_{tn} - S_{tn} \quad (13)$$

$$V'_n = \int_{t_c}^{t_a} (Q(t) - Q_b) d(t) - \int_{t_a}^{t_h} (R(t) - Q_b) d(t) + \int_{t_c}^{t_g} (R(t) - Q_b) d(t) + \quad (14)$$

که در آن، $Q(t)$ دبی مشاهده شده و $R(t)$ منحنی فروکش اصلی است.

معرفی رابط کاربری گرافیکی

یک جعبه ابزار متلب (SFE_IFC) برای انجام خودکار این روش توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021) توسعه داده شده و یک رابط کاربری گرافیکی برای آن ساخته شده است. رابط کاربری گرافیکی برای انتخاب رویدادهای سیل و شناسایی ویژگی‌های سیل در شکل ۴ نمایش داده شده است. توابع و رویه‌های این جعبه‌ابزار به تفصیل ارائه شده است. این جعبه ابزار شامل چهار جزء اصلی است: پنل انتخاب رویداد سیل، پنل تعیین ویژگی‌های سیل، پنجره‌های نمودار و پنجره‌های جدول. هر مورد در جعبه ابزار در زیر توضیح داده شده است. سمت چپ جعبه ابزار، ناحیه عملکردی و سمت راست، ناحیه ارائه نتایج است. ماژول انتخاب رویداد سیل شامل سه بخش است: ورودی داده‌ها، روش نمونه‌گیری و پارامترهای POT.



شکل ۴- رابط کاربری گرافیکی برای انتخاب رویدادهای سیل و شناسایی ویژگی‌های سیل

Fig. 4. GUI for selecting flood events and identifying flood characteristics (Zhang et al., 2021)

انتخاب فایل داده (A): در این قسمت می‌توان یک فایل جریان روزانه رودخانه را در هر پوشه‌ای از کامپیوتر انتخاب نمود، که باید با فرمت xls یا xlsx باشد. داده‌های جریان رودخانه متعاقباً نمایش داده می‌شوند.

روش نمونه‌گیری (B): دو روش نمونه‌گیری انتخاب شده است. روش POT در بخش قبلی تشریح شده است. از آنجایی که روش AMS نسبتاً ساده است و این کار عمدتاً مبتنی بر مدل POT است، روش AMS در این جا معرفی نشده است.

پارامترهای آستانه (C): وقتی دکمه محاسبه پارامترها را در پنل پارامترهای POT فشار داده می‌شود، آستانه بهینه انتخاب می‌شود و پارامترهای مربوطه در پنل ارائه می‌شوند که شامل اوج‌ها در سال، آستانه بهینه و مقدار آماره AD است.

معیارهای استقلال (D): حداقل فاصله روزهایی که اوج‌های سیل را مستقل از هم می‌کند، در این پنل ارائه شده است و روش متناظر با آن در بخش معیارهای استقلال معرفی شده است.

نتیجه اعتبارسنجی (E): شاخص پراکندگی ذکر شده در بخش روش‌های اعتبارسنجی، پس از تعیین آستانه بهینه محاسبه می‌گردد. با فشردن دکمه انتخاب رویدادها، تاریخ‌های شروع و پایان رویدادهای سیل محاسبه می‌شوند و ویژگی‌های خام سیل با استفاده از روش مرسوم شرح داده شده، در جدولی در قسمت بالای سمت راست جعبه ابزار ارائه می‌شوند. پس از انتخاب رویدادهای سیل با استفاده از مدل POT، ویژگی‌های سیل مربوطه با استفاده از روش ذکر شده، شناسایی می‌شوند. پنل ویژگی‌های سیل شناسایی شده در جعبه ابزار SFE_IFC (شکل ۳) شامل چهار جزء اصلی است: استخراج فروکش‌ها، روش‌های منحنی فروکش اصلی، جریان پایه عمیق و ذخیره نتایج.

استخراج فروکش‌ها (F): شاخص پراکندگی پس از تعیین آستانه بهینه محاسبه می‌گردد. در این جعبه ابزار، یک روش خودکار برای استخراج فروکش‌ها اتخاذ شده است (Carlotto & Chaffe, 2019). برای کاهش نویز داده‌های جریان رودخانه، یک میانگین متحرک سه نقطه‌ای اعمال شده است. تعداد دفعات اعمال روش میانگین متحرک سه نقطه‌ای را می‌توان از پیش تعیین کرد (مقدار پیش‌فرض ۱ است). حداقل مدت زمان دوره‌های افت جریان (فروکش) را می‌توان با استناد به پژوهش کارلوت و چافه (Carlotto & Chaffe, 2019) و براساس رفتار داده‌های مشاهده‌ای جریان رودخانه تعریف کرد. در این مطالعه، حداقل مدت دوره‌های افت جریان به عنوان کمترین مدتی تعریف می‌شود که اطمینان دهد میزان افت کمتر از ۱۰۰ باشد؛ این مدت باید بزرگ‌تر یا مساوی پنج روز باشد.

روش تحلیل فروکش (E): در این پنل، امکان انتخاب چهار روش منحنی فروکش اصلی فراهم است. در ادامه، پارامتر متناظر این روش قرار دارد که با استفاده از نظریه درست‌نمایی بیشینه، برآورد می‌شود.

جریان پایه عمیق (F): جریان پایه عمیق را می‌توان با اعمال روش مطرح شده در بخش تعریف جریان پایه عمیق استخراج کرد. پس از تعیین همه پارامترها، می‌توان دکمه تشخیص ویژگی‌های سیلاب را کلیک کرد تا هیدروگراف سیل جدا شود. نتایج در جدول بخش بالایی سمت راست جعبه ابزار نمایش داده خواهند شد. نتایج پس از آن می‌توانند با کلیک بر دکمه ذخیره رویدادهای سیلابی در پوشه جاری به صورت یک فایل اکسل ذخیره شوند. نتایج، از جمله جدول ویژگی‌های سیل و هیدروگراف سیل، در سمت راست جعبه ابزار SFE_IFC نمایش داده می‌شوند.

پنجره جدول (I): این جدول، نتایج مربوط به ویژگی‌های سیل را نمایش می‌دهد که شامل تعداد رویدادهای سیل، تاریخ‌های شروع، پایان، دبی اوج، حجم و مدت زمان هستند. هنگامی که روی یک سطر در جدول کلیک شود، هیدروگراف سیل متناظر در پنجره نمودار ترسیم می‌شود.

پنجره نمودار (J): این بخش، پنجره اصلی نمایش خروجی‌های گرافیکی است.

تنظیمات جعبه گرافیکی (K): انواع مختلف مقیاس محور عمودی (خطی و لگاریتمی) را می‌توان برای منحنی‌های فروکش انتخاب کرد. پس از کلیک بر دکمه پاک کردن جعبه گرافیکی، پنجره نمودار پاک می‌شود.

نیکویی برازش (L): این پنل، نتایج شاخص‌های نیکویی برازش (GOF) مربوط به منحنی‌های فروکش مختلف برای داده‌های گسسته منحنی فروکش اصلی را ارائه می‌دهد که شامل مجموع مربعات خطا (SSE)، مقدار ضریب تعیین (R-square) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) می‌شود (Carlotto & Chaffe, 2019).

نتایج و بحث

برای هر دو ایستگاه هیدرومتری، شاخص‌های τ و I_d نتوانستند فرض صفر را در سطح معنی‌داری ۵٪ رد کنند (جدول ۱). این نتیجه نشان می‌دهد که رویدادهای سیل مستقل از یکدیگر بوده و توزیع پارتو تعمیم یافته برازش خوبی برای سری‌های اوج (دبی پیک) این دو ایستگاه دارد.

جدول ۱- پارامترهای آماری برای ایستگاه‌های دبی‌سنجی رودخانه کاجو

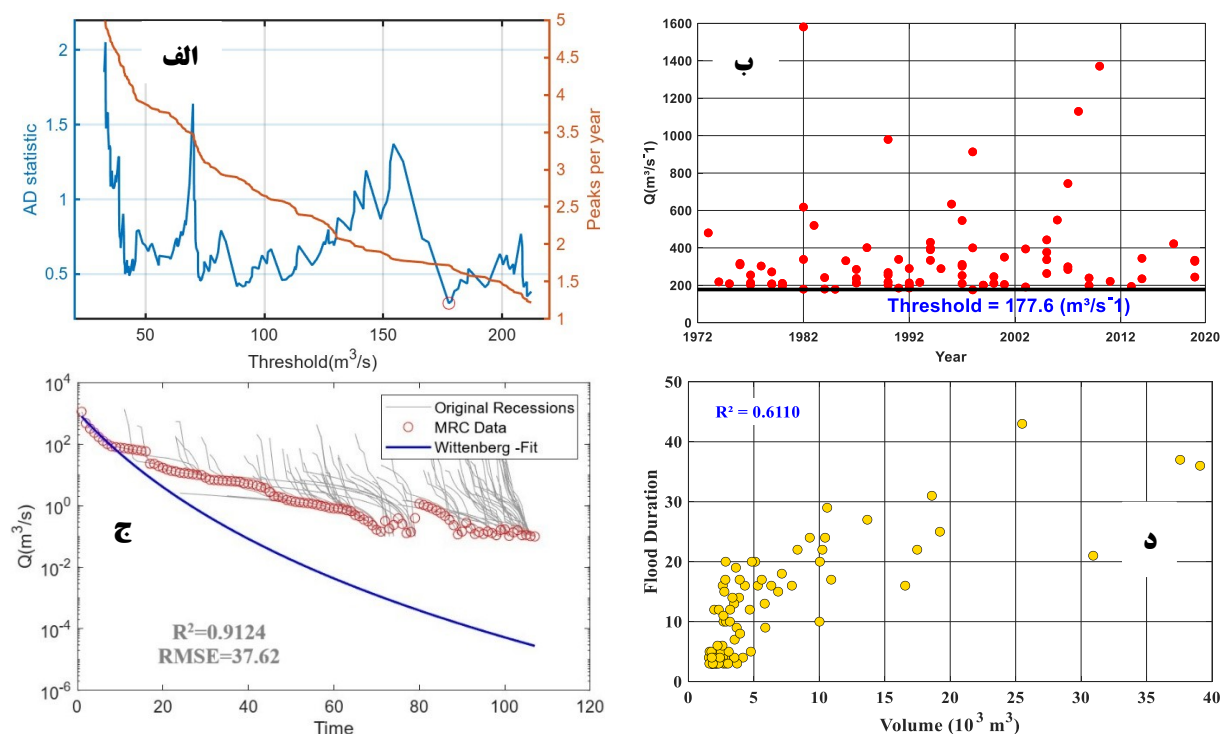
Table 1- Statistical Parameters for the Kaju River Discharge-Gauging Stations

ایستگاه Gauge	Threshold (m ³ /s)	AD Statistic	PPY	I_d	I_d Confidence Interval	τ	τ Confidence Interval
Pirsohrab پیرسهراب	177.6	0.0304	1.719	1.004	[1.3920, 0.6080]	0.1268	[0.2742, -0.0206]
Chandokan چندوکان	52	0.374	2.099	1.037	[2.0174, 0.8117]	-0.1165	[0.0151, -0.2481]

شکل ۵ و ۶ نتایج حاصل از اجرای جعبه ابزار SFE_IFC به ترتیب بر روی داده‌های ایستگاه‌های پیرسهراب و چندوکان را نمایش می‌دهند. فرایند انتخاب یک آستانه بهینه در شکل (۵ الف) و (۶ الف) نشان داده شده است. با افزایش آستانه کاندید، مقدار آماری AD تغییرات پیچیده‌ای را نشان داده و مقدار اوج سالانه کاهش می‌یابد. دایره توخالی قرمز رنگ نشان‌دهنده آستانه بهینه است. مقدار آستانه سیلاب برای ایستگاه پیرسهراب و چندوکان به ترتیب ۱۷۷/۶ و ۵۲ مترمکعب بر ثانیه تعیین گردیده است. ایستگاه چندوکان در منطقه مرتفع‌تر و بالادست حوضه آبریز رودخانه کاجو قرار داشته و طبیعی است که از آستانه پایین‌تری برخوردار باشد؛ بر عکس، ایستگاه پیرسهراب در پایین دست حوضه، منطقه پست و کم ارتفاع جلگه دشتیاری قرار داشته و از آستانه بالاتری برخوردار است. شکل (۵ ب) و (۶ ب) سری‌های اوج به دست آمده از مدل POT در این رویکرد را نشان می‌دهد. تعداد رویدادهای سیل در دوره مورد مطالعه (۱۹۷۲-۲۰۲۲) برای ایستگاه‌های پیرسهراب و چندوکان به ترتیب ۸۲ و ۱۰۲ مورد بوده است.

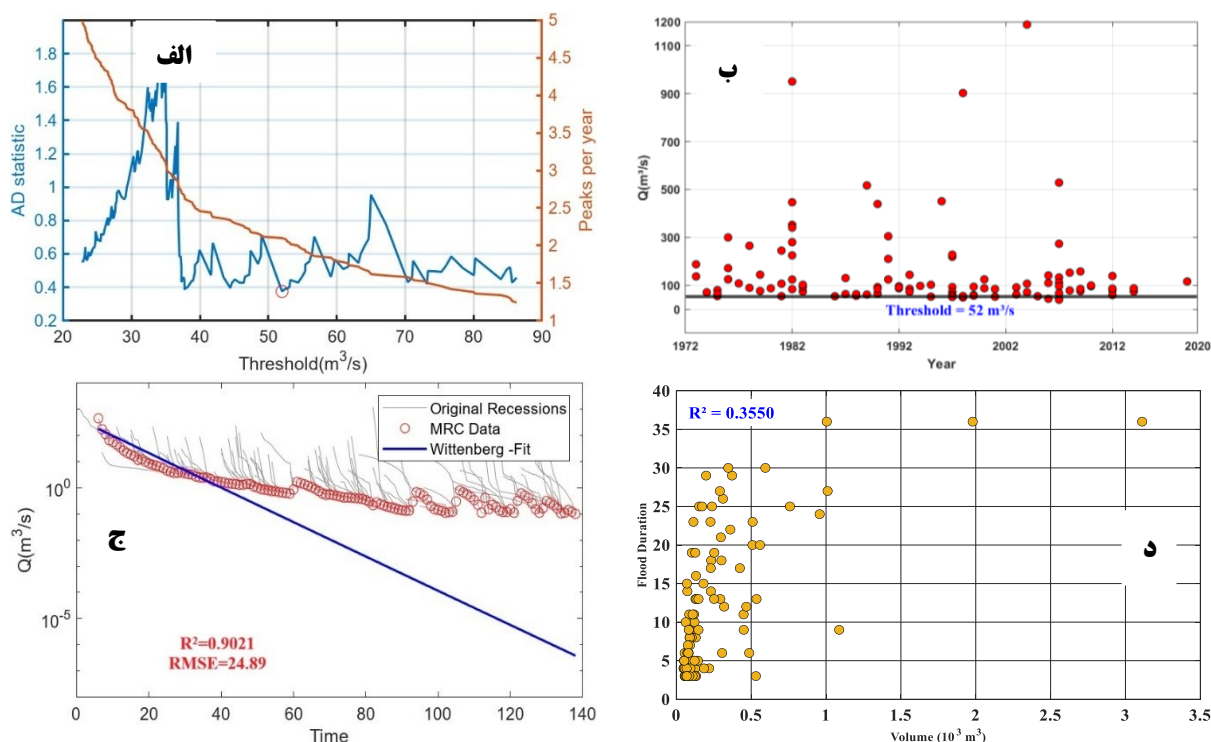
به منظور دستیابی به ویژگی‌های دقیق‌تر سیل، از روش خودکار منحنی فروکش اصلی برای قسمت‌بندی هیدروگراف سیل استفاده شده است. شکل‌های (۵ ج) و (۶ ج) منحنی فروکش اصلی حاصل از به کارگیری روش نوار تطبیقی و روابط تحلیلی معادله ویتنبرگ را نشان می‌دهد. دایره‌های توخالی قرمز رنگ نشان‌دهنده داده‌های گسسته منحنی فروکش اصلی حاصل از روش نوار تطبیقی، و خط آبی نشان‌دهنده منحنی فروکش اصلی جریان حاصل از روش ویتنبرگ است. مقادیر ضریب تعیین (R^2)، برای دو ایستگاه بیش از ۰/۹ بود که این نتایج نشان می‌دهد که منحنی فروکش اصلی می‌تواند فرایندهای فروکش یا اُفت جریان را به خوبی برازش دهند.

علاوه بر این، ضریب همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های مختلف سیلاب محاسبه و نمایش داده شده است. شکل (۵ د) و (۶ د)، نمودارهای پراکندگی ویژگی‌های سیل را نشان می‌دهد. نقاط توپر نشان‌دهنده ویژگی‌های سیل به دست آمده از روش پیشنهادی معرفی شده در بخش ۲-۲ هستند. ضریب همبستگی بین دوام (تداوم) و حجم سیلاب در قالب ضریب تعیین نمایش داده است. ضریب همبستگی بین دوام و حجم سیلاب در ایستگاه پیرسهراب، ۰/۷۱۸۷ می‌باشد که به عبارتی حجم سیلاب حدود ۶۱٪ از تغییرات دوام سیلاب را تبیین می‌کند. بنابراین حجم سیلاب عامل کلیدی در تعیین دوام سیلاب تلقی می‌گردد. با این حال، ۳۹٪ از تغییرات دوام سیلاب توسط عوامل دیگری مانند ویژگی‌های حوضه، ویژگی‌های بارش، مدیریت رواناب و غیره کنترل می‌گردد. در ایستگاه چندوکان، ضریب همبستگی بین دوام و حجم سیلاب، ۰/۵۹۵۸ می‌باشد که به عبارتی حجم سیلاب حدود ۳۶٪ از تغییرات دوام سیلاب را تبیین می‌کند. سیلاب‌های با حجم زیادتر، زمان بیشتری برای تخلیه یا عبور از یک مقطع دارند و بنابراین دوام سیلاب را افزایش می‌دهند. میانگین دوام رویدادهای سیل در ایستگاه پیرسهراب و چندوکان تقریباً یکسان و برابر ۱۲ روز است.



شکل ۵- نتایج حاصل از اجرای جعبه ابزار SFE_IFC بر روی ایستگاه پیرسهراب. (الف) مقادیر آماره اندرسون- دارلینگ (AD) و میانگین تعداد اوج‌های سالانه متناظر با آستانه‌های کاندید مختلف. دایره توخالی قرمز نشان‌دهنده آستانه بهینه است. (ب) سری‌های اوج به دست آمده از مدل POT؛ (ج) نتیجه برازش فرایند فروکش با استفاده از روش ویتنبرگ. R^2 نشان‌دهنده ضریب تعیین و RMSE نمایانگر جذر میانگین مربعات خطا می‌باشد. (د) نمودار پراکندگی بین مدت زمان و حجم سیل.

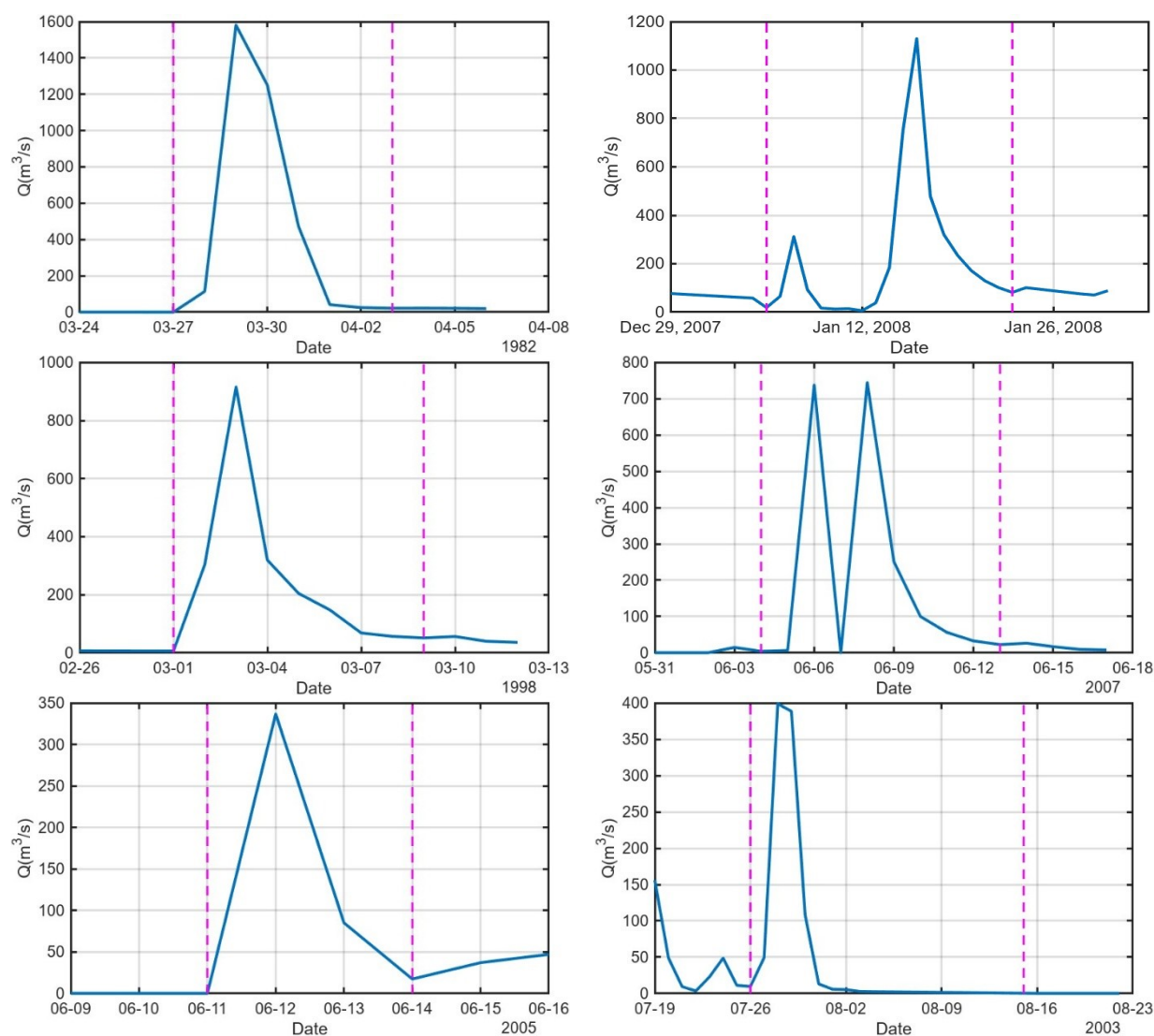
Fig. 5. Results from Pirsohrab gauge driving the SFE_IFC toolbox. (a) The AD statistics and the mean numbers of PPY corresponding to the different candidate thresholds. The red hollow circle represents the optimal threshold; (b) the peaks series from the POT model; (c) the result of fitting the recession process by Wittenberg method. The R^2 represents the coefficient of determination and the RMSE means Root Mean Squared Error; (d) scatter plot between duration and volume.



شکل ۶- نتایج حاصل از اجرای جعبه ابزار SFE_IFC بر روی ایستگاه چندوکان. (سایر موارد مشابه توضیحات شکل ۵ می‌باشد).

Fig. 6. Results from Chandokan gauge driving the SFE_IFC toolbox. (The other items are similar to the description of Fig. 5)

هیدروگراف سیل پردازش شده از خروجی جعبه ابزار SFE_IFC به دست آمده است. برای هر ایستگاه، شش رویداد سیل به طور تصادفی انتخاب شده‌اند (شکل ۷ و ۸). حوضه آبریز رودخانه کاجو دارای دو رژیم بارش متفاوت می‌باشد. بنابراین تعداد ۳ رویداد برای رژیم بارش مدیترانه‌ای و ۳ رویداد برای رژیم بارش موسمی تابستانه انتخاب شده است. بررسی این هیدروگراف‌های سیل مشاهده شده که تاریخ شروع شناسایی شده برای رویدادهای سیل عموماً با نقطه آغاز افزایش سیل مطابقت دارد، و منحنی فروکش اصلی حاصل از روابط تحلیلی ویتنبرگ، فرایند فروکش جریان را به طور رضایت‌بخشی برازش می‌کند. روش پیشنهادی برای هر دو نوع سیل تک اوجی و چند اوجی عملکرد خوبی را نشان می‌دهد. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهد که رویکرد خودکار ارائه شده در این مطالعه می‌تواند به طور مؤثری هیدروگراف‌های سیل را استخراج و در نهایت به ویژگی‌های دقیق‌تری از سیل دست یابد.

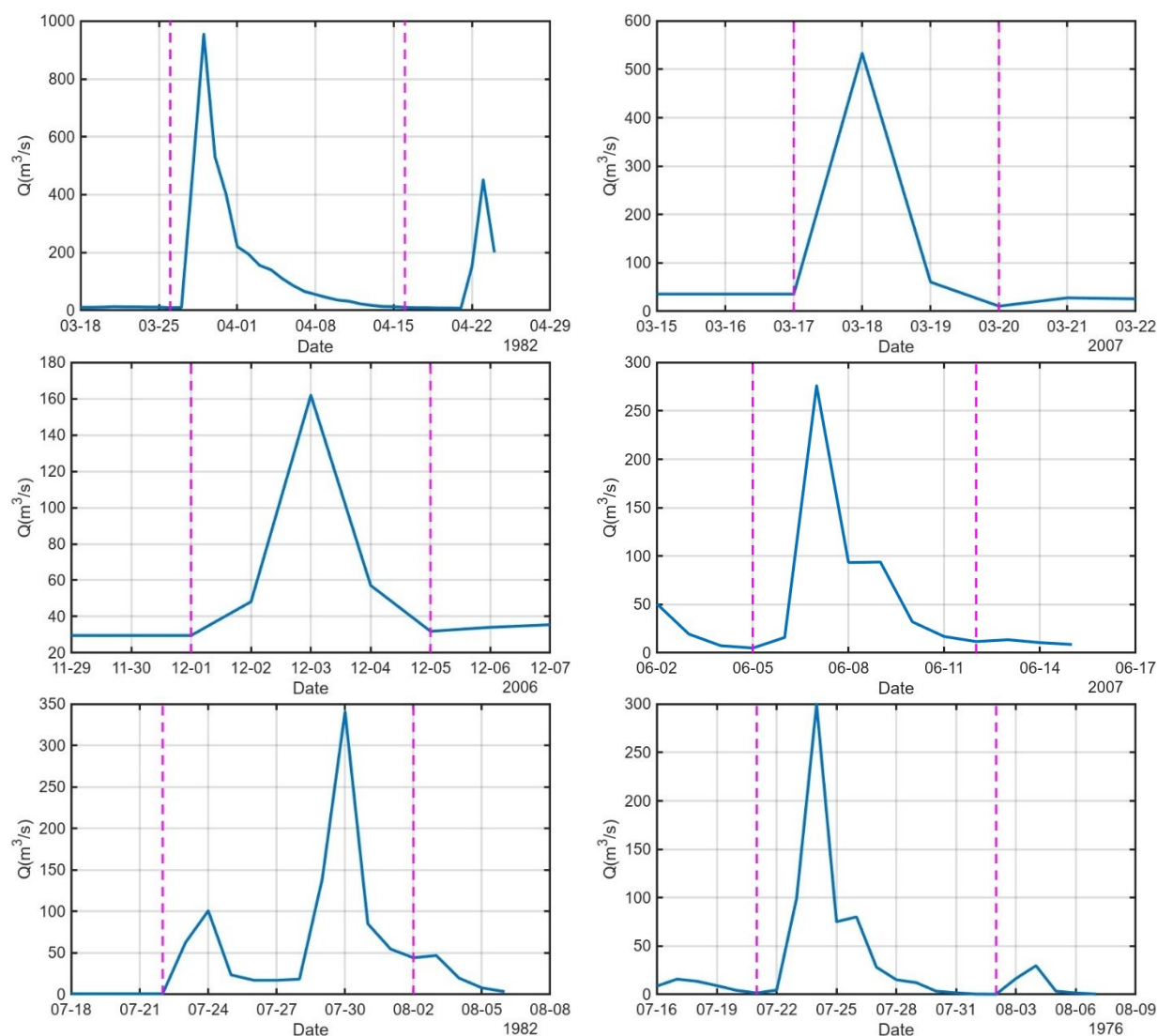


شکل ۷- نمونه‌های از هیدروگراف‌های مربوط به رویدادهای سیل در ایستگاه پیرسهراب. چهار رویداد سیل با برچسب‌های الف، ب، ج و د نشان داده شده‌اند.

Fig. 7. Examples of hydrographs for flood events at the Pirsahrab station. Four flood events, labeled a, b, c, and d, are shown.

از آنجایی که مدل POT می‌تواند اطلاعات بیشتری را از فرآیندهای سیل نسبت به روش سری بیشینه سالانه (AMS) ثبت کند، به طور گسترده‌ای در نمونه‌برداری سیل مورد استفاده قرار می‌گیرد (Lang et al., 1999). در این مطالعه، مقادیر میانگین تعداد اوج‌های سالانه، حول عدد ۲ نوسان داشت که با نتایج پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد (Claps & Laio, 2003). در مورد شاخص پراکندگی، مقدار به دست آمده برای هر دو ایستگاه آب‌سنجی به عدد ۱ نزدیک بود و درون محدوده اطمینان ۹۵٪ قرار گرفت. در این مطالعه، یک روش عمومی خودکار برای تعیین ویژگی‌های سیل بررسی شد. نتایج تحلیل همبستگی ویژگی‌های سیل (شکل ۴ و ۵ قسمت د) نمونه‌های هیدروگراف رویدادهای سیل (شکل ۶ و ۷) اثبات کردند که روش تعیین کلی ارائه شده در این مطالعه کارآمد و معقول است. تحلیل همبستگی به عنوان یک روش جایگزین برای بررسی ویژگی‌های سیل مورد استفاده قرار گرفت، چرا که

دستیابی به ویژگی‌های واقعی سیل دشوار است. در مقایسه با سایر روش‌های ارائه شده توسط پژوهشگران (Nadarajah & Shiau, 2005; Daneshkhah, Remesan, Chareabgoun & Holman, 2016; Liu et al., 2020)، این روش فروکش سیل و جریان پایه عمیق را نیز لحاظ می‌کند.

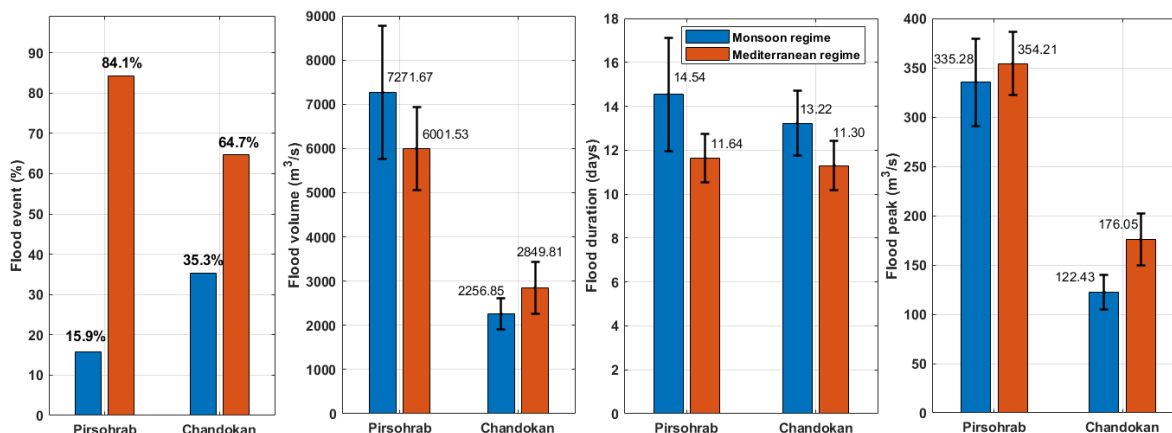


شکل ۸- نمونه‌های از هیدروگراف‌های مربوط به رویدادهای سیل در ایستگاه چندوکان. چهار رویداد سیل با برچسب‌های الف، ب، ج و د نشان داده شده‌اند.

Fig. 8. Examples of hydrographs for flood events at the Chandokan station. Four flood events, labeled a, b, c, and d, are shown.

همچنان که در شکل ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، تاریخ شروع شناسایی شده برای رویداد سیل عموماً با نقطه آغاز افزایش سیل مطابقت دارد و روش منحنی فروکش اصلی فرآیند اُفت جریان را به خوبی برازش می‌کند. جداسازی جریان پایه چالش برانگیز است زیرا نمی‌توان آن را مستقیماً اندازه‌گیری کرد و می‌تواند برای گروه‌های ذینفع مختلف معانی متفاوتی داشته باشد (Smakhtin, 2001). بنابراین، در این مطالعه به بررسی عمیق این موضوع پرداخته نشده است. به طور جایگزین، جریان پایه عمیق به عنوان

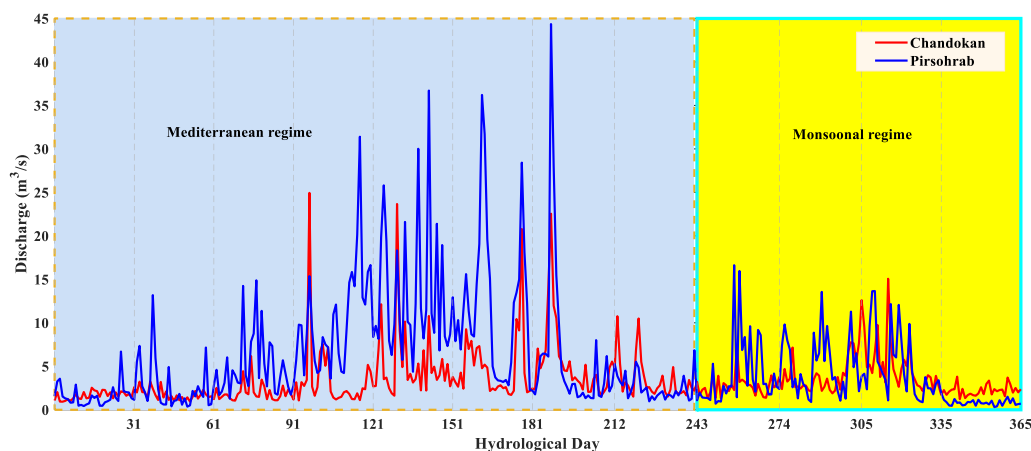
میانگین مقدار دبی در دوره خشک یک سال تعریف شده که یک مقدار ایستا است. البته نتایج حاصل از تحلیل هیدروگراف سیل (شکل ۷ و ۸) نشان داد که این ساده‌سازی تأثیر قابل توجهی بر نتایج ویژگی سیل و تحلیل بعدی سیل نداشته است. یکی از یافته‌های قابل توجه در این مطالعه این بود که فراوانی رویدادهای سیل در رژیم بارش مدیترانه‌ای (فصل سرد سال) بسیار بیشتر از رژیم بارش مونسونی (تابستانه) بود (شکل ۹). در ایستگاه پیرسهراب و چندوکان، به ترتیب ۸۴/۱٪ و ۶۴/۷٪ از رویدادهای سیل در رژیم بارندگی فصل سرد سال رخ داده است. از نظر ویژگی‌های حجم و دوام رویدادهای سیلاب برتری با رژیم بارش مونسونی بوده است؛ هرچند تفاوت‌ها اندک می‌باشد. از نظر ویژگی اوج سیلاب نیز برتری با رژیم بارش مدیترانه‌ای می‌باشد.



شکل ۹- مقایسه ویژگی‌های سیل (فراوانی رخداد، حجم، دوام و اوج) در رژیم‌های هیدرولوژیکی متفاوت رودخانه کاجو

Fig. 9. Comparison of flood characteristics (event frequency, volume, duration, and peak) in different hydrological regimes of the Kajo River

در این پژوهش، رژیم بارش مدیترانه‌ای (دوره سرد سال) از شروع سال هیدرولوژیکی (اول مهر) تا پایان اردیبهشت و رژیم بارش مونسونی از خرداد ماه تا پایان سال هیدرولوژیکی لحاظ شده است. علیرغم وجود سد مخزنی زبردان بر روی رودخانه کاجو، فراوانی رویدادهای سیلابی به ویژه در رژیم مدیترانه‌ای در قسمت‌های پایاب حوضه (ایستگاه پیرسهراب) بسیار بالا می‌باشد. این رویدادهای سیلابی از نظر ویژگی‌های اوج و حجم با رویدادهای سیلابی حوضه‌های پُرآب ایران در جنوب غرب (مانند، کارون و کرخه) قابل مقایسه بوده و لازم است اقدام‌های کنترلی در راستای ذخیره‌سازی آب ناشی از سیلاب در حوضه آبریز کاجو صورت گیرد.



شکل ۱۰- هیدروگراف رودخانه کاجو در دو رژیم هیدرواقليمی شامل مدیترانه‌ای (مهر تا اردیبهشت) و مونسونی (خرداد تا شهریور)

Fig. 10. Kajo River hydrograph in the two hydroclimatic regimes: Mediterranean (Oct-May) and Monsoonal (Jun-Sep)

نتیجه گیری

این مطالعه، با به کارگیری یک چارچوب کلی از رویه‌های خودکار مبتنی بر مدل POT و روش منحنی فروکش اصلی (MRC)، به انتخاب رویدادهای سیل و استخراج ویژگی‌های کلیدی آن (مدت، حجم و اوج) در حوضه آبریز رودخانه کاجو پرداخته است. جعبه ابزار SFE_IFC در محیط MATLAB با قابلیت اجرای خودکار و رابط کاربری گرافیکی، امکان پردازش کارآمد داده‌های جریان روزانه را فراهم کرد. نتایج حاصل از دو ایستگاه هیدرومتری پیرسهراب (پایاب کاجو) و چندوکان (سرآب کاجو) نشان داد که روش پیشنهادی حتی در شرایط هیدرولوژیکی پیچیده و متغیر این حوضه، قادر به استخراج عینی و دقیق هیدروگراف‌های سیل و ویژگی‌های مرتبط است. بررسی‌ها حاکی از آن بود که آستانه بهینه سیلاب در ایستگاه چندوکان (بالادست) برابر با ۵۲ مترمکعب بر ثانیه و در ایستگاه پیرسهراب (پایاب) برابر با ۱۷۷/۶ مترمکعب بر ثانیه است که نشان‌دهنده تأثیر معنادار موقعیت توپوگرافی و هیدرولوژیکی بر رفتار سیل‌خیزی حوضه می‌باشد. علاوه بر این، تحلیل ویژگی‌های سیلاب در دو رژیم بارشی غالب حوضه (مدیترانه‌ای و مونسونی) نشان داد که حدود ۸۴/۱ درصد از سیلاب‌های ایستگاه پیرسهراب و ۶۴/۷ درصد از سیلاب‌های ایستگاه چندوکان در دوره سرد سال (رژیم مدیترانه‌ای) رخ داده‌اند. با این حال، سیلاب‌های مربوط به رژیم مونسونی از نظر حجم و مدت زمان غالباً بزرگ‌تر بوده‌اند. همبستگی قوی بین حجم و مدت سیلاب (ضریب تعیین حدود ۰/۶۱ در ایستگاه پیرسهراب و ۰/۳۶ در ایستگاه چندوکان) گویای آن است که حجم سیلاب عامل تعیین‌کننده‌ای در تداوم رویدادهای سیلابی این حوضه محسوب می‌شود.

با توجه به بزرگی و فراوانی قابل توجه سیلاب‌های ثبت‌شده در حوضه رودخانه کاجو، که حتی با حوضه‌های پرآبی؛ نظیر کارون و کرخه قابل مقایسه است، و نیز تأثیرپذیری بالای منطقه از دو سامانه بارشی متفاوت، لزوم توجه جدی به مدیریت و کنترل سیلاب در این حوضه بیش از پیش احساس می‌شود. وجود سد زردان در بالادست اگر چه تا حدودی جریان را تنظیم می‌کند، اما سیلاب‌های بزرگ به ویژه در بخش‌های پایاب حوضه (مانند محدوده ایستگاه پیرسهراب) همچنان رخ می‌دهند و خسارات اقتصادی و زیست محیطی قابل توجهی به همراه دارند. از این رو، اجرای اقدامات تکمیلی مانند احداث سازه‌های ذخیره‌سازی سیلاب، توسعه سیستم‌های هشدار سریع، و به کارگیری روش‌های مدیریت یکپارچه حوضه آبریز در کنار بهره‌گیری از ابزارهای خودکار پایش و تحلیل، می‌تواند در کاهش ریسک سیل و بهره‌وری از منابع آب ناشی از سیلاب مؤثر واقع شود. به عنوان یک پیشنهاد اجرایی، احیاء و بهسازی سامانه‌های بومی کنترل سیلاب با رویکرد تلفیق دانش سنتی و فناوری‌های نوین پیشنهاد می‌گردد. در بخش بالا دست حوضه (محدوده ایستگاه چندوکان)، توسعه سامانه‌های دربند با به کارگیری مصالح نوین و طراحی بهینه‌شده می‌تواند ضمن کنترل سیلاب‌های کوهستانی، به حفظ خاک و توسعه پوشش گیاهی کمک نماید. در بخش پایین دست حوضه (محدوده ایستگاه پیرسهراب)، لایروبی، مرمت و حصارکشی هوتک‌های موجود و احداث هوتک‌های جدید با عمق و ظرفیت مناسب، همراه با سامانه‌های دگار برای کشت سیلابی، می‌تواند نقش مؤثری در ذخیره‌سازی سیلاب‌های فصلی، تأمین آب مورد نیاز جوامع محلی و کاهش خطر سیلاب داشته باشد. این سامانه‌ها ضمن حفظ منابع طبیعی و پایداری محیط زیست، انگیزه بهره‌برداران را در مدیریت مشارکتی سیلاب افزایش می‌دهند.

در مجموع، روش خودکار معرفی شده در این تحقیق به عنوان یک ابزار استاندارد و قابل تعمیم، قابلیت به کارگیری در حوضه‌های مختلف با شرایط هیدرواقليمی گوناگون را داراست و می‌تواند دقت و سرعت تحلیل‌های مرتبط با سیل را بهبود بخشد. با این حال، وابستگی نتایج به کیفیت و پیوستگی داده‌های ورودی، نیاز به کالیبراسیون پارامترهای آستانه در حوضه‌های متفاوت، و نیز ساده‌سازی‌های انجام شده در تخمین جریان پایه از جمله محدودیت‌هایی هستند که در مطالعات آتی می‌توانند مورد توجه قرار گیرند. توسعه الگوریتم‌های تلفیقی با داده‌های بارش و مدل‌های هیدرولوژیکی، و نیز بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های سیلاب در حوضه‌های مشابه، از جمله زمینه‌های پژوهشی پیشنهادی برای تکمیل یافته‌های حاضر است.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ گونه تعارض منافی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

فاطمه گنجی گوهری در گردآوری داده ها و مدیریت داده ها، تحلیل و نوشتن پیش نویس نقش داشت. حمید نظری پور (نویسنده مسئول) طراحی روش شناسی، تحلیل، ویرایش نهایی و نظارت بر پژوهش را بر عهده داشت. محمدرضا پودینه و محسن حمیدیان پور در تحلیل داده ها و بازبینی محتوا مشارکت کردند. رضا تیموری در پیش پردازش داده ها نقش ایفا نمود و علیرضا قائمی در تحلیل های تکمیلی و ویرایش نهایی مقاله مشارکت داشت.

حامی مالی

حمایت مالی این پژوهش از طرف بنیاد ملی علم ایران (INSF) در قالب حمایت از رساله دکتری نویسنده اول برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۴۴۳۳۴ انجام شده است.

سپاسگزاری

نویسندگان صمیمانه از آقای Zhang Qin، از دانشگاه ووهان (چین)، به پاس ابداع جعبه ابزار SFE_IFC، به اشتراک گذاری سخاوتمندانه و عمومی نسخه نرم افزاری آن و نظارت بر فرایند تجزیه و تحلیل داده ها سپاسگزاری می کنند. از شرکت سهامی آب منطقه ای استان سیستان و بلوچستان به خاطر تأمین رایگان داده های پژوهش سپاسگزاری می گردد. از داوران ناشناس نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی به خاطر ارائه نظرهای علمی و ساختاری تشکر و قدردانی می شود.

References

- Adhikari, P., Yang, H., Douglas, K. R., Kirschbaum, D. B., Gourley, J., Adler, R., & Brakenridge, G. R. (2010). A digitized global flood inventory (1998–2008): Compilation and preliminary results. *Natural Hazards*, 55(2), 405–422. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9537-2>
- Aissia, M. A., Ben Chebana, F., Ouarda, T. B. M. J., Roy, L., Desrochers, G., & Chartier, I. (2012). Multivariate Analysis of flood characteristics in a climate change context of the watershed of the Baskatong Reservoir, Province of Qu'ebec, Canada. *Hydrological Processes*, 261, 130–142. <https://doi.org/10.1002/hyp.8117>
- Arciniega-Esparza, S., Breña-Naranjo, J. A., Pedrozo-Acuña, A., & Appendini, C. M. (2017). HYDRORECESSION: A Matlab toolbox for streamflow recession analysis. *Computers & Geosciences*, 98, 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.10.005>
- Aryanmanesh, J., Nazaripour, H., Mahmoodi, P., & Khosravi, P. (2024). Reconstruction of Missing Daily Streamflow Data using the MissForest Algorithm in Southern Baluchestan Basin, Iran. *Journal of Watershed Management Research*, 15(2), 49–64. [In Persian] <https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.49>
- Bernardara, P., Mazas, F., Kergadallan, X., & Hamm, L. (2014). A two-step framework for over-threshold modelling of environmental extremes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(3), 635–647. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-635-2014>
- Beven, K., Smith, P. J., & Wood, A. (2011). On the colour and spin of epistemic error (and what we might do about it). *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(10), 3123–3133. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3123-2011>
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A., Parajka, J., Merz, B., ... & Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>

- Brunner, M. I., Furrer, R., Sikorska, A. E., Viviroli, D., Seibert, J., & Favre, A. C. (2018). Synthetic design hydrographs for ungauged catchments: a comparison of regionalization methods. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(7), 1993-2023. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1523-3>
- Brunner, M. I., Hingray, B., Zappa, M., & Favre, A. C. (2019). Future trends in the interdependence between flood peaks and volumes: Hydro-climatological drivers and uncertainty. *Water Resources Research*, 55(6), 4745-4759. <https://doi.org/10.1029/2019WR024701>
- Carlotto, T., & Chaffe, P. L. B. (2019). Master recession curve parameterization tool (MRCptool): different approaches to recession curve analysis. *Computers & Geosciences*, 132, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.06.016>
- Choulakian, V., & Stephens, M. A. (2001). Goodness-of-fit tests for the generalized Pareto distribution. *Technometrics*, 43(4), 478-484. <https://doi.org/10.1198/00401700152672573>
- Claps, P., & Laio, F. (2003). Can continuous streamflow data support flood frequency analysis? An alternative to the partial duration series approach. *Water Resources Research*, 39(8). <https://doi.org/10.1029/2002WR001868>
- Cunnane, C. (1979). A note on the Poisson assumption in partial duration series models. *Water Resources Research*, 15(2), 489-494. <https://doi.org/10.1029/WR015i002p00489>
- Daneshkhah, A., Remesan, R., Chatrabgoun, O., & Holman, I. P. (2016). Probabilistic modeling of flood characterizations with parametric and minimum information pair-copula model. *Journal of Hydrology*, 540, 469-487. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.044>
- Davison, A. C., & Smith, R. L. (1990). Models for exceedances over high thresholds. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 52(3), 393-425. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01796.x>
- De Bruijn, J. A., de Moel, H., Jongman, B., de Ruiter, M. C., Wagemaker, J., & Aerts, J. C. (2019). A global database of historic and real-time flood events based on social media. *Scientific Data*, 6(1), 311. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0326-9>
- Duan, Q., Schaake, J., Andréassian, V., Franks, S., Goteti, G., Gupta, H. V., ... & Wood, E. F. (2006). Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 3-17. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.031>
- Duncan, H. P. (2019). Baseflow separation—A practical approach. *Journal of Hydrology*, 575, 308-313. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.040>
- Durocher, M., Burn, D. H., & Ashkar, F. (2019). Comparison of estimation methods for a nonstationary index-flood model in flood frequency analysis using peaks over threshold. *Water Resources Research*, 55(11), 9398-9416. <https://doi.org/10.1029/2019WR025305>
- Durocher, M., Mostofi Zadeh, S., Burn, D. H., & Ashkar, F. (2018). Comparison of automatic procedures for selecting flood peaks over threshold based on goodness-of-fit tests. *Hydrological Processes*, 32(18), 2874-2887. <https://doi.org/10.1002/hyp.13223>
- Güngör, M. N., & Ozkaya, A. (2025). Baseflow index estimation using digital and minima methods in the Büyük Menderes Basin. *Sustainable Water Resources Management*, 11(6), 129. <https://doi.org/10.1007/s40899-025-01304-6>
- Harville, D. A. (1977). Maximum likelihood approaches to variance component estimation and to related problems. *Journal of the American Statistical Association*, 72(358), 320-338. <https://doi.org/10.2307/2286796>
- Helfer, F., Bernardi, F., De Barros, C. A. P., Allasia, D. G., Minella, J. P. G., Tassi, R., & Scariot, N. (2025). Enhanced baseflow separation in rural catchments: event-specific calibration of recursive digital filters with tracer-derived data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(23), 6959-6984. <https://doi.org/10.5194/hess-29-6959-2025>

- Heo, J. H., Shin, H., Nam, W., Om, J., & Jeong, C. (2013). Approximation of modified Anderson–Darling test statistics for extreme value distributions with unknown shape parameter. *Journal of Hydrology*, 499, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.008>
- Jeong, D. I., Sushama, L., Khaliq, M. N., & Roy, R. (2014). A copula-based multivariate analysis of Canadian RCM projected changes to flood characteristics for northeastern Canada. *Climate Dynamics*, 42(7), 2045–2066. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1851-4>
- Karahacane, H., Meddi, M., Chebana, F., & Saaed, H. A. (2020). Complete multivariate flood frequency analysis, applied to northern Algeria. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), e12619. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12619>
- Kauffeldt, A., Wetterhall, F., Pappenberger, F., Salamon, P., & Thielen, J. (2016). Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. *Environmental Modelling & Software*, 75, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.09.009>
- Lamb, R., & Beven, K. (1997). Using interactive recession curve analysis to specify a general catchment storage model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1(1), 101–113. <https://doi.org/10.5194/hess-1-101-1997>
- Lang, M., Ouarda, T. B., & Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold modeling. *Journal of Hydrology*, 225(3–4), 103–117. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00167-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00167-5)
- Liang, B., Shao, Z., Li, H., Shao, M., & Lee, D. (2019). An automated threshold selection method based on the characteristic of extrapolated significant wave heights. *Coastal Engineering*, 144, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.12.001>
- Liu, Y. R., Li, Y. P., Ma, Y. A., Jia, Q. M., & Su, Y. Y. (2020). Development of a Bayesian-copula-based frequency analysis method for hydrological risk assessment—The Naryn River in Central Asia. *Journal of Hydrology*, 580, 124349. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124349>
- Mazas, F., & Hamm, L. (2011). A multi-distribution approach to POT methods for determining extreme wave heights. *Coastal Engineering*, 58(5), 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.12.003>
- Mediero, L., Jim' Enez-Alvarez, A., & Garrote, L. (2010). Design flood hydrographs from the relationship between flood peak and volume. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), 2495–2505. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2495-2010>
- Moradi, M., & Ranjbar Saadat Abadi, A. (2020). A Synoptic-Dynamic Investigation of the Flood in Sistan and Baluchestan and the Heavy Snowfall in Gilan in winter 2020. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(3), 227–243. <https://doi.org/10.22067/geoh.2020.67338.1000>
- Mostofizadeh, S., Durocher, M., Burn, D. H., & Ashkar, F. (2019). Pooled flood frequency analysis: a comparison based on peaks-over-threshold and annual maximum series. *Hydrological Sciences Journal*, 64(2), 121–136. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1577556>
- Nadarajah, S., & Shiau, J. T. (2005). Analysis of extreme flood events for the Pachang River, Taiwan. *Water Resources Management*, 19(4), 363–374. <https://doi.org/10.1007/s11269-005-2073-2>
- Nathan, R. J., & McMahon, T. A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7), 1465–1473. <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01465>
- Nazaripour, H. (2015). Development of a New Comprehensive Multivariate Aggregate Drought Index (ADI) based on Principal Component Analysis (PCA) for Hydro- Meteorological Droughts Assessment in the Southeast of Iran (Case Study: Pishin Dam Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 4(3), 91–112. <https://doi.org/10.22067/geo.v4i3.31626>
- Oktaviana, P. P., Syafei, A. D., Kuswanto, H., & Hermana, J. (2025). Temporal Probability Analysis of Flood Occurrence Using Peak Over Threshold Method for Extreme Rainfall Events. In *BIO Web of Conferences* (Vol. 157, p. 11002). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202515711002>

- Ombadi, M., Nguyen, P., Sorooshian, S., & Hsu, K. L. (2018). Developing intensity-duration-frequency (IDF) curves from satellite-based precipitation: Methodology and evaluation. *Water Resources Research*, 54(10), 7752-7766. <https://doi.org/10.1029/2018WR022929>
- Önöz, B., & Bayazit, M. (2001). Effect of the occurrence process of the peaks over threshold on the flood estimates. *Journal of Hydrology*, 244(1-2), 86-96. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00330-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00330-4)
- Qiu, L., Du, Z., Zhu, Q., & Fan, Y. (2017). An integrated flood management system based on linking environmental models and disaster-related data. *Environmental Modelling & Software*, 91, 111-126.
- Ribatet, M., Sauquet, E., Grésillon, J. M., & Ouarda, T. B. (2007). A regional Bayesian POT model for flood frequency analysis. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21(4), 327-339. <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0068-z>
- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(3-4), 147-186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
- Solari, S., & Losada, M. A. (2012). A unified statistical model for hydrological variables including the selection of threshold for the peak over threshold method. *Water Resources Research*, 48(10). <https://doi.org/10.1029/2011WR011475>
- Solari, S., Egüen, M., Polo, M. J., & Losada, M. A. (2017). Peaks Over Threshold (POT): A methodology for automatic threshold estimation using goodness of fit p-value. *Water Resources Research*, 53(4), 2833-2849. <https://doi.org/10.1002/2016WR019426>
- Sujono, J., Shikasho, S., & Hiramatsu, K. (2004). A comparison of techniques for hydrograph recession analysis. *Hydrological Processes*, 18(3), 403-413. <https://doi.org/10.1002/hyp.1247>
- Tallaksen, L. M. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, 165(1-4), 349-370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)
- Tanoue, M., Hirabayashi, Y., & Ikeuchi, H. (2016). Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years. *Scientific Reports*, 6(1), 36021. <https://doi.org/10.1038/srep36021>
- Tosunoglu, F., Gürbüz, F., & İspirli, M. N. (2020). Multivariate modeling of flood characteristics using Vine copulas. *Environmental Earth Sciences*, 79(19), 459. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09199-6>
- Vittal, H., Singh, J., Kumar, P., & Karmakar, S. (2015). A framework for multivariate data-based at-site flood frequency analysis: Essentiality of the conjugal application of parametric and nonparametric approaches. *Journal of Hydrology*, 525, 658-675. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.024>
- Wittenberg, H. (1999). Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. *Hydrological Processes*, 13(5), 715-726. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990415\)](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990415))
- Yue, S. (2000). The bivariate lognormal distribution to model a multivariate flood episode. *Hydrological Processes*, 14(14), 2575-2588. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015))
- Zeng, S., Du, H., & Xia, J. (2020). Development of an interface-oriented add-in modeling framework for integrated water system simulation and its application. *Environmental Modelling & Software*, 134, 104840. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104840>
- Zhang, Q., Zhang, L., She, D., Wan, S., Wang, G., & Zeng, S. (2021) Automatic procedure for selecting flood events identifying flood characteristics from daily streamflow data. *Environmental Modelling and Software*, 145, 105180. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105180>