



## Regional Flood Frequency Analysis in West of Iran

V. Chitsaz<sup>1\*</sup> and P. Mohit Isfahani<sup>2</sup>

## Abstract

Over recent decades Iran and especially its western regions have suffered from devastating floods. Planning and designing hydraulic structures require information from flood magnitude corresponding to a given occurrence probability. Hence, in this study, we aimed to determine flood homogeneous regions and regional growth curves using L-moments and flood index method for annual maximum flow of 62 sub-basins in Great-Karoon and Karkhe basins. Moreover, the impacts of droughts and hydraulic structures on the stationary and stochastic nature of floods were investigated using Mann-Kendall trend test, Pettitt's change point detection test (CPD) and graphical interpretations. It was found that there are five hydrological homogeneous regions in the study area. The goodness of fit tests results showed that the Generalized Pareto (GPA) distribution for the first and second regions, the Generalized Normal (GNO) distribution for the third region and the Generalized Logistic (GPA) distribution for the fourth and fifth regions are the most appropriate regional statistical distributions. Also, maximum daily flows corresponding to 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 and 1000-year return periods were estimated for all study sub-basins. Regional flood frequency analysis revealed that for 100-year return period the fifth region's sub-basins, with 4060 m<sup>3</sup>/s discharge on average, have the highest maximum daily flow. The average 100-year maximum daily flows in the regions I, II, III and IV were estimated around 632, 682, 460 and 429 (m<sup>3</sup>/s), respectively.

**Keywords:** Frequency Analysis, Trend Test, Natural Hazards Risk, L-Moments, Growth Curve, Dam.

Received: December 6, 2021

Accepted: April 17, 2022

## تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیل در غرب ایران

وحید چیت‌ساز<sup>۱\*</sup> و پوریا محیط اصفهانی<sup>۲</sup>

## چکیده

در چند دهه اخیر کشور ایران و به ویژه مناطق غربی آن از وقوع انواع سیلاب‌های مخرب رنج برده‌اند. از سوی دیگر ارائه برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و طراحی سازه‌های هیدرولیکی برای کاهش سیل (Flood mitigation)، نیازمند اطلاعات از بزرگی سیلاب‌ها به ازای احتمال وقوع مشخص می‌باشد. لذا در پژوهش حاضر سعی شد تا با استفاده از گشتاورهای خطی و روش شاخص سیل، مناطق همگن هیدرولوژیکی و منحنی‌های رشد منطقه‌ای برای حداکثر دبی روزانه در ۶۲ زیرحوضه از حوضه‌های کارون بزرگ و کرخه تعیین شود. علاوه بر این اثر سازه‌های هیدرولیکی و خشکسالی بر ماهیت استوکاستیک و ایستایی داده‌ها توسط آزمون روند من-کندال، آزمون تعیین نقطه آغاز تغییرات پتیت و بررسی‌های نموداری مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین، بر اساس ناحیه‌بندی و آزمون‌های همگنی، پنج زیرناحیه همگن برای زیرحوضه‌ها مشخص شد. نتایج آزمون نکویی برازش نشان داد که توزیع‌های پارتو تعمیم‌یافته (GPA) برای زیرناحیه‌های اول و دوم، نرمال تعمیم‌یافته (GNO) برای زیرناحیه سوم و لجستیک تعمیم‌یافته (GLO) برای زیرناحیه‌های چهارم و پنجم دارای بهترین برازش هستند. به همین ترتیب دبی متناظر با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سال برای همه زیرحوضه‌ها برآورد گردید. نتایج تحلیل فراوانی منطقه‌ای مشخص کرد که به ازای دوره بازگشت ۱۰۰ سال، زیرحوضه‌های ناحیه پنجم با میانگین ۴۰۶۰ متر مکعب بر ثانیه دارای بیش‌ترین مقادیر حداکثر دبی روزانه هستند. به همین ترتیب در زیرحوضه‌های زیرناحیه‌های اول تا چهارم میانگین حداکثر دبی‌های روزانه با دوره بازگشت ۱۰۰ سال به ترتیب ۶۳۲، ۶۸۲، ۴۶۰ و ۴۲۹ متر مکعب بر ثانیه برآورد گردید.

**کلمات کلیدی:** تحلیل فراوانی، آزمون روند، ریسک مخاطرات طبیعی، گشتاورهای خطی، منحنی رشد، سد.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۹/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱/۲۸

1- Researcher in Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran. Email: v.chitsaz@areeo.ac.ir

2- M.Sc. Graduate of Watershed Management, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\*- Corresponding Author

Dor: [20.1001.1.17352347.1401.18.1.6.4](https://doi.org/10.1001.1.17352347.1401.18.1.6.4)

۱- کارشناس پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

\*- نویسنده مسئول  
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۱ امکانپذیر است.



فراهم می‌کند (Hosking and Wallis, 1997). Kumar and Chatterjee (2005) در هندوستان اقدام به استفاده از روش‌های تحلیل فراوانی منطقه‌ای در حوضه‌های براهامپوترا هندوستان کردند و اظهار داشتند که توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته<sup>۳</sup> (GEV) مناسب‌ترین توزیع برای برآورد دوره بازگشت سیلاب‌های این منطقه می‌باشد. Ellouze and Abida (2008) نیز برای حوضه‌های تونس تکنیک تحلیل فراوانی منطقه‌ای را بکار بردند. نتایج آنها نیز حاکی از ارجحیت توزیع‌های GEV و لوجستیک تعمیم‌یافته<sup>۴</sup> (GLO) نسبت به سایر توزیع‌های احتمال در برآورد دبی پیک سیلاب‌ها بود. همچنین، نتایج آنها نشان داد که پارامترهای این توزیع‌ها ارتباط نزدیکی با مساحت حوضه‌ها دارد و می‌توان با مدل‌های رگرسیونی پارامترهای این توزیع‌ها را برای حوضه‌های فاقد آمار به منظور برآورد دبی‌های سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف برآورد کرد. Noto and La (2009) نیز در سیسیل ایتالیا تحلیل فراوانی منطقه‌ای را انجام دادند و نشان دادند که حوضه‌های مورد مطالعه‌شان در پنج گروه همگن به لحاظ هیدرولوژیکی قرار می‌گیرد و توزیع GEV مناسب‌ترین توزیع برای هر پنج گروه جهت تحلیل فراوانی منطقه‌ای می‌باشد.

در ایران نیز مطالعات متعددی در مناطق مختلف در ارتباط با تعیین بهترین تابع توزیع قابل برازش به داده‌های دبی حداکثر روزانه و پیک سیلاب به روش تحلیل فراوانی منطقه‌ای انجام شده است. برای مثال Modarres and Soltani (2007) تابع توزیع لوگ نرمال سه پارامتری<sup>۵</sup> (LN3) را در محدوده حوضه کرخه، Rahnama and Rostami (2007) توزیع‌های پارتو تعمیم‌یافته<sup>۶</sup> (GPA) و مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV) را در منطقه هلیل‌رود، Malekinezhad et al. (2011) و Sharifi-Garmdareh and et al. (2018) به ترتیب توزیع‌های GEV و لوگ-پیرسون نوع سوم (LP3) را برای حوضه‌های دریاچه نمک و Allahbakhshian-Farsani et al. (2020) نیز توزیع نرمال تعمیم‌یافته<sup>۷</sup> (GNO) را در برخی از حوضه‌های کارون بزرگ و کرخه جهت تحلیل فراوانی سری‌های حداکثر دبی روزانه در این مناطق معرفی کردند.

اهداف اصلی پژوهش حاضر نیز تعیین حوضه‌های همگن هیدرولوژیکی و ارائه منحنی‌های رشد منطقه‌ای<sup>۸</sup> جهت برآورد بزرگی سیلاب‌ها به ازای دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه‌های سیلخیز غرب کشور در سطح وسیع و با استفاده از تحلیل فراوانی منطقه‌ای و روش شاخص سیل<sup>۹</sup> می‌باشد. در این راستا یک روش با سناریوهای مختلف نیز برای تعیین اثر خشکسالی‌ها و سازه‌های هیدرولیکی موجود

پدیده سیلاب یکی از مخاطرات طبیعی می‌باشد که کشور ما در سال‌های اخیر بیش از پیش از آن رنج برده است. از این حیث این پدیده توجه بسیاری از محققین و تصمیم‌گیران را در چند سال اخیر به خود معطوف ساخته است. با این وجود انجام هر گونه مطالعه و ارائه طرح‌های مدیریتی و سازه‌ای به منظور کاهش سیل<sup>۱</sup> در درجه اول نیازمند اطلاعات مناسب هم از لحاظ کیفی و هم از لحاظ کمی می‌باشد؛ دبی‌های حداکثر و دبی پیک سیلاب‌های یک حوضه به ازای دوره بازگشت‌های مختلف دو مورد از مهم‌ترین این اطلاعات هستند. این دو متغیر پایه و اساس بسیاری از طرح‌های آبخیزداری و طراحی سازه‌های هیدرولیکی می‌باشند. با این وجود فقدان ایستگاه‌های هیدرومتری و یا طول دوره آماربرداری کوتاه مدت منجر شده است که داده‌های مناسبی برای تحلیل این متغیرها در بسیاری از حوضه‌های کشور موجود نباشد. به عنوان یک راهکار پذیرفته شده در دنیا برای غلبه بر این مشکلات، استفاده از تکنیک‌های تحلیل فراوانی منطقه‌ای سیلاب به جای تحلیل فراوانی ایستگاهی این پدیده بسیار توصیه شده است (Hosking et al., 1985; Hailegeorgis and Alfredsen, 2018; Sharifi Garmdareh et al., 2017).

از آنجایی که تحلیل فراوانی منطقه‌ای مشاهدات بیشتری را از یک منطقه همگن هیدرولوژیکی جهت برآورد چندک‌ها<sup>۲</sup> مورد استفاده قرار می‌دهد، نتایج آن به ویژه برای وقایع حدی با دوره بازگشت‌های بلند مدت نسبت به روش تحلیل فراوانی ایستگاهی برای ایستگاه‌ها با طول دوره آماری کم قابل اطمینان‌تر می‌باشد (Nam et al., 2015; Kim et al., 2020). لذا تکنیک‌های تحلیل فراوانی منطقه‌ای به صورت گسترده نه تنها فقط برای سیل (Sharifi Garmdareh et al., 2020; Allahbakhshian-Farsani et al., 2018) بلکه برای مطالعه احتمال وقوع انواع رویدادهای حدی مانند خشکسالی (Ghadami et al., 2020; Strnad et al., 2020)، دوره‌های خشک (Modarres and Sarhadi, 2010)، جریان پایه (Zamani et al., 2015) و حداکثر بارش روزانه (Malekinezhad and Zare-Garizi, 2014; Mohammadi and Talebi, 2020) در ایران و سایر مناطق دنیا مورد استفاده قرار گرفته است.

از سوی دیگر برآورد صحیح از احتمال وقوع یک رویداد حدی مانند سیل در یک منطقه همگن هیدرولوژیکی در درجه اول مستلزم انتخاب تابع توزیع احتمال مناسب و در درجه دوم نیازمند برآورد پارامترهای منطقه‌ای صحیح می‌باشد که تحلیل فراوانی منطقه‌ای این امکان را

در منطقه بر روی ماهیت استوکاستیک داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری معرفی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۱-۱- منطقه مورد مطالعه و داده

پژوهش حاضر از نظر هیدرولوژیکی در محدوده زیرحوضه‌های کارون بزرگ و کرخه در غرب زاگرس انجام شد که از نظر سیاسی شامل بخش‌هایی از استان‌های همدان، لرستان، ایلام، خوزستان، کرمانشاه، کردستان، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، مرکزی و اصفهان می‌شود. منطقه مورد مطالعه از نظر توپوگرافی از محدوده پست جلگه خوزستان با ارتفاع حدود ۲۷ متر از سطح دریا تا ارتفاعات رشته کوه‌های زاگرس با ارتفاعات بیش از ۴۰۰۰ متر را شامل می‌شود (شکل ۱). این محدوده بیشتر به سبب وجود رودخانه‌های بزرگ کارون و کرخه و سرشاخه‌های این رودخانه‌ها از لحاظ هیدرولوژیکی حائز اهمیت می‌باشد. از سوی دیگر به سبب بارش‌های شدید و سیل‌آسا رویدادهای حدی سیلابی در سال‌های اخیر این مناطق را متحمل

خسارات جانی و مالی جدی کرده‌اند (Mehdi Nasab, 2020). لذا در پژوهش حاضر از داده‌های دبی روزانه که توسط شرکت مدیریت منابع آب وزارت نیرو (wrs.wrm.ir) به صورت رایگان تا سال ۱۳۹۶ در اختیار کاربران قرار گرفته است، برای ۶۲ ایستگاه هیدرومتری با طول دوره آماری حداقل ۲۰ سال استفاده شد. در این راستا جهت تحلیل فراوانی رویدادهای حدی سیل در ایستگاه‌های مورد مطالعه، از داده‌های دبی روزانه سری‌های سالانه حداکثر دبی روزانه تهیه و مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این اطلاعات و مشخصات مربوط به سازه‌های هیدرولیکی موجود در منطقه شامل موقعیت، نوع سازه، سال شروع پروژه سازه و سال بهره‌برداری از آن از سازمان تحقیقات منابع آب (تماب) وابسته به وزارت نیرو جمع‌آوری شد. در شکل ۱ محدوده مورد مطالعه، شبکه زهکشی، ایستگاه‌های هیدرومتری و حوضه‌های آنها به همراه موقعیت سدهای موجود در منطقه نمایش داده شده است. در جدول‌های ۱ و ۲ نیز برخی از خصوصیات آماری این ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه گردیده است.

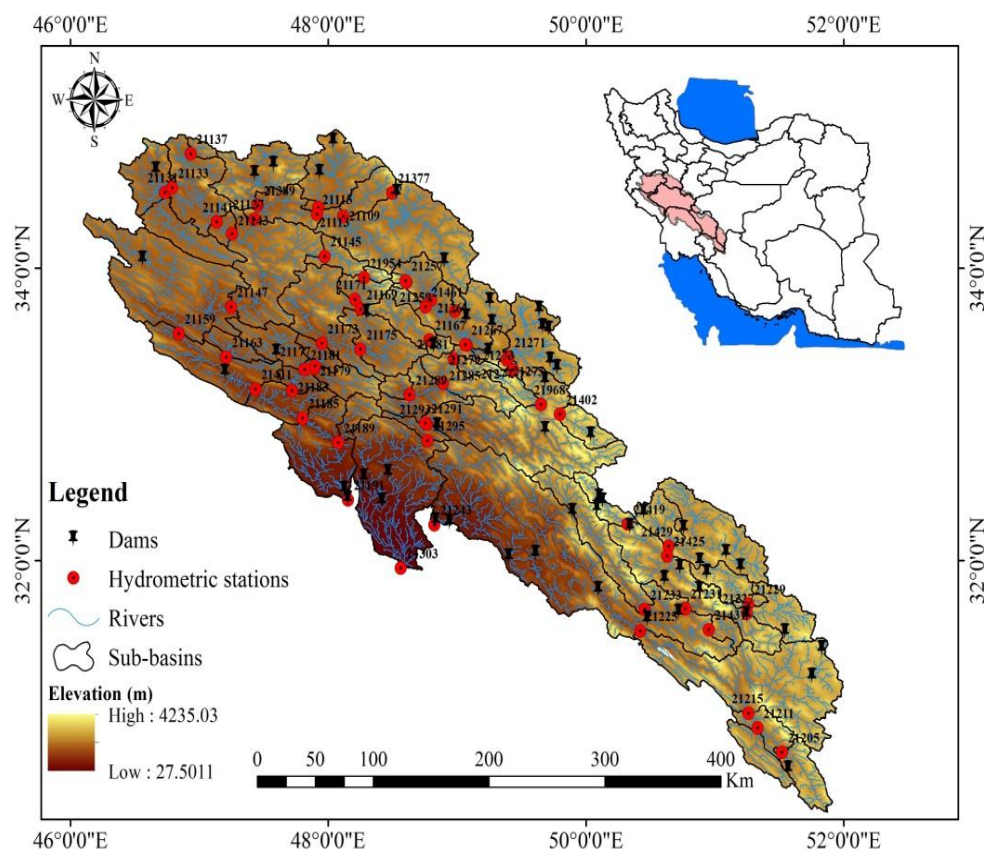


Fig. 1- Locations of dams and investigated hydrometric stations in the study area.

شکل ۱- موقعیت سازه‌های هیدرولیکی، ایستگاه‌های هیدرومتری مورد بررسی و محدوده مورد مطالعه

## ۲-۲- بررسی روند و اثر سازه‌های هیدرولیکی

یکی از پیش شرط‌های اصلی تحلیل فراوانی چه به صورت ایستگاهی و چه به صورت منطقه‌ای عدم وجود روند و استقلال و ایستایی داده‌ها می‌باشد. از سوی دیگر وجود سازه‌های هیدرولیکی نظیر سد می‌تواند ماهیت وقوع تصادفی<sup>۱۰</sup> داده‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. لذا در این پژوهش اثر انواع سازه‌های هیدرولیکی موجود در منطقه- شامل سدهای مخزنی، بندهای خاکی و یا تونل‌های انتقال آب- بر روی ایستگاه‌های هیدرومتری پایین‌دست به کمک آزمون روند من-کندال<sup>۱۱</sup> (Mann, 1945; Libiseller and Grimvall, 2002)، آزمون تعیین نقطه آغاز تغییرات (شکست ساختاری) پتیت<sup>۱۲</sup> (Pettitt, 1979) و بررسی‌های نموداری سری‌های سالانه حداکثر دبی روزانه با حوضه‌های مجاور مورد ارزیابی قرار گرفت. تکنیک بکار گرفته شده در این پژوهش برای تعیین مبدأ زمان اثر سازه‌های هیدرولیکی بر ماهیت داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری پایین‌دست، به صورت مشابه توسط Mei et al. (2016) نیز در ایالات متحده برای تعیین اثر سازه‌های هیدرولیکی بر دبی اوج سیلاب ایستگاه‌های هیدرومتری پایین‌دست سازه‌ها مورد استفاده و تأیید قرار گرفته است.

از این رو ابتدا ایستگاه‌هایی که در بالادست خود دارای هرگونه سازه هیدرولیکی بودند مشخص شدند؛ پس از آن در جهت مسیر رودخانه به سمت پایین‌دست، ایستگاه‌های هیدرومتری به ترتیب مورد بررسی قرار گرفتند. چنانچه هیچ‌گونه روند کاهشی معنی‌دار و یا تغییر ناگهانی و غیر عادی در سری زمانی داده‌های اولین ایستگاه پس از سازه هیدرولیکی وجود نداشت، تأثیر سازه مذکور بر ایستگاه مورد نظر و ایستگاه‌های بعد از آن قابل چشم‌پوشی و سایر فرضیات- عدم خود همبستگی و استقلال- برای داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در صورتیکه سری زمانی داده‌ها در اولین ایستگاه پس از یک سازه معین دارای روند کاهشی معنی‌دار و شکست ساختاری مشخص بود، همزمانی سال نقطه شکست و تغییرات پس از آن با سال‌های بین آغاز عملیات تا خاتمه (آبگیری) پروژه سازه مقایسه شد. علت در نظر گرفتن بازه آغاز تا پایان پروژه‌های سازه‌های هیدرولیکی بجای سال آغاز یا سال بهره‌برداری آنها به تنهایی به عنوان زمان مبنا برای اثرگذاری سازه، متفاوت بودن عملیات‌های زیرساختی و اولیه برای سازه‌های مختلف می‌باشد که اطلاعات همه آنها نیز موجود نمی‌باشد. از این حیث ممکن است اثرگذاری یک سازه بر روی داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری پایین‌دست از مراحل اولیه آغاز پروژه و یا هر مرحله‌ای پیش از بهره‌برداری از سازه شروع شده باشد؛ در این صورت چنانچه فقط سال انتهایی پروژه به عنوان مبنا در نظر گرفته شود ممکن است

اطلاعات برخی از سال‌هایی که دبی آنها تصادفی نباشد در محاسبات لحاظ شود. به صورت بر عکس اگر سال آغاز پروژه به عنوان مبنا اثرگذاری سازه تلقی شود ولی اثر سازه در مراحل انتهایی پروژه نمایان شده باشد منجر به نادیده گرفتن داده تصادفی برخی از سال‌ها خواهد شد. لذا چنانچه سال نقطه شکست و تغییرات آن در ایستگاه مورد بررسی پس از سال آغاز پروژه سازه بود، تغییرات سری زمانی داده‌ها در ایستگاه‌های بالادست سازه و یا در حوضه‌های مجاور که فاقد سازه‌های هیدرولیکی بودند نیز مورد بررسی قرار گرفت. اگر در داده‌های ایستگاه‌های بالادست و یا حوضه‌های مجاور تغییرات مشهود و مشابهی وجود نداشت، فرض بر تأثیرگذاری سد بر روی ماهیت تصادفی داده‌های ایستگاه هیدرومتری مورد نظر قرار داده شد و داده‌های آن تا قبل از سال نقطه آغاز تغییرات (شکست ساختاری) مورد استفاده قرار گرفت. در صورتیکه ایستگاه مناسبی در بالادست سازه و یا حوضه‌های مجاور وجود نداشت و یا این ایستگاه‌ها نیز دارای روند و شکست ساختاری همزمان با شکست ساختاری ایستگاه مورد بررسی بودند، پیشینه تغییرات داده‌ها در ایستگاه مورد بررسی و ایستگاه‌های بالادست و مجاور با تغییرات شاخص بارش استاندارد شده<sup>۱۳</sup> (SPI) با مقیاس‌های زمانی بلند مدت ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه (Mckee et al., 1993) به عنوان یک متغیر مستقل تأثیرگذار بر رژیم هیدرولوژیکی حوضه‌ها بررسی شد. چنانچه تغییرات داده‌ها با شاخص SPI دارای همخوانی و هماهنگی بود اثر سد بر ماهیت تصادفی داده‌ها قابل چشم‌پوشی در نظر گرفته شد. در غیر این حالت اثر سد قابل ملاحظه و داده‌های حداکثر دبی روزانه تا سال قبل از نقطه شکست مورد استفاده قرار گرفت. به همین ترتیب برای ایستگاه‌های هیدرومتری بعدی در مسیر رودخانه نیز این فرآیند تکرار شد. شایان ذکر است که برای مقایسه تغییرات دبی بین حوضه‌های مختلف و یا با شاخص SPI، از داده‌های استاندارد شده دبی‌ها با توجه به میانگین و انحراف از معیار آنها در هر ایستگاه استفاده شد.

## ۲-۳- تحلیل فراوانی منطقه‌ای

روش‌شناسی تحلیل فراوانی منطقه‌ای بجای تحلیل فراوانی ایستگاهی به صورت کامل توسط Hosking and Wallis (1997) بر اساس تئوری گشتاورهای خطی<sup>۱۴</sup> (Hosking, 1990) ارائه شد. گشتاورهای خطی نیز توابع خطی از گشتاورهای وزنی احتمال<sup>۱۵</sup> (Greenwood et al., 1979) می‌باشند. Hosking (1990) نشان داد که بین پارامترهای توزیع‌های آماری و ضرایب (نسبت) گشتاورهای خطی ارتباط وجود دارد. ضرایب گشتاورهای خطی مهم یک مجموعه داده عبارت هستند از ضریب تغییرات خطی<sup>۱۶</sup>، ضریب چولگی خطی<sup>۱۷</sup> و

ضریب کشیدگی خطی<sup>۱۸</sup> که به ترتیب با  $t$ ،  $t_3$  و  $t_4$  نمایش می‌دهند. همچنین، Hosking (1990) اظهار داشت که برای مجموعه‌هایی که دارای داده پرت هستند، برآورد پارامترهای توزیع‌های آماری بر اساس ضرایب گشتاورهای خطی نسبت به سایر روش‌ها مانند روش گشتاورهای وزنی احتمال از خطای کمتری برخوردار هستند.

برای انجام فرآیند تحلیل فراوانی منطقه‌ای پس از برقراری پیش شرط‌های استقلال و ایستایی داده‌ها، گشتاورهای وزنی احتمال ( $b_r$ ) برای یک مجموعه داده با اندازه نمونه  $n$  با فرم کلی رابطه ۱ قابل محاسبه می‌باشد (Landwehr et al., 1979). که در آن  $j$  رتبه مشاهده  $X_j$  در ترتیب صعودی و  $r$  مرتبه گشتاور وزنی می‌باشند. به همین ترتیب چهار گشتاور خطی مرتبه نخست ( $d_1, d_2, d_3, d_4$ ) از روی گشتاورهای وزنی مطابق با روابط ۲ تا ۵ قابل محاسبه خواهند بود.

$$b_r = \begin{cases} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_j & , r = 0 \\ \frac{1}{n} \sum_{j=r+1}^n \frac{(j-1)(j-2)\dots(j-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} X_{j:n} & , r \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$I_1 = b_0 \quad (2)$$

$$I_2 = 2b_1 - b_0 \quad (3)$$

$$I_3 = 6b_2 - 6b_1 + b_0 \quad (4)$$

$$I_4 = 20b_3 - 30b_2 + 12b_1 + b_0 \quad (5)$$

در نهایت برای یک مجموعه داده ضرایب (نسبت) گشتاورهای خطی نیز از گشتاورهای خطی مطابق روابط ۶ تا ۸ قابل محاسبه خواهند بود. (۸-۶)

$$L-cv = t = \frac{I_2}{I_1}, L-skew = t_3 = \frac{I_3}{I_2}, L-kurt = t_4 = \frac{I_4}{I_2}$$

باتوجه به ضرایب گشتاورهای خطی برای یک مجموعه از ایستگاه‌ها در یک منطقه Hosking and Wallis (1991) دو آماره برای آزمون همگنی<sup>۱۹</sup> منطقه معرفی کردند. آماره اول عبارت است از معیار ناجوری<sup>۲۰</sup> ( $D$ ) که بیانگر فاصله ویژگی‌های آماری (ضرایب گشتاورهای خطی) هر ایستگاه از میانگین منطقه می‌باشد. این آماره برای هر ایستگاه بر اساس ماتریس ضرایب گشتاورهای خطی هر ایستگاه  $u_{(i)} = [t_1^{(i)}, t_3^{(i)}, t_4^{(i)}]^T$  مطابق روابط ۹ تا ۱۱ قابل محاسبه می‌باشد. در روابط زیر  $N, S$  و  $T$  به ترتیب بیانگر تعداد ایستگاه‌ها، ماتریس کوواریانس نمونه و ترانهاده ماتریس می‌باشند.

$$D_i = \frac{1}{3} (u_i - \bar{u})^T S^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (9)$$

$$S = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T, \bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (10-11)$$

برای یک مجموعه از ایستگاه‌ها مقدار  $D \geq 3$  بیانگر ناجوری ایستگاه مورد نظر در منطقه می‌باشد. با این وجود Hosking and Wallis (1997) اظهار داشتند که مقدار بحرانی ۳ برای مناطق همگن با تعداد ایستگاه کم مناسب نمی‌باشد. مقدار بحرانی  $D$  برای مناطق با کمتر از پانزده ایستگاه به تدریج کاهش می‌یابد. در پژوهش حاضر از مقادیر بحرانی پیشنهادی در جدول ۳-۱، Hosking and Wallis (1997) برای تعیین ناجوری ایستگاه‌های مورد مطالعه در مناطق همگن استفاده شد.

آماره دوم برای آزمون درجه همگنی یک منطقه با سه آماره  $H_2, H_1$  و  $H_3$  بر اساس آزمون تغییرپذیری گشتاورهای خطی منطقه واقعی با گشتاورهای خطی مناطق شبیه‌سازی شده بر اساس روابط ۱۲ تا ۱۶ قابل محاسبه می‌باشد. در روابط زیر  $t^R, t_3^R$  و  $t_4^R$  به ترتیب ضرایب تغییرات خطی، چولگی خطی و کشیدگی خطی منطقه‌ای و  $\mu_v$  و  $\sigma_v$  نیز به ترتیب میانگین و انحراف از معیار برای  $V_{(j)}$ ها از مناطق شبیه‌سازی شده می‌باشد.

$$V_1 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N n_i (t^{(i)} - t^R)^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \right\}^{0.5}$$

$$V_2 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \{ (t^{(i)} - t^R)^2 + (t_3^{(i)} - t_3^R)^2 \}^{0.5}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (12-14)$$

$$V_3 = \frac{\sum_{i=1}^N n_i \{ (t_3^{(i)} - t_3^R)^2 + (t_4^{(i)} - t_4^R)^2 \}^{0.5}}{\sum_{i=1}^N n_i}$$

$$t^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i}, H_{(j)} = \frac{V_{(j)} - \mu_{V_{(j)}}}{\sigma_{V_{(j)}}} \quad (15-16)$$

باتوجه به مقادیر  $H$  چنانچه مقدار این آماره از ۱ کمتر باشد، منطقه کاملاً همگن، بین ۱ تا ۲ منطقه نسبتاً همگن و بیش از ۲ منطقه کاملاً ناهمگن<sup>۲۱</sup> شناخته می‌شود. Hosking and Wallis (1997) اظهار داشتند که آماره  $H_1$  نسبت به دو آماره دیگر ارجحیت دارد و چنانچه مقدار این آماره به تنهایی کمتر از ۱ بود می‌توان منطقه را همگن در نظر گرفت.

## ۵-۲- خوشه‌بندی

از آنجایی که در این پژوهش تنوع زیرحوضه‌ها و ویژگی‌های هیدرولوژیکی آنها در منطقه مورد مطالعه زیاد است برای تفکیک و گروه‌بندی ایستگاه‌های همگن هیدرولوژیکی از تکنیک خوشه‌بندی تفکیکی<sup>۲۵</sup> به روش kmean و الگوریتم تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها بر اساس آماره مجموع مربعات درون خوشه‌ای<sup>۲۶</sup> استفاده شد (Guldemir and Sengur, 2006; Pansera et al., 2013). از این رو فرآیند تحلیل فراوانی و آزمون‌های همگنی و فرآیند انتخاب و برآورد پارامترهای منحنی رشد منطقه‌ای برای هر یک از زیرمناطق همگن به صورت مجزا انجام شد. داده‌های مورد استفاده برای فرآیند خوشه‌بندی در این پژوهش شامل مقادیر استاندارد شده میانگین و ضرایب گشتاورهای خطی سری‌های سالانه حداکثر دبی روزانه در ایستگاه‌ها می‌باشند.

## ۳- نتایج

### ۳-۱- روند و اثر سازه‌های هیدرولیکی

نتایج تحلیل روند نشان داد که از ۶۲ ایستگاه مورد بررسی ۲۰ ایستگاه دارای روند کاهشی معنی‌دار می‌باشند. همچنین، آغاز نقطه تغییرات برای این ایستگاه‌ها اغلب طی سال‌های ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ شناسایی شد. از این رو علت وجود روند کاهشی معنی‌دار -تأثیر سازه هیدرولیکی یا خشکسالی- برای تمامی این ایستگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۲ برای هر یک از حالات ذکر شده در بخش ۲-۱ یک ایستگاه به عنوان مثال جهت تعیین اثر سازه‌های هیدرولیکی و خشکسالی بر سری‌های حداکثر دبی روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه نمایش داده شده است. در شکل‌های ۲-۲ و ۲-۳ به ترتیب اثر سد ایشوان بر ایستگاه ۱۶۷-۲۱ در رودخانه هرود لرستان و سد کرخه بر روی ایستگاه ۱۹۱-۲۱ در رودخانه کرخه خوزستان نمایش داده شده است. محدوده زمانی سبز رنگ در این شکل‌ها فاصله زمانی بین آغاز تا خاتمه پروژه سازه را نشان می‌دهد. همچنین، سری‌های خط- نقطه‌چین آبی و نارنجی در این شکل‌ها تغییرات دبی استاندارد شده را برای حوضه‌های مجاور که فاقد سازه هیدرولیکی هستند نمایش می‌دهند. خط عمودی سیاه رنگ نیز سال آغاز تغییرات داده‌های حداکثر دبی روزانه را بر اساس آزمون پتیت در ایستگاه مورد بررسی نشان می‌دهد. محدوده‌های قرمز رنگ محدوده‌هایی هستند که پس از احداث سازه‌های هیدرولیکی، ایستگاه‌های مجاور دارای وقایع سیلابی بوده‌اند؛ اما تغییرات در ایستگاه مورد بررسی (خط بنفش، دبی استاندارد) نسبت به دوره‌های پیش از احداث سازه ملموس نبوده و اثرگذاری سازه در این ناحیه تعیین می‌شود. بطور مثال در شکل ۲-۳ سری داده‌ها در

پس از تأیید همگنی منطقه مورد نظر برای انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع منطقه‌ای نیز از آزمون نکویی برازش<sup>۲۳</sup> هاسکینگ و والیس و آماره  $Z^{Dist}$  استفاده خواهد شد (Hosking and Wallis, 1997). این آماره بر اساس ضریب کشیدگی خطی توزیع‌های آماری ( $t_4$ ) و میانگین ضریب کشیدگی خطی منطقه همگن ( $t_4^R$ ) قابل محاسبه می‌باشد (رابطه ۱۷). مقدار بحرانی برای آماره  $Z^{Dist}$  برابر  $1/64$  می‌باشد و چنانچه مقدار قدر مطلق این آماره از حد بحرانی کمتر و نزدیک به صفر باشد توزیع آماری مناسب و قابل برازش به ایستگاه‌های منطقه همگن می‌باشد. علاوه بر آزمون نکویی برازش، نمودار نسبت گشتاورهای خطی<sup>۲۳</sup> نیز به صورت بصری تا حد زیادی به انتخاب توزیع آماری مناسب و ارزیابی همگنی و ناجوری ایستگاه‌ها کمک خواهد کرد (Hosking, 1991). در رابطه ۱۷ مقدار  $\sigma_4$  بیانگر انحراف از معیار  $t_4^R$  می‌باشد و از مناطق شبیه‌سازی شده قابل محاسبه می‌باشد.

$$Z^{Dist} = \frac{(t_4^{Dist} - t_4^R)}{s_4} \quad (17)$$

### ۴-۲- شاخص سیل

یکی از پرکاربردترین روش‌های تحلیل فراوانی منطقه‌ای استفاده از تکنیک تحلیل فراوانی منطقه‌ای بر اساس شاخص سیل می‌باشد. واژه "شاخص سیل" یک عبارت بوده و تنها مختص پدیده سیل نمی‌باشد. در این روش داده‌های هر ایستگاه پس از تأیید پیش شرط‌های استقلال و ایستایی، توسط یک شاخص (شاخص سیل) مقیاس (بدون بعد<sup>۲۴</sup>) می‌شوند. شاخص سیل عمدتاً میانگین و یا میانه داده‌ها در نظر گرفته می‌شود و برای مقیاس کردن داده‌ها تمامی مشاهدات تقسیم بر شاخص سیل می‌شوند. پس از آن مطابق روش شناسی ارائه شده در بالا با تعیین و برآورد پارامترهای توزیع منطقه‌ای برای داده‌های مقیاس شده یک توزیع منطقه برآورد می‌گردد. این توزیع منطقه‌ای اصطلاحاً منحنی رشد منطقه‌ای نامیده می‌شود و چندک‌های آن بی‌بعد هستند. برای تعیین چندک‌های ایستگاهی از منحنی رشد منطقه‌ای از رابطه ۱۸ استفاده می‌شود.

$$Q^{(k)}(F) = I_X^{(k)}(F) \quad (18)$$

که در آن  $I_X^{(k)}$  شاخص سیل در ایستگاه  $k$ ام،  $Q^{(k)}(F)$  چندک‌های متغیر مورد نظر در ایستگاه  $k$ ام،  $q(F)$  مقدار چندک بی‌بعد بدست آمده از منحنی رشد منطقه‌ای و  $F$  احتمال عدم تجاوز متناظر با یک دوره بازگشت معین می‌باشند (Hosking and Wallis, 1997). در پژوهش حاضر از میانگین سری‌های سالانه حداکثر دبی روزانه به عنوان شاخص سیل برای ایستگاه‌های مورد مطالعه استفاده شد.

کاهش پیدا کرده است و حتی در سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۹۴ که سال‌های سیلابی نیز بوده‌اند علیرغم پیک‌های مشاهده شده در ایستگاه‌های ۲۱-۱۸۵ و ۲۱-۱۸۹ داده‌های حداکثر دبی روزانه در این ایستگاه تغییرات چندانی نداشته است. لذا می‌توان اثر سد کرخه بر روی داده‌های دبی ایستگاه ۲۱-۱۹۱ را از سال ۱۳۷۷ به بعد ملموس دانست. به همین ترتیب با تفسیر مشابه اثر سد ایشوان بر روی ایستگاه ۱۶۷-۲۱ از سال ۱۳۸۹ قابل ملاحظه می‌باشد (شکل ۲-ا).

ایستگاه‌های ۲۱-۱۹۱ (خط بنفش) و ۲۱-۱۸۵ (خط-نقطه چین آبی، ایستگاه بالادست) در سال‌های ۱۳۵۲ و ۱۳۶۰ که سال‌های سیلابی بوده‌اند هر دو پیک‌های سیلابی داشته‌اند. همچنین، در سال‌های دیگر پیش از احداث سد کرخه نیز نوسانات این دو ایستگاه تقریباً مشابه یکدیگر - با ضریب همبستگی ۰/۸۹- بوده است. در حالیکه از سال ۱۳۷۷ (نقطه شکست ساختاری) به بعد که دقیقاً مصادف با سال پایان پروژه سد تنظیمی کرخه و بدون هیچ شرایط خشکسالی می‌باشد، مقدار و نوسانات سری حداکثر دبی روزانه در ایستگاه ۲۱-۱۹۱ به شدت

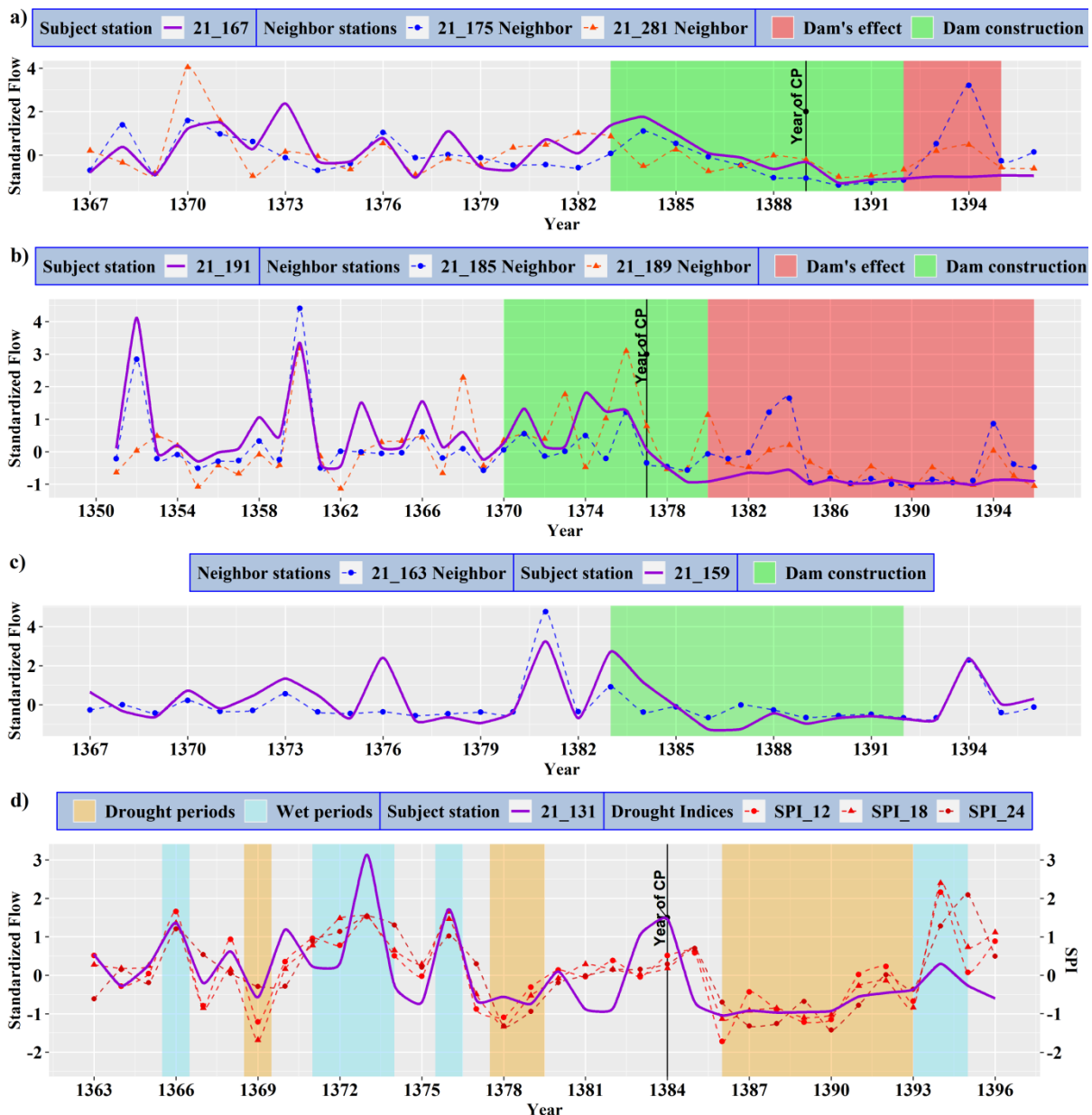


Fig. 2- Some of the results for assessment of impacts of droughts and hydraulic structures on the stochastic nature of data

شکل ۲- نمونه‌هایی از ارزیابی تأثیرات سازه‌های هیدرولیکی و خشکسالی بر ماهیت استوکاستیک داده‌ها

شایان ذکر است که در ایستگاه‌هایی که هر دو سد و خشکسالی با یک همزمانی بر روی داده‌ها اثرگذار بودند تأثیر دائمی سد از تأثیر موقتی خشکسالی توسط تغییرات دبی حوضه‌های مجاور در سال‌های سیلابی مانند ۹۵-۱۳۹۴ بعد از دوره خشکسالی مشخص شد (شکل‌های ۲-۱ و ۲-۲). برای مثال در شکل ۲-۲ نیز اثر سد شیان بر ایستگاه ۱۵۹-۲۱ در رودخانه شیان بررسی شده است. در حوضه این ایستگاه و حوضه مجاور آن (۱۶۳-۲۱) طی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳ که همزمان با یک دوره خشکسالی پیاپی می‌باشد (Rahimi et al., 2020)، سری‌های حداکثر دبی روزانه در هر دو حوضه به شدت کاهش پیدا کرده است. با این حال از سال ۱۳۹۴ به بعد مجدداً پیک‌های سیلابی در هر دو حوضه به صورت مشابه مشاهده شده است. لذا از آنجایی که الگوی تغییرات هر دو زیرحوضه چه قبل و چه بعد از احداث سد شیان مشابه است می‌توان اظهار داشت که اثر سد شیان بر ایستگاه ۱۵۹-۲۱ قابل چشم‌پوشی می‌باشد. در شکل ۲-۲ سری استاندارد شده حداکثر دبی روزانه در ایستگاه ۱۳۱-۲۱ به همراه میانگین شاخص‌های خشکسالی SPI-12، SPI-18 و SPI-24 ماهه منتهی به شهریور ماه (ماه پایانی سال آبی) ایستگاه‌های باران‌سنجی برای نمایش شرایط خشکسالی/ترسالی کل حوضه این ایستگاه نمایش داده شده است. در این حوضه هیچ‌گونه سازه هیدرولیکی وجود ندارد. با این حال سری حداکثر دبی روزانه در این حوضه طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳ (محدوده زرد رنگ پهن در شکل ۲-۲) به شدت کاهش پیدا کرده است و منجر به یک روند کاهشی معنی‌دار در سری داده‌های این حوضه شده است. این در حالی است که باتوجه به دوره‌های خشک (نواحی زرد رنگ) و تر (نواحی آبی رنگ) متوسط حداکثر دبی روزانه در این حوضه به ترتیب معمولاً کاهشی و افزایشی می‌باشد که تأثیرپذیری آبدی این رودخانه را در شرایط خشکسالی/ترسالی هوشناسی نشان می‌دهد. لذا می‌توان اظهار داشت کاهش حداکثر دبی روزانه در این حوضه طی سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳ بخاطر خشکسالی‌های پیاپی بوده است.

بطور کلی نتایج نشان داد که ۳۲ ایستگاه از ۶۲ ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه در بالادست خود دارای حداقل یک سازه هیدرولیکی می‌باشند. باتوجه به الگوریتم بکار گرفته شده از بین ۳۲ ایستگاهی که دارای سازه هیدرولیکی در بالادست خود بودند، سری‌های زمانی داده‌ها در ۲۲ ایستگاه فاقد روند و شکست ساختاری محرز بودند. به عبارت دیگر اثر سازه‌های هیدرولیکی بر این ایستگاه‌ها قابل چشم‌پوشی بود و داده‌های آنها به صورت کامل مورد استفاده قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد که از ۱۰ ایستگاه باقی‌مانده که دارای روند کاهشی معنی‌دار

و شکست ساختاری محرز بودند فقط در ۴ ایستگاه ۲۱-۱۶۷، ۲۱-۲۱-۱۹۱، ۲۱-۲۲۹ و ۲۱-۲۴۳ به ترتیب شواهدی از اثرگذاری سدهای ایشوان، کرخه، چغاخور و گتوند وجود داشت و در ۶ ایستگاه باقی‌مانده روند کاهشی معنی‌دار بخاطر شرایط خشکسالی حاکم بر منطقه بوده است. لذا آمار این ایستگاه‌ها نیز تا پیش از نقطه آغاز تغییرات مورد استفاده قرار گرفت.

علاوه بر این نتایج نشان داد که در برخی از ایستگاه‌های مورد مطالعه به ویژه در حوضه کرخه علیرغم عدم وجود سازه‌های هیدرولیکی در بالادست، یک روند کاهشی معنی‌دار و شکست ساختاری محرز برای ایستگاه‌ها از اواسط دهه ۸۰ وجود دارد. بررسی‌های نموداری و مقایسات زوجی داده‌های حداکثر دبی روزانه با متوسط شاخص خشکسالی SPI ایستگاه‌های باران‌سنجی درون حوضه‌های این ایستگاه‌ها نشان داد که در بازه سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۳ یک دوره خشکسالی متوالی تقریباً ۱۰ ساله آبدی این حوضه‌ها را تحت تأثیر قرار داده است و دبی رودخانه‌ها را به صورت چشمگیری کاهش داده است. این نتایج مطابق با نتایج (Rahimi et al., 2020) نیز می‌باشد. لذا باتوجه به هدف پژوهش حاضر که بررسی احتمال وقوع رویدادهای حدی سیلاب است، اطلاعات چنین ایستگاه‌هایی که بخاطر خشکسالی‌های پیاپی ماهیت بلندمدت داده‌های حداکثر دبی روزانه آنها تحت تأثیر قرار گرفته بود - دارای روند کاهشی معنی‌دار و شکست ساختار محرز- تا سال قبل از سال شکست ساختاری (تأثیر خشکسالی) مورد استفاده قرار گرفت.

در جدول ۱ ایستگاه‌هایی که طول دوره آماری آنها بخاطر اثر سازه‌های هیدرولیکی و یا خشکسالی کوتاه شده است مشخص شده است. علاوه بر این آماره‌های روند آزمون من-کندال و خودهمبستگی داده‌ها برای دوره آماری مورد استفاده ایستگاه‌ها محاسبه و در جدول ۱ ارائه گردیده است. نتایج نشان داد که پس از اصلاح دوره آماری همه ایستگاه‌ها پیش شرط‌های لازم را برای فرآیند تحلیل فراوانی منطقه‌ای دارا می‌باشند. (Allahbakhshian Farsani et al., 2020) نیز در مطالعه‌ای مشابه ایستایی داده‌های حداکثر دبی روزانه را در برخی از ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه مورد مطالعه با روش پیشنهادی آژانس‌های ایالات متحده برای تحلیل فراوانی سیل (Griffis and Stedinger, 2007) بررسی کردند. مقایسه نتایج این پژوهش با یافته‌های پژوهش ایشان نشان داد ایستگاه‌های مشترک و دارای ایستایی و پیش‌شرط‌های لازم برای تحلیل فراوانی سیل، در هر دو پژوهش یکسان هستند.



**Table 1- Location, applied record periods and some statistical properties for investigated stations**

جدول ۱- موقعیت، دوره آماری مورد استفاده و برخی از ویژگی‌های آماری ایستگاه‌های مورد بررسی

Stations	Lon	Lat	Applied record period	AR(1)	Mann-Kendall Z statistics	CPD of whole records	Mean	Maximum
21-109	48.12	34.35	1333-1382 <sup>D</sup>	0.11	-1.23	1382	15.48	62.0
21-113	47.92	34.42	1333-1385 <sup>D</sup>	-0.07	-0.94	1385	43.35	153.0
21-115	47.90	34.37	1348-1385 <sup>D</sup>	-0.09	-1.89	1385	135.29	405.8
21-127	47.43	34.33	1333-1396	0.12	-1.00		251.16	905.0
21-131	46.73	34.52	1353-1384 <sup>D</sup>	0.07	-1.36	1384	32.03	92.1
21-133	46.78	34.55	1351-1385 <sup>D</sup>	0.00	-1.42	1385	46.64	123.9
21-137	46.93	34.78	1365-1385 <sup>D</sup>	0.24	0.42	1385	4.78	12.8
21-141	47.13	34.32	1334-1385 <sup>D</sup>	-0.01	-0.80	1385	168.74	956.0
21-143	47.25	34.23	1332-1389 <sup>A</sup>	0.00	-1.87		162.15	918.0
21-145	47.97	34.08	1348-1396	-0.09	-1.29		35.70	117.0
21-147	47.25	33.73	1340-1396	0.02	-1.88		453.38	2540.0
21-159	46.84	33.55	1360-1396	0.15	-1.05		506.58	1440.0
21-163	47.21	33.39	1353-1396	-0.05	-1.87		27.18	212.0
21-167	48.78	33.51	1367-1389 <sup>H</sup>	-0.01	-0.68	1389	47.33	104.6
21-169	48.25	33.72	1334-1396	-0.10	-0.35		121.17	391.0
21-171	48.21	33.79	1333-1396	0.16	0.42		35.18	125.4
21-173	47.95	33.48	1346-1396	0.22	-1.20		294.08	962.5
21-175	48.25	33.45	1334-1396	0.13	0.24		100.97	490.7
21-177	47.89	33.33	1334-1396	0.11	0.61		372.32	1341.0
21-179	47.89	33.31	1334-1396	0.24	1.07		87.15	472.3
21-181	47.82	33.31	1361-1396	-0.01	-0.91		30.93	142.0
21-183	47.72	33.16	1334-1396	0.20	1.13		477.68	1546.0
21-185	47.80	32.97	1346-1384 <sup>D</sup>	-0.17	-0.50	1384	1172.12	4690.2
21-189	48.08	32.82	1351-1396	0.13	-1.93		207.80	694.0
21-191	48.15	32.42	1333-1377 <sup>H</sup>	-0.13	1.55	1377	1189.25	3988.0
21-205	51.52	30.68	1348-1387 <sup>A</sup>	-0.07	0.31		272.45	807.0
21-211	51.33	30.85	1348-1396	0.07	-0.03		183.95	534.0
21-215	51.25	30.95	1351-1396	-0.13	-0.36		418.30	863.0
21-225	50.42	31.52	1349-1383 <sup>D</sup>	-0.26	1.69	1383	793.90	1621.0
21-227	51.25	31.64	1357-1385 <sup>D</sup>	-0.24	-0.22	1385	100.51	260.0
21-229	51.26	31.70	1357-1391 <sup>H</sup>	0.08	-1.33	1391	38.51	181.0
21-231	50.77	31.67	1335-1396	-0.10	-0.77		527.46	2050.0
21-233	50.45	31.66	1348-1387 <sup>A</sup>	-0.04	1.16		676.14	1692.6
21-243	48.82	32.25	1333-1389 <sup>H</sup>	-0.02	-0.01	1389	1498.95	4772.0
21-257	48.60	33.91	1370-1396	-0.19	-1.41		5.58	18.1
21-259	48.61	33.90	1347-1396	0.09	-1.27		8.90	37.1
21-261	48.80	33.78	1354-1396	0.20	-0.28		38.66	149.0
21-265	48.98	33.71	1359-1386 <sup>D</sup>	0.21	0.38	1386	8.23	53.0
21-267	49.06	33.48	1334-1396	0.06	-1.42		132.51	445.0
21-271	49.40	33.39	1340-1383 <sup>A</sup>	0.09	0.38		43.34	213.3
21-273	49.43	33.31	1346-1396	-0.21	0.64		7.31	19.2
21-275	49.38	33.38	1334-1396	-0.04	1.23		5.32	31.0
21-277	49.39	33.38	1337-1383 <sup>D</sup>	0.06	1.72	1383	53.68	311.8
21-279	49.07	33.47	1334-1396	0.16	-0.77		68.91	427.5
21-281	48.97	33.39	1334-1396	0.09	0.02		53.33	224.6
21-285	48.89	33.21	1334-1396	0.23	-0.79		314.57	1048.0
21-289	48.63	33.14	1341-1391 <sup>A</sup>	0.02	-0.48		103.94	432.0
21-291	48.75	32.93	1356-1396	0.16	-1.87		926.81	2867.0
21-293	48.77	32.93	1347-1396	0.20	0.53		926.55	3191.0
21-295	48.77	32.82	1334-1396	0.21	0.41		1578.33	7268.0
21-303	48.55	31.95	1341-1396	0.20	-1.09		933.51	3425.0
21-377	48.50	34.53	1363-1382 <sup>D</sup>	0.00	-0.63	1382	5.70	11.8
21-389	47.45	34.43	1358-1396	0.14	-0.05		108.84	338.2
21-402	49.80	33.00	1361-1385 <sup>D</sup>	-0.14	1.17	1385	126.09	487.0
21-411	47.43	33.17	1361-1390 <sup>A</sup>	0.27	-1.82		528.60	995.0
21-419	50.32	32.25	1363-1396	-0.04	-1.56		133.06	613.0
21-425	50.63	32.03	1362-1396	0.11	-1.30		136.56	567.0
21-429	50.64	32.10	1364-1396	0.20	-1.44		81.64	265.0
21-431	50.95	31.53	1364-1385 <sup>D</sup>	-0.17	-1.66	1385	16.01	65.0
21-461	48.75	33.74	1364-1385 <sup>D</sup>	-0.21	-0.21	1385	38.83	119.9
21-954	48.28	33.94	1368-1396	0.05	-0.77		13.66	34.6
21-968	49.65	33.07	1361-1396	0.09	-1.28		66.87	236.0

A: Only available records

D: Shrank data records because of droughts effect; H: Shrank data records because of hydraulic structure(s) effect

### ۳-۲- ناحیه‌بندی و تحلیل فراوانی منطقه‌ای

پس از تأیید پیش شرط‌های داده‌ها جهت تحلیل فراوانی منطقه‌ای، گشتاورهای خطی برای هر کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه محاسبه گردید (جدول ۲). پس از آن با استفاده از متغیرهای استاندارد شده شامل میانگین ( $I_1$ ) و ضرایب گشتاورهای خطی ایستگاه‌ها ( $t_1$  و  $t_3$  و  $t_4$ )، تعداد ۵ خوشه بر اساس آماره مجموع مربعات درون خوشه‌ای (t-WSS) برای تفکیک ایستگاه‌ها مناسب شناخته شد (شکل ۳-ا). در شکل ۳-ب موقعیت ایستگاه‌ها درون خوشه‌ها نسبت به دو مؤلفه اصلی نخست -با مجموع واریانس ۸۱/۶٪ از کل تغییرات- مشخص شده است. همانطور که مشخص است خوشه‌ها به خوبی از یکدیگر قابل تفکیک هستند.

پس از خوشه‌بندی آزمون‌های ناچوری و همگنی برای هر یک از زیرناحیه‌ها انجام شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که هر ۵ زیرناحیه به لحاظ ویژگی‌های هیدرولوژیکی همگن ( $H < 1$ ) هستند و هیچ ایستگاه ناچوری ( $D_i < \text{Critical } D$ ) در هیچ یک از زیرناحی تعیین شده وجود ندارد. از این رو نمودار نسبت گشتاورهای خطی منطقه‌ای و ایستگاهی برای هر منطقه ترسیم و بر اساس آزمون نکویی برازش و هاسکینگ و والیس توزیع‌های آماری سه پارامتری رایج شامل PE3،

LN3، GLO، WEI، GEV و GPA مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که توزیع GPA برای مناطق اول و دوم، توزیع GNO برای منطقه سوم و توزیع GLO برای مناطق چهار و پنجم پژوهش حاضر به عنوان مناسب‌ترین توابع توزیع منطقه‌ای -دارای کمترین مقادیر  $Z^{\text{Dist}}$ - شناخته شدند. در جدول ۲ آماره‌های آزمون‌های همگنی، ناچوری، نکویی برازش، منحنی‌های رشد منطقه‌ای و پارامترهای آنها برای هر زیرناحیه ارائه شده است.

همچنین، در شکل ۴ موقعیت جغرافیایی زیرحوضه‌های هر زیرناحیه، نمودار نسبت گشتاورهای خطی و منحنی رشد منطقه‌ای هر یک از زیرناحیه‌ها نمایش داده شده است. باتوجه به منحنی‌های رشد منطقه‌ای و شاخص سیل ایستگاه‌ها دبی متناظر با هر دوره بازگشت دلخواه برای ایستگاه‌ها از شکل ۴ (ستون سمت راست) قابل برآورد می‌باشد. با این وجود در جدول ۳ نیز دبی متناظر با برخی از دوره بازگشت‌های مهم (۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله) برای ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است. همچنین، به منظور ارزیابی بزرگی سیلاب‌های زیرناحیه‌های تعیین شده به ازای دوره بازگشت‌های (احتمال وقوع) یکسان در شکل ۵ نمودار جعبه‌ای حداکثر دبی‌های روزانه برای برخی از دوره بازگشت‌های مهم نمایش داده شده است.

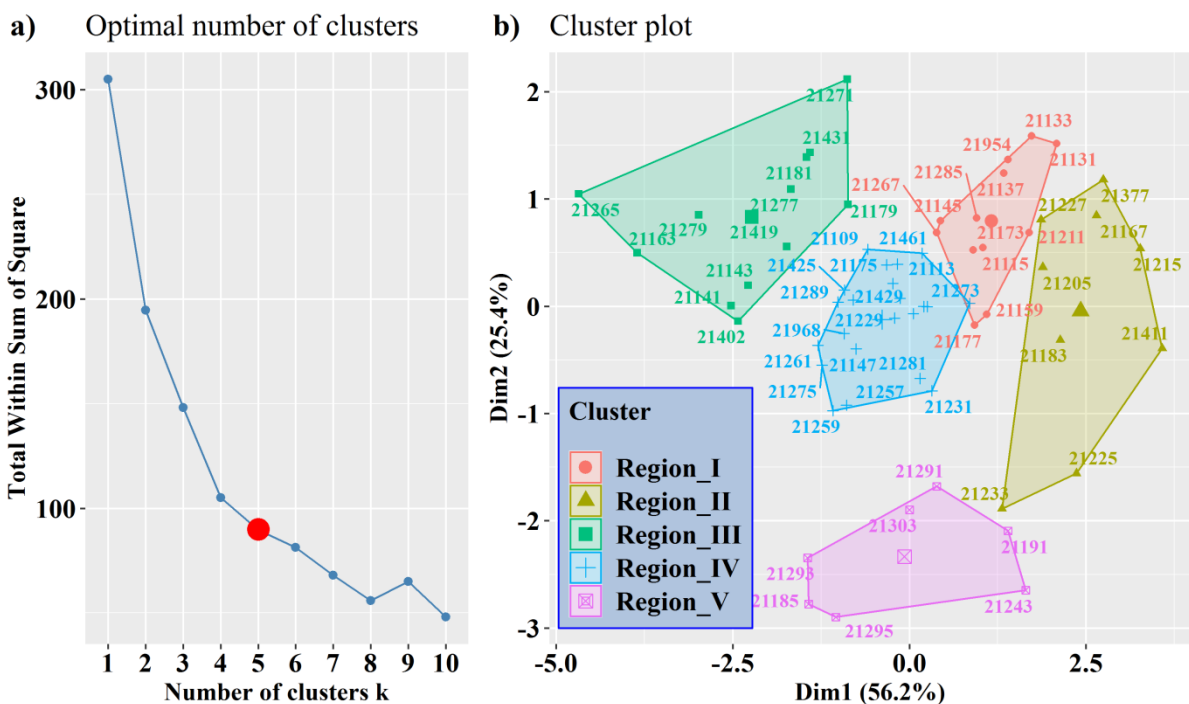


Fig. 3- Determine optimal number of clusters (a) and clusters locations on first two principal components (b)  
شکل ۳- تعیین تعداد خوشه مناسب برای خوشه‌بندی (a) و موقعیت خوشه‌های تعیین شده بر روی دو مؤلفه اصلی نخست (b)

Table 2- The results of discordancy, homogeneity and goodness-of-fit tests and the regional growth curves

جدول ۲- نتایج آزمون‌های ناجوری، همگنی و نکویی برازش و منحنی‌های رشد منطقه‌ای

Name	Region	N	I <sub>1</sub> (m <sup>3</sup> /s)	At-site L-moments Ratios			Critical D	D(i)	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	Z <sup>Dist</sup>	Curve Growth
				t	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>							
21115	Region_I	38	135.3	0.349	0.315	0.160		1.12					
21133		35	46.6	0.407	0.278	0.064		1.14					
21137		21	4.8	0.389	0.259	0.079		0.64					
21145		49	35.7	0.397	0.262	0.157		1.38					
21159		37	506.6	0.364	0.290	0.143		0.21					
21173		51	294.1	0.382	0.302	0.155	2.632	0.27	-0.7	-1.7	-2	-0.14	<b>Gen. Pareto:</b> mu: 0.1951 scale: 0.8961 shape: 0.1133
21177		63	372.3	0.337	0.280	0.152		1.27					
21211		49	183.9	0.367	0.193	0.108		2.28					
21267		63	132.5	0.395	0.314	0.176		1.21					
21285		63	314.6	0.416	0.322	0.106		1.07					
21954	29	13.7	0.389	0.296	0.097		0.42						
21131	Region_II	32	32.0	0.407	0.171	0.016		1.12					
21167		23	47.3	0.321	0.123	0.034		0.50					
21183		63	477.7	0.313	0.155	0.069		1.20					
21205		40	272.5	0.372	0.090	0.072		1.20					
21215		46	418.3	0.336	0.120	0.018	2.329	0.54	0.97	-0.49	-1.12	-1.34	<b>Gen. Pareto:</b> mu: 0.1354 scale: 1.3845 shape: 0.6013
21225		35	793.9	0.269	0.044	0.133		1.68					
21227		29	100.5	0.365	0.148	0.091		0.80					
21377		20	5.7	0.343	0.116	0.054		0.02					
21411		30	528.6	0.280	-0.005	0.038		1.94					
21141		Region_III	52	168.7	0.443	0.493	0.337		1.00				
21143	58		162.2	0.457	0.462	0.329		0.40					
21163	44		27.2	0.531	0.521	0.393		0.99					
21179	63		87.2	0.472	0.356	0.199		1.24					
21181	36		30.9	0.527	0.398	0.227		0.80					
21265	28		8.2	0.620	0.564	0.397	2.757	2.33	-0.41	-1.12	-1.21	-0.50	<b>Gen. Normal:</b> mu: 0.6248 scale: 0.5909 shape: -0.9861
21271	44		43.3	0.567	0.426	0.164		1.91					
21277	47		53.7	0.496	0.456	0.249		0.64					
21279	63		68.9	0.530	0.517	0.316		0.83					
21402	25		126.1	0.421	0.464	0.346		1.01					
21419	34	133.1	0.467	0.433	0.272		0.18						
21431	22	16.0	0.527	0.393	0.205		0.68						
21109	Region_IV	50	15.5	0.399	0.342	0.235		0.52					
21113		53	43.3	0.370	0.333	0.213		0.29					
21127		64	251.2	0.370	0.263	0.201		0.55					
21147		57	453.4	0.406	0.346	0.243		0.73					
21169		63	121.2	0.337	0.331	0.231		0.10					
21171		64	35.2	0.315	0.300	0.212		0.39					
21175		63	101.0	0.398	0.309	0.193		0.61					
21189		46	207.8	0.380	0.300	0.216		0.25					
21229		35	38.5	0.377	0.305	0.237		0.34					
21231		62	527.5	0.330	0.314	0.188		0.96					
21257		27	5.6	0.263	0.333	0.280	3.000	1.32	0.32	-1.93	-3.02	0.44	<b>Gen. Logistic:</b> mu: 0.8284 scale: 0.2915 shape: -0.3169
21259		49	8.9	0.258	0.370	0.290		1.83					
21261		43	38.7	0.324	0.429	0.323		2.05					
21273		51	7.3	0.297	0.222	0.178		1.66					
21275		63	5.3	0.306	0.390	0.265		1.23					
21281		63	53.3	0.273	0.219	0.226		2.23					
21289		56	103.9	0.385	0.361	0.279		0.93					
21389		39	108.8	0.348	0.242	0.233		1.45					
21425	35	136.6	0.401	0.357	0.229		0.66						
21429	33	81.6	0.369	0.313	0.205		0.23						
21461	22	38.8	0.370	0.301	0.152		1.79						
21968	36	66.9	0.354	0.312	0.296		1.87						
21185	Region_V	39	1172.1	0.318	0.463	0.331		1.54					
21191		45	1189.3	0.291	0.269	0.186		0.26					
21233		40	676.1	0.241	0.138	0.183		1.55					
21243		57	1498.9	0.282	0.289	0.134	2.140	1.68	-0.01	0.36	0.15	0.03	<b>Gen. Logistic:</b> mu: 0.8389 scale: 0.2625 shape: -0.3275
21291		41	926.8	0.328	0.287	0.251		0.54					
21293		50	926.5	0.329	0.398	0.334		0.71					
21295		63	1578.3	0.378	0.451	0.291		1.15					
21303		56	933.5	0.329	0.284	0.240		0.57					

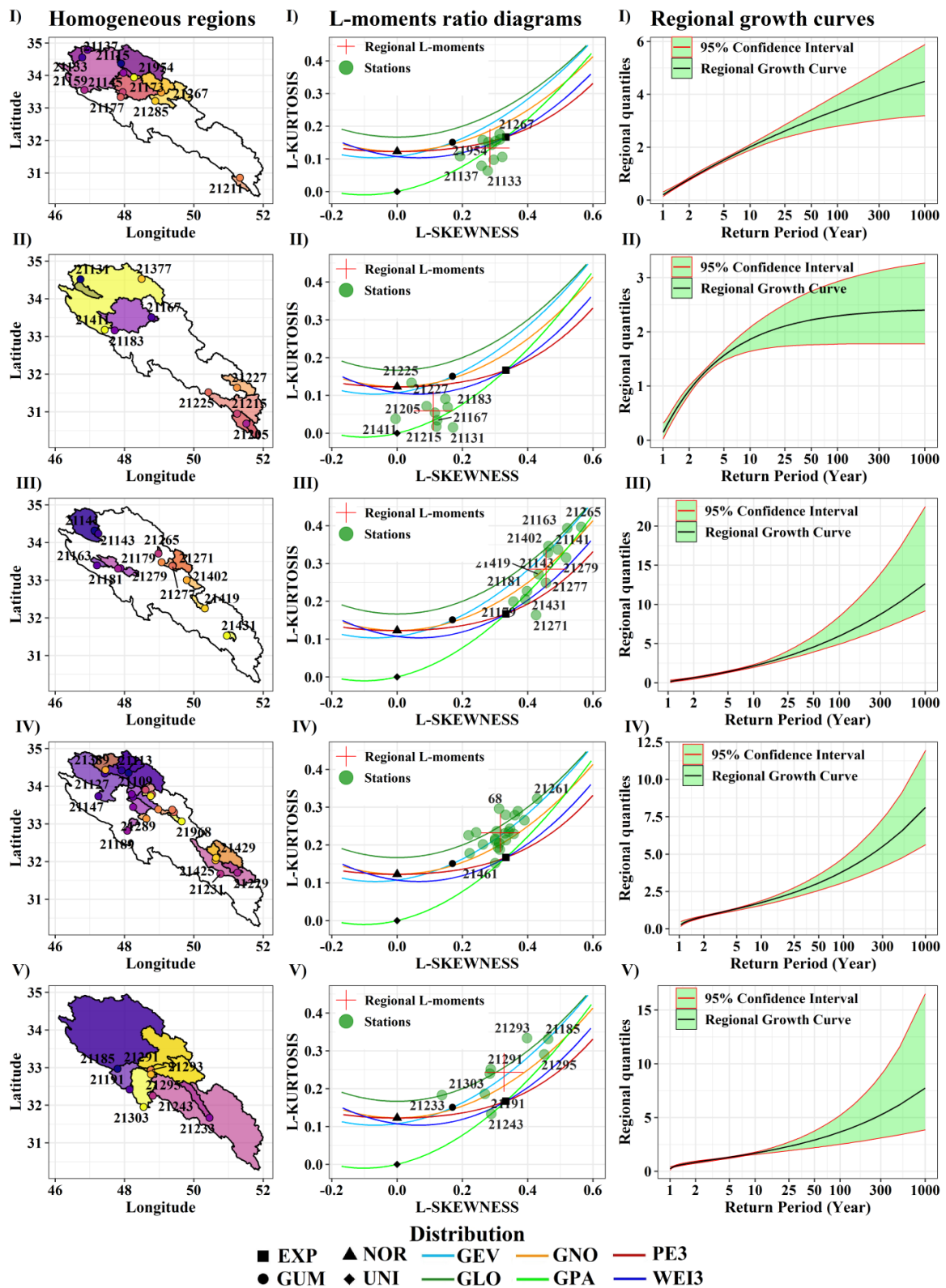


Fig. 4- The sub-basins location, L-M.R. diagram and regional growth curves for sub-regions I, II, III, IV and V

شکل ۴- موقعیت زیرحوضه‌ها، نمودار نسبت گشتاورهای خطی و منحنی رشد منطقه‌ای در هر زیرناحیه همگن (I, II, III, IV و V)

(V)

Table 3- Corresponding maximum daily discharge for some important return periods at study stations

جدول ۳- حداکثر دبی روزانه متناظر با برخی از دوره بازگشت‌های مهم در ایستگاه‌های مورد مطالعه

Sites	Region	Maximum Daily Discharge (m <sup>3</sup> /s)							
		2-year	5-year	10-year	25-year	50-year	100-year	500-year	1000-year
21115	Region_I	107.21	204.75	272.10	353.38	409.51	461.40	567.27	607.25
21133		36.96	70.59	93.81	121.84	141.19	159.08	195.58	209.37
21137		3.79	7.23	9.61	12.49	14.47	16.30	20.04	21.46
21145		28.29	54.02	71.79	93.24	108.05	121.74	149.68	160.22
21159		401.44	766.69	1018.87	1323.26	1533.42	1727.72	2124.16	2273.85
21173		233.04	445.07	591.47	768.17	890.17	1002.97	1233.10	1320.01
21177		295.05	563.49	748.84	972.56	1127.03	1269.83	1561.20	1671.23
21211		145.77	278.39	369.97	480.49	556.81	627.36	771.31	825.67
21267		105.00	200.54	266.50	346.12	401.10	451.92	555.61	594.77
21285		249.28	476.09	632.68	821.70	952.20	1072.85	1319.03	1411.98
21954	10.82	20.67	27.46	35.67	41.33	46.57	57.26	61.29	
21131	Region_II	29.48	50.07	59.62	67.45	71.08	73.47	76.34	76.94
21167		43.55	73.98	88.09	99.65	105.02	108.55	112.79	113.67
21183		439.55	746.67	889.10	1005.78	1059.89	1095.56	1138.33	1147.27
21205		250.71	425.87	507.11	573.66	604.53	624.87	649.27	654.36
21215		384.91	653.84	778.56	880.74	928.12	959.36	996.81	1004.64
21225		730.53	1240.94	1477.65	1671.58	1761.51	1820.79	1891.88	1906.73
21227		92.48	157.10	187.07	211.62	223.00	230.51	239.51	241.39
21377		5.25	8.91	10.61	12.00	12.65	13.08	13.59	13.69
21411		486.40	826.25	983.86	1112.98	1172.86	1212.33	1259.67	1269.55
21141		Region_III	105.43	236.18	362.11	572.57	770.49	1006.78	1731.69
21143	101.32		226.96	347.98	550.22	740.42	967.48	1664.09	2050.19
21163	16.98		38.04	58.32	92.21	124.09	162.14	278.89	343.59
21179	54.46		121.99	187.03	295.73	397.96	520.00	894.41	1101.92
21181	19.33		43.30	66.38	104.96	141.24	184.56	317.44	391.09
21265	5.14		11.52	17.67	27.94	37.60	49.12	84.50	104.10
21271	27.08		60.66	93.00	147.06	197.89	258.58	444.77	547.96
21277	33.54		75.13	115.19	182.14	245.10	320.27	550.87	678.68
21279	43.06		96.45	147.88	233.82	314.65	411.14	707.17	871.24
21402	78.78		176.48	270.58	427.84	575.73	752.29	1293.96	1594.18
21419	83.14	186.24	285.55	451.51	607.58	793.91	1365.54	1682.37	
21431	10.00	22.40	34.35	54.31	73.09	95.50	164.27	202.38	
21109	Region_IV	12.83	20.68	27.16	37.57	47.47	59.68	100.59	125.69
21113		35.91	57.90	76.03	105.19	132.90	167.07	281.61	351.88
21127		208.07	335.51	440.55	609.52	770.07	968.08	1631.74	2038.92
21147		375.59	605.64	795.25	1100.28	1390.09	1747.52	2945.53	3680.54
21169		100.38	161.87	212.54	294.07	371.52	467.05	787.24	983.69
21171		29.14	46.99	61.71	85.37	107.86	135.59	228.55	285.58
21175		83.64	134.88	177.10	245.03	309.57	389.18	655.97	819.66
21189		172.14	277.58	364.49	504.29	637.12	800.95	1350.03	1686.91
21229		31.90	51.45	67.55	93.46	118.08	148.45	250.21	312.65
21231		436.96	704.59	925.18	1280.05	1617.21	2033.04	3426.79	4281.89
21257	4.62	7.45	9.78	13.53	17.09	21.49	36.22	45.26	
21259	7.38	11.90	15.62	21.61	27.30	34.32	57.85	72.29	
21261	32.02	51.64	67.81	93.82	118.53	149.00	251.15	313.82	
21273	6.06	9.76	12.82	17.74	22.41	28.17	47.49	59.34	
21275	4.41	7.11	9.33	12.91	16.31	20.51	34.57	43.19	
21281	44.18	71.24	93.54	129.42	163.51	205.55	346.46	432.91	
21289	86.10	138.84	182.31	252.24	318.68	400.62	675.26	843.77	
21389	90.17	145.39	190.91	264.14	333.72	419.52	707.13	883.58	
21425	113.13	182.42	239.53	331.41	418.70	526.36	887.20	1108.59	
21429	67.63	109.06	143.20	198.13	250.31	314.68	530.40	662.76	
21461	32.17	51.87	68.11	94.23	119.05	149.66	252.27	315.21	
21968	55.40	89.33	117.29	162.28	205.02	257.74	434.44	542.85	
21185	Region_V	983.29	1523.24	1973.33	2704.35	3405.06	4275.77	7231.98	9066.91
21191		997.66	1545.50	2002.17	2743.87	3454.82	4338.25	7337.66	9199.40
21233		567.21	878.68	1138.31	1560.00	1964.20	2466.46	4171.74	5230.21
21243		1257.46	1947.96	2523.55	3458.41	4354.49	5467.98	9248.46	11595.02
21291		777.50	1204.44	1560.34	2138.37	2692.42	3380.91	5718.42	7169.32
21293		777.27	1204.10	1559.89	2137.75	2691.65	3379.93	5716.77	7167.25
21295		1324.06	2051.13	2657.20	3641.57	4585.11	5757.57	9738.28	12209.11
21303		783.12	1213.15	1571.61	2153.81	2711.87	3405.33	5759.72	7221.11

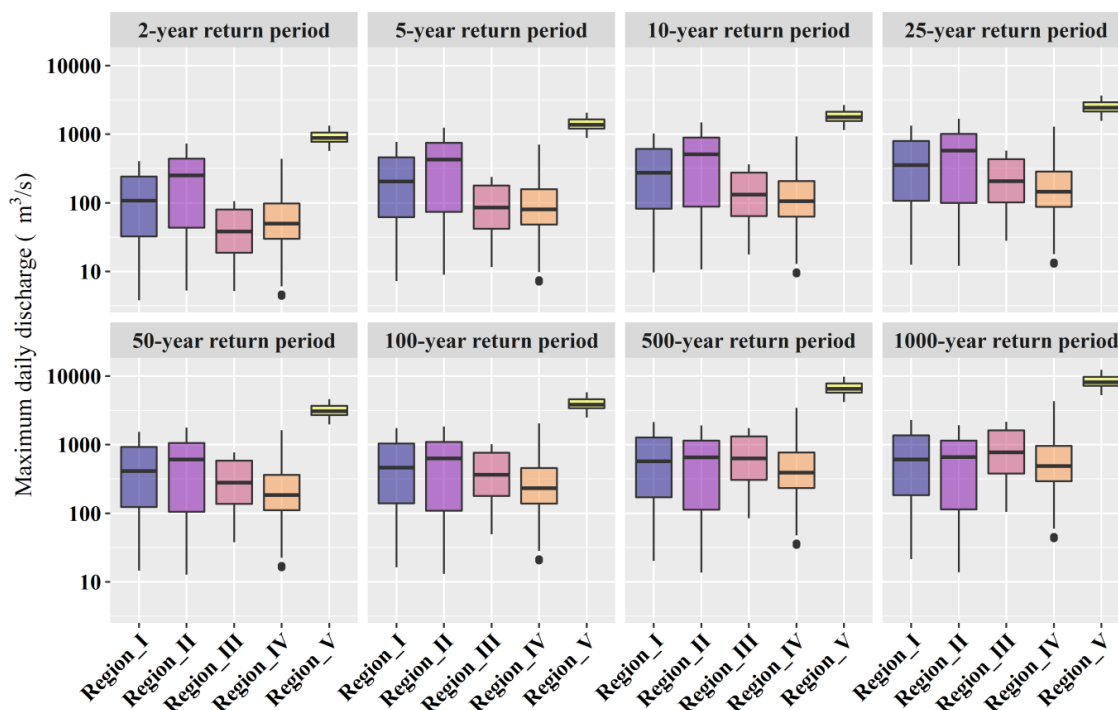


Fig. 5- The boxplots of 2, 5, 10, 25, 50, 100, 500 and 1000-year daily discharges in each homogeneous region  
 شکل ۵- نمودار جعبه‌ای حداکثر دبی‌های روزانه ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله در هر یک از زیرناحیه‌های همگن

برای کل حوضه‌ها در زیرمناطق همگن و زیرحوضه ۱۳۹-۲۱ تهیه گردد تا بتوان این زیرحوضه را به یکی از پنج زیرناحیه همگن تعیین شده در پژوهش حاضر نسبت داد. برای این منظور در این پژوهش خصوصیات ساده‌ای شامل محیط  $(P^{(km)})$ ، مساحت  $(A^{(km^2)})$ ، طول حوضه  $(BL^{(km)})$ ، ضریب شکل  $(FF)$ ، ضریب فشردگی  $(CC)$ ، طول آبراهه اصلی  $(MFL^{(km)})$ ، مجموع طول کل شبکه آبراهه‌ای  $(TRL^{(km)})$ ، شیب آبراهه اصلی  $(MFS^{(%)})$ ، شیب  $(BS^{(%)})$  و ارتفاع  $(BE^{(m)})$  متوسط حوضه‌ها و اختلاف ارتفاع یا همان رلیف حوضه‌ها  $(R^{(m)})$  برای همه حوضه‌های مورد مطالعه و زیرحوضه ۱۳۹-۲۱ محاسبه گردید. از آنجایی که واحد این خصوصیات و ارزش عددی آنها بسیار متفاوت است، برای مقایسه بهتر و همچنین نسبت دادن صحیح‌تر زیرحوضه ۱۳۹-۲۱ به شبیه‌ترین زیرمنطقه همگن، ابتدا از ارزش عددی همه خصوصیات مورد بررسی لگاریتم طبیعی گرفته شد. پس از آن میانگین لگاریتم طبیعی خصوصیات مورد بررسی برای هر یک از زیرمناطق همگن تعیین گردید (جدول ۴). در گام بعدی با توجه به خصوصیات مورد بررسی در جدول ۴، فاصله اقلیدسی<sup>۲۷</sup> بین زیرحوضه ۱۳۹-۲۱ با هر یک از زیرمناطق همگن محاسبه گردید و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شد. با توجه به نتایج، زیرحوضه ۱۳۹-۲۱ از نظر خصوصیات مورد بررسی کمترین فاصله اقلیدسی (بیشترین شباهت) را با زیرمنطقه شماره I دارد.

### ۳-۳- کاربرد تحلیل فراوانی منطقه‌ای

همانطور که پیش‌تر به آن اشاره شد علاوه بر قابل اطمینان‌تر بودن نتایج تحلیل فراوانی منطقه‌ای نسبت به تحلیل فراوانی ایستگاهی، یکی دیگر از کاربردهای تحلیل فراوانی منطقه‌ای برآورد دبی‌های حداکثر روزانه یا اوج سیلاب در حوضه‌های فاقد آمار یا دارای آمار نامناسب می‌باشد. از این حیث در این بخش زیرحوضه ۱۳۹-۲۱ (به نام حجت آباد) با مساحت  $1365/25$  کیلومتر مربع در استان کرمانشاه به عنوان مثال و برای درک بهتر از کاربرد تحلیل فراوانی منطقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. حوضه ۱۳۹-۲۱ دارای دوره آماری نامناسبی می‌باشد بطوری که داده‌های پیوسته آن تنها در یک دوره سی ساله طی سال‌های ۱۳۳۱-۳۲ تا ۱۳۶۰-۶۱ موجود می‌باشد و پس از آن در این ایستگاه آماربرداری انجام نشده است. در شکل ۶ موقعیت جغرافیایی این زیرحوضه و ایستگاه هیدرومتری آن و همچنین سری زمانی داده‌های حداکثر دبی روزانه آن نمایش داده شده است.

به منظور ارزیابی کارایی روش تحلیل فراوانی منطقه‌ای برای برآورد دبی‌های حداکثر روزانه در زیرحوضه ۱۳۹-۲۱ ابتدا فرض خواهد شد که هیچ اطلاعاتی از ایستگاه هیدرومتری این زیرحوضه وجود ندارد. در گام بعدی لازم است که برخی از خصوصیات ساده و قابل دسترس

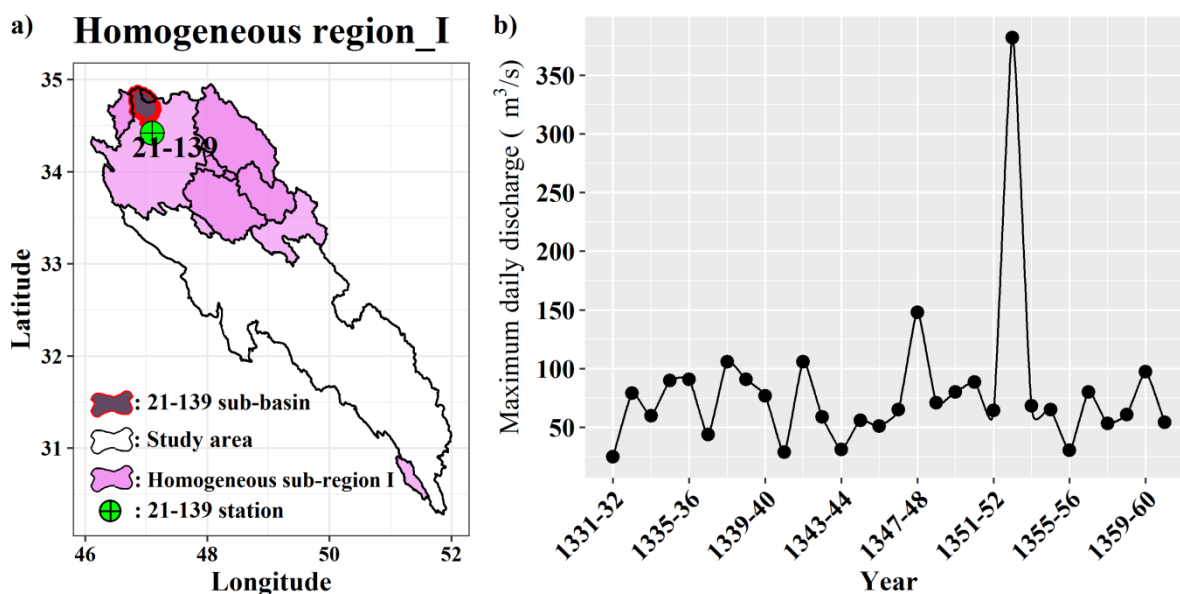


Fig. 6- The location of 21-139 sub-basin and other sub-basins of homogeneous region\_I (left) and the annual maximum discharge series in 21-139 station (right)

شکل ۶- موقعیت زیرحوضه ۲۱-۱۳۹ و سایر زیرحوضه‌های زیرمنطقه همگن I (سمت چپ) و داده‌های حداکثر دبی روزانه در ایستگاه ۲۱-۱۳۶ (سمت راست)

Table 4- The average of natural logarithmic values of the climatic and physiographic characteristics for the homogeneous sub-regions and the ungauged sub-basin 21-139

جدول ۴- میانگین لگاریتم طبیعی خصوصیات اقلیمی و فیزیوگرافیکی برای زیرمناطق همگن و ایستگاه فاقد آمار ۲۱-۱۳۹

Homogeneous sub-regions	The characteristics of the homogeneous sub-regions										
	P	A	BL	FF	CC	MFL	TRL	BS	MFS	BE	R
G1	5.92	7.69	4.62	-1.55	0.86	4.56	7.34	3.01	0.10	7.56	7.61
G2	5.88	7.51	4.64	-1.77	0.90	4.52	7.18	3.01	0.02	7.64	7.67
G3	5.36	6.67	4.14	-1.63	0.83	4.00	6.34	2.78	0.22	7.55	7.40
G4	5.27	6.56	4.02	-1.47	0.77	3.87	6.18	3.26	0.77	7.67	7.62
G5	7.09	9.61	5.90	-2.18	1.06	5.83	9.24	3.31	-0.58	7.55	8.19
Ungauged sub-basin	The characteristics of the ungauged sub-basin 21-139										
	P	A	BL	FF	CC	MFL	TRL	BS	MFS	BE	R
21_139	5.55	7.22	4.30	-1.38	0.73	4.20	6.92	2.99	-1.18	7.43	7.40

Table 5- The Euclidean distance between the ungauged sub-basin 21-139 and the homogeneous sub-regions for the study characteristics

جدول ۵- فاصله اقلیدسی ویژگی‌های مورد بررسی بین زیرحوضه فاقد آمار ۲۱-۱۳۹ و زیرمناطق همگن

Ungauged sub-basins	Homogeneous sub-regions				
	sub-region_I	sub-region_II	sub-region_III	sub-region_IV	sub-region_V
21_139	<u>1.585</u>	1.940	1.684	2.290	4.528

پارتو تعمیم یافته استفاده شد که به عنوان توزیع منطقه‌ای در زیرمنطقه همگن I در پژوهش حاضر تعیین شد.

همانطور که از شکل ۸ مشخص است با اینکه در حالت تحلیل فراوانی منطقه‌ای فرض شد که هیچگونه اطلاعات هیدرومتری از حوضه ۱۳۹-۲۱ موجود نمی‌باشد؛ اما منحنی چندک-دوره بازگشت پیش‌بینی شده از طریق تحلیل فراوانی منطقه‌ای (منحنی آبی رنگ در شکل ۸) برای این حوضه تشابه زیادی به منحنی چندک-دوره بازگشت برآورد شده از روی داده‌های واقعی آن (منحنی قرمز رنگ در شکل ۸) دارد. بطوری که برای دبی‌ها با دوره بازگشت کمتر از ۲۵ سال این اختلاف بسیار ناچیز می‌باشد. با این وجود برای دبی‌ها با دوره بازگشت بلند مدت اختلاف بین دو منحنی افزایش خواهد یافت. بطوری که منحنی مشاهداتی برای دوره بازگشت‌های یکسان و بیش از ۲۵ سال حداکثر دبی‌های روزانه را بیشتر از منحنی پیش‌بینی شده نشان می‌دهد و یک روند افزایشی با شیب تند دارد. البته باید اشاره کرد که منحنی مشاهداتی بر اساس داده‌ها در حدود سه دهه قبل تهیه شده است و اثر خشکسالی‌های حاکم بر منطقه در یک دهه اخیر (Rahimi et al., 2020) در آن لحاظ نشده است. این در حالی است که برای منحنی پیش‌بینی شده اثر خشکسالی‌های اتفاق افتاده در کل زیرحوضه‌های زیرمنطقه همگن I تا حدودی لحاظ شده است. بنابراین شیب منحنی پیش‌بینی شده برای دوره بازگشت‌های بلند مدت کند و به صورت تدریجی افزایش می‌یابد. از این رو می‌توان اختلاف رفتاری بین دو منحنی را در شکل ۸ توجیه کرد. وجود دبی‌های کم و پیاپی در یک سری منجر خواهد شد که به ازای دوره بازگشت‌های یکسان دبی‌های حداکثر روزانه کمتری برآورد شود.

پس از نسبت دادن زیرحوضه فاقد آمار ۱۳۹-۲۱ به زیرمنطقه همگن شماره I، در گام بعدی مدل رگرسیونی برای برآورد شاخص سیل در زیرمنطقه همگن شماره I با توجه به مساحت زیرحوضه‌های این زیرمنطقه تعیین شد و نتایج آنها در شکل ۷ ارائه گردید. با توجه به نتایج مشخص شد که تغییرات شاخص سیل در زیرمنطقه I تا ۸۱٪ توسط مساحت زیرحوضه‌ها به تنهایی قابل توجیه می‌باشد. بنابراین با توجه به مدل رگرسیونی و مساحت زیرحوضه ۱۳۹-۲۱، شاخص سیل در زیرحوضه ۱۳۹-۲۱ معادل ۶۴/۸۴ متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌شود. شایان ذکر است که مقدار واقعی شاخص سیل با توجه به داده‌های به ثبت رسیده در ایستگاه ۱۳۹-۲۱ طی سال‌های ۱۳۳۱ تا ۱۳۶۰ معادل ۸۰/۱۳ متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌شود. این در حالی است که بدون لحاظ کردن واقعه سیلابی سال ۱۳۵۲ - با حداکثر دبی روزانه ۳۸۲ متر مکعب بر ثانیه - در این حوضه (شکل ۶)، مقدار شاخص سیل در این حوضه برابر ۶۹/۷۲ متر مکعب بر ثانیه برآورد می‌شود که بسیار نزدیک به مقدار برآورد شده آن از طریق مدل رگرسیونی می‌باشد.

در نهایت برای برآورد دوره بازگشت حداکثر دبی‌های روزانه در زیرحوضه ۱۳۹-۲۱ تنها کافی است که منحنی رشد زیرمنطقه همگن I در شاخص سیل برآورد شده این زیرحوضه (۶۴/۸۴ متر مکعب بر ثانیه) ضرب شود. در شکل ۸ منحنی‌های چندک-دوره بازگشت برای حداکثر دبی‌های روزانه در ایستگاه ۱۳۹-۲۱ برای دو حالت الف) بر اساس مشاهدات واقعی و به ثبت رسیده در ایستگاه هیدرومتری و ب) ضرب شاخص سیل برآورد شده از مدل رگرسیونی در منحنی رشد منطقه شماره I ترسیم شده است. شایان ذکر است که برای تحلیل فراوانی داده‌های مشاهداتی در ایستگاه ۱۳۹-۲۱ نیز از همان توزیع

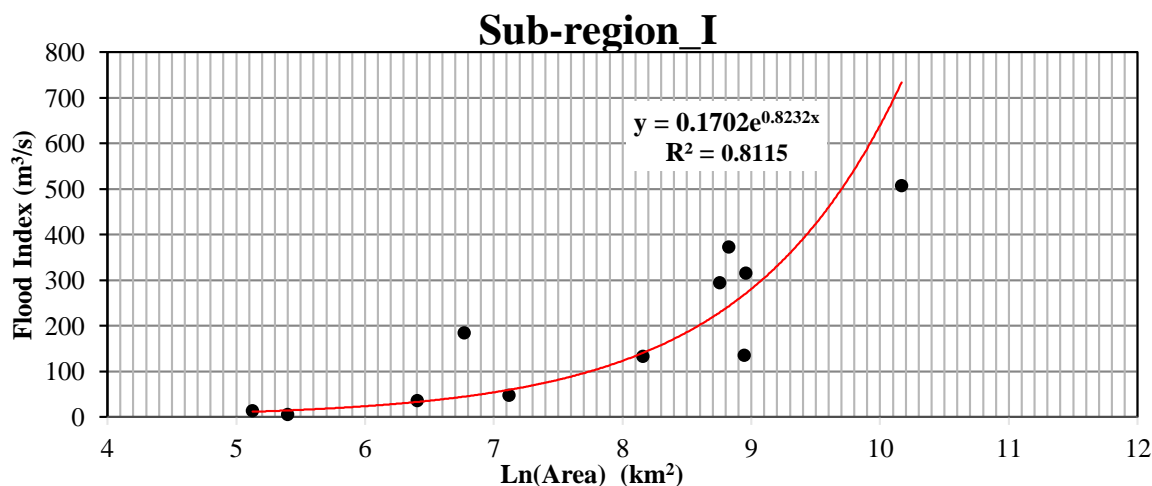


Fig. 7- The relationship between ln(area) and flood index in sub-basins of the homogeneous sub-region\_I  
 شکل ۷- رابطه بین لگاریتم طبیعی مساحت و شاخص سیل زیرحوضه‌ها در زیرمنطقه همگن I



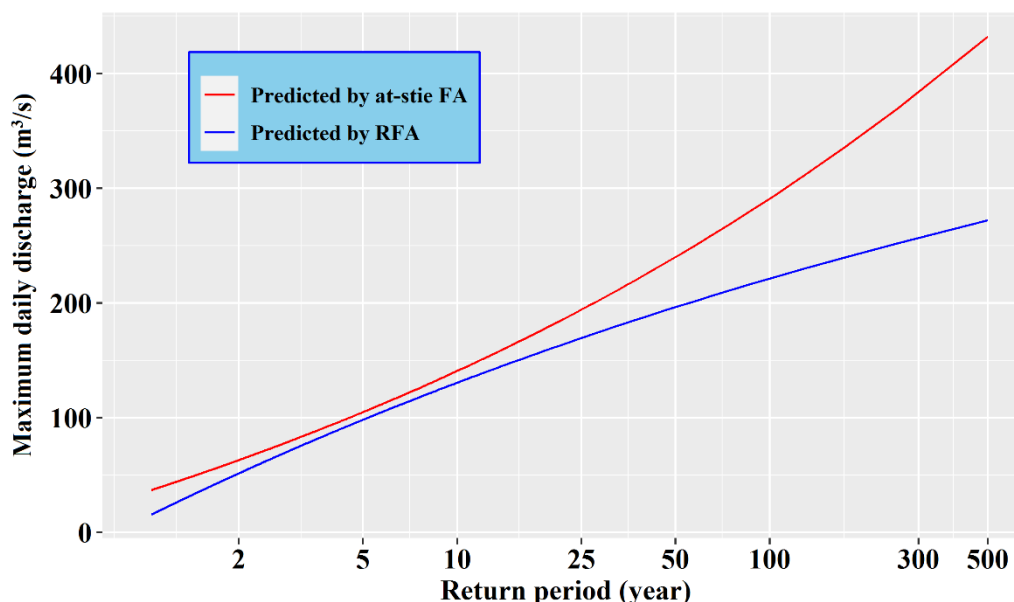
برای آبدهی ماهانه، فصلی و سالانه رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه توسط مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Abghari et al., 2013; Rahimi et al., 2020). باتوجه به نتایج این پژوهش و سایر مطالعات علت اصلی روند کاهشی در آبدهی رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه خشکسالی‌های پیاپی از اواسط دهه ۸۰ به مدت ده سال می‌باشد.

از سوی دیگر در مطالعات حدی سیلاب، عدم درنظر گرفتن وجود انواع سازه‌های هیدرولیکی و خشکسالی‌های پیاپی که گشتاورهای حقیقی داده‌ها را به صورت معنی‌دار تحت تأثیر قرار می‌دهند، می‌تواند منجر به کم‌تر برآورد شدن دبی‌های حدی به ازای احتمال وقوع مشخص شود. البته وقوع خشکسالی‌ها و کاهش آبدهی رودخانه‌ها جزیی از ماهیت استوکاستیک داده‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هیدرومتری هستند. با این حال نتایج پژوهش نشان داد که خشکسالی اتفاق افتاده در منطقه مورد مطالعه که می‌توان آن را یک ابر خشکسالی نیز نامید، به شدت گشتاورهای مرتبه اول و دوم داده‌ها (میانگین و واریانس) را در برخی از ایستگاه‌ها تحت تأثیر قرار داده است.

به صورت مشابه و برعکس وجود وقایع سیلابی مهیب و بزرگ نیز می‌تواند منجر به برآورد دوره بازگشت‌های کوتاه مدت‌تر برای دبی‌های حداکثر روزانه یا اوج شود. برای مثال بر اساس گزارش نهایی هیأت ویژه سیلاب‌ها (SPNFR<sup>۲۸</sup>) وقایع سیلابی سال آبی ۹۸-۱۳۹۷ در ایستگاه‌های ۲۱-۱۹۳ (تنگ‌پنج بختیاری) و ۲۱-۱۹۵ (تله‌زنگ) -به ترتیب با دبی اوج ۲۵۶۸ و ۵۴۶۳ متر مکعب بر ثانیه- منجر شدند که دوره بازگشت دبی‌های اوج مذکور در ایستگاه ۲۱-۱۹۳ از ۸۰-۵۰ سال و در ایستگاه ۲۱-۱۹۵ از ۱۰۰-۸۰ سال به ۵ تا ۱۵ سال کاهش یابد (SPNFR, 2020).

#### ۴- بحث و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر سعی شد تا احتمال وقوع سیلاب‌ها برای حوضه‌های در معرض خطر سیل در غرب کشور و در مقیاس وسیع برآورد گردد. بطورکلی نتایج نشان داد که متغیر حداکثر دبی روزانه در یک سوم ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای روند کاهشی معنی‌دار می‌باشد. علاوه‌بر متغیر حداکثر دبی روزانه، وجود روندهای کاهشی معنی‌دار



Return period (Year)		2	5	10	25	50	100	200	500
Maximum daily discharge (m <sup>3</sup> /s)	Predicted by regional F.A.	51.38	98.13	130.41	169.38	196.28	221.15	244.14	271.89
	Predicted by at-site F.A.	62.93	104.79	140.58	194.12	239.91	290.83	347.43	432.10

Fig. 8- The quantile-return period curves in 21-139 sub-basin. Blue line is predicted by regional frequency analysis and red line is estimated by at-site frequency analysis

شکل ۸- منحنی‌های چندک-دوره بازگشت پیش‌بینی شده از طریق تحلیل فراوانی منطقه‌ای (خط آبی رنگ) و مشاهده شده از طریق تحلیل فراوانی ایستگاهی (خط قرمز رنگ) برای حوضه ۲۱-۱۳۹

لذا در نظر گرفتن مقادیر دبی به حداقل رسیده در این دوره‌های خشک می‌تواند منجر به آریبی و خطا در برآورد پارامترهای توزیع‌های منطقه‌ای و ایستگاهی پدیده سیلاب نسبت به پیشینه بلند مدت داده‌های آن شود. البته ممکن است در بلند مدت و در شرایط اقلیمی که منطقه تحت تأثیر چنین رویدادهای حدی نباشد، اثر چنین داده‌هایی بر روی گشتاورها به مرور و با ثبت داده‌های بیشتر کم رنگ شود. از سوی دیگر ممکن است تحت تأثیر تغییر اقلیم و نقش فعالیت‌های انسانی بر روی متغیرهای اقلیمی - هیدرولوژیکی (Milly et al., 2008) شرایط به موجود آمده برای آبدی رودخانه‌های منطقه مورد مطالعه (افت تمامی متغیرهای آبدی) ادامه پیدا کند، بطوریکه از نظر برخی از محققین برجسته این حالت بخاطر کاهش در بارش محتمل تر می‌باشد (Ashraf et al., 2019). با این وجود شاید در منطقه مورد مطالعه مقدار بارش در آینده کاهش یابد، اما نقش بارش‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته نیز به منظور ارزیابی پتانسیل سیلخیزی حوضه‌ها می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. بطوریکه بر اساس گزارش نهایی هیأت ویژه سیلاب‌ها (SPNFR) علت اصلی سیلاب‌های سهمگین در بهار ۱۳۹۸ وقوع بارش‌های شدید و متوالی چند روزه گزارش شده است (SPNFR, 2020).

در ارتباط با سایر دوره بازگشت‌ها نتایج نشان داد که پس از حوضه‌های بزرگ و اصلی گروه پنجم در استان خوزستان که بالاترین مقادیر سیلاب را به ازای تمامی دوره بازگشت‌ها نسبت به سایر مناطق دارند، دبی مورد انتظار به ازای دوره بازگشت‌های کمتر از ۱۰۰ سال در مناطق اول و دوم - عمدتاً شامل حوضه‌های درجه دو در شمال کرخه - بیش از سایر مناطق است (جدول ۳ و شکل ۵). این در حالی است که برای دوره بازگشت‌های بلند مدت مانند ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساله که تقریباً تمام شبکه زهکشی حوضه‌ها مشارکت خواهند کرد متوسط بزرگی سیلاب‌ها در زیرحوضه‌های هر چهار زیرناحیه اول تا چهارم تقریباً با یکدیگر برابر خواهند شد (جدول ۳ و شکل ۵). بطور خلاصه نتایج نشان داد که زیرحوضه‌های شمالی منطقه مورد مطالعه در استان‌های همدان، لرستان و کرمانشاه نسبت به زیرحوضه‌های مناطق جنوبی در کهگیلویه و بویراحمد، اصفهان، چهارمحال و بختیاری و شرق استان خوزستان (به استثنای ایستگاه‌های منطقه پنجم) از احتمال وقوع بیشتری نسبت به سیلاب‌های یکسان - یا سیلاب‌های بزرگتری نسبت به احتمال وقوع یکسان - برخوردار هستند.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Flood mitigation
- 2- Quantiles
- 3- Generalized Extreme Value
- 4- Generalized Logistic
- 5- 3-Parameter Log-Normal
- 6- Generalized Pareto
- 7- Generalized Normal
- 8- Regional Growth Curve
- 9- Flood Index
- 10- Stochastic
- 11- Mann-Kendall Trend Test
- 12- Pettite Change Point Detection Test
- 13- Standardized Precipitation Index
- 14- Linear Moments
- 15- Probability Weighted Moments
- 16- Coefficient of L-Variation
- 17- Coefficient of L-Skewness
- 18- Coefficient of L-kurtosis
- 19- Homogeneity
- 20- Discordancy
- 21- Heterogeneous
- 22- Goodness of Fit Test
- 23- L-Moments Ratio Diagram
- 24- Dimensionless
- 25- Partitional Clustering
- 26- Total Within Sum of Square
- 27- Euclidean Distance
- 28- Special Panel on National Floods Report

از سوی دیگر بخاطر خارج شدن از حالت ثبات و پویا شدن جوامع آماری متغیرهای هیدرولوژیکی در منطقه مورد مطالعه برآورد پارامترهای این جوامع از روی نمونه‌های کوچک نیازمند داده‌های جدیدتر و روش‌های انعطاف‌پذیرتر نالیستا خواهد بود (Mohit Isfahani and Modarres, 2020). با این حال باتوجه به اینکه متغیر حداکثر دبی روزانه در بسیاری از حوضه‌های منطقه مورد مطالعه ایستا می‌باشد و در حوضه‌های دارای نالیستایی نیز فقط بخش کوچکی از طول دوره آماری به ثبت رسیده دارای ناهنجاری بود، می‌توان اظهار داشت که نتایج پژوهش حاضر برای احتمال وقوع رویدادهای حدی سیل قابل اطمینان می‌باشد.

در ارتباط با تعیین مناطق همگن و نتایج تحلیل فراوانی مشخص شد که به ازای احتمال وقوع ۱٪ و یا دوره بازگشت ۱۰۰ سال - دوره بازگشت دبی طراحی اکثر سازه‌های هیدرولیکی - زیرحوضه‌های بزرگ ناحیه پنجم با حداقل ۲۴۶۶ تا حداکثر ۵۷۵۷ و میانگین ۴۰۶۰ مترمکعب بر ثانیه دارای بیش‌ترین مقادیر حداکثر دبی روزانه هستند. به همین ترتیب در زیرحوضه‌های زیرناحیه‌های اول تا چهارم میانگین حداکثر دبی‌های روزانه با دوره بازگشت ۱۰۰ سال به ترتیب برابر ۶۳۲، ۶۸۲، ۴۶۰ و ۴۲۹ متر مکعب بر ثانیه برآورد شد (جدول ۳ و شکل ۵).

## ۵- مراجع

- Abghari H, Tabari H, Talaei PH (2013) River flow trends in the west of Iran during the past 40 years: impact of precipitation variability. *Global and Planetary Change* 101:52-60
- Allahbakhshian-Farsani P, Vafakhah M, Khosravi-Farsani H, Hertig E (2020) Regional flood frequency analysis through some machine learning models in semi-arid regions. *Water Resources Management* 34(9):2887-2909
- Ashraf S, AghaKouchak A, Nazemi A, Mirchi A, Sadegh M, Moftakhari HR, Hassanzadeh E, Miao CY, Madani K, Mousavi Baygi M, Anjileli H, Arab DR, Norouzi H, Mazdiyasn O, Azarderakhsh M, Alborzi A, Tourian M, Mehran A, Farahmand A, Mallakpour I (2019) Compounding effects of human activities and climatic changes on surface water availability in Iran. *Climatic Change* 152(3):379-391
- Ellouze M, Abida H (2008) Regional flood frequency analysis in Tunisia: identification of regional distributions. *Water Resources Management* 22(8):943-957
- Ghadami M, Raziei T, Amini M, Modarres R (2020) Regionalization of drought severity-duration index across Iran. *Natural Hazards* 103(3):2813-2827
- Greenwood JA, Landwehr JM, Matalas NC, Wallis JR (1979) Probability weighted moments: Definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research* 15:1049-1054
- Griffis VW, Stedinger JR (2007) Evolution of flood frequency analysis with Bulletin 17. *Journal of Hydrologic Engineering* 12(3):283-297
- Guldemir H, Sengur A (2006) Comparison of clustering algorithms for analog modulation classification. *Expert Systems with Applications* 30:642-649
- Hailegeorgis TT, Alfredsen K (2017) Regional flood frequency analysis and prediction in ungauged basins including estimation of major uncertainties for mid-Norway. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 9:104-126
- Hosking JRM, Wallis JR, Wood EF (1985). An appraisal of the regional flood frequency procedure in the UK flood studies report. *Hydrological Sciences Journal* 30(1):85-109
- Hosking JRM (1990) L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society* 52:105-124
- Hosking JRM (1991) Approximations for use in constructing L-moment ratio diagrams. *Research.Rep. RC 16635, IBM Research Division, TJ Watson Research Center*
- Hosking JRM, Wallis JR (1993) Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research* 29(2):271-281
- Hosking JRM, Wallis JR (1997) Regional frequency analysis: An approach based on l-moments. *Cambridge University Press*, 244 p
- Kim H, Shin JY, Kim T, Kim S, Heo JH (2020) Regional frequency analysis of extreme precipitation based on a nonstationary population index flood method. *Advances in Water Resources* 146:1-43
- Kumar R, Chatterjee C (2005) Regional flood frequency analysis using L-Moments for North Brahmaputra region of India. *Journal of Hydrologic Engineering* 10:1-7
- Landwehr JM, Matalas NC, Wallis JR (1979) Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles. *Water Resource Research* 15(5):1055-1064
- Libiseller C, Grimvall A (2002) Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates. *Environmetrics: The official journal of the International Environmetrics Society* 13(1):71-84
- Malekinezhad H, Nachtnebel HP, Klik A (2011) Regionalization approach for extreme flood analysis using L-moments. *Journal of Agricultural Science and Technology* 13:1183-1196
- Malekinezhad H, Zare-Garizi A (2014) Regional frequency analysis of daily rainfall extremes using L-moments approach. *Atmósfera* 27(4):411-427
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*:245-259
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* 179-184
- Mehdi Nasab M (2020) Survey of 1 April flood in Kashkan Catchment in Lorestan Province and presenting solutions. *Journal of Environment and*

- Suprasectorial Development 5(67):17-30 (In Persian)
- Mei X, Van Gelder PHAJM, Dai Z, Tang Z (2017) Impact of dams on flood occurrence of selected rivers in the United States. *Frontiers of Earth Science* 11(2):268-282
- Milly PCD, Betancourt J, Falkenmark M, Hirsch RM, Kundzewicz ZW, Lettenmaier DP, Stouffer RJ (2008) Stationarity is dead: Whither water management? *Earth* 4(20):573-574
- Modarres R, Sarhadi A (2010) Frequency distribution of extreme hydrologic drought of southeastern semiarid region, Iran. *Journal of Hydrologic Engineering* 15(4):255-264
- Modarres R, Soltani S (2007) Flood frequency analysis using L-moments, 7th international seminar on river engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran (In Persian)
- Mohammadi M, Talebi A (2020) Regional frequency analysis of maximum 24-hour precipitation in arid lands using the L-Moments Approach (Case study: Yazd Province). *Desert Management* 8(15):37-52 (In Persian)
- Mohit Isfahani P, Modarres R (2020) The generalized additive models for nonstationary flood frequency analysis. *Iran-Water Resources Research* 16(3):376-387 (In Persian)
- Noto LV, La Loggia G (2009) Use of L-moments approach for regional flood frequency analysis in Sicily, Italy. *Water Resources Management* 23(11):2207-2229
- Nam W, Kim S, Kim H, Joo K, Heo JH (2015) The evaluation of regional frequency analyses methods for nonstationary data. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 371(1):95-98
- Pansera WA, Gomes BM, Boas MAV, de Mello EL (2013) Clustering rainfall stations aiming regional frequency analysis. *Journal of Food, Agriculture, and Environment* 11(2):877-885
- Pettitt AN (1979) A non-parametric approach to the change point problem. *Journal of the Royal Statistical Society Series C, Applied Statistics* 28:126-135
- Rahimi D, Khoshhal Dastjerdi J, Rahimi D (2020) Trend analysis of maximum flood in the Karkheh basin. *Journal of Natural Environmental Hazards* 9(26):43-58 (In Persian)
- Rahnama M, Rostami R (2007) Halil-River Basin regional flood frequency analysis based on L-moment Approach. *International Journal of Agricultural Research* 2:261-267
- Sharifi Garmdareh E, Vafakhah M, Eslamian S (2018) Regional flood frequency analysis using support vector regression in arid and semi-arid regions of Iran. *Hydrological Sciences Journal* 63(3):426-440
- Special Panel on National Floods Report (SPNFR) (2020) Story, analyze, experiences and offers. 314p (In Persian)
- Strnad F, Moravec V, Markonis, Y, Máca P, Masner J, Stočes M, Hanel M (2020) An index-flood statistical model for hydrological drought assessment. *Water* 12(4):1213-1229
- Zamani R, Tabari H, Willems P (2015) Extreme streamflow drought in the Karkheh river basin (Iran): Probabilistic and regional analyses. *Natural Hazards* 76(1):327-346