

Analysis of river flow regime changes using the indicators of hydrologic alteration (Case study: Hableroud watershed)

Mahin Naderi¹ , Vahedberdi Sheikh^{2*} , Abdolreza Bahrehmand³ , Choghi Bayram Komaki⁴ ,
Abdolazim Ghangherme⁵ 

¹ Ph.D. Student, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran

² Associate Professor, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran

³ Professor, Department of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Desert Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran

⁵ Associate Professor, Department of Geography, Golestan University, Gorgan, Iran

Abstract

Introduction

Hydrological regimes play a major role in changing the structure and function of ecological processes and river ecosystems. Significant changes in the hydrological regimes of river flow cause the spatial and temporal heterogeneity of river systems and the degradation of natural ecosystem services and threaten biodiversity. Trend analysis and change point detection are important topics in the analysis of hydrological time series. The study area in this research includes the upstream part of the Hablehroud river basin draining to the Bonekoh hydrometry station, located within the jurisdiction of the Tehran province. The Habaleroud river as the main drain of this watershed has recently encountered the pressures induced by human interventions and climate change, resulting in significant changes in its hydrological status.

Materials and Methods

In this research, using the sequential Mann-Kendall, Pettitt, Buishand Range, Buishand U, Standard Normal Homogeneity, and double mass curve tests, the significant change point in the annual discharge time series (1980–2017) of the Bonekoh hydrometry station at the outlet of the Hableroud watershed was detected. Then, using the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA), the alterations in the hydrological condition in the period after the change point (Altered flow regime) compared to the period before the change point (the natural flow regime) were analyzed using the daily observed discharge data of the Hableroud watershed.

Results and Discussion

According to the research results, in the mid-1990s, a statistically significant change point in the annual discharge time series of the Bonekoh hydrometry station occurred, and most of the hydrological indicators show a deterioration in the condition of the Habaleroud watershed flow regime. Whereas for most of the hydrological indicators, after the change point, the frequency of the low values category has increased and the frequencies of the middle and high values categories, have decreased. These reductions have not only occurred for high extreme values, but also for low extreme values. In addition, the mean monthly discharge for all months of the year and the base flow of the basin have decreased. Both the frequency and duration of low-flow pulses have increased. On the contrary, both the frequency and duration of the high-flow pulses have decreased. For this reason, the frequency and magnitude of high extreme events such as medium and large floods have decreased. The long-term trend analysis indicated that 25 out of the 33 IHA have experienced a statistically significant decreasing trend. Therefore, the mean annual discharge of the watershed at the Bonekoh station has declined from 8.43 m³/s during the pre-impact period to 5.43 m³/s during the post-impact period, which is equivalent to about 35 % decline in the watershed outflow. While the watershed's mean annual precipitation shows a negligible long-term

increasing trend. Therefore, it seems that human interventions across the watershed play a major role in the hydrologic regime alteration of the watershed.

Conclusion

In the Benkoh hydrometric station in the mid-1990s, the hydrological regime of the basin has changed significantly. Then, using special software, the hydrological change indicators and key environmental flow indicators were analyzed in the periods before and after the change point. Unfortunately, most of the hydrological indicators show a downward trend in the Habaleroud river flow. So that the average discharge has decreased in all months of the year. Base current values are reduced. Both the frequency and duration of minimum current pulses are increased. On the contrary, both the frequency and duration of maximum current pulses are reduced. For this reason, the frequency and magnitude of extreme events such as medium and large floods have decreased. The results of the analysis of the trend of several indicators of the environmental flow also indicate the regressive course in the ecohydrological conditions of the Hableroud watershed. So that the minimum monthly flows for all months of the year show a downward trend. On the one hand, the continuity and frequency of periods of water shortage has increased, and on the other hand, the frequency of high flow pulses has decreased. The consequence of these changes will be creating tension and threatening riverside plant and animal communities that live in the flood plains of rivers and provide many ecological services. On the other hand, with the destruction of these riverside communities, the hydraulic conditions of the floodplains have changed and the vulnerability of river ecosystems and infrastructure facilities around the river increases against possible floods and causes a lot of damage. With the continuation of the existing process of managing water resources of the basin, stakeholders and beneficiaries of the basin will face many challenges in the future. Due to the fact that the average annual rainfall of Hableroud basin does not show a decreasing trend, it seems that human interventions are one of the main factors affecting the hydrological changes of this basin. Therefore, it is suggested that the main focus of management policies and measures should be focused on the management and optimization of human interventions in Hableroud watershed. In other words, instead of focusing on the top-down management approach and (hard) structural engineering measures, the focus should be on the participatory management approach and (soft) management engineering measures, and the water and soil resources of this basin should be used optimally and in accordance with the principles of sustainable development, so that at the same time Reducing the conflicts between the beneficiaries and the stakeholders upstream and downstream of the watershed (social challenges and threats) which currently occurred on a larger scale between the two provinces of Tehran and Semnan, and also preventing these conflicts from occurring on a smaller scale between the smaller communities upstream and downstream in The extension of waterways and rivers in the basin prevented the occurrence and spread of diverse environmental challenges and threats and vulnerability to natural hazards such as sudden floods and droughts. Also, it is suggested that the future changes in discharge of the studied watershed should be predicted according to the results of climate change models and land use changes, and suitable solutions should be formulated and implemented in order to deal with or adapt to these changes.

Keywords: Change points detection, Discharge time series, Hableroud, River flow decline, IHA

Article Type: Research Article

*Corresponding Author, E-mail: sheikh@gau.ac.ir

Citation: Naderi, M., Sheikh, V., Bahremand, A., Komaki, CH., & Ghangermeh, A. (2023). Analysis of river flow regime changes using the indicators of hydrologic alteration (Case study: Hableroud watershed). *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3), 1-19.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11430.1129

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.3.1.3

Received: 04 September 2022, Received in revised form: 18 September 2022, Accepted: 18 September 2022, Published online: 18 September 2022

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 3, pp. 1-19

Publisher: University of Mohaghegh Ardabil

© Author(s)





تحلیل تغییرات رژیم جریان آب رودخانه‌ای با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز حبله‌رود)

مهین نادری^۱، واحدبردی شیخ^{۲*}، عبدالرضا بهره‌مند^۳، چوقی بایرام کمکی^۴، عبدالعظیم قانقرمه^۵

- ^۱ دانشجوی دکتری، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۲ دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۳ استاد، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۴ استادیار، گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
^۵ دانشیار، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

چکیده

رژیم‌های هیدرولوژیکی، نقش عمده‌ای در تغییر ساختار و عملکرد فرآیندهای بوم‌شناختی و بوم‌سازگان رودخانه‌ای ایفا می‌کنند. تغییرات قابل ملاحظه‌ای در رژیم‌های هیدرولوژیکی جریان رودخانه‌ها، باعث ایجاد ناهمگونی مکانی و زمانی سامانه‌های رودخانه‌ای و تخریب خدمات طبیعی بوم‌سازگان و تهدید تنوع زیستی می‌شود. تحلیل روند و شناسایی نقطه تغییر، یک مسأله مهم در تحلیل سری‌های زمانی هیدرولوژیکی است. در این پژوهش با استفاده از آزمون من-کندال دنباله‌ای، آزمون پیت، آزمون دامنه بویژاند، آزمون U بویژاند، آزمون همگنی استاندارد نرمال و آزمون جرم مضاعف نقطه تغییر معنادار در داده‌های مربوط به دبی ایستگاه هیدرومتری بنکوه واقع در خروجی حوزه آبخیز حبله‌رود در طول دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ تعیین شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (IHA)، تغییرات شاخص‌های گوناگون هیدرولوژیکی در دوره آماری قبل و بعد از نقطه تغییر معنادار در سری زمانی دبی سالیانه در حوزه آبخیز حبله‌رود بررسی شد. مطابق نتایج به دست آمده، در اواسط دهه ۱۹۹۰ یک نقطه تغییر معنادار در سری داده‌های دبی سالیانه ایستگاه هیدرومتری بنکوه اتفاق افتاده است و بعد از آن مقطع زمانی اکثر شاخص‌های هیدرولوژیکی کاهش در وضعیت جریان رودخانه حبله‌رود را نشان می‌دهند. به طوری که متوسط آبدهی در تمام ماه‌های سال و مقدار جریان پایه حوضه کاهش یافته است. هم فراوانی و هم طول دوره پالس‌های جریان کمینه افزایش یافته است. برعکس، هم فراوانی و هم طول دوره پالس‌های جریان بیشینه کاهش یافته است. به همین دلیل فراوانی و بزرگی وقایع حدی بالا مثل سیل‌های متوسط و بزرگ کاهش یافته است. تحلیل روند طولانی‌مدت نشان می‌دهد که ۲۵ شاخص از بین ۳۳ شاخص تغییرات هیدرولوژیکی دارای روند نزولی معنادار از نظر آماری هستند. به طوری که میزان دبی متوسط حوضه در ایستگاه هیدرومتری بنکوه از ۸/۴۳ مترمکعب در ثانیه در دوره قبل از تغییر به ۵/۴۷ مترمکعب در ثانیه در دوره بعد از تغییر کاهش یافته است که معادل ۳۵ درصد کاهش در آبدهی حوضه حبله‌رود است. پیامد این تغییرات هیدرولوژیکی شدید در حوزه آبخیز حبله‌رود، علاوه بر بروز تعارض و تنش‌های اجتماعی میان بهره‌برداران، ایجاد تنش و تهدید جوامع گیاهی و جانوری رودکناری خواهد بود که در سیلاب‌دست‌های رودخانه‌ها زندگی می‌کنند و خدمات بوم‌سازگانی متعددی را فراهم می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: تعیین نقاط تغییر، کاهش دبی، حبله‌رود، سری زمانی دبی، IHA

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: sheikh@gau.ac.ir

استاد: نادری، مهین، شیخ، واحدبردی، بهره‌مند، عبدالرضا، کمکی، چوقی بایرام، و قانقرمه، عبدالعظیم (۱۴۰۲). تحلیل تغییرات رژیم جریان آب رودخانه‌ای با استفاده از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز حبله‌رود). *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۱-۱۹.

DOI: 10.22098/mmws.2022.11430.1129

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.3.1.3

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۰۶/۲۷

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۳، شماره صفحه ۱ تا ۱۹

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

افزایش میانگین دمای سطح جهان، باعث تغییر در عوامل آب و هوایی مانند بارش و تبخیر و تعرق شده است که این امر به نوبه خود رژیم جریان رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تحلیل روند تغییرات جریان رودخانه‌ها و بارش حوزه‌های آبخیز از مسایل مهم در مدیریت منابع آب حوضه‌ها است (Chapman, 1996). با توجه به آخرین گزارش IPCC^۱ مربوط به سال ۲۰۰۷ پیش‌بینی می‌شود که میانگین رواناب سالانه در عرض‌های جغرافیایی بالا و در مناطق گرمسیری و مرطوب افزایش ۱۰ تا ۴۰ درصدی و در برخی مناطق خشک در عرض‌های میانی و استوا کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصدی داشته باشد (IPCC, 2007). با توجه به این تغییرات نیاز است ویژگی‌های مختلف دبی حوضه‌ها از نظر وجود روند بررسی شوند تا بتوان اقدامات مدیریتی مناسب برای کاهش آسیب‌پذیری در برابر این تغییرات اتخاذ نمود. بررسی روند علاوه بر مشخص کردن نوسانات طولانی‌مدت فرایندهای هیدرولوژیکی، دوره تناوب و دیگر خصوصیات آنها را مشخص می‌کند (Fang Sang et al., 2014)، بدین منظور در طی سال‌های گذشته محققین روش‌های مختلف پارامتری و ناپارامتری را جهت بررسی روند ارائه داده‌اند. در روش‌های پارامتری نیاز است که داده‌ها مستقل بوده و از توزیع نرمال پیروی کنند. در صورتی که در روش‌های غیرپارامتری نیاز نیست داده‌ها از توزیع نرمال پیروی کنند و این روش‌ها نسبت به داده‌های پرت و گم شده حساسیت کمتری دارند (Hamed, 2007). علاوه بر اهمیت بالای بررسی روند عوامل مختلف جهت برنامه‌ریزی و مدیریت درست حوزه‌های آبخیز، تحلیل نقطه تغییر با هدف تشخیص تغییر در میانگین یک متغیر در داده‌های ثبت شده طولانی‌مدت، تغییر در خصوصیات آماری و تفاوت آن‌ها در دوره‌های قبل و بعد از وقوع نقطه تغییر در سری‌های زمانی هیدروکلیمایی نیز از نظر امکان برنامه‌ریزی استفاده از منابع آب و نیز پیش‌بینی وقوع خشکسالی مهم و قابل توجه هستند (Dingman, 2002). برای تعیین روند تغییرات و تعیین نقاط تغییر معنادار در سری‌های زمانی متغیرهای دبی رودخانه‌ها از روش‌های آماری استاندارد، هم‌چون آزمون روند من-کندال^۳ (Mann, 1945; Kendall, 1948)، آزمون پتیت^۴ (Pettitt, 1979) یا روش منحنی جرم مضاعف^۵ (Huo et al., 2008) استفاده می‌شود. سری‌های زمانی در تحلیل نقطه تغییر از هم‌دیگر مستقل فرض می‌شوند (Salehi et al., 2020). اولین

تحقیقات در مورد تحلیل نقطه تغییر برای آزمون وجود تغییر در کنترل کیفی کارخانجات انجام گرفت و پس از آن در مورد نقاط تغییر چندگانه و انواع مختلف داده‌ها به کار رفت. این روش تحت عناوین مرتبط قطعه‌بندی، شکست ساختار، نقطه شکست، تغییر ساختار و شناسایی بی‌نظمی مطرح و مورد ارزیابی قرار گرفته است (Pettitt, 1979).

(2004) Xiong et al. برای تحلیل تغییرات هیدرولوژیکی رودخانه یانگ تسه از آزمون تعیین نقطه تغییر در سری داده‌های حداکثر، حداقل و متوسط دبی سالانه در دوره زمانی (۱۸۸۲ تا ۲۰۰۱) استفاده کردند و دو نقطه تغییر معنادار (سال‌های ۱۹۳۴ و ۱۹۶۸) را در سری داده‌های دبی متوسط سالانه شناسایی کردند در حالی که برای سری داده‌های دبی حداقل و حداکثر نقاط تغییر معناداری را مشاهده نکردند. در مطالعه‌ای (Wong et al., 2006) برای تشخیص تغییرات سطح آب رودخانه از تجزیه و تحلیل نقطه تغییر استفاده کردند. هم‌چنین از تحلیل نقطه تغییر برای تشخیص تغییرات در واریانس سری زمانی اقیانوس‌شناسی استفاده شده است (Killick et al., 2010). اخیراً، استفاده از روش‌های تعیین نقطه تغییر برای شناسایی تغییرات ناگهانی گذشته در داده‌های سری زمانی، به‌ویژه داده‌های اقلیمی، به‌طور گسترده‌ای رواج یافته است. نقطه تغییر یک مقطع زمانی مشخص در سری زمانی است که میزان اختلاف در مقادیر گشتاور اول و دوم سری زمانی در قبل و بعد از آن به حد معنادار از نظر آماری می‌رسد و نشان‌دهنده تغییر در الگوی داده‌های سری زمانی است. به‌عبارت دیگر، نقطه تغییر به‌عنوان نقطه‌ای تعریف می‌شود که در آن عوامل (میانگین، واریانس و روند) یک توزیع اساسی یا عوامل مدل مورد استفاده برای توصیف سری‌های زمانی به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند (Beaulieu, 2012). بررسی منابع علمی نشان می‌دهد که مطالعات متعددی در نقاط مختلف جهان در خصوص کاربرد تحلیل نقطه تغییر در زمینه‌های تخصصی گوناگون صورت گرفته است. برای مثال، در مطالعات پیشین، به‌ویژه در زمینه علوم زمین، (Croitoru, 2012) و (Khapalova et al., 2013) برای تشخیص تغییرات بارش و (Shirvani, 2017) برای تشخیص تغییرات دما، از تحلیل نقطه تغییر استفاده شده است.

(Arif et al., 2017) از تجزیه و تحلیل نقطه تغییر با استفاده از دو روش Cusum و Bootstrap برای کشف تغییرات قابل توجه بالقوه در میانگین سالانه بارندگی، دما و رطوبت نسبی یک دوره ۲۵ ساله داده‌های آب و هوایی مالزی استفاده کردند. از روش Cusum برای تجزیه و تحلیل روند و الگوهای داده و از روش Bootstrap برای شناسایی وقوع نقاط تغییر استفاده شده است. (Richter et al., 1996) به‌منظور

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² Change point analysis

³ Mann-Kendall test

⁴ Pettitt test

⁵ Double mass curve test

داده است. در حالی که، سهم این دوره از دبی‌های بیشینه فقط ۲۵ درصد است که بیانگر کاهش مقدار جریان در اثر احداث سد و همچنین، روند کاهش بارش است.

Asgari et al. (2019) پژوهشی را با هدف تعیین و تحلیل نقاط تغییر در داده‌های مربوط به دبی سالانه ۲۰ ایستگاه هیدرومتری حوزه آبخیز گرگانرود در طول دوره آماری ۳۴ ساله انجام دادند. نتایج حاصل از تحلیل نقاط تغییر در دبی نشان داد که نقاط تغییر در داده‌های مورد استفاده در این مطالعه بیش‌تر از نوع کاهش و در مواردی نیز افزایشی و در برخی از ایستگاه‌ها اصلاً نقاط تغییری شناسایی نشده است. بنابراین تعداد تغییرات کاهش در ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه، به‌طور معنادار بیش‌تر از تغییرات افزایشی بوده است.

Yang et al. (2008) ارزیابی مکانی دگرسانی هیدرولوژیکی ناشی از ساخت سد در رودخانه زرد چین را انجام دادند. در پژوهشی نیز Fernández et al. (2012) از شاخص‌های جریان هیدرولوژیکی به‌منظور برنامه‌ریزی در رابطه با آب‌های به شدت تغییر یافته در اسپانیا استفاده کردند. Fantin et al. (2015) نیز با استفاده از تحلیل شاخص‌های هیدرولوژیکی تأثیر تاسیسات برق‌آبی انحراف آب بر وضعیت هیدرولوژیکی رودخانه کورنتس در برزیل را ارزیابی کردند. Mwedzi et al. (2016) میزان تغییر شاخص‌های هیدرولوژیکی در بخش‌های مختلف حوضه رودخانه مانیام در زیمبابوه را پس از ساخت سد در این حوضه بررسی و تجزیه و تحلیل کردند. همچنین Papadaki et al. (2016) اثرات بالقوه تغییر آب و هوا بر رژیم جریان و زیستگاه ماهی در رودخانه‌های کوهستانی جنوب غربی بالکان را با استفاده از تحلیل شاخص‌های هیدرولوژیکی رژیم جریان بررسی کردند. همچنین Su et al. (2018) روند جریان درازمدت ۹۱۶ رودخانه بزرگ و پرآب جهان را بررسی کردند که نتایج بیان‌گر کاهش جریان ۵۰۳ رودخانه و افزایش جریان در ۴۰۸ رودخانه بوده است. همچنین، آن‌ها دریافتند که افزایش جریان در عرض‌های جغرافیایی بالا شایع‌تر بوده، در حالی که روند جریان منفی در عرض‌های جغرافیایی پایین بیش‌تر است.

Wang et al. (2020) تغییرات رواناب ۱۳۲۱ حوزه آبخیز در سراسر جهان را مورد مطالعه قرار دادند، نتایج نشان داد رواناب جهانی به‌طور متوسط ۱۱/۹ میلی‌متر در سال در دهه‌های اخیر کاهش یافته است. Liu et al. (2021) نیز روند جریان را در بخش میانی و فوقانی رودخانه زرد در چین بررسی کردند، نتایج نشان داد که دبی رودخانه زرد در ۵۰ سال گذشته کاهش یافته که این کاهش جریان در بخش میانی و پایینی رودخانه بیش‌تر به‌دلیل اجرای اقدامات و پروژه‌های صرفه‌جویی در آب و همچنین انتقال آب بوده است. Xu et al. (2022) نیز تغییرات زمانی و

ارزیابی جامع تغییرات هیدرولوژیکی، شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (IHA) را توسعه داده‌اند.

IHA شامل ۳۳ شاخص تغییرات هیدرولوژیکی است و به پنج گروه تقسیم می‌شود. همچنین، Richter et al. (1997) رویکرد دامنه تغییرپذیری (RVA) را جهت توضیح تغییرات کمی پیشنهاد کردند. شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، Khosravi et al. (2019) در رودخانه خرمارود استان گلستان طبقه‌بندی و تعیین تغییرات رژیم جریان آب رودخانه‌ای را با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی IHA انجام دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که فعالیت‌های انسانی در حوزه آبخیز مورد مطالعه سبب کاهش مقادیر جریان‌های کم، دبی حداقل و میانگین ماهانه، مدت زمان تداوم جریان، تعداد پالس‌های جریان‌های زیاد، مدت زمان تداوم سیلاب‌های کوچک و بزرگ، میانگین در هر سال آبی شده و به عکس سبب افزایش مقدار و فراوانی دبی اوج سیلاب‌های کوچک و بزرگ، تعداد روزهای جریان با دبی صفر، فراوانی جریان‌های خیلی کم و میانگین حداکثر جریان یک‌روزه در هر سال آبی شده است.

Esfandiyari Darabad et al. (2019) نیز تحلیل تغییرات شاخص‌های هیدرولوژیک جریان تحت تأثیر احداث سد در رودخانه‌های زربینه‌رود و ساروق چای استان آذربایجان غربی را مطالعه نمودند. با توجه به نتایج کمی مربوط به درصد اختلاف شاخص‌های هیدرولوژیک، سدهای احمدآباد، گوگردچی، نورزولو و شهید کاظمی در جریان طبیعی رودخانه‌های زربینه‌رود و ساروق‌چای اثرگذار بوده است و باعث تغییر شاخص‌ها در دوره‌های مورد مطالعه شده است. در پژوهشی دیگر نیز Naderi et al. (2019) به تحلیل شاخص‌های هیدرولوژیک جریان رودخانه کارون پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیش‌ترین کم‌ترین رژیم جریان مورد نیاز برای حفظ رودخانه زربین‌گل را با توجه به نیازهای بوم‌شناختی در ماه‌های فروردین و مهر به‌ترتیب معادل ۵/۰۹ و ۰/۸۹ مترمکعب بر ثانیه، با میانگین ۱/۷۹ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۸۴ درصد جریان طبیعی رودخانه) برآورد می‌کند.

در تحقیقی Nasiri Khiavi et al. (2019) به بررسی تأثیر ترکیبی تغییر مؤلفه‌های اقلیمی و احداث سد یامچی بر دبی جریان رودخانه بالخلوچای اردبیل با استفاده از نرم‌افزار IHA 7.1 در دوره‌های قبل از احداث سد (۱۳۵۳-۱۳۸۳) و بعد از احداث سد (۱۳۹۲-۱۳۸۴) پرداختند. بر اساس نتایج، دوره‌های بعد از احداث سد حدود ۹۲ درصد دبی‌های کمینه جریان را به‌خود اختصاص

¹ Indicators of Hydrologic Alteration

² Range of Variability Approach

نرم‌افزار IHA و رویکرد RVA به مقایسه شاخص‌های هیدرولوژیکی و جریان محیط زیستی در دوره‌های قبل و بعد از نقطه تغییر پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل بخش بالادست حوزه آبخیز حبله‌رود تا ایستگاه آب‌سنجی بنکوه است که در محدوده سیاسی استان تهران واقع شده و مساحت آن حدود ۳۲۰۰ کیلومتر مربع است. از نظر مختصات جغرافیایی در محدوده طول ۱۹° ۱۱' ۵۲" تا ۴۰° ۸' ۵۳" شرقی و عرض ۳۵° ۵۷' ۲۹" تا ۳۵° ۵۷' ۲۹" شمالی واقع شده است (شکل ۱). تراکم جمعیتی و مناطق مسکونی حوضه نسبتاً کم است. با توجه به کوهستانی بودن حوضه، اراضی زراعی نیز اکثراً باغات و کشاورزی آبی بوده که محدود به بستر دره‌ها و پادگانه رودخانه‌ها در بالادست و دشتهای کوچک پراکنده در پایین‌دست است. کاربری غالب منطقه مرتع و با پوشش گیاهی فقیر تا متوسط است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی آمبرژه، اقلیم حوضه حبله‌رود نیمه‌خشک سرد و بر اساس روش دومارتن نیمه خشک ارتفاعی است. متوسط بارندگی سالانه حبله‌رود شمالی (منطقه مورد مطالعه) حدود ۴۰۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه آن حدود ۱۱ درجه سانتی‌گراد است.

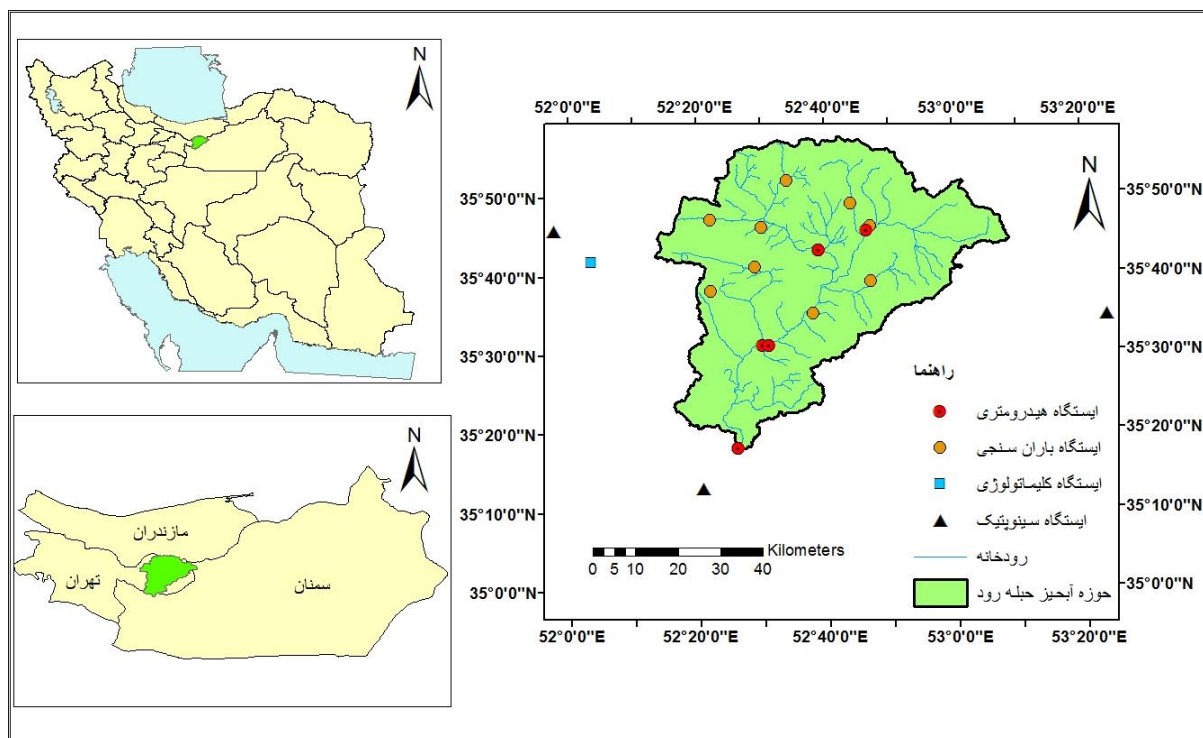
۲-۲- تحلیل آماری متغیرهای هیدروکلیمایی

به‌منظور تحلیل آماری متغیرهای هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه، آمار روزانه ایستگاه هیدرومتری بنکوه واقع در خروجی حوضه حبله‌رود جمع‌آوری شد و از لحاظ طول دوره آماری و کیفیت داده‌های ثبت شده مورد بررسی قرار گرفت. سپس به‌منظور بررسی معناداری روند تغییرات آبدی حوضه حبله‌رود و اینکه جهت تغییرات به چه صورت است. روند تغییرات دبی متوسط سالانه رودخانه حبله‌رود از طریق رگرسیون خطی و نرخ تغییرات با استفاده از شیب خط روند مشخص شد (Sheikh et al., 2009).

داده‌های روزانه اقلیمی نیز از آمار مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی داخل و اطراف حوضه حبله‌رود، به‌دست آمد. در شکل ۱ موقعیت این ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود. به‌منظور بررسی تغییرات متغیرهای اقلیمی سالانه نیز رگرسیون خطی و شیب خط روند استفاده شد. به این ترتیب معناداری یا عدم معناداری روند تغییرات و همچنین جهت و نرخ روند تغییرات برای هر کدام از متغیرهای مورد بررسی در مقیاس سالانه مشخص شد.

منطقه‌ای در هیدرولوژی رودخانه‌ای در کشور چین را در ۶۰ سال گذشته بررسی کردند و دریافتند که فعالیت‌های انسانی، ساخت سد و بهره‌برداری از منابع آب همگی تأثیر قابل توجهی بر تغییرات هیدرولوژیکی داشتند.

تغییرات در شرایط هیدرولوژیکی، توسعه اقتصادی-اجتماعی و حفاظت محیط زیست را به خطر می‌اندازد و بر زندگی انسان تأثیر می‌گذارد. درک عملکرد و ویژگی‌های متغیرهای هیدرولوژیکی و اقلیمی بلندمدت برای توسعه اقتصادی-اجتماعی کشورهای در حال توسعه و مدیریت کارآمد و استفاده از منابع حوضه امری حیاتی است (Chauluka et al., 2021). آشکارسازی روند تغییرات شاخص‌های متعدد هیدروکلیمایی از اولین گام‌های تحلیل تغییرات حوزه آبخیز در طول زمان است. با توجه به اهمیت موضوع در طی سه دهه گذشته، تحقیقات متعددی در زمینه بررسی روند تغییرات سری‌های زمانی عوامل هیدروکلیماتولوژیکی در سطح دنیا و به‌ویژه در بعضی از کشورهای پیشرفته و یا دارای آمار طولانی‌مدت از جمله ایالات متحده آمریکا، کانادا، انگلستان، سوئد، چین و ترکیه صورت گرفته است (Sheikh et al., 2014). در اکثر نقاط کشور ایران، رودخانه‌ها بر اثر دخالت‌های انسانی مانند احداث سد، انتقال آب بین حوضه‌ای، افزایش میزان بهره‌برداری برای مصارف کشاورزی و شهری و تغییرات چشم‌گیری یافته‌اند (Naderi et al., 2019). منطقه مورد مطالعه در این پژوهش آبخیز حبله‌رود است که یکی از آبخیزهای مهم و مشترک بین دو استان تهران و سمنان بوده که در چند دهه اخیر به‌دلیل افزایش جمعیت و برداشت گسترده از منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی، کاهش دبی آن موجب بروز تعارض بین ذینفعان بالادست و پایین‌دست این حوزه آبخیز شده است (Sheikh et al., 2018). بنابراین مطالعه حاضر به تحلیل تغییرات هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی متعدد در ایستگاه هیدرومتری بنکوه بر رودخانه حبله‌رود پرداخته است. با توجه به این‌که رودخانه حبله‌رود زهکش اصلی حوزه آبخیز حبله‌رود است، تحلیل تغییرات هیدرولوژیکی آن با استفاده از شاخص‌های متعدد جهت شناخت مفصل رفتار جریان دبی حوضه به‌منظور کمک به سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی و حفاظت از محیط زیست منطقه از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین‌منظور در مطالعه حاضر ابتدا تغییرات متغیرهای هیدروکلیمایی در طول دهه‌های گذشته در حوزه آبخیز حبله‌رود مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و بعد از تعیین نقطه تغییر معنادار در سری زمانی داده‌های مشاهداتی دبی جریان، سری‌های آماری متغیرهای هیدرولوژیکی به دو دوره قبل از تغییر (دوره طبیعی) و بعد از تغییر دسته‌بندی شده، سپس با استفاده از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز حبله‌رود در ایران
Figure 1- Geographical location of Hableroud watershed in Iran

است. این روش معمولاً برای تشخیص تغییرات در سری هیدرولوژیکی و همچنین سری‌های آب و هوایی مورد استفاده قرار گرفته است. در حقیقت در این روش هر عدد سری زمانی با عدد قبل از خود مقایسه می‌شود و میزان تفاوت آن‌ها محاسبه می‌شود و این تفاوت‌ها به صورت تراکمی محاسبه می‌شود و در مقطعی از زمان که مقدار تراکمی این تغییرات به حدی افزایش می‌یابد که معنادار شود آن مقطع زمانی به عنوان نقطه شروع معنادار شدن تغییرات محسوب و انتخاب می‌شود. بنابراین، این بدان معنا نیست که نقطه تغییر منتخب، ضرورتاً مقطع زمانی است که تغییرات ناگهانی در آن اتفاق می‌افتد، بلکه بیانگر این است از این نقطه به بعد ویژگی‌های کلیدی توزیع آماری داده‌ها همچون میانگین و واریانس داده‌ها دچار تغییر معنادار می‌شوند (Gao et al., 2011). این روش، اختلاف عوامل توزیع آماری دو مجموعه نمونه X_1, X_2, \dots, X_t و X_{t+1}, \dots, X_T از یک جامعه آماری را آزمون می‌کند. آماره مورد استفاده در این آزمون به صورت $U_{t,T}$ نشان داده می‌شود. و حداکثر مقدار آن به عنوان نقطه تغییر (CPT) تعریف می‌شود (Gao et al., 2011).

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j), 1 \leq t < T \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x > 0 \\ 0, & \text{if } x = 0 \\ -1, & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

$$CPT = \max |U_{t,T}|, 1 \leq t < T \quad (2)$$

۲-۳- تعیین نقطه تغییر در دبی سالیانه

زمان ایجاد تغییر معنادار در سری‌های زمانی (نقطه تحول) از اهمیت ویژه‌ای در توصیف رفتار آن‌ها برخوردار است. به منظور تشخیص نقطه تغییر در سری‌های زمانی، روش‌های متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بعضی از روش‌های رایج عبارتند از: آزمون من-کندال دنباله‌ای یا آزمون جهش من-کندال، آزمون پتیت، آزمون دامنه بویژاند، آزمون U بویژاند، آزمون همگنی استاندارد نرمال و آزمون جرم مضاعف که در این تحقیق تمام روش‌های بیان شده مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل این که تمام این آزمون‌ها، روش‌های تجربی هستند و روابط و فرضیات مورد استفاده در آن‌ها متفاوت است. بنابراین، برای حصول اطمینان و اعتبار بالای نتایج شناسایی نقطه تغییر از روش‌های مختلف تحلیل نقطه تغییر استفاده شد و در صورت شباهت آن‌ها (علیرغم تفاوت‌های جزئی)، از میانگین روش‌ها برای تعیین نقطه تغییر معنادار استفاده می‌شود.

۲-۳-۱- آزمون پتیت

یکی از روش‌های مورد استفاده برای تعیین نقاط تغییر معنادار در سری‌های زمانی، روش غیرپارامتری پیشنهاد شده توسط Pettitt

¹ Sequence Mann-Kendall test

² Mann-Kendall Mutation test

³ Buishand Range test

⁴ Buishand U test

⁵ Standard Normal Homogeneity test

موردنظر به صورت سری استاندارد شده Z_i که $i=1,2,\dots,n$ در می‌آید. سپس دنباله T_k از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_k = KZ_k^2 + (n-k)Z_{n-k}^2 \quad (5)$$

که در آن برای $k=1,2,\dots,n-1$ که در آن میانگین Z_k^2 داده اول و Z_{n-k}^2 میانگین $n-k$ داده باقیمانده است، رسم می‌شود. راهکارهای دیگری نیز برای بررسی بیش از چند نقطه ناهمگن برای این آزمون در نظر گرفته شده است. آماره این آزمون در حقیقت بیشینه $T_k = \max T_k$ است، که به‌عنوان نقطه تغییر نیز شناخته می‌شود (Alexandersson and Moberg, 1997).

۲-۳-۴- آزمون بویژاند

این آزمون همگنی بر پایه جمع‌های جزئی تعدیل شده و یا انحرافات جمعی از میانگین بنا نهاده شده است که به وسیله بویژاند در سال ۱۹۸۲ برای تحلیل سری‌های زمانی ارائه شده و مراحل محاسبه آن به‌شرح زیر است. ابتدا مقدار آماره S_k^* از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$S_k^* = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}) \quad (6)$$

$$K=1, \dots, n$$

که در آن، Y مقدار متوسط متغیر Y_i است. سپس مقدار S_k^{**} از تقسیم S_k^* بر انحراف معیار داده‌ها (Dy) به‌دست می‌آید.

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{Dy} \quad (7)$$

$$K=1,2,\dots,n$$

مقدار بیشینه آماره S_k^{**} با Q نشان داده می‌شود که با استفاده از آن، نقطه تغییر و وجود ناهمگنی در سری زمانی شناسایی می‌شود، به‌طوری که اگر مقدار محاسبه شده Q/\sqrt{n} بزرگ‌تر از مقدار بحرانی آماره آزمون باشد، وجود نقطه تغییر و ناهمگنی در سری داده تأیید می‌شود (Kazemzadeh, 2015).

$$Q = \max |S_k^{**}| \quad 0 \leq k \leq n \quad (8)$$

۲-۳-۵- آزمون دنباله من-کندال

برای شناسایی نقاط تغییر معنادار در سری‌های دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری منطقه مورد مطالعه، آزمون دنباله من-کندال نیز استفاده شد. آزمون من-کندال دنباله‌ای $U(t)$ برای نشان دادن تغییرات روند نسبت به زمان استفاده می‌شود. ابتدا دنباله پیشرو آماره $U(t)$ که متغیر نرمال استاندارد شده با میانگین صفر و انحراف معیار واحد است برای هر کدام از داده‌های سری زمانی از

۲-۳-۲- آزمون منحنی جرم مضاعف

منحنی جرم مضاعف ساده‌ترین و گسترده‌ترین روش تحلیل روند سری‌های زمانی است (Mo et al., 2019). منحنی جرم مضاعف، نمودار مقادیر جمعی یک متغیر در مقابل مقادیر جمعی متغیر وابسته دیگر برای یک دوره زمانی همزمان است. منحنی جمعی مضاعف بین بارش و رواناب ابزاری مؤثر برای آشکارسازی تغییرات رژیم هیدرولوژیکی متأثر از آشفته‌گی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی است. به‌طور معمول، منحنی جرم مضاعف بین بارش و دبی یک خط مستقیم است، اما تغییر یا شکست در شیب این منحنی نشان‌دهنده این موضوع است که رابطه اصلی بین متغیرها شکسته شده است. در این مطالعه از منحنی جرم مضاعف برای مشخص کردن نقطه تغییر سری رواناب به‌عنوان تأیید نقاط شکست تعیین شده توسط آزمون پتیت استفاده می‌شود. همان‌طور که در بالا ذکر شد روش مرسوم منحنی جرم مضاعف بر رابطه بین دبی و بارندگی جمعی متمرکز است در حالی که اثر تغییرات اقلیمی بر متغیر دما و در نتیجه تبخیر و تعرق ممکن است بیش‌تر از اثر متغیر بارش باشد. بنابراین، (Wei et al., 2010) برای ترسیم منحنی جرم مضاعف از رابطه جمعی مقدار دبی در برابر مقادیر جمعی اختلاف بارش و تبخیر و تعرق استفاده نمودند. در مطالعه حاضر هر دو روش مورد استفاده قرار گرفت. شکل کلی معادله‌های منحنی جرم مضاعف در این دو روش به‌صورت زیر است:

$$\sum_{i=1}^t Q_i = a + b \sum_{i=1}^t P_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^t Q_i = a + b \sum_{i=1}^t (P_i - ET_i) \quad (4)$$

۲-۳-۳- آزمون همگنی نرمال استاندارد

یکی از متداولترین روش‌های بررسی همگنی داده‌ها، روش همگنی نرمال استاندارد است که توسط محققان مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمون، به شکست‌های ابتدایی و انتهای در سری داده‌ها بسیار حساس است و امکان شناسایی موقعیت زمانی ناهمگنی و شدت آن را دارد. این روش، هم‌چنین برای مطالعه روند در سری زمانی آب و هوایی مناسب است. فرض صفر این آزمون، همگنی سری را همراه با توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس یک در مقابل ناهمگنی سری و وجود حداقل یک نقطه مانند M که داده‌های قبل از آن با میانگین μ_1 و داده‌های بعد از آن با میانگین μ_2 باشند را ارائه می‌کند (Alexandersson, 1986). برای انجام این آزمون سری داده

محاسبه ۶۷ پارامتر آماری را دارد که در دو گروه عوامل شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (IHA) و عوامل مؤلفه‌های جریان محیط زیستی طبقه‌بندی می‌شوند. تعداد عوامل شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی ۳۳ مورد و تعداد عوامل مؤلفه‌های جریان محیط زیستی ۳۴ مورد است که در این پژوهش این ۶۷ شاخص محاسبه شد. همچنین، نرم‌افزار IHA دارای گزینه‌های متعددی برای انجام محاسبات و ارائه نتایج به اشکال مختلف توسط کاربر است. مهم‌ترین این گزینه‌ها که باید توسط کاربر تعیین شود، نحوه تحلیل تغییرات با استفاده از روش‌های آماری پارامتریک یا ناپارامتریک است. در صورتی که داده‌های مورد بررسی از توزیع نرمال تبعیت کنند استفاده از روش‌های پارامتریک توصیه می‌شود، ولی از آن‌جا که اکثر سری داده‌های هیدرولوژیکی دارای چولگی هستند و از توزیع نرمال تبعیت نمی‌کنند استفاده از روش ناپارامتریک توصیه می‌شود. در این روش تحلیل‌ها با استفاده از عوامل میانه، چارک‌ها، دهک‌ها و صدک‌ها صورت می‌گیرد. گزینه مهم دیگر، انتخاب نحوه تحلیل‌ها بر اساس سری کامل آمار یا تقسیم سری داده‌ها به دو دوره و مقایسه مقادیر شاخص‌ها در این دو دوره است. تقسیم سری داده‌ها به دو دوره، زمانی که منطقه مورد مطالعه دستخوش تغییرات انسانی ناگهانی یا شدید شده باشد مناسب است. در این روش پژوهش تغییرات ایجاد شده در مقادیر شاخص‌های هیدرولوژیکی در دو دوره قبل و بعد از تغییر محاسبه و مقایسه شد. به‌علاوه با استفاده از نرم‌افزار IHA و رویکرد دامنه تغییرپذیری (RVA) معرفی شده توسط Richter et al. (1997) برای ۳۳ شاخص تغییرات هیدرولوژیکی استفاده شد و نتایج آن در قالب یک نمودار کلی نشان داده شد. در رویکرد RVA برای هر شاخص، فراوانی آن در سه دسته مقادیر پائین، میانه و بالا در دوره طبیعی (دوره قبل از تغییر) به‌عنوان مقادیر مرجع محاسبه می‌شود تا بتوان میزان تغییرات ایجاد شده در فراوانی این سه دسته برای آن شاخص را در دوره بعد از تغییر برآورد نمود. فاکتور تغییرات هیدرولوژیکی برای هر شاخص و دسته مورد نظر به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{f_a - f_b}{f_b} \quad (12)$$

که در آن، D میزان تغییرات شاخص هیدرولوژیکی، f_a فراوانی دسته در دوره بعد از نقطه تغییر و f_b فراوانی دسته در دوره قبل از تغییر است.

Richter et al. (1997) توصیه کرده‌اند که مدیران منابع آب باید تلاش کنند تا توزیع مقادیر سالانه شاخص‌های هیدرولوژیکی را تا جای ممکن شبیه به توزیع مقادیر آن‌ها در دوره طبیعی حفظ کنند. رویکرد RVA فقط برای عوامل

ابتدا تا انتها، و سپس دنبالهٔ پسر آماره $U'(t)$ همانند $U(t)$ محاسبه می‌شود. با این تفاوت که این بار محاسبات از دادهٔ آخر سری زمانی شروع می‌شود. نقطه تقاطع منحنی‌های $U(t)$ و $U'(t)$ به‌عنوان نقطه تغییر روند در متغیر مورد بررسی انتخاب می‌شود (Shirvani, 2017).

آزمون من-کندال (Sneyres, 1990) برای ارزیابی و شناسایی نقطه تغییر در سری زمانی طولانی مدت X_i به‌کار می‌رود. اساس کار این آزمون بر این است که هر داده X_i ($i = 2, \dots, n$) با داده X_j ($j = 1, \dots, i-1$) در سری زمانی مقایسه می‌شود و تعداد دفعاتی که X_i بزرگ‌تر از X_j است شمرده می‌شود و به‌عنوان آماره t_i محسوب می‌شود که دارای توزیع نرمال بوده و میانگین و واریانس آن مطابق روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$E(t_i) = \frac{i(i-1)}{4} \quad (9)$$

$$ar(t_i) = \frac{i(i-1)(2i+5)}{72} \quad (10)$$

مقادیر دنبالهٔ آماره $U(t)$ از معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$U(t_i) = \frac{t_i - E(t_i)}{\sqrt{Var(t_i)}} \quad (11)$$

دنبالهٔ $U'(t)$ همانند مراحل بالا محاسبه می‌شود با این تفاوت که نقطه شروع داده‌ها آخر سری زمانی X_i است.

۲-۴- تحلیل تغییرات شاخص‌های هیدرولوژیکی

تاکنون بیش از ۱۷۰ شاخص هیدرولوژیکی برای بررسی مؤلفه‌های مختلف رژیم جریان رودخانه‌ها معرفی شده است که اکثر آنها همپوشانی و روابط همبستگی یا همخطی دارند. اما برای بررسی تغییرات رژیم جریان ناشی از تغییرات طبیعی یا انسانی تعدادی شاخص کلیدی تحت عنوان شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نهاد بین‌المللی حفاظت طبیعت TNC برای محاسبه این شاخص‌ها، نرم‌افزار شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی (IHA) را طراحی کرده است تا کاربران بتوانند به راحتی این شاخص‌ها را از روی سری داده‌های روزانه متغیرهایی هم‌چون دبی جریان، سطح ایستابی آب‌های زیرزمینی و سطح آب دریاچه‌ها استخراج کنند (TNC, 2009). از سایر امکانات این نرم‌افزار تهیهٔ منحنی‌های تداوم جریان برای دوره‌های زمانی تعریف شده توسط کاربر است. بنابراین با ترسیم منحنی‌های تداوم جریان در دوره‌های قبل و بعد از تغییرات می‌توان شاخص‌های کلیدی منحنی تداوم جریان را که در مدیریت منابع آب بسیار کلیدی محسوب می‌شوند، محاسبه نموده و میزان تغییرات آنها را کمی‌سازی نمود. نسخه IHA 7.1 قابلیت

شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی قابل استفاده است و قابل استفاده برای عوامل مؤلفه‌های جریان محیط‌زیستی نیست. به‌طور پیش فرض مقادیر کوچک‌تر از صدک ۳۳ در دسته پائین و مقادیر بزرگ‌تر از صدک ۶۷ در دسته بالا و باقی‌مانده اعداد در دسته میانه توزیع می‌شود.

مقدار مثبت فاکتور تغییرات هیدرولوژیک برای هر دسته بیانگر افزایش فراوانی آن دسته در دوره بعد از تغییر نسبت به دوره قبل از تغییر است و برعکس. نتایج کلی تغییرات شاخص

هیدرولوژیکی برای هر ۳۳ پارامتر در قالب یک نمودار ستونی نشان داده می‌شود. یک گزینه مهم دیگر که باید توسط کاربر نرم‌افزار IHA تعیین شود انتخاب زمان شروع سال آبی است که در نیم‌کره شمالی معمولاً روز اول اکتبر در نظر گرفته می‌شود. عوامل شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی و مؤلفه‌های جریان محیط زیستی هر کدام به پنج گروه به‌شرح جدول‌های ۱ و ۲ تقسیم می‌شوند.

جدول ۱- شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی تولید شده توسط نرم‌افزار IHA (TNC, 2009)
Table 1- of the list of hydrological alteration indicators generated by IHA (TNC, 2009)

عوامل هیدرولوژیکی	گروه عوامل IHA
میانگین یا میانه دبی جریان هر ماه	میزان دبی ماهانه (۱۲ شاخص)
حدافل و حداکثر میانگین‌های یک، سه، هفت، ۳۰ و ۹۰ روزه طی سال	مقدار و مدت وقایع حدی سالانه (۱۲ شاخص)
تعداد روزه‌های جریان صفر	
شاخص جریان پایه: حدافل دبی جریان هفت روزه تقسیم بر میانگین دبی سالانه	زمان وقوع جریان حدی (۲ شاخص)
شماره روز وقوع حدافل و حداکثر جریان یک روزه طی هر سال	تناوب و مدت تداوم پالس‌های کم و زیاد جریان (۴ شاخص)
تعداد پالس‌های کم و بالا در هر سال	
میانگین یا میانه مدت زمان تداوم پالس‌های کم و بالا (روز)	
میزان افزایش جریان (شاخه صعودی): میانگین یا میانه تمام تفاوت‌های مثبت بین مقادیر روزانه متوالی	میزان و فراوانی تغییرات وضعیت جریان (۳ شاخص)
میزان کاهش جریان (شاخه نزولی): میانگین یا میانه تمام تفاوت‌های منفی بین مقادیر روزانه متوالی	
تعداد برگشت‌های هیدرولوژیکی	

جدول ۲- شاخص‌های جریان محیط زیستی تولید شده توسط نرم‌افزار IHA (TNC, 2009)
Table 2- The list of the environmental flow indicators generated by IHA (TNC, 2009)

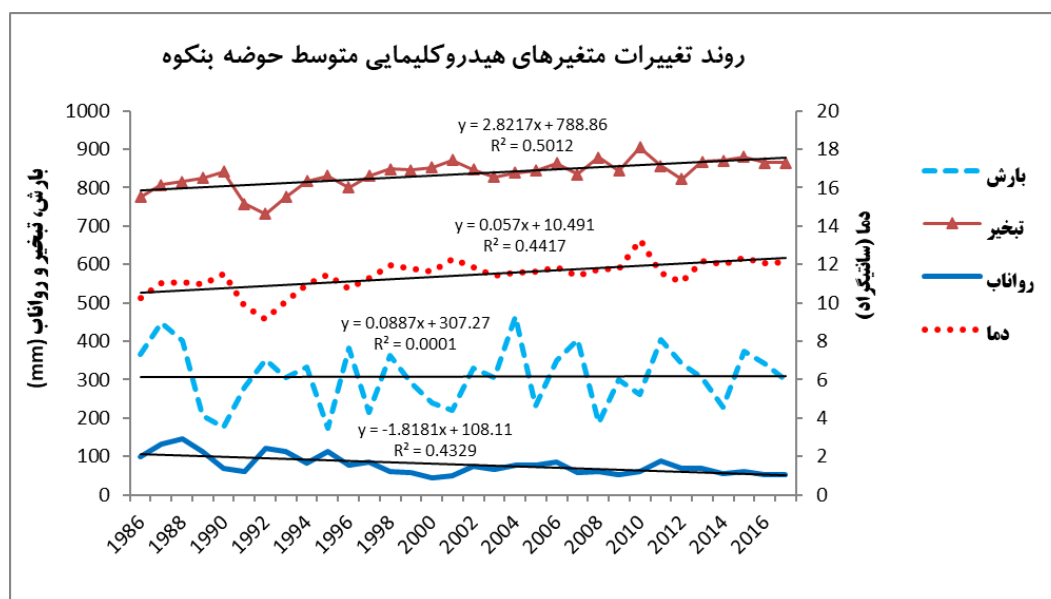
عوامل هیدرولوژیکی	گروه عوامل EFC
میانگین یا میانه مقادیر حدافل دبی جریان هر ماه	جریان‌های حدافل ماهانه (۱۲ شاخص)
فراوانی جریان‌های حدی پائین هر سال آبی	جریان‌های فرین پائین (۴ شاخص)
میانگین یا میانه مقدار اوج (حدافل مقدار)، تداوم و زمان (تاریخ) وقوع جریان حدی پائین	
فراوانی پالس‌های جریان بالا هر سال آبی	پالس‌های جریان بالا (۶ شاخص)
میانگین یا میانه مقدار اوج (حداکثر مقدار)، تداوم و زمان (تاریخ) وقوع جریان حدی پائین	
میانگین یا میانه نرخ‌های صعودی (Rise rate) و نزولی (Fall rate) در جریان	
فراوانی سیل‌های کوچک هر سال آبی	سیل‌های کوچک (۶ شاخص)
میانگین یا میانه مقدار اوج (حداکثر مقدار)، تداوم و زمان (تاریخ) وقوع وقایع سیل کوچک	
میانگین یا میانه نرخ‌های صعودی (Rise rate) و نزولی (Fall rate) در وقایع سیل کوچک	
فراوانی سیل‌های بزرگ هر سال آبی	سیل‌های بزرگ (۶ شاخص)
میانگین یا میانه مقدار اوج (حداکثر مقدار)، تداوم و زمان (تاریخ) وقوع وقایع سیل بزرگ	
میانگین یا میانه نرخ‌های صعودی (Rise rate) و نزولی (Fall rate) در وقایع سیل بزرگ	

۳- نتایج و بحث

۳-۱- روند تغییرات متغیرهای هیدروکلیمایی

و تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه در حوضه مورد مطالعه دارای روند صعودی معنادار در دوره آماری ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۷ است. متوسط بارش سالانه روند صعودی خفیفی را نشان می‌دهد که از نظر آماری معنادار نیست. اما متوسط عمق رواناب سالانه حوضه حبله‌رود (برحسب میلی‌متر در سال) در محل ایستگاه بنکوه روند نزولی معنادار را در دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد.

نتایج مربوط به بررسی روند تغییرات متغیرهای هیدروکلیمایی کلیدی متوسط حوضه حبله‌رود تا محل ایستگاه بنکوه در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متوسط دما



شکل ۳- روند تغییرات سالانه متغیرهای هیدروکلیماتی متوسط حوضه حبله‌رود

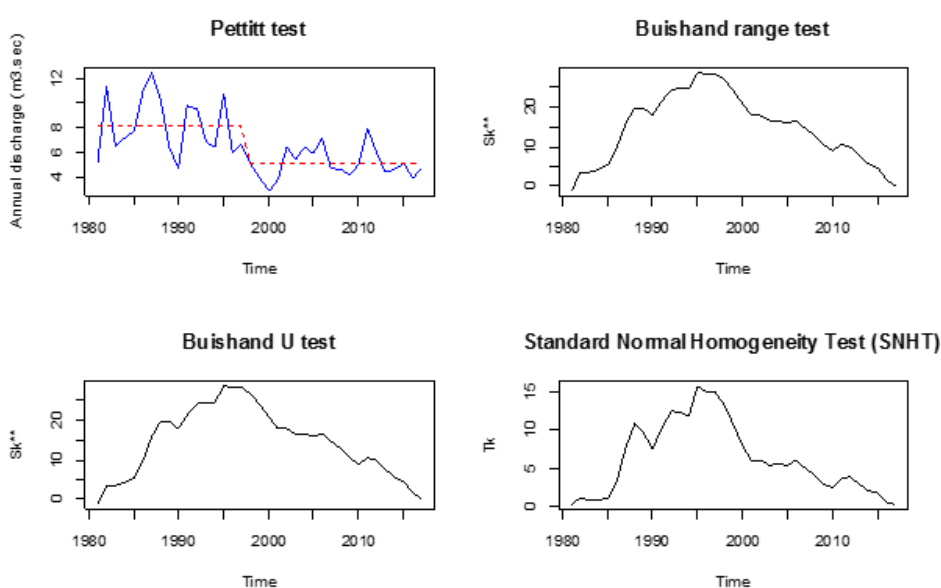
Figure 3-Trend of the mean annual hydroclimatic variables across the Hableroud basin

روش پتیت محل نقطه تغییر با تغییر ناگهانی در خط نقطه چین که نشان‌دهنده میانگین سری داده‌هاست نشان داده می‌شود. در مورد روش‌های بویژاند و همگنی نرمال استاندارد، محل نقطه تغییر جایی است که مقدار آماره مورد نظر به حداکثر می‌رسد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود سال نقطه تغییر به‌دست آمده برای ایستگاه بنکوه با استفاده از روش‌های مختلف اندکی متفاوت است. بنابراین میانگین سال‌های به‌دست آمده از روش‌های مختلف به‌عنوان سال انتهای دوره جریان طبیعی و شروع دوره تغییرات انتخاب شد.

۳-۲- تعیین نقطه تغییر در جریان دبی

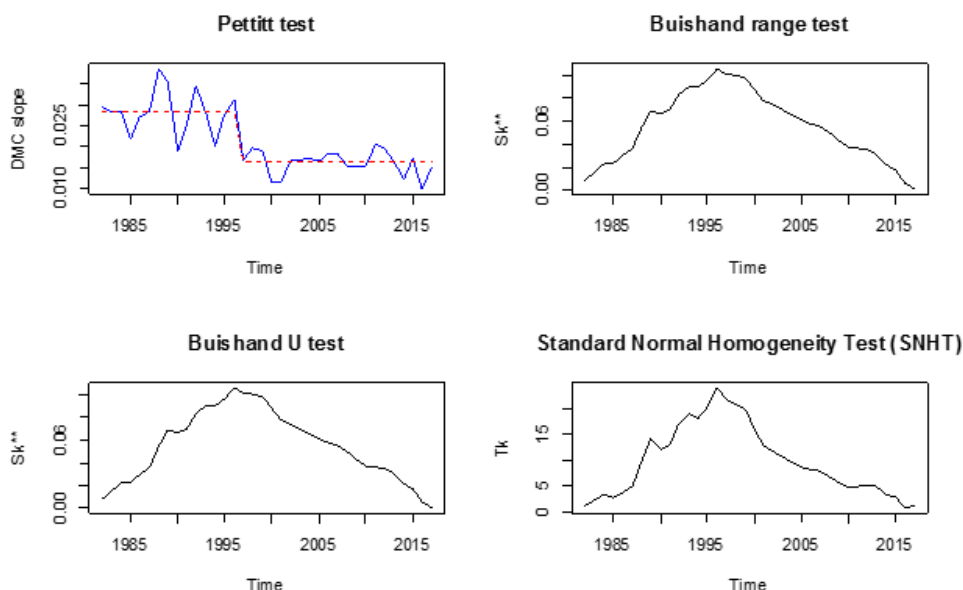
بر اساس سری‌های دبی متوسط سالانه ایستگاه بنکوه، سال شروع تغییر معنادر (نقطه تغییر) با استفاده از آزمون‌های آماری پتیت، بویژاند و همگنی نرمال استاندارد شناسایی شد و سپس همین آزمون‌ها روی سری داده‌های محاسبه شده شیب منحنی جرم مضاعف دبی-بارش متوسط سالانه ایستگاه مورد استفاده قرار گرفتند تا یکبار دیگر سال شروع تغییرات معنادر در سری‌های دبی ایستگاه استخراج شود (جدول ۳).

نتایج استفاده از این آزمون‌ها برای هر دو سری مورد استفاده در ایستگاه بنکوه در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. در



شکل ۴- نقطه تغییر شناسایی شده برای سری زمانی دبی متوسط سالانه در محل ایستگاه هیدرومتری بنکوه

Figure 4- The change point detected for the average annual discharge time series at the Bonekoh hydrometric station



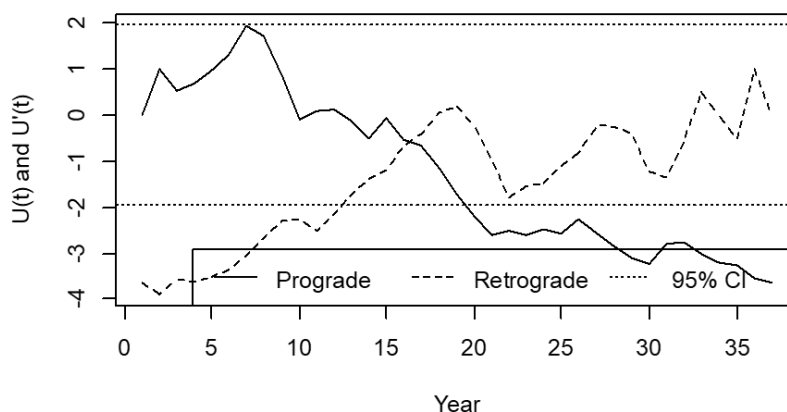
شکل ۵- نقطه تغییر شناسایی شده برای سری شیب منحنی جرم مضاعف دبی-بارش متوسط سالانه در محل ایستگاه هیدرومتری بنکوه
 Figure 5-The change point detected for the time series of slope values of the double mass curve between average annual discharge – precipitation observations at the Bonekoh hydrometric station

جدول ۳- تعیین نقطه تغییر دبی در محل ایستگاه هیدرومتری بنکوه
 Table 3- Determination of the change point for discharge data at Bonekoh hydrometric station

میانگین	سری شیب منحنی جرم مضاعف دبی-بارش متوسط سالانه				سری دبی متوسط سالانه				ایستگاه هیدرومتری
	SNHT	Buishand UT	Buishand RT	Pettitt	SNHT	Buishand UT	Buishand RT	Pettitt	
1995	1994	1994	1994	1994	1995	1995	1995	1997	بنکوه

دارد. در این نمودار کاملاً مشخص است که در ایستگاه بنکوه در سال شانزدهم (۱۹۹۵) تغییر اتفاق افتاده است. با توجه به این که روند یا تغییرات ناگهانی مشخصی در مقدار بارندگی متوسط حوضه حبله‌رود مشاهده نمی‌شود (شکل ۳)، احتمالاً مداخلات انسانی چشم‌گیری در این حوضه در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی رخ داده که باعث شده است ویژگی‌های کلیدی توزیع آماری سری داده‌های دبی مشاهده‌ای حوضه تغییر معناداری یافته است.

علاوه بر روش‌های فوق، از آزمون دنباله من-کندال (Sequential Mann - Kendall) نیز برای شناسایی نقاط تغییر معنادار در سری‌های دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری منطقه نیز استفاده شد. در این روش، محل نقطه تغییر معنادار جایی است که منحنی پسرونده (Retrograde) منحنی پیش‌رونده (Prograde) را از پائین به بالا قطع می‌کند. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج این روش و سایر روش‌های مورد استفاده در بالا وجود

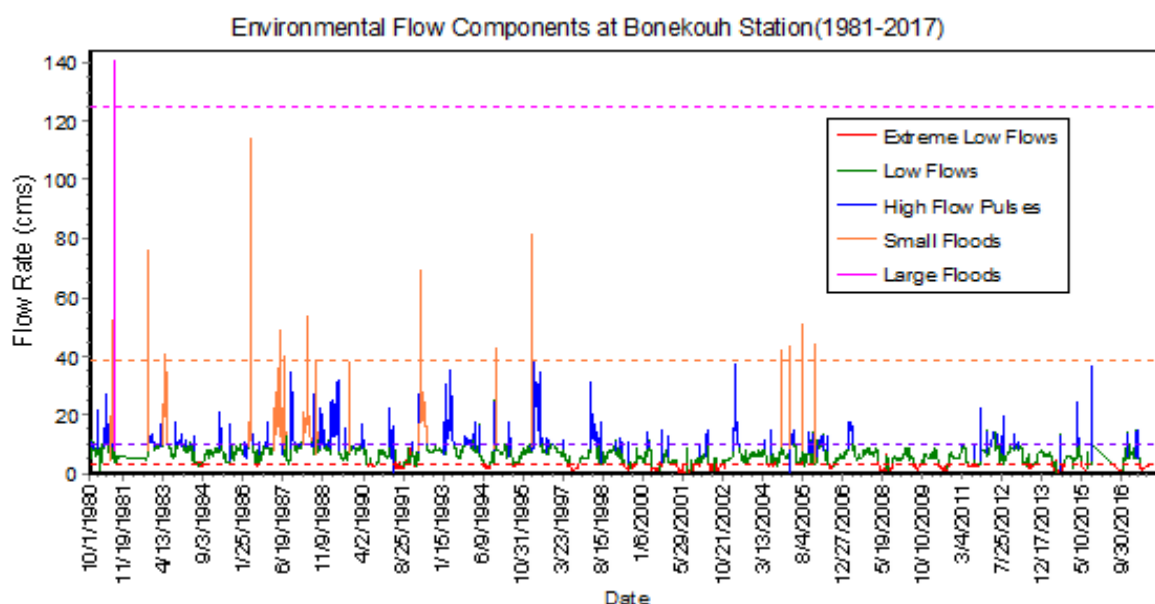


شکل ۶- شناسایی نقطه تغییر در سری دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری بنکوه با استفاده از آزمون دنباله من-کندال
 Figure 6- Detection of the change point for the annual discharge time series at the Bonekoh hydrometric station using the sequential Man-Kendall test

۳-۳- تغییرات شاخص‌های هیدرولوژیکی

برای تحلیل تغییرات هیدرولوژیکی حوضه حبله‌رود منتهی به ایستگاه هیدرومتری بنکوه از نرم‌افزار IHA استفاده شد. در شکل ۷ مؤلفه‌های جریان محیط زیستی در کل دوره آماری مورد بررسی در پنج شاخص جریان‌های فرین پائین، جریان‌های کم، پالس‌های جریان بالا، سیل‌های کوچک و سیل‌های بزرگ ارائه شده است. در حقیقت در این نمودار، سری داده‌های روزانه جریان دبی به پنج دسته جریان‌های حدی پائین، جریان‌های کم، پالس‌های جریان بالا، سیل‌های کوچک و سیل‌های بزرگ تقسیم می‌شوند. در این تقسیم‌بندی، ابتدا داده‌های روزانه دبی به دو دسته جریان‌های کم و پالس‌های جریان بالا تقسیم می‌شوند به طوری که اگر داده دبی هر روز بزرگ‌تر از ۷۵ درصد داده‌های کل دوره آماری باشد، به‌عنوان پالس جریان بالا محسوب می‌شود و سایر داده‌ها جریان کم تلقی می‌شوند. اگر دوره بازگشت دبی اوج یک پالس جریان بالا بیش از دو سال باشد، سیل کوچک

محسوب می‌شود و اگر بیش از ۱۰ سال باشد، سیل بزرگ محسوب می‌شود. آن بخش از داده‌های جریان کم که کوچک‌تر از ۱۰ درصد داده‌های کل دوره آماری باشند، جزو جریان‌های حدی پائین طبقه‌بندی می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود در اوایل دوره آماری فراوانی پالس‌های جریان بالا و سیل‌های کوچک زیاد است، اما هر چه به سمت انتهای دوره پیش می‌رود فراوانی آن‌ها به‌ویژه فراوانی سیل‌ها کم‌تر می‌شود. برعکس، فراوانی جریان‌های پائین و حدی بسیار کم پائین افزایش می‌یابد. بنابراین، جوامع گیاهی و جانوری رودکناری که در سیلاب‌دشت‌های رودخانه‌ها زندگی می‌کنند دچار تنش و تهدید می‌شوند. از سوی دیگر با از بین رفتن این جوامع رودکناری، شرایط هیدرولیکی سیلاب‌دشت‌ها تغییر یافته و آسیب‌پذیری بوم‌سازگان رودخانه و تأسیسات زیربنایی اطراف رودخانه در برابر سیلاب‌های محتمل نیز افزایش خواهد یافت.



شکل ۷- مؤلفه‌های جریان محیط زیستی ایستگاه هیدرومتری بنکوه

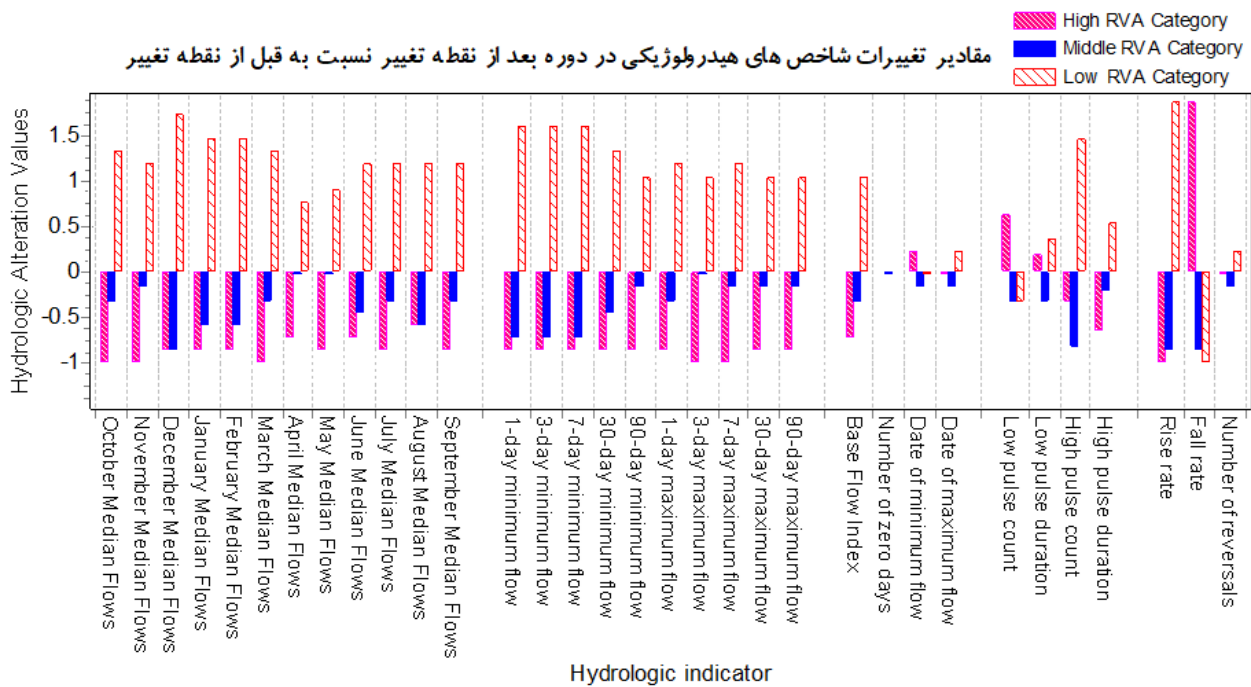
Figure 7- Environmental flow components at the Bonekoh hydrometric station

فقط برای تعداد پالس‌های جریان پائین و نرخ متوسط تغییرات منفی در دبی روزهای متوالی (کاهش معنادار دبی از روزی به روز دیگر یا نرخ تغییرات در شاخه‌های نزولی هیدروگراف)، فراوانی دسته پائین RVA کاهش یافته است که باز هم نشان‌دهنده کاهش دبی جریان رودخانه است. افزایش فراوانی نرخ تغییرات منفی در دسته بالای RVA نشان‌دهنده این است که شیب شاخه نزولی هیدروگراف سیلاب‌ها افزایش یافته است و جریان‌های سیلابی سریع‌تر فروکش می‌نمایند.

در شکل ۸ تصویر کلی تغییرات تمام شاخص‌های هیدرولوژیکی (۳۳ شاخص) در دوره بعد از تغییر نسبت به دوره قبل از تغییر خلاصه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای اکثر شاخص‌های هیدرولوژیکی فراوانی دسته پائین RVA افزایش یافته است و برای دسته بالا و وسط RVA فراوانی‌ها کاهش یافته است. این بدان معناست که فراوانی مقادیر پائین این شاخص‌ها در دوره بعد از تغییر نسبت به دوره قبل از تغییر افزایش یافته است. این کاهش‌ها نه تنها برای مقادیر حدی بالا اتفاق افتاده است، بلکه برای مقادیر حدی پائین هم کاهش یافته است.

دامنه تغییرپذیری میانه دبی ماه‌های نظیر در دوره قبل از تغییر هم نمی‌رسد. میزان کاهش دبی برای ماه‌های فصل بهار که معمولاً پرآب‌ترین ماه‌های سال هستند شدیدتر است. یکی از دلایل احتمالی کاهش شدید دبی در این ماه‌های سال کاهش نزولات برفی در منطقه به دلیل پدیده گرمایش جهانی و افزایش معنادار دمای حوزه آبخیز است. به طور کلی مقدار دبی متوسط سالانه حوضه در محل ایستگاه بنکوه از $۸/۴۲$ مترمکعب در ثانیه در دوره قبل از نقطه تغییر به $۵/۴۷$ مترمکعب بر ثانیه در دوره بعد از نقطه تغییر کاهش یافته که معادل ۳۵ درصد کاهش آبدی حوضه است. با توجه به بررسی تحقیقات مرتبط مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج تحقیقات Khosravi et al. (2019)، Wang et al. (2019)، Su et al. (2018)، Khiavi et al. (2020)، Liu et al. (2021) و Xu et al. (2022) که روند دبی را کاهشی نشان داده‌اند و اکثراً این کاهش را به مداخلات انسانی نسبت داده‌اند، هم‌سو است.

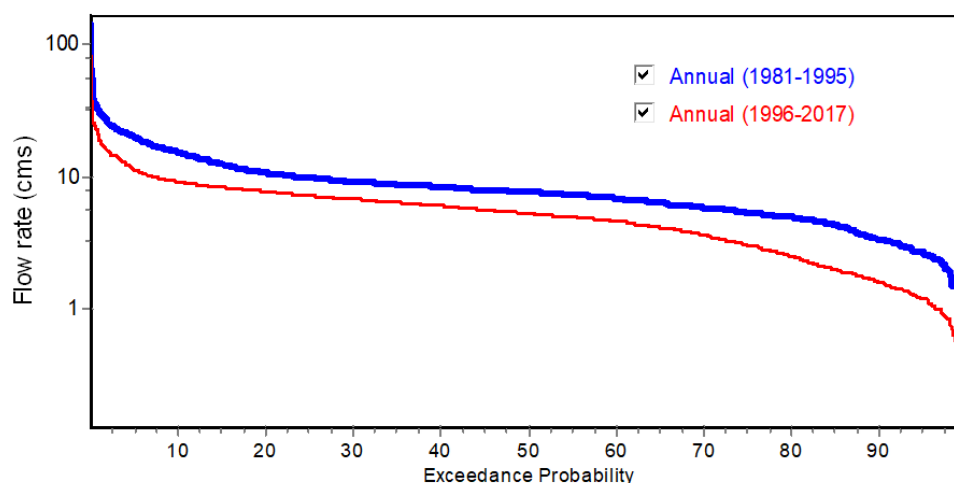
در شکل ۹ منحنی‌های تداوم جریان دبی در ایستگاه هیدرومتری بنکوه برای دو دوره قبل و بعد از سال ۱۹۹۵ (نقطه تغییر) ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود میزان دبی حوضه حبله‌رود بعد از سال ۱۹۹۵ برای تمام سطوح احتمال تجاوز به شدت کاهش یافته است. این در حالی است که بارندگی سالانه میانگین حوضه در طول دوره آماری مورد مطالعه روند کاهشی را نشان نمی‌دهد. بنابراین، کاهش دبی حوضه حبله‌رود بیش‌تر تحت تأثیر رویکرد مدیریت و بهره‌برداری گذشته و کنونی بوده است و در صورت ادامه وضع موجود در مدیریت منابع آب، این حوضه با چالش‌های جدی مرتبط با کمبود و تنش آب روبه‌رو خواهد شد. در شکل ۱۰ نیز دبی متوسط ماهانه ایستگاه هیدرومتری بنکوه در دوره قبل و بعد از تغییر ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در دوره بعد از تغییر (۲۰۱۷-۱۹۹۶) در همه ماه‌های سال دبی متوسط ماهانه در محل ایستگاه هیدرومتری بنکوه کاهش یافته است. میزان کاهش دبی ماهانه در دوره بعد از تغییر به حدی شدید است که مقادیر میانه دبی تمام ماه‌های سال در دوره بعد از تغییر به مرز پائینی



شکل ۸- نتایج تحلیل رویکرد RVA برای ایستگاه هیدرومتری بنکوه

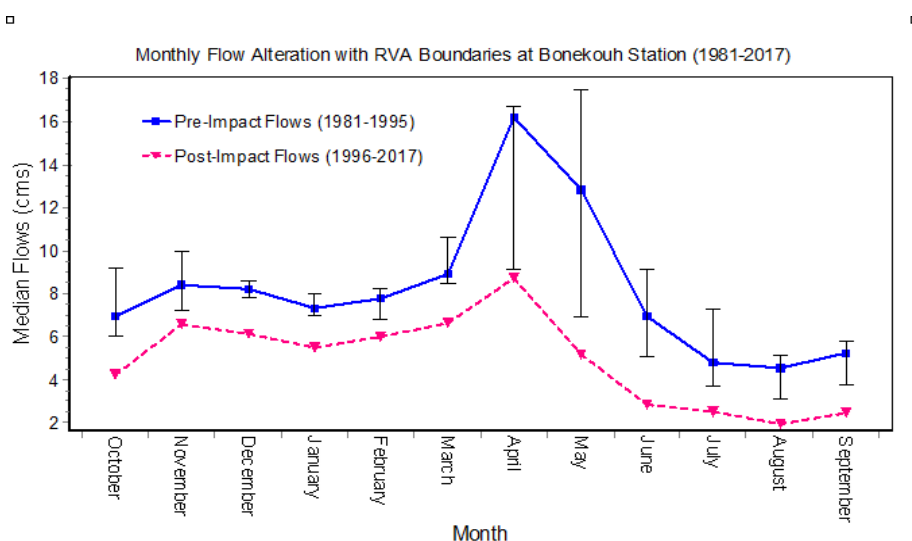
Figure 8- The RVA approach results for the Bonekoh hydrometric station

مقایسه منحنی های تداوم جریان در دوره های قبل و بعد از تغییرات در ایستگاه هیدرومتری بنکوه



شکل ۹- مقایسه منحنی های تداوم جریان ایستگاه هیدرومتری بنکوه در دو دوره قبل و بعد از تغییرات

Figure 9-Comparison of the flow duration curves for the pre-impact and post-impact periods at the Bonekoh hydrometric station



شکل ۱۰- دبی متوسط ماهانه ایستگاه هیدرومتری بنکوه در دوره قبل و بعد از تغییر

Figure 10- Monthly median discharge at the Bonekoh hydrometric station during the pre-impact and post-impact periods

هیدرومتری بنکوه در اواسط دهه ۱۹۹۰ رژیم هیدرولوژیکی حوضه به حد معناداری تغییر پیدا کرده است. سپس با استفاده از نرم‌افزار ویژه نسبت به تحلیل شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی و شاخص‌های کلیدی جریان محیط زیستی در دوره‌های قبل و بعد از نقطه تغییر اقدام شد. متأسفانه اکثر شاخص‌های هیدرولوژیکی بیان‌گر روند تنزیل در وضعیت جریان رودخانه حبلرود هستند. به طوری که متوسط دبی در تمام ماه‌های سال کاهش یافته است. مقادیر جریان پایه کاهش یافته است. هم فراوانی و هم طول دوره پالس‌های جریان کمینه افزایش یافته است. برعکس، هم فراوانی و هم طول دوره پالس‌های جریان بیشینه کاهش یافته است. به همین دلیل فراوانی و بزرگی وقایع حدی بالا مثل سیل‌های متوسط و بزرگ کاهش یافته است.

روند تغییرات ۳۳ شاخص تغییرات هیدرولوژیکی نیز با استفاده از نرم‌افزار IHA و به روش رگرسیون خطی بررسی شده است که نتایج آن در جدول ۴ خلاصه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای بیش از ۸۰ درصد شاخص‌های IHA روند تغییرات در طول دوره مورد بررسی از نظر آماری در سطح اعتماد ۹۵ درصد و بالاتر معنادار است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، ابتدا آمار طولانی‌مدت ایستگاه هیدرومتری بنکوه واقع در خروجی حوزه آبخیز حبلرود جمع‌آوری و مورد پردازش اولیه قرار گرفت. سپس با استفاده از روش‌های آماری، نقطه تغییر معنادار در سری دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری بنکوه شناسایی شد. در ایستگاه

جدول ۴- نتایج آزمون روند شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی در ایستگاه هیدرومتری بنکوه

Table 4- The results of the trend test for the hydrologic alteration indicators at the Bonekoh hydrometric station

P_value	معداری	جهت روند	ضریب همبستگی (R ²)	شیب (نرخ تغییرات در سال)	عنوان شاخص
0.005	معدنار	نزولی	0.229	-0.117	دبی اکتبر
0.005	معدنار	نزولی	0.217	-0.089	دبی نوامبر
0.005	معدنار	نزولی	0.204	-0.067	دبی دسامبر
0.010	معدنار	نزولی	0.192	-0.059	دبی ژانویه
0.010	معدنار	نزولی	0.179	-0.055	دبی فوریه
0.005	معدنار	نزولی	0.208	-0.116	دبی مارس
0.010	معدنار	نزولی	0.191	-0.234	دبی آوریل
0.010	معدنار	نزولی	0.186	-0.267	دبی مه
0.010	معدنار	نزولی	0.183	-0.138	دبی ژوئن
0.005	معدنار	نزولی	0.242	-0.114	دبی ژوئیه
0.010	معدنار	نزولی	0.177	-0.075	دبی اوت
0.001	معدنار	نزولی	0.320	-0.100	دبی سپتامبر
0.001	معدنار	نزولی	0.306	-0.077	دبی حداقل ۱ روزه
0.001	معدنار	نزولی	0.374	-0.083	دبی حداقل ۳ روزه
0.001	معدنار	نزولی	0.370	-0.084	دبی حداقل ۷ روزه
0.001	معدنار	نزولی	0.336	-0.090	دبی حداقل ۳۰ روزه
0.001	معدنار	نزولی	0.319	-0.107	دبی حداقل ۹۰ روزه
0.005	معدنار	نزولی	0.223	-1.275	دبی حداکثر ۱ روزه
0.001	معدنار	نزولی	0.264	-0.704	دبی حداکثر ۳ روزه
0.001	معدنار	نزولی	0.274	-0.493	دبی حداکثر ۷ روزه
0.001	معدنار	نزولی	0.283	-0.338	دبی حداکثر ۳۰ روزه
0.001	معدنار	نزولی	0.268	-0.224	دبی حداکثر ۹۰ روزه
0.500		صعودی	0.009	0.001	تعداد روزهای جریان صفر
0.005	معدنار	نزولی	0.247	-0.006	شاخص دبی پایه
0.500		صعودی	0.006	0.399	تاریخ وقوع حداقل جریان سالانه
0.500		صعودی	0.001	0.293	تاریخ وقوع حداکثر جریان سالانه
0.500		صعودی	0.012	0.028	تعداد پالس‌های جریان کمینه
0.025	معدنار	صعودی	0.184	1.603	مدت تداوم پالس‌های جریان کمینه
0.010	معدنار	نزولی	0.196	-0.172	تعداد پالس‌های جریان بیشینه
0.500		صعودی	0.018	0.106	مدت تداوم پالس‌های جریان بیشینه
0.001	معدنار	نزولی	0.470	-0.014	نرخ تغییرات مثبت در دبی روزهای متوالی
0.001	معدنار	صعودی	0.374	0.014	نرخ تغییرات منفی در دبی روزهای متوالی
0.250		نزولی	0.055	-0.695	تعداد برگشت‌های متوالی

متعددی در آینده روبه‌رو خواهند شد. با توجه به این که بارندگی سالانه متوسط حوضه حبله‌رود روند کاهشی را نشان نمی‌دهد، به نظر می‌رسد مداخلات انسانی از عوامل اصلی تاثیرگذار بر تغییرات هیدرولوژیکی این حوضه است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود تمرکز اصلی سیاست‌ها و اقدامات مدیریتی، بر مدیریت و بهینه‌سازی مداخلات انسانی در حوزه آبخیز حبله‌رود متمرکز شود. به عبارتی به جای تمرکز بر رویکرد مدیریتی بالا به پائین و اقدامات مهندسی سازه‌ای (سخت)، بر رویکرد مدیریتی مشارکتی و اقدامات مهندسی مدیریتی (نرم) تمرکز صورت گیرد و از منابع آب و خاک این حوضه به صورت بهینه و مطابق اصول توسعه پایدار بهره‌برداری شود تا ضمن کاهش تعارضات بین ذینفعان و ذیمدخلان بالادست و پائین‌دست حوزه آبخیز (چالش‌ها و تهدیدات اجتماعی) که در حال حاضر در مقیاس بزرگ‌تر بین دو استان تهران و سمنان بروز کرده است و همچنین جلوگیری از بروز این تعارضات در

نتایج تحلیل روند شاخص‌های متعدد جریان محیط زیستی نیز بیان گر سیر قهقرایی در شرایط اکوهیدرولوژی حوزه آبخیز حبله‌رود است. به طوری که جریان‌های حداقل ماهانه برای تمام ماه‌های سال روند نزولی را نشان می‌دهد. از یک سو تداوم و فراوانی دوره‌های کم آبی افزایش و از سوی دیگر فراوانی پالس‌های جریان بالا کاهش یافته است. پیامد این تغییرات، ایجاد تنش و تهدید جوامع گیاهی و جانوری رودکناری خواهد بود که در سیلاب‌دشت‌های رودخانه‌ها زندگی می‌کنند و خدمات بوم‌سازگانی متعددی را فراهم می‌کنند. از سوی دیگر با از بین رفتن این جوامع رودکناری، شرایط هیدرولیکی سیلاب‌دشت‌ها تغییر یافته و آسیب‌پذیری بوم‌سازگان رودخانه و تاسیسات زیربنایی اطراف رودخانه در برابر سیلاب‌های محتمل افزایش می‌یابد و خسارت‌های زیادی را تحمیل می‌کند. با ادامه روند وضع موجود مدیریت منابع آب حوضه، ذیمدخلان و ذینفعان حوضه با چالش‌های

سپاسگزاری

این تحقیق در قالب رساله دکتری و طرح پژوهشی با حمایت شرکت آب منطقه‌ای تهران صورت گرفته است. نویسندگان از شرکت آب منطقه‌ای تهران و معاونت پژوهشی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که موجبات تسهیل انجام این تحقیق را فراهم نموده‌اند تشکر می‌نمایند.

مقیاس کوچک‌تر بین جوامع کوچک‌تر بالادست و پائین‌دست در امتداد آبراهه‌ها و رودخانه‌های حوضه، از وقوع و گسترش چالش‌ها و تهدیدات محیط زیستی متنوع و آسیب‌پذیری در برابر خطرات طبیعی مثل سیل‌های ناگهانی و خشکسالی‌ها جلوگیری کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود تغییرات آبی حوضه آبخیز مورد مطالعه با توجه به نتایج مدل‌های تغییرات اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی پیش‌بینی شده و در جهت مقابله و یا سازگاری با این تغییرات راه‌کارهای مناسب تدوین و اجرا شود.

منابع

- کردن آبخیز حبله‌رود. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۲(۴)، ۲-۱۸.
doi:10.22092/wmej.2019.125497.1194
- عسگری، ابراهیم، مصطفی‌زاده، رئوف، و حاجی، خدیجه (۱۳۹۸). تحلیل نقاط تغییر در سری زمانی دبی برخی ایستگاه‌های هیدرومتری استان گلستان. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۳۱(۵)، ۸۱-۹۳. doi:10.22034/jest.2018.21474.3049
- کاظم‌زاده، مجید (۱۳۹۴). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه، مطالعه موردی: حوضه آبخیز آچی‌چای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه تهران، ۱۷۷ صفحه.
- نادری، محمدحسن، ذاکری‌نیا، مهدی، و سالاری جزی، میثم (۱۳۹۸). بررسی تأثیر شاخص‌های اکوهیدرولیکی در تحلیل رژیم جریان زیست‌محیطی و شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه با کاربرد River2D با تکیه بر باز زنده‌سازی بوم‌شناختی رودخانه زرین گل. اکوهیدرولوژی، ۶(۱)، ۲۰۵-۲۲۲. doi:10.22059/ije.2019.266895.962
- نصیری خیابوی، علی، مصطفی‌زاده، رئوف، اسمعیل‌عوری، اباذر، غفارزاده، امید، و گلشن، محمد (۱۳۹۸). تغییر شاخص‌های هیدرولوژیکی جریان رودخانه بالخلوچای ناشی از تأثیر ترکیبی تغییر مؤلفه‌های اقلیمی و احداث سد یامچی اردبیل با استفاده از رویکرد دامنه تغییرپذیری. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۱۱(۴)، ۸۵-۸۶. doi:10.22092/ijwms.2018.116873.1413
- اسفندیاری درآباد، فریبا، مصطفی‌زاده، رئوف، شاهمرادی، رضا، و نصیری خیابوی، علی (۱۳۹۸). تحلیل تغییرات شاخص‌های هیدرولوژیکی جریان تحت تأثیر احداث سد در رودخانه‌های زربنه‌رود و ساروق چای (استان آذربایجان غربی). هیدروژئومورفولوژی، ۱۸(۵)، ۵۷-۷۷. doi:10.1001.1.23833254.1398.6.18.4.3
- خسروی، غلامرضا، سعدالدین، امیر، اونق، مجید، بهره‌مند، عبدالرضا، و مصطفوی، حسین (۱۳۹۸). طبقه‌بندی و تعیین تغییرات رژیم جریان آب رودخانه‌ای با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی IHA (مطالعه موردی: رودخانه خرمارود-استان گلستان). اکوهیدرولوژی، ۶(۳)، ۶۵۱-۶۷۱. doi:10.22059/ije.2019.269287.982
- شیخ، واحد بردی، بابایی، اکبر، و موشاخیان، یوسف (۱۳۸۸). بررسی روند تغییرات رژیم بارش حوضه آبریز گرگانرود. علوم و مهندسی آبخیزداری/ایران، ۳(۸)، ۲۹-۳۸.
- شیخ، واحد بردی، حزبی، عبدالجلیل، و بهره‌مند، عبدالرضا (۱۳۹۴). مدل‌سازی توزیعی و دینامیک بیلان آب حوضه آبخیز چهل‌چای در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی. پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، ۱۲، ۲۹-۴۲.
- شیخ، واحد بردی، زارع گاریزی، آرش، الوندی، احسان، اسدی نلیوان، امید، خسروی، غلامرضا، سعدالدین، امیر، و اونق، مجید (۱۳۹۸). مکان‌یابی مشارکتی راهکارهای پیشنهادشده برای مدیریت

to detect potential abrupt change. *Jurnal Teknologi*, 79(5). doi:10.11113/jt.v79.10388

Asgari, E., Mostafazadeh, R., & Haji, K. (2019). Change point analysis of discharge time series in some hydrometric stations in Golestan Province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(5), 81-93. doi:10.22034/jest.2018.21474.3049 [In Persian]

Beaulieu, C., Chen, J., & Sarmiento, J.L. (2012). Change-point analysis as a tool to detect abrupt climate variations. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1962), 1228-1249. doi:10.1098/rsta.2011.0383

References

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*, 6(6), 661-675. doi:10.1002/joc.3370060607
- Alexandersson, H., & Moberg, A. (1997). Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology*, 17(1), 25-34. doi:10.1002/(SICI)1097-0088(199701)17:1<25::AID-JOC103>3.0.CO;2-J
- Arif, S.N.A.M., Mohsin, M.F.M., Bakar, A.A., Hamdan, A.R., & Abdullah, S.M.S. (2017). Change point analysis: a statistical approach

- Chapman, D. (1996). *Water quality assessments - a guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Second Edition, Great Britain at the University Press, Cambridge, 609 pages.
- Chauluka, F., Singh, S., & Kumar, R. (2021). Rainfall and streamflow trends of Thuchila River, Southern Malawi. *Materials Today: Proceedings*, 34, 846-855. doi:10.1016/j.matpr.2020.06.228
- Croitoru, A.E., Drignei, D., Holobaca, I.H., & Dragota, C.S. (2012). Change-point analysis for serially correlated summit temperatures in the Romanian Carpathians. *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1), 9-18. doi:10.1007/s00704-011-0508-7
- Dingman, S. L. (2002). *Water in soils: infiltration and redistribution*. In: Physical Hydrology (Second ed.), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Esfandyari Darabad, F., Mostafazadeh, R., Shahmoradi, R., & Nasiri Khiavi, A. (2019). The Analysis of the changes of the hydrological flow indices affected by dam construction in Zarrinehrood and Saruqchai Rivers of West Azerbaijan Province. *Hydrogeomorphology*, 5(18), 57-77. doi:10.1001.1.23833254.1398.6.18.4.3 [In Persian]
- Fang Sang, Y., Wang, Z., & Liu, C. (2014). Comparison of the MK test and EMD method for trend identification in hydrological time Series. *Journal of Hydrology*, 510, 293-298. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.12.039
- Fantin-Cruz, I., Pedrollo, O., Girard, P., Zeilhofer, P., & Hamilton, S.K. (2015). Effects of a diversion hydropower facility on the hydrological regime of the Correntes River, a tributary to the Pantanal floodplain, Brazil. *Journal of Hydrology*, 531, 810-820. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.10.045
- Fernández, J.A., Martínez, C., & Magdaleno, F. (2012). Application of indicators of hydrologic alterations in the designation of heavily modified water bodies in Spain. *Environmental Science & Policy*, 16, 31-43. doi:10.1016/j.envsci.2011.10.004
- Gao, P., Mu, X.M., Wang, F., & Li, R. (2011). Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1-10. doi:10.5194/hess-15-1-2011, 2011
- Hamed, K.H. (2007). Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 349(3-4), 350-363. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.009
- Huo, Z., Feng, S., Kang, S., Li, W., & Chen, S. (2008). Effect of climate changes and water-related human activities on annual stream flows of the Shiyang river basin in arid north-west China. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(16), 3155-3167. doi:10.1002/hyp.6900
- IPCC, (2007). Fourth assessment report climate change. Paris. *Journal of the American Statistical Association*, 74, 365-367.
- Kazemzadeh, M. (2015). Evaluation of climate change impacts on the hydrological characteristics of watershed, case study: Aji chai Watershed. M.Sc. Thesis, University of Tehran, 177 pages. [In Persian]
- Kendall, M.G. (1948). *Rank correlation methods*. 4th Edition, Griffin, London.
- Khapalova, E.A., Jandhyala, V.K., & Fotopoulos, S.B. (2013). Change-point analysis of annual mean precipitation for northern tropical and southern latitudes of the globe in the past century. *Journal of Environmental Statistics*, 4(3), 1-21.
- Khosravi, G., Sadodin, A., Ownegh, M., Bahremand, A., & Mostafavi, H. (2019). Classification and identification of changes in river flow regime using the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) Case study: (The Khormarud River-Tilabad Watershed-Golestan Province). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(3), 651-671. doi:10.22059/ije.2019.269287.982 [In Persian]
- Killick, R., Eckley, I.A., Ewans, K., & Jonathan, P. (2010). Detection of changes in variance of oceanographic time-series using changepoint analysis. *Ocean Engineering*, 37(13), 1120-1126. doi:10.1016/j.oceaneng.2010.04.009
- Liu, W., Shi, C., & Zhou, Y. (2021). Trends and attribution of runoff changes in the upper and middle reaches of the Yellow River in China. *Journal of Hydro-environment Research*, 37, 57-66. doi:10.1016/j.jher.2021.05.002
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259. doi:10.2307/1907187
- Mo, K., Guerrero, P., Yi, L., Su, H., Wonka, P., Mitra, N., & Guibas, L.J. (2019). Structurynet: Hierarchical graph networks for 3d shape generation. arXiv preprint arXiv:1908.00575. doi:10.48550/arXiv.1908.00575
- Mwedzi, T., Katiyo, L., Mugabe, F.T., Bere, T., Bangira, C., Mangadze, T., & Kupika, O.L. (2016). A spatial assessment of stream-flow characteristics and hydrologic alterations, post dam construction in the Manyame catchment, Zimbabwe. *Water SA*, 42(2), 194-202. doi:10.4314/wsa.v42i2.03
- Naderi, M.H., Zakerinia, M., & Salarijazi, M. (2019). Investigation of ecohydraulic indices in environmental flow regime and Habitat

- suitability simulation analysis using River2D Model with relying on the restoration ecological in zarrin-gol river. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(1), 205-222. doi:10.22059/ije.2019.266895.962 [In Persian]
- Nasiri Khiavi, A., Mostafazadeh, R., Esmali Ouri, A., Ghafarzadeh, O., & Golshan, M. (2019). Alteration of hydrologic flow indicators in Ardabil Balikhouchai River under combined effects of change in climatic variables and Yamchi Dam construction using Range of Variability Approach. *Watershed Engineering and Management*, 11(4), 851-865. doi:10.22092/ijwmse.2018.116873.1413 [In Persian]
- Papadaki, C., Soulis, K., Muñoz-Mas, R., Martinez-Capel, F., Zogaris, S., Ntoanidis, L., & Dimitriou, E. (2016). Potential impacts of climate change on flow regime and fish habitat in mountain rivers of the south-western Balkans. *Science of the Total Environment*, 540, 418-428. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.06.134
- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change - point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135. doi:10.2307/2346729
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J., & Braun, D.P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163-1174.
- Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., & Braun, D. (1997). How much water does a river need?. *Freshwater Biology*, 37(1), 231-249. doi:10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x
- Salehi, S., Dehghani, M., Mortazavi, S.M., & Singh, V.P. (2020). Trend analysis and change point detection of seasonal and annual precipitation in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(1), 308-323. doi:10.1002/joc.6211
- Sheikh, V., Babaei, A., & Mooshakhian, Y. (2009). Trend analysis of precipitation regime in the Gorganroud basin. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 3(8), 29-38. [In Persian]
- Sheikh, V., Hezbi, A.J., & Bahremand, A.R. (2014). Distributed and dynamic modeling of the water balance of ChelChai watershed in the geographic information system environment. *Watershed Management Research*, 12, 29-42. [In Persian]
- Sheikh, V., Zare Garizi, A., Alvandi, E., Asadi Nelivan, O., Khosravi, G., Saaduddin, A., & Ong, M. (2018). Collaborative location of proposed solutions to manage the Hablehroud watershed. *Watershed Research*, 32(4), 2-18. doi:10.22092/wmej.2019.125497.1194 [In Persian]
- Shirvani, A. (2017). Change point detection of the Persian Gulf sea surface temperature. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(1), 123-127. doi:10.1007/s00704-015-1625-5
- Sneyres, R. (1990). Technical note no. 143 on the statistical Analysis of Time Series of Observation. World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland.
- Su, L., Miao, C., Kong, D., Duan, Q., Lei, X., Hou, Q., & Li, H. (2018). Long-term trends in global river flow and the causal relationships between river flow and ocean signals. *Journal of Hydrology*, 563, 818-833. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.06.058
- Wang, S., McVicar, T.R., Zhang, Z., Brunner, T., & Strauss, P. (2020). Globally partitioning the simultaneous impacts of climate-induced and human-induced changes on catchment streamflow: A review and meta-analysis. *Journal of Hydrology*, 590, 125387. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125387
- Wei, X., & Zhang, M. (2010). Quantifying streamflow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: A single watershed study. *Water Resources Research*, 46(12). doi:10.1029/2010WR009250
- Wong, H., Hu, B.Q., Ip, W.C., & Xia, J. (2006). Change-point analysis of hydrological time series using grey relational method. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 323-338. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.10.007
- Xiong, L., & Guo, S. (2004). Trend test and change-point detection for the annual discharge series of the Yangtze River at the Yichang hydrological station/Test de tendance et détection de rupture appliqués aux séries de débit annuel du fleuve Yangtze à la station hydrologique de Yichang. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 99-112. doi:10.1623/hysj.49.1.99.53998
- Xu, M., Wang, G., Wang, Z., Hu, H., Singh, D.K., & Tian, S. (2022). Temporal and spatial hydrological variations of the Yellow River in the past 60 years. *Journal of Hydrology*, 609, 127750. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.127750
- Yang, T., Zhang, Q., Chen, Y.D., Tao, X., Xu, C. Y., & Chen, X. (2008). A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(18), 3829-3843. doi:10.1002/hyp.6993