

Research Paper



Temporal analysis of river flow health index of the Shahrchai river under the dam regulating effect



Raof Mostafazadeh^{1*}, Mostafa Zabihi Silabi², Mohammad Kazemi³

1. Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and natural Resources, and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. raoofmostafazadeh@yahoo.com
2. Ph. D student in Watershed Management Sciences & Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. mostafazabihi1373@gmail.com
3. Associate Professor, Department of Hormoz Studies and Research Center, University of Hormozgan, Iran. mohamad.kazemi86@gmail.com

Keywords

River flow regime, Flow alteration, Hydrological health, Hydrological index, Urmia Shahrchai dam.

Receive: 2024/01/27

Accept: 2024/03/12

Available: 2024/07/14

ABSTRACT

The increasing human needs and changes in climate patterns have led to the construction of water storage structures to meet the water demand in many regions worldwide, including Iran. Consequently, the hydrological regimes of rivers in various parts of Iran, due to human activities such as dam construction, have undergone alterations in recent decades. Understanding the effects of dams on river hydrological regimes is essential for river flow management and the preservation of river ecosystems. In this regard, the present study assesses the changes in the health of the Urmia's Shahrchai River flow during three periods: pre-dam construction, dam construction, and dam operation, from 1951 to 2017, through calculating different flow health related indices. The results indicate that the deviation of all hydrological health sub-indices in the post-dam construction period is higher than the pre-dam construction period. Moreover, the deviation of flow regime sub-indicators was predominantly low to moderate until 1998 and varied from low to very high after 1998. Additionally, the highest deviation of studied flow health-related indices occurred during the reference and dam operation periods for flood occurrence and minimum monthly flow, respectively, while during the dam construction period, it pertained to minimum monthly flow. Furthermore, the findings suggest that the hydrologic health of Shahrchai River flow decreased by approximately 16% and 45% during the dam construction/operation periods, respectively, compared to the reference period. The results of this study can be utilized in the understanding of flow alteration and the sustainable regulation of the Shahrchai River flow regime.

* Corresponding Author: Raof Mostafazadeh
 E-mail: Raofmostafazadeh@uma.ac.ir
 How cite to this article: Mostafazadeh, Raof; Zabihi Silabi, Mostafa; Kazemi, Mohammad. (2024). Temporal analysis of river flow health index of the Shahrchai river under the dam regulating effect. *Hydrogeomorphology*, 11(39): 101 – 121.
[DOI:10.22034/HYD.2024.60280.1726](https://doi.org/10.22034/HYD.2024.60280.1726)



Introduction

The increase in population and changes in climate patterns have led to the construction of water storage structures to meet the water demand in many regions worldwide, including Iran. Consequently, the hydrological regimes of rivers in various parts of Iran, due to human activities such as dam construction, have undergone alterations in recent decades. Understanding the effects of dams on river hydrological regimes is essential for river flow management and the preservation of river ecosystems. The natural regime of river flow plays a fundamental role in determining the structure and function of aquatic and riparian ecosystems, and contributes to the stability of river channel habitats and floodplains. Changes in river flow regime not only alter river habitat conditions but also affect the connectivity of different ecosystem components. These changes have negative impacts on the hydrological and ecological services of the watershed, increasing the vulnerability of stakeholders and users downstream. Therefore, in recent decades, multiple indicators have been developed to assess the effects of human activities on changes in river flow regime and their role in altering river ecology conditions. Evaluating river health can be used to estimate environmental flow and quantify the amount, timing, and quality of water flow needed for the sustainability of river ecosystem, contributing to the revival, protection, and optimal utilization of water resources.

Methodology

The present study assesses the changes in the health of the Urmia's Shahrchai River flow during three periods: pre-dam construction, dam construction, and dam operation, from 1951 to 2017, through calculating different flow health related indices. The Shahar Chay Dam in Urmia is an earth-rockfill dam with a clay core, standing at a height of 84 meters above the riverbed, with a crest length of 550 meters, constructed on the Shahar Chay River. The reservoir capacity of Shahar Chay Dam exceeds 221 million cubic meters up to the normal level, with the Shahar Chay River being its main water source. The primary purpose of constructing the Shahar Chay Dam is to supply water for drinking and agricultural needs. In this study, temporal changes in the Flow Health index of the stream were calculated. The hydrological stream health score in the research is computed based on variations in various criteria extracted from flow characteristics and monthly discharge. These criteria include average monthly flow, maximum and minimum flows, temporal variations in minimum and maximum flows, frequency, predictability of high and low flows, events, intensity, and frequency of flow volume changes.

Results and Discussion

The results indicate that the deviation of all hydrological sub-indices (high flow, low flow, persistency and seasonality) in the post-dam construction period is higher than the pre-dam construction period. Moreover, the deviation of the studied indices from natural flow regime was predominantly low to moderate until 1998 and varied from low to very high after 1998. Additionally, the highest deviation in the studied hydrological indices occurred during the reference and dam operation periods for flood occurrence and minimum monthly flow, respectively, while during the dam construction period, it pertained to minimum monthly flow. Furthermore, the findings suggest that the health of Shahrchai River flow decreased by approximately 16% and 45% during the dam construction and operation periods, respectively, compared to the reference period.

Conclusions

The values of maximum flow volume index, maximum monthly flow, duration of minimum flows, seasonal flow variations, and the occurrence of post-dam flood flows have deviated in all the years following the dam's construction. Evaluating the hydrological changes in rivers flowing into Lake Urmia is recommended to identify the extent of alterations in hydrological characteristics resulting from dam construction, land use changes, and climatic factors. Furthermore, it is suggested that in future research, along with assessing the trend of changes in climatic variables, the contribution of human and climatic factors to the alterations in

hydrological health and related indices in the Shahar Chay River should be investigated. The results of this study can be utilized in the understanding of river flow alteration and the sustainable regulation of the Urmia's Shahrchai River flow regime.

مقاله پژوهشی



تحلیل تغییرات شاخص سلامت هیدرولوژیک جریان رودخانه شهرچای تحت تأثیر تنظیمی سد



رئوف مصطفی زاده^{۱*}، مصطفی ذبیحی سیلابی^۲، محمد کاظمی^۳

۱- دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. raoofmostafazadeh@uma.ac.ir
 ۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. mostafazabihi1373@gmail.com
 ۳- استادیار پژوهشکده هرمز، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران. mohamad.kazemi86@gmail.com

کلیدواژه‌ها

رژیم جریان رودخانه، تغییر جریان، سلامت هیدرولوژیک، شاخص هیدرولوژیک، سد شهرچای ارومیه.

چکیده

افزایش نیاز به آب و تغییر الگوهای اقلیمی باعث تشدید ساخت سازه‌های ذخیره آبی برای تأمین تقاضا در بسیاری از مناطق جهان شده است، لذا رژیم‌های هیدرولوژیکی رودخانه‌ها بر اثر فعالیت‌های انسانی و احداث سدها تغییر کرده‌اند. بر همین اساس درک اثرات سدها بر رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها به منظور مدیریت جریان رودخانه، تأمین نیاز آبی و حفظ ارزش‌های اکولوژیکی رودخانه ضروری است. در پژوهش حاضر، تغییرات سلامت هیدرولوژیک جریان رودخانه شهرچای ارومیه در سه دوره قبل از احداث سد، دوره ساخت سد و دوره بهره‌برداری از سد شهرچای در بازه زمانی ۱۹۵۱ الی ۲۰۱۷ ارزیابی شده است. نتایج پژوهش نشان داد میزان انحراف همه زیرشاخص‌های هیدرولوژیک در دوره بعد از احداث سد بیش‌تر از دوره قبل از احداث سد است. در همین راستا میزان انحراف زیرشاخص‌های سلامت هیدرولوژیک جریان از شرایط طبیعی تا سال ۱۹۹۸ غالباً در محدوده خیلی کم تا متوسط و از سال ۱۹۹۸ به بعد در محدوده خیلی کم تا خیلی زیاد بوده است. هم‌چنین، بر اساس نتایج، بیش‌ترین میزان انحراف در زیرشاخص‌ها در دوره‌های مرجع و بهره‌برداری از سد مربوط به شاخص وقوع جریان‌های سیلابی و در دوره ساخت سد مربوط به جریان حداقل ماهانه بود. هم‌چنین نتایج حاکی از آن بود که سلامت هیدرولوژیک جریان رودخانه شهرچای در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری از سد شهرچای به ترتیب در حدود ۱۶ و ۴۵ درصد در مقایسه با دوره مرجع کاهش داشته است. یافته‌های پژوهش حاضر می‌تواند در درک تغییرات رژیم تنظیمی جریان رودخانه، مدیریت و تنظیم پایدار رژیم جریان رودخانه شهرچای استفاده شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۲۴

* نویسنده مسئول: رئوف مصطفی زاده

رایانامه: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

ارجاع به این مقاله: مصطفی زاده، رئوف؛ ذبیحی سیلابی، مصطفی؛ کاظمی، محمد. (۱۴۰۳). تحلیل

تغییرات شاخص سلامت هیدرولوژیک جریان رودخانه شهرچای تحت تأثیر تنظیمی سد. هیدروژنومورفولوژی، ۱۱ (۳۹): ۱۰۱-۱۲۱.

DOI:10.22034/HYD.2024.60280.1726



Copyright: ©2024 by the authors.

Publisher: University of Tabriz

رژیم طبیعی جریان رودخانه، در تعیین ساختار و عملکرد بوم‌سازگان‌های آبی و حاشیه رودخانه‌ها نقش اساسی دارد و باعث پایداری زیستگاه درون کانال رودخانه و سیلاب‌دشت‌ها می‌شود (کاظمی و همکاران، ۲۰۲۳: ۲۶۴). در همین راستا تغییرات در رژیم جریان رودخانه‌ها علاوه بر تغییر بسیاری از شرایط زیستگاه رودخانه، پیوستگی بوم‌سازگان‌های مختلف آن را نیز دچار تغییر می‌کند (لیو و همکاران، ۲۰۲۱: ۵۸). از همین‌رو در دهه‌های گذشته در اغلب نقاط ایران، رژیم‌های هیدرولوژیکی رودخانه‌ها بر اثر دخالت‌های انسانی از جمله احداث سدها، انتقال آب بین‌حوضه‌ای و هم‌چنین به‌دلیل افزایش میزان بهره‌برداری از منابع آب برای مصارف مختلف تغییرات معنی‌داری داشته‌اند (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۷: ۶۵۸؛ امینی و همکاران، ۲۰۱۹: ۴۷۴؛ نصیری و همکاران، ۲۰۱۹: ۸۶). در همین راستا تغییر رژیم طبیعی رودخانه‌ها تأثیرات مثبت و منفی بر بوم‌سازگان‌های رودخانه‌ای دارد که در مقالات به خوبی مستند شده‌اند (ریشتر و همکاران، ۲۰۱۰: ۱۴؛ کوریکی و آردیشیلی‌اوغلو، ۲۰۱۸: ۱۴۶). برای مثال، ساخت یک سد می‌تواند اثرات مثبتی با کاهش سیلاب‌های بزرگ، ذخیره آب برای فصل خشک و کمک به تولید برق داشته باشد. در عین حال، احداث سد می‌تواند باعث کاهش جریان رودخانه در پایین‌دست شود، که این عامل اثرات شدیدی بر بوم‌سازگان‌های پایین‌دست رودخانه خواهد داشت (کوریکی و همکاران، ۲۰۱۷: ۱۴۶؛ علی و همکاران، ۲۰۱۹: ۵۱۷۷). از سوی دیگر تغییرات رژیم جریان، اثرات منفی بر خدمات هیدرولوژیکی و بوم‌شناختی حوزه آبخیز خواهند داشت که میزان آسیب‌پذیری ذی‌نفعان و بهره‌برداران در پایین‌دست را افزایش می‌دهند (خسروی و همکاران، ۱۳۹۸: ۶۵۲). از همین‌رو افزایش آسیب‌پذیری ذی‌نفعان در نتیجه تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از احداث سد و مشکلات محیط‌زیستی مرتبط با آن نگرانی‌های زیادی را برای هیدرولوژیست‌ها، بوم‌شناسان و مدیران منابع آب به‌وجود آورده است (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۵: ۷۱۲). بر همین اساس در دهه‌های اخیر برای ارزیابی اثرات فعالیت‌های انسانی بر تغییرات رژیم جریان رودخانه‌ای و نقش آن در تغییر شرایط بوم‌شناسی رودخانه‌ها بیش از ۱۷۰ شاخص هیدرولوژیکی تدوین و توسعه داده شده است که به ارزیابی مشخصات جریان رودخانه قبل و بعد از تغییرات حاصله می‌پردازند (پترز، ۲۰۰۹: ۱۰۷۲). اصطلاح سلامت رودخانه، که برای ارزیابی وضعیت رودخانه به کار می‌رود، به‌عنوان مشابه با سلامت انسان در نظر گرفته می‌شود که هنوز مبهم باقی مانده است. شناسایی جنبه‌های سلامت رودخانه از طریق مجموعه‌ای از شاخص‌های مرتبط با اکوسیستم هنوز خوب مطالعه نشده است و نیز ادغام ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی رودخانه‌ها در تعیین سلامت رودخانه نیازمند مطالعات بیش‌تری است (نوریس و تامز، ۱۹۹۹: ۱۹۸). در همین راستا در چند سال اخیر برای ارزیابی انحراف جریان رودخانه و طراحی یک رژیم جریان ماهانه محیطی برنامه‌ای تحت عنوان سلامت جریان توسعه داده شده است که هدف اصلی آن ارزیابی امتیاز سالانه سلامت هیدرولوژیک جریان است (سلاجقه و همکاران، ۲۰۲۱: ۳۶). ارزیابی سلامت رودخانه می‌تواند در برآورد جریان محیط‌زیستی و کمی کردن مقدار، زمان‌بندی و کیفیت جریان آب مورد نیاز در تداوم حیات بوم‌سازگان‌های رودخانه‌ای استفاده شود (هایز و همکاران، ۲۰۱۸: ۱۰۹۰). از سوی دیگر نتایج حاصل از ارزیابی سلامت رودخانه می‌تواند در احیاء، حفاظت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب کمک کننده باشد (اسفندیاری‌درآباد و همکاران، ۲۰۲۳: ۲۷۶). پژوهش‌های متعددی تغییرات رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها را با استفاده از روش‌های مختلف بررسی کرده‌اند. به‌عنوان مثال، Li و همکاران (۲۰۱۷: ۲۱۷) روند تغییرات هیدرولوژیکی جریان رودخانه مکونگ کشور ویتنام را تحت تأثیر سد ارزیابی کردند. ایشان دریافتند با احداث سد جریان در فصول مرطوب و خشک به‌ترتیب کاهش و افزایش یافته است. در پژوهشی دیگر Su و همکاران (۲۰۱۸: ۸۱۸) رژیم هیدرولوژیکی ۹۱۶ رودخانه بزرگ و پرآب جهان را بررسی کردند. ارزیابی نتایج گویای آن بود که روند جریان در ۵۰۳ و ۴۰۸ رودخانه به‌ترتیب کاهش و افزایشی بوده است. از سوی دیگر نتایج پژوهش مذکور نشان داد که افزایش جریان در عرض‌های جغرافیایی بالا بیش‌تر از سایر بخش‌ها بوده است. در حالی که روند کاهش جریان در عرض‌های جغرافیایی پایین غالب‌تر است. Ali و همکاران (۲۰۱۹: ۵۱۷۶) نیز تأثیر سدهای سه‌گانه Gorges بر شاخص‌های هیدرولوژیکی رودخانه یانگ‌تسه چین در دو ایستگاه

- 1- Liu
- 2 -Richter
- 3 -Kuriqi and Ardiçlioglu
- 4 -Kuriqi
- 5 -Ali

- 6 -Zhang
- 7 -Petts
- 8 -Norris and Thoms
- 9- Flow Health
- 1 -Hayes

هیدرومتری را ارزیابی کردند و ضمن تأیید اثرات مثبت و منفی، بیان نمودند که روی جریان در ماه جولای تأثیر مثبت و در ماه اکتبر ناچیز بوده است. مقدار حداقل جریان یک روزه در دو ایستگاه پایین دست، متفاوت و به میزان ۷ و ۲ درصد بوده است. کومار و جایاکومار (۲۰۲۰: ۱۰۵۶۶۳) نیز در پژوهشی اثرات فعالیت‌های انسانی را روی تغییرات هیدرولوژیکی رودخانه کریشنا^۲ هند ارزیابی کردند. نتایج پژوهش بیان گر آن بود که تغییرات هیدرولوژیکی رودخانه مذکور ناشی از فعالیت‌های انسانی بوده است، به طوری که در فصول کم و پرآبی تغییرات مذکور در جریان رودخانه به ترتیب مثبت و منفی بوده است. مرگز^۳ و همکاران (۲۰۲۱: ۱۲۵۷۳۲) نیز تغییرات هیدرولوژیکی پایین دست سدها در ۲۲ رودخانه کشور اسپانیا را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد تمامی رودخانه‌های مورد مطالعه تغییرات قابل توجهی در بزرگی و زمان بندی جریان‌ها پس از ساخت سد داشتند. از سوی دیگر یک روند کاملاً همگن در حوضه‌های خشک مشاهده شد که میانگین جریان سالانه و جریان شدید سالانه به طور قابل توجهی کاهش یافت. اسلام^۴ و همکاران (۲۰۲۲: ۵۲۳۳) نیز اثرات احداث سد فرکا^۵ در تغییرات رژیم هیدرولوژیکی رودخانه پامدا^۶ در بنگلادش را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که روند کاهشی معنی داری در میانگین دبی جریان در ماه‌های ژانویه تا مه (فصل خشک) مشاهده شده است. اخیراً نیز مالده^۷ و همکاران (۲۰۲۳: ۱۰۰۲۲۲) تأثیرات توام و جداگانه کاربری/پوشش اراضی و تغییرات اقلیمی را بر جریان‌های هیدرولوژیکی را در سه دوره اقلیمی در اتیوپی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد اثرات ترکیبی کاربری/پوشش اراضی و آب و هوا باعث افزایش رواناب سطحی و کاهش روند تبخیر و تعرق شده است. علاوه بر این، هیچ روند افزایشی معنی داری از نظر آماری برای حداقل و حداکثر جریان روزانه یک روزه، سه روزه، هفت روزه و سی روزه در حوضه آبخیز مذکور مشاهده نشد.

در داخل کشور نیز پژوهش‌های متعددی با اهداف مختلف انجام شده است. در همین راستا، دایی چینی و همکاران (۱۳۹۹: ۵۹۵) تغییرات شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیک^۸ در دو دوره قبل و بعد از احداث سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر در حوزه آخیز گرگانود استان گلستان را ارزیابی کردند. تحلیل نتایج نشان داد مقدار دبی جریان پس از احداث سدها در ایستگاه اوغان تحت تأثیر سد بوستان حدود ۳۰ درصد، در ایستگاه‌های گنبد و قزاقلی تحت تأثیر سد گلستان به ترتیب حدود ۵۲ و ۳۰ درصد و در ایستگاه آق قلا در پایین دست سد وشمگیر ۴۹ کاهش یافته است. اسفندیاری درآباد و همکاران (۱۴۰۱: ۵۷) نیز تغییرات رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌های زرینه رود و ساروق چای تحت تاثیر احداث سد را در استان آذربایجان غربی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد جریان طبیعی و در پی آن شاخص‌های هیدرولوژیکی رودخانه‌های زرینه رود و ساروق چای تحت تأثیر سدهای احمدآباد، گوگردچی، نوروزلو و شهید کاظمی تغییر کرده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۱: ۲۵) تغییرات رژیم جریان هیدرولوژیکی رودخانه خیاوچای در یک دوره ۳۰ ساله را ارزیابی کردند. نتایج بیان گر آن بود که، مقادیر جریان‌های کمینه طی دوره ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۶ افزایشی بوده است. از سوی دیگر نتایج نشان داد مقدار مولفه‌های نرخ اوج‌گیری و نرخ فروکش در دوره‌های اخیر افزایش پیدا کرده است. سلاجقه و همکاران (۱۴۰۱: ۳۵)، تغییرات زمانی و مکانی سلامت رودخانه قره‌سو در استان گلستان را بررسی و تحلیل کردند. نتایج گویای آن بود که ایستگاه غاز محله بیش‌ترین امتیاز سلامت (۰/۸۶) را در بین ایستگاه‌های مطالعاتی داشت و از نظر سلامت هیدرولوژیکی به‌عنوان سالم‌ترین ایستگاه انتخاب شد. از سوی دیگر روند سلامت ایستگاه‌های نهارخوران، پل اردوگاه و غاز محله نیز کاهشی بود در صورتی که وضعیت سلامت ایستگاه‌های یساقی و ورودی سد کوثر روند افزایشی داشتند. اخیراً نیز اسفندیاری درآباد و همکاران (۱۴۰۲: ۲۷۵) تغییرات زمانی سلامت هیدرولوژیک جریان خروجی از تالاب نئور در دو دوره قبل و بعد از احداث سد نئور از بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد سلامت هیدرولوژیک جریان خروجی از تالاب نئور پس از احداث سد نئور در حدود ۴ درصد کاهش داشته است. از سوی تداوم جریان حداکثر بیش‌ترین انحراف را در مقایسه با سایر شاخص‌ها پس از احداث سد مذکور داشته است.

بر اساس مرور منابع، پژوهش‌های مختلفی نیز در داخل و خارج کشور با اهداف و روش‌های مختلف در ارتباط با ارزیابی تغییرات رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های انسان ساخت از جمله احداث سدها انجام شده است. در همین راستا در غالب مطالعات گزارش شده است که

1 -Kumar and Jayakumar
2 -Krishna
3 -Mezger
4 -Islam

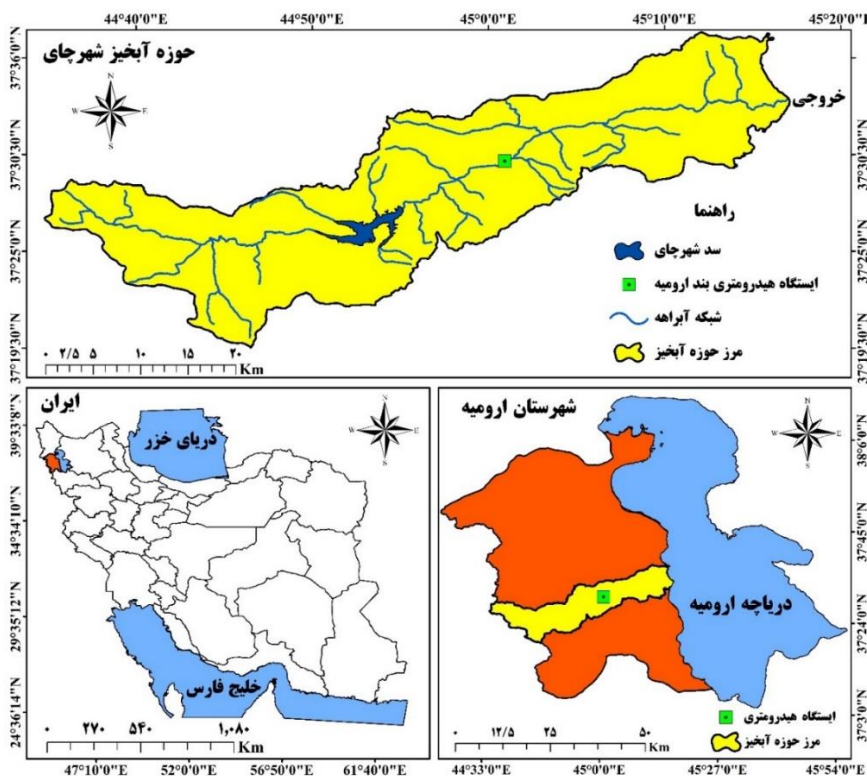
5 -Farakka
6 -Padma
7 -Malede
8 - Indicators of Hydrologic Alterations (IHA)

سدها علاوه بر کاهش یکپارچگی و افزایش انحراف جریان رودخانه، می‌توانند ساختار و عملکرد بوم‌سازگان‌های رودخانه را نیز تحت تأثیر قرار دهند. در همین راستا تمامی مطالعات به این نکته اشاره دارند که مدیریت منابع آب پس از احداث سدها بایستی با تکیه بر حفظ شرایط بوم‌شناختی مطلوب و یکپارچگی بوم‌سازگان‌های پایین‌دست سدهای احداثی مدنظر قرار گیرد تا علاوه بر مدیریت بهینه آب، سلامت بوم‌سازگان‌های پایین‌دست نیز حفظ شود. در بسیاری از مطالعات نیز به تأثیر سدها بر شاخص‌های هیدرولوژیک جریان پرداخته شده است که بیان‌گر افزایش انحراف در شاخص‌های جریان کمینه و نیز دبی پایه رودخانه‌ها بوده است. هر چند تأثیر سدها بر هیدرولوژی و اکولوژی رودخانه انکارناپذیر است، اما ارزیابی جامع و کمی‌نمودند میزان تغییر در ویژگی‌های جریان رودخانه از مواردی است که می‌تواند در حفظ اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و نیز تخصیص زمانی مناسب جریان محیط زیستی کمک نماید. از همین رو می‌توان دریافت ارزیابی روند سلامت هیدرولوژیک جریان در دوره‌های قبل و بعد از احداث سدهای مختلف ضرورت دارد. با این حال اگر چه پژوهش‌های مرتبط با ارزیابی تغییرات رژیم هیدرولوژیک رودخانه‌ها در سال‌های اخیر افزایش چشم‌گیری داشته است، اما پژوهش‌های کمی در ارتباط با ارزیابی تغییرات سلامت هیدرولوژیک جریان در طول زمان و با لحاظ اثر احداث سدها در سال‌های اخیر گزارش شده است. از سوی دیگر بسیاری از پژوهش‌گران عامل اصلی خشکیدگی دریاچه ارومیه را سدهای احداثی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه می‌دانند. از همین رو ارزیابی اثرات احداث سدهای احداث شده در حوزه دریاچه ارومیه بر رژیم هیدرولوژیک رودخانه شهرچای به یک ضرورت مهم تبدیل شده است. از همین رو در پژوهش حاضر ارزیابی تغییرات سلامت هیدرولوژیک جریان رودخانه شهرچای ارومیه پس از احداث سد شهرچای ارومیه به‌عنوان یکی از رودخانه‌های نمونه و اصلی منتهی به دریاچه ارومیه برنامه‌ریزی شده است. این رودخانه یکی از منابع اصلی تأمین کننده آب شرب شهر ارومیه و حومه آن، آب کشاورزی مورد نیاز اراضی تحت پوشش و هم‌چنین به‌عنوان یکی از ورودی‌های مهم دریاچه ارومیه دارای اهمیت زیادی است. بر همین اساس انتظار می‌رود یافته‌های پژوهش حاضر بتواند در مدیریت منابع آب حوزه آبخیز دریاچه ارومیه پشتیبانی فنی لازم را برای مقامات و مدیران مربوطه فراهم سازد.

مواد و روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

رودخانه شهرچای از کوه‌های زرینه، کمال و زریاناتابوتان به‌ترتیب با ارتفاع‌های ۳۱۰۰، ۳۳۸۶ و ۳۳۶۹ متر از سطح دریا سرچشمه می‌گیرد. در ادامه با اضافه شدن سرشاخه‌هایی از کوه‌های مرزی ایران و ترکیه وارد منطقه برده‌سور می‌شود. این رودخانه دارای امتداد شمالی جنوبی است که پس از گذر از شهر ارومیه و سیراب نمودن کشت‌زارها و باغات شهرستان، در نهایت وارد دریاچه ارومیه می‌شود (اسدی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶: ۳۱). یکی از سازه‌های مهم ساخته‌شده در طول رودخانه مذکور سد شهرچای است که سامانه بوم‌شناختی رودخانه شهرچای را در هر دو سمت بالا و پایین‌دست سد تغییر داده است. سد شهرچای ارومیه از نوع خاکی-سنگریزه‌ای با هسته رسی است که ارتفاع آن ۸۴ متر از بستر رودخانه است و طول تاج آن برابر ۵۵۰ متر است بر روی رودخانه شهرچای احداث شده است. حجم مخزن سد شهرچای تا تراز نرمال بیش از ۲۲۱ میلیون متر مکعب است که رودخانه شهرچای ورودی اصلی تأمین‌کننده آن است. سد شهرچای با هدف ذخیره و تنظیم آب رودخانه شهرچای و تأمین آب کشاورزی، تأمین آب شرب و صنعت شهر ارومیه احداث شده است. بنابراین، در مطالعه حاضر، ایستگاه بند ارومیه واقع در پایین‌دست سد با توجه به موقعیت مکانی و در دسترس بودن داده‌های با کیفیت مناسب برای تحلیل تغییرات صورت گرفته در نظر گرفته شد. موقعیت حوزه آبخیز شهرچای، سد مطالعاتی و ایستگاه هیدرومتری بند ارومیه در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت ایستگاه هیدرومتری بند ارومیه، سد شهرچای و حوزه آبخیز شهرچای در شهرستان ارومیه و ایران
 Figure (1): The location of the Band river gauge station, Shahrchay dam and the upland area in Iran

روش پژوهش

داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر تغییرپذیری زمانی شاخص سلامت هیدرولوژیک جریان رودخانه شهرچای ارومیه تحت تأثیر احداث سد شهرچای مدنظر قرار گرفته است. در راستای هدف پژوهش، ابتدا آمار دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری بند ارومیه از شرکت مدیریت منابع آب ایران اخذ شد. قابل ذکر است که دوزه آماری داده‌های مورد استفاده از سال ۱۳۳۰ تا ۱۳۹۷ بوده است که به فرمت مورد استفاده در نرم‌افزار تبدیل شدند.

تعیین دوره مبنا و آزمون بر اساس زمان احداث سد

در مطالعات ارزیابی تغییرات سلامت رودخانه، معمولاً یک دوره به‌عنوان دوره مبنا یا مرجع در نظر گرفته می‌شود، به عبارتی تغییر در امتیاز سلامت هیدرولوژیک جریان با دوره مبنا مقایسه می‌شود (جوزف و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۰۷۱۱۰). در ادامه، بر اساس عامل تغییر در رژیم جریان (فعالیت‌های انسانی و تغییر اقلیم)، دوره تغییر داده‌ها مشخص می‌شود (جیانگ و همکاران، ۲۰۲۱: ۱۲۶۵۶۶). دوره مرجع معمولاً به دوره‌ای از داده‌های جریان اشاره دارد که از طریق تنظیم توسط یک سد یا انحراف جریان تحت تأثیر قرار نگرفته است که بر اساس نظر کاربر تعیین خواهد شد (گیپل و همکاران، ۲۰۱۲). دوره آزمون به دوره مورد ارزیابی اشاره دارد که ممکن است کل داده‌های ثبت شده و یا فقط سال‌های اخیر (بعد از وقوع تغییرات) باشد. در پژوهش حاضر، سال ۱۳۷۳ به‌عنوان سال شروع احداث سد در نظر گرفته شد. البته باید ذکر شود که سد شهرچای در سال ۱۳۸۶ به بهره‌برداری رسیده است (عباس نوین‌پور و همکاران، ۱۳۹۸، ۷۹). در پژوهش حاضر سعی شده است این دوره در مقایسه‌ها نیز مدنظر قرار گیرد. داده‌ها سپس تغییرپذیری سلامت هیدرولوژیک

جریان و شاخص‌های مرتبط با آن در رودخانه شهرچای ارومیه در دوره‌های قبل و بعد از احداث سد شهرچای در محل ایستگاه هیدرومتری بند ارومیه ارزیابی و تحلیل شد.

محاسبه زیرشاخص‌های سلامت هیدرولوژیک جریان

زیرشاخص‌های سلامت هیدرولوژیک جریان تعیین‌کننده ویژگی‌های رژیم جریان هستند که برای توصیف اثرات هیدرولوژیکی تنظیم جریان، از نظر اجزای اصلی جریان مرتبط با محیط زیست رودخانه انتخاب شده‌اند (جدول ۱). مقدار امتیاز جریان برای هر زیرشاخص از طریق مقایسه مقدار ویژگی در سال مورد آزمون با مقدار مورد انتظار در دوره مرجع محاسبه می‌شود. زیرشاخص‌های سلامت هیدرولوژیک شامل حجم جریان حداکثر، حجم جریان حداقل،^۲ جریان‌های حداکثر ماهانه،^۳ جریان‌های حداقل ماهانه،^۴ تداوم جریان‌های حداکثر،^۵ تداوم جریان‌های حداقل،^۶ تداوم جریان‌های خیلی کم،^۷ تغییرات فصلی جریان^۸ و وقوع جریان‌های سیلابی^۹ هستند (گیپل و همکاران، ۲۰۱۲؛ اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۴۰۲: ۲۷۵).

جدول (۱): اثرات معمول تنظیم رژیم جریان بر هیدرولوژی رودخانه (گیپل و همکاران، ۲۰۱۲)

Table (1): River flow regulation impacts of river hydrology (Gippel et al., 2012)

کاهش پیک جریان‌های بالا، افزایش فاصله بین اوج‌های سیلاب، کاهش سیلاب‌های کوچک تا متوسط، توزیع مجدد جریان‌های فصلی	سد کنترلی
کاهش پیک جریان‌های بالا، افزایش فاصله بین اوج‌های سیلاب، کاهش حجم جریان در فصل‌هایی با جریان بالا تداوم جریان بیش‌تر در فصل‌های کم جریان، معکوس شدن جریان فصلی	سد ذخیره‌ای
کاهش پیک جریان‌های بالا، افزایش فاصله بین اوج‌های سیلاب، کاهش حجم جریان در فصل‌هایی با جریان بالا کاهش حجم جریان در فصل‌هایی با جریان کم، تداوم جریان کم‌تر در فصل‌های کم جریان، افزایش وقوع جریانهای بسیار کم	انحراف جریان

محاسبه شاخص سلامت هیدرولوژیک جریان

نرم‌افزار سلامت جریان رودخانه در کشور چین برای ارزیابی تغییرات رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها و طراحی یک رژیم جریان ماهانه محیطی توسعه داده شده است (گیپل و همکاران، ۲۰۱۲). هدف اصلی نرم‌افزار تعیین شاخص سلامت هیدرولوژیک جریان، برآورد امتیاز سالانه سلامت هیدرولوژیک جریان است. امتیاز سلامت هیدرولوژیک جریان در این برنامه بر اساس تغییرات معیارهای مختلف که از خصوصیات جریان و بر اساس دبی ماهانه استخراج می‌شوند محاسبه می‌شوند. این معیارها شامل میانگین دبی جریان ماهانه، دبی‌های حداکثر و حداقل، تغییرات زمانی دبی‌های حداقل و حداکثر، فراوانی تداوم و قابلیت پیش‌بینی دبی‌های زیاد و کم و وقایع، شدت و فراوانی تغییرات در حجم دبی جریان هستند. با استفاده از مقادیر دبی روزانه برای هر یک از معیارهای مذکور در مقیاس سالانه، یک امتیاز سلامت هیدرولوژیک جریان برآورد می‌شود که انحراف جریان و تغییرات شاخص‌های آن‌ها از شرایط طبیعی را نشان می‌دهد (خروشی و همکاران، ۱۳۹۶: ۳۸۰؛ اسفندیاری درآباد و همکاران، ۱۴۰۲: ۲۷۵). امتیاز شاخص سلامت هیدرولوژیک جریان از میانگین هفت امتیاز زیرشاخص‌ها به دست می‌آید، البته مقادیر زیرشاخص‌ها بیان‌کننده این است که کدام جنبه از رژیم جریان رودخانه نسبت به شرایط مرجع بیش‌تر دچار انحراف شده است.

- 1 -High flow volume (HF)
- 2 -Low flow volume (LF)
- 3 -Highest monthly flow (HM)
- 4 -Lowest monthly flow (LM)
- 5 -Persistently higher flow (PH)

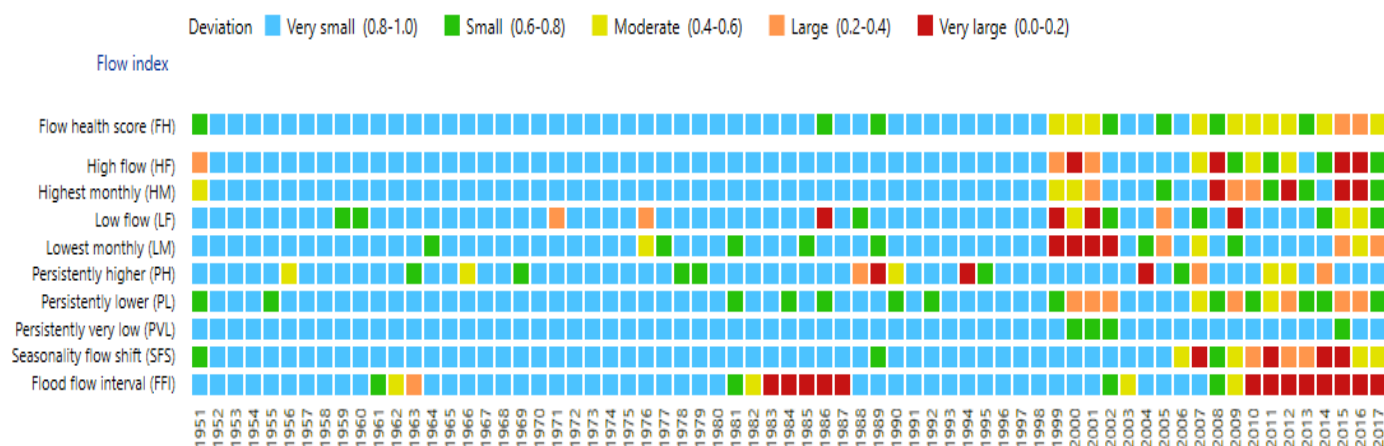
- 6 -Persistently lower flow (PL)
- 7 -Persistently very low (PVL)
- 8 -Seasonality flow shift (SFS)
- 9 -Flood flow interval (FFI)

ارزیابی تغییرات سلامت هیدرولوژیک جریان

تغییرات زمانی زیرشاخص‌ها و شاخص سلامت هیدرولوژیک جریان رودخانه در هر سال و سری زمانی مربوط به آن‌ها از مهم‌ترین اطلاعات ارائه شده در رویکرد استفاده شده در این پژوهش است (سلاجقه و همکاران، ۲۰۲۲: ۳۵). بر این اساس، در پژوهش حاضر بر اساس دوره‌های انتخابی مرجع و دوره آزمون مقایسه شاخص‌ها صورت گرفته است.

نتایج و بحث

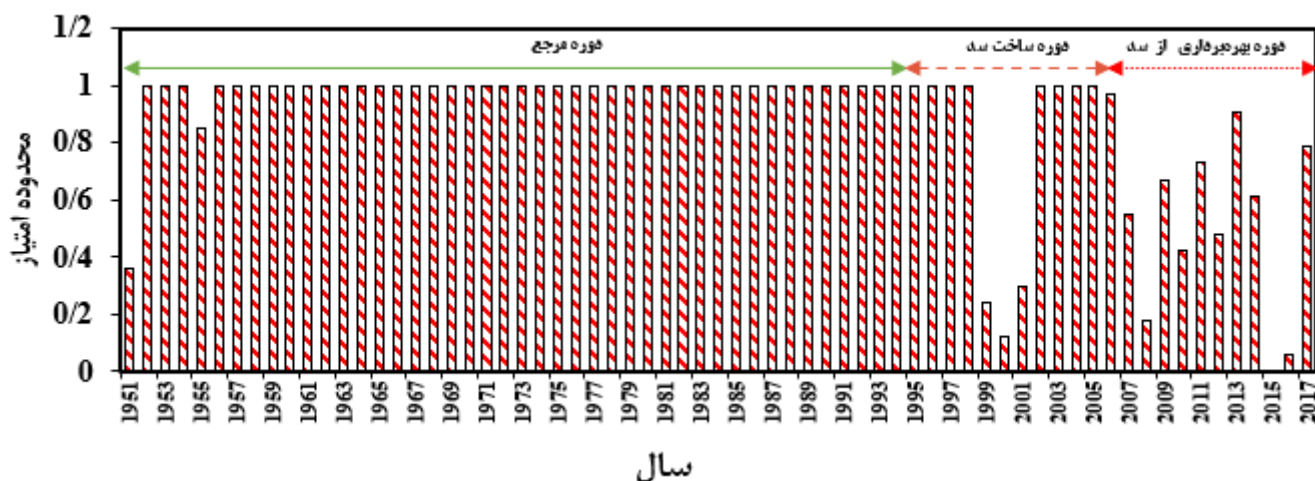
در پژوهش حاضر تغییرات سلامت هیدرولوژیک جریان رودخانه شهرچای ارومیه در دو دوره قبل و بعد از احداث سد شهرچای مورد ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است عملیات ساخت سد شهرچای ارومیه در سال ۱۳۷۳ آغاز و در سال ۱۳۸۶ به بهره‌برداری رسیده است (عباس‌نوین‌پور و همکاران، ۱۳۹۸: ۷۹). از همین‌رو دوره آماری ۱۳۲۹-۱۳۸۶ به‌عنوان دوره آماری پیش از تأثیر و دوره آماری ۱۳۸۶-۱۳۹۶ به‌عنوان دوره پس از تأثیر برای ارزیابی تغییرات سلامت هیدرولوژیک جریان مدنظر قرار گرفت. از همین‌رو حداکثر آمار موجود از دبی جریان ایستگاه هیدرومتری بند ارومیه در پایین‌دست سد شهرچای تحلیل شدند. تغییرات شاخص سلامت هیدرولوژیک جریان و زیرشاخص‌های مربوط به آن با لحاظ تأثیر سد شهرچای برآورد و مقایسه شدند. نتایج حاصل از دامنه تغییرات سلامت و شاخص‌های هیدرولوژیکی جریان رودخانه شهرچای در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل (۲): دامنه تغییرات سلامت و شاخص‌های هیدرولوژیکی جریان رودخانه شهرچای در محل ایستگاه هیدرومتری بند ارومیه

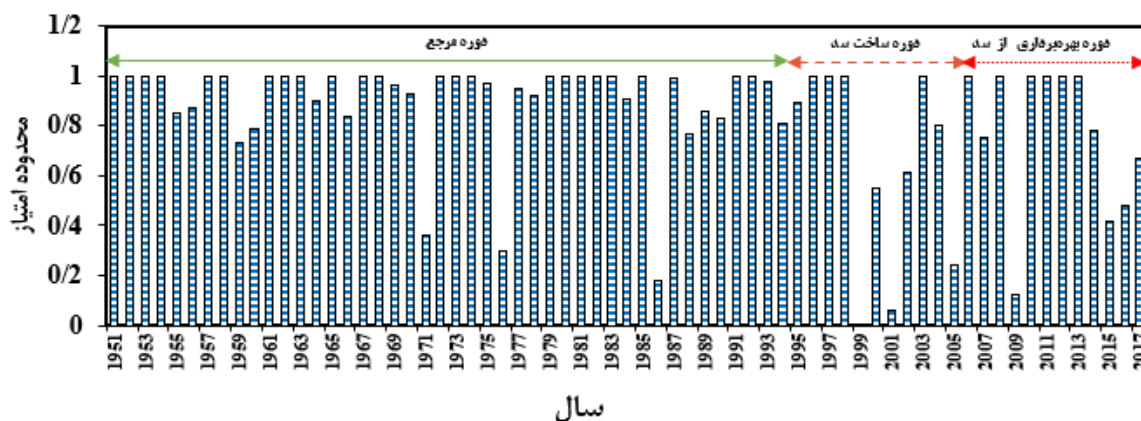
Figure (2): The range of changes in the health and hydrological health indicators of Shahrchai river flow, Band river gauge station

در شکل ۲ میزان انحراف سلامت هیدرولوژیک جریان و هم‌چنین شاخص‌های هیدرولوژیکی در محدوده ۰ الی ۰/۲ (انحراف بسیار بزرگ) تا ۰/۸ الی ۱ (انحراف بسیار کم) نشان داده شده است. از همین‌رو از نتایج حاصل از شکل ۲ می‌توان استنباط نمود در طول دوره مطالعاتی تمامی شاخص‌های مورد بررسی دارای انحراف از شرایط طبیعی جریان بوده است. با این حال میزان انحرافات در برخی از شاخص‌ها کم و در برخی دیگر از شاخص‌ها قابل توجه است. از سوی دیگر نتایج حاکی از آن است میزان انحراف شاخص‌های مطالعاتی از شرایط طبیعی تا سال ۱۹۹۸ غالباً در محدوده خیلی کم تا متوسط و از سال ۱۹۹۸ به بعد در محدوده خیلی کم تا خیلی زیاد بوده است. در شکل ۳ تغییرات زمانی شاخص حجم جریان حداکثر (High Flow, HF) ارائه شده است.



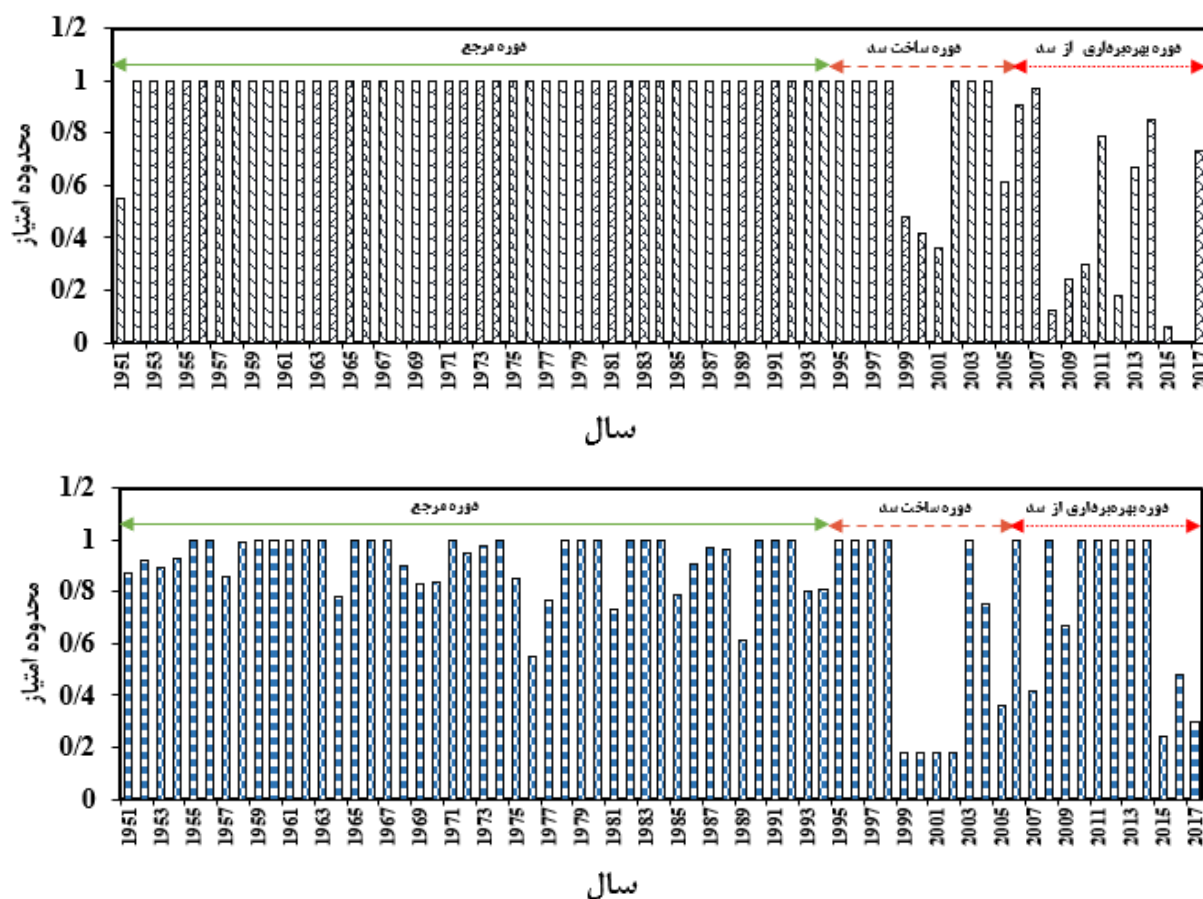
شکل (۳): تغییرات زمانی انحراف شاخص حجم جریان حداکثر High flow volume (HF) رودخانه شهرچای در دوره‌های مختلف
 Figure (3): Temporal variations of the High Flow volume (HF) in Shahrchai River across different periods

نتایج حاصل از شکل ۲ حاکی از آن است که قبل از دوره احداث سد (دوره مرجع) در ۴۳ سال مورد بررسی، شاخص حجم جریان حداکثر فقط در سال‌های ۱۹۵۱ (انحراف زیاد) و ۱۹۵۵ (انحراف خیلی کم) انحرافات از شرایط طبیعی جریان داشته است. در صورتی که شاخص مذکور در دوره ساخت سد از ۱۳ سال مورد بررسی در ۴ سال و در دوره بهره‌برداری از سد در تمامی سال‌ها انحراف داشته است. از همین رو می‌توان دریافت فراوانی و میزان انحرافات شاخص حجم جریان حداکثر در دوره بهره‌برداری از سد بسیار بیش‌تر از دوره مرجع بوده است، به‌طوری سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ بیش‌ترین میزان انحراف از شرایط طبیعی را تجربه کردند. بنابراین اثر احداث سد شهرچای در تغییرات شاخص جریان حداکثر به‌خوبی نمایان است. در همین راستا نتایج پژوهش حاضر با پژوهش‌های Ali و همکاران (۲۰۱۹: ۵۱۷۶) و کاظمی و همکاران (۱۴۰۱: ۲۶۳) هم‌خوانی دارد. در پژوهش‌های مذکور احداث سدهای Three Gorges در چین و سدهای شمیل و نیان در استان هرمزگان ایران باعث کاهش جریان‌های حداکثر شده بود. یکی از دلایل کاهش حجم جریان حداکثر را می‌توان به ذخیره آب در فصل پربابی برای مصارف کشاورزی، صنعت و شرب دانست. در همین راستا عباس‌نوین‌پور و همکاران (۱۳۹۸: ۷۹) بیان کردند در حدود ۷۶ میلیون مترمکعب از آب ذخیره در سد شهرچای در هر سال برای مصارف شرب و صنعت هدف‌گذاری شده است. لازم به ذکر است آب حاصل از ذوب برف منبع اصلی تغذیه‌کننده رودخانه شهرچای است. از همین رو یکی دیگر از دلایل کاهش حجم جریان حداکثر می‌تواند کاهش سطح برف در ارتفاعات حوزه آبخیز شهرچای باشد که نتایج احمدی و همکاران (۱۳۹۱: ۹۷) نیز تأییدکننده این موضوع است، در پژوهش ایشان کاهش سطح برف در نتیجه روند افزایشی دما از عوامل اصلی کاهش دبی رودخانه شهرچای قلمداد شد.



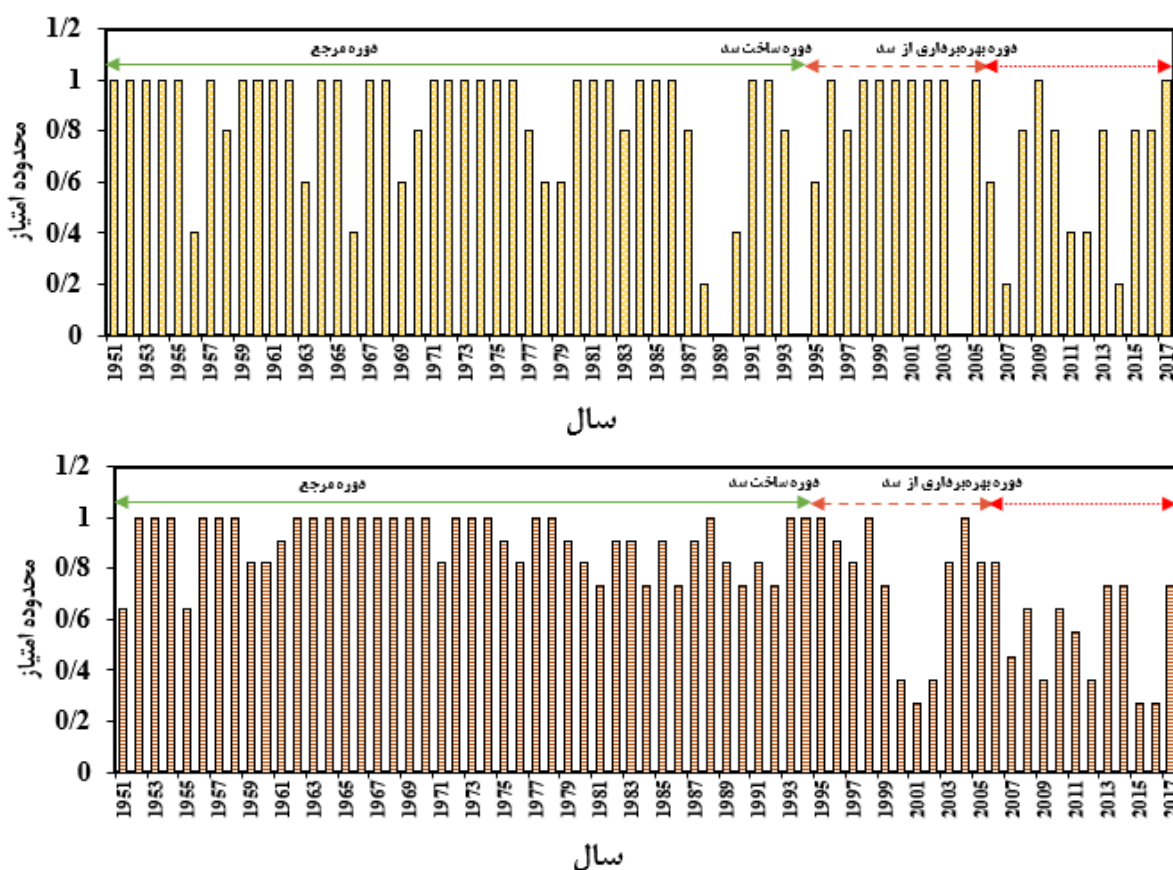
شکل (۴): تغییرات زمانی انحراف شاخص حجم جریان حداقل Low flow volume (LF) رودخانه شهرچای در دوره‌های مختلف
 Figure (4): Temporal variations of the Low Flow volume (LF) in Shahrchai River across different periods

نتایج حاصل از شکل ۴ گویای آن است که حجم جریان حداقل برخلاف حجم جریان حداکثر انحرافات بسیاری در طول دوره مطالعاتی داشته است به طوری که شاخص حجم جریان حداقل در دوره‌های قبل از احداث سد، ساخت سد و بعد از احداث سد به ترتیب در ۴۴، ۵۸ و ۶۰ درصد از سال‌های مورد بررسی انحرافات داشته است. با این حال میزان این انحرافات در دوره‌های مختلف متفاوت بوده و بیش‌ترین فراوانی انحرافات مربوط به دوره بهره‌برداری از سد است. از سوی دیگر بالاترین میزان انحراف شاخص جریان حداقل از جریان طبیعی در دوره ساخت سد در سال‌های ۱۹۹۱ و ۲۰۰۱ بوده است که می‌تواند ناشی از انحراف جریان رودخانه به منظور ساخت سد باشد. از آنجایی که جریان‌های حداقل و حداکثر در فرآیندهای مختلفی از جمله تنظیم وضعیت فیزیکی و ساختار مورفولوژیکی رودخانه‌ها، توسعه و توزیع جوامع گیاهی، تنظیم مبادلات مواد مغذی بین رودخانه و دشت سیلابی، دفع زباله و هوادهی بسترهای تولید مثل در رسوبات کانال نقش دارند (خسروی و همکاران، ۲۰۱۹: ۶۵۱). بنابراین انحراف مؤلفه‌های مذکور از شرایط طبیعی می‌تواند بوم‌سازگان‌های موجود در رودخانه شهرچای ارومیه را تهدید کند. حداکثر جریان ماهانه نیز نشان‌گر بزرگی جریان‌های سیلابی است که برای بوم‌سازگان‌های آبی از جمله تالاب‌ها ضروری هستند، رفتار تخم‌ریزی ماهی را نشان می‌دهند، مهاجرت ماهی را تسهیل می‌کنند و رسوب را برای ایجاد زیستگاه فیزیکی به حرکت در می‌آورند (Gippel و همکاران، ۲۰۱۲). با این حال انحراف شاخص مذکور از شرایط طبیعی پس از احداث سد شهرچای به وضوح قابل در شکل ۵ قابل مشاهده است.



شکل (۵): تغییرات زمانی انحراف شاخص‌های جریان‌های حداکثر (High Monthly flow (HM) (بالا)، و حداقل ماهانه (Lowest monthly flow (LM) (پایین)، رودخانه شهرچای در دوره‌های مختلف
 Figure (5): Temporal variations of the Highest Monthly flow (HF) (top), and Lowest Monthly flow (LM) (down), in Shahrchai River across different periods

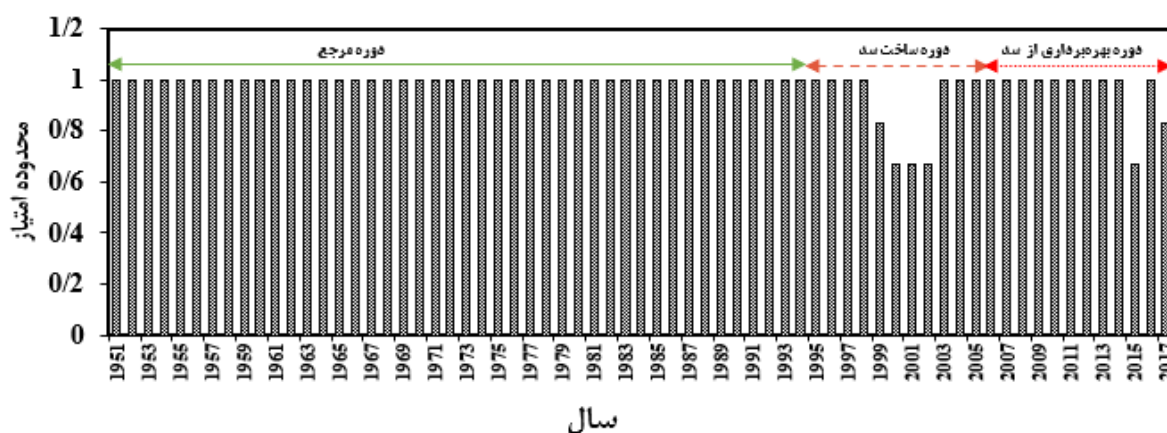
انحراف شاخص حداکثر جریان ماهانه (شکل ۵) از شرایط طبیعی پس از انجام دخالت‌های انسانی در رودخانه شهرچای بسیار زیاد شده است. به طوری که در دوره قبل از احداث سد فقط در سال (سال ۱۹۵۱)، دوره ساخت سد ۵ سال و در دوره بهره‌برداری از سد در تمامی سال‌ها شاخص مذکور از شرایط طبیعی جریان انحراف داشته است. نتایج مذکور با نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در استان اردبیل مبنی بر اثرات منفی سد یامچی در استان اردبیل (نصیری‌خیای و همکاران، ۱۳۹۸: ۸۵)، سد گتوند در استان خوزستان (نادری و همکاران، ۱۴۰۱) و سد Komardanga در اندوزی (تالوکار و پال، ۲۰۱۸: ۵۹) به ترتیب بر دبی جریان رودخانه‌های بالخلوچای، کارون و Punarbhaba هم‌خوانی دارد. هم‌چنین نتایج پژوهش اسفندیاری در آباد و همکاران (۲۰۲: ۲۷۵) نیز حاکی از آن بود که قبل از احداث سد نفور در استان اردبیل تغییری در حداکثر جریان ماهانه رودخانه نفور مشاهده نشده بود. این در حالی است که پس از احداث سد شاخص جریان حداکثر ماهانه به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۱ و ۱۹۹۳ بیش‌ترین میزان انحراف از شرایط طبیعی جریان را داشته است. از سوی دیگر ارزیابی جریان حداقل ماهانه (شکل ۵) نیز نشان داد اگرچه فراوانی انحرافات جریان حداقل ماهانه در دوره قبل از احداث سد (در حدود ۵۲ درصد از سال‌های مورد بررسی) بیش‌تر از دوره پس از احداث سد (۴۰ درصد از سال‌های مورد بررسی) است، با این حال میزان انحرافات در دوره قبل از احداث سد در محدوده‌ی کم تا خیلی کم و در دوره بعد از احداث سد در محدوده متوسط تا کم است. در همین راستا بیش‌ترین فراوانی و انحراف جریان حداقل ماهانه از شرایط طبیعی مربوط به دوره ساخت سد است. شاخص‌های تداوم جریان حداکثر (PH) و تداوم جریان حداقل (PL) نیز برای انعکاس وجود یک دوره زمانی در نظر گرفته شده‌اند که جریان در سال آزمون به‌طور مداوم (یعنی برای دو یا چند ماه متوالی) به ترتیب بالاتر و پایین‌تر از محدوده مورد انتظار است.



شکل (۶): تغییرات زمانی انحراف شاخص‌های تداوم جریان‌های حداکثر (PH) (بالا)، و حداقل (Persistently lower flow) (پایین)، رودخانه شهرچای در دوره‌های مختلف

Figure (6): Temporal variations of the Persistently higher flow (PH) (up), and persistently lower flow (PL) (down), in Shahrchai River across different periods

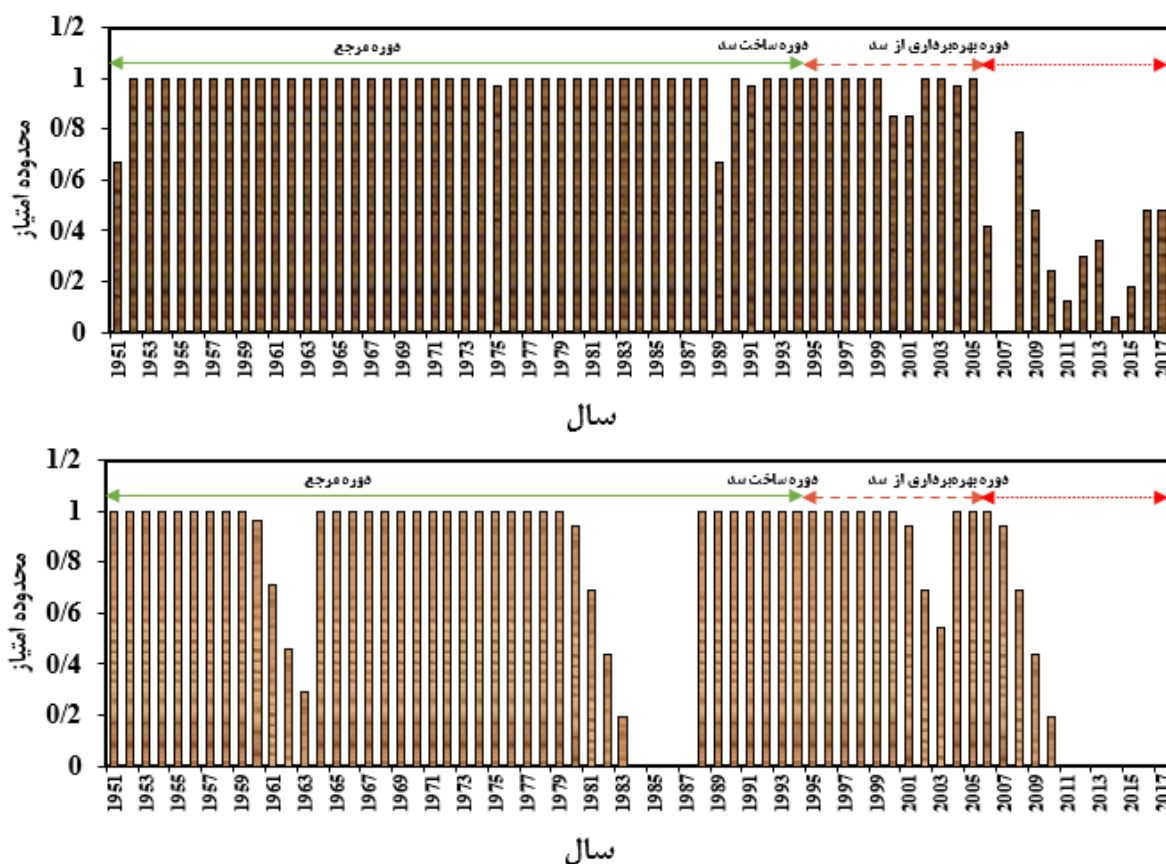
بررسی تغییرات شاخص‌های تداوم جریان‌های حداکثر و حداقل در دوره‌های مطالعاتی (شکل ۶) نشان داد فراوانی انحرافات در شاخص‌های تداوم جریان حداکثر و حداقل در طول دوره‌های مطالعاتی زیاد است. با این حال میزان انحرافات در شاخص تداوم حداکثر بیش‌تر از شاخص تداوم حداقل است. از سوی دیگر در شاخص تداوم حداکثر انحراف بسیار زیاد از شرایط طبیعی در سال‌های ۱۹۹۸ (دوره مرجع) و ۲۰۰۴ (دوره ساخت سد) مشاهده شده است. در صورتی که در شاخص تداوم حداقل انحراف بسیار زیاد از شرایط طبیعی مشاهده نمی‌شود. از سوی دیگر نتایج حاکی از آن است که بعد از احداث سد شهرچای شاخص تداوم جریان حداکثر در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ انحرافی از شرایط طبیعی نداشته است، با این حال در بقیه سال‌ها انحراف از شرایط طبیعی جریان دیده می‌شود. هم‌چنین نتایج گویای آن بود میزان انحرافات شاخص جریان حداقل در دوره مرجع در مقایسه با دوره ساخت و بهره‌برداری از سد شهرچای بسیار کم است. در همین راستا بررسی تغییرات زمانی انحراف شاخص تداوم جریان‌های خیلی کم (شکل ۷) نیز حاکی از آن بود که در دوره قبل از احداث سد شاخص مذکور هیچ انحرافی از شرایط طبیعی جریان نداشته است. این در صورتی است که در دوره ساخت سد شاخص تداوم جریان‌های خیلی کم طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ انحرافات در محدوده کم و خیلی کم داشته است.



شکل (۷): تغییرات زمانی انحراف شاخص تداوم جریان‌های خیلی کم (PVL) رودخانه شهرچای در دوره‌های مختلف
 Figure (4): Temporal variations of the Persistently very low (PVL) in Shahrchai River across different periods

در دوره بعد از احداث سد نیز شاخص مذکور فقط در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ از شرایط طبیعی جریان به ترتیب انحراف کم و خیلی کم داشته است. در همین راستا نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش‌های اسفندیاری درآباد و همکاران (۱۴۰۲: ۲۷۵) و سلاجقه و همکاران (۱۴۰۱: ۳۵) هم‌خوانی دارد. نتایج پژوهش‌های مذکور حاکی از آن بود که میزان انحراف شاخص تداوم جریان خیلی کم در مقایسه با شاخص‌های دیگر دارای کم‌ترین تغییرپذیری از شرایط طبیعی بوده است. با این حال افزایش تداوم جریان‌های خیلی کم می‌تواند اثرات زیان‌باری بر بوم‌سازگان رودخانه داشته باشد. پیامدهای تداوم جریان‌های خیلی کم می‌تواند برای تمام موجودات زنده در جریان مخرب باشد. جریان‌های بسیار کم اغلب با از دست دادن زیستگاه‌ها، ازدحام موجودات زنده در استخرها و کیفیت آب تنزل یافته، مانند درجه حرارت زیاد و افزایش خطر کمبود اکسیژن و شوری بالا همراه هستند (گیپل و همکاران، ۲۰۱۲).

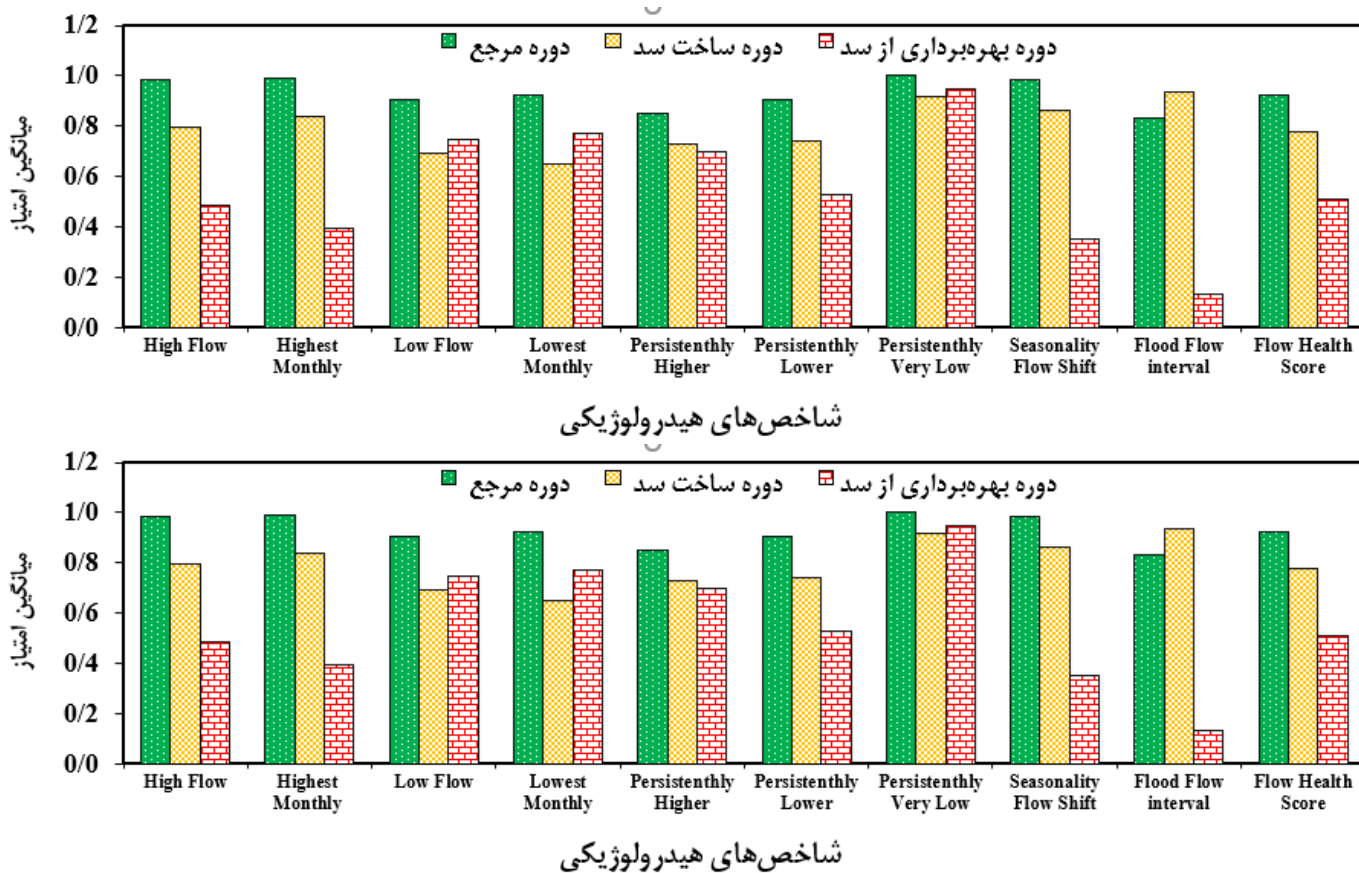
شاخص‌های تغییرات فصلی جریان (SFS) و وقوع جریان‌های سیلابی (FFI) دو شاخص دیگری هستند که توسط نرم‌افزار Flow Health برآورد می‌شوند (شکل ۸). شاخص تغییرات جریان فصلی برای تشخیص انتقال ماه‌های با جریان بالا و پایین به دیگر زمان‌های سال و شاخص وقوع جریان‌های سیلابی نیز برای تعیین فاصله زمانی بین سیل‌ها در نظر گرفته شده‌اند.



شکل (۸): تغییرات زمانی انحراف شاخص‌های تغییرات فصلی جریان (SFS) (بالا)، و وقوع جریان‌های سیلابی (Flood flow interval (FFI) (پایین)، رودخانه شهرچای در دوره‌های مختلف

Figure (8): Temporal variations of the Seasonality flow shift (SFS) (top) and Flood flow interval (FFI) (down) in Shahrchai River across different periods

تحلیل نتایج تغییرات زمانی انحراف شاخص‌های تغییرات فصلی جریان و وقوع جریان‌های سیلابی (شکل ۸) نشان می‌دهد تغییرات فصلی جریان قبل از احداث سد فقط در سه سال ۱۹۵۱، ۱۹۷۵ و ۱۹۸۹ رخ داده است. این در صورتی است که در دوره ساخت سد و هم‌چنین دوره بهره‌برداری از سد تغییر فصلی جریان به ترتیب در ۴ و ۱۰ سال صورت پذیرفته است که نشان از اثرگذاری مستقیم سد بر تغییرات فصلی جریان است. پیامدهای این امر می‌تواند اختلال در زمان‌بندی طبیعی پالس‌های جریان و جریان‌های پایه باشد که رفتار موجودات آبی را که چرخه زندگی آن‌ها با الگوی فصلی خاصی از جریان سازگار شده است، تحریک کند (گیپل و همکاران، ۲۰۱۲). ارزیابی تغییرپذیری زمانی وقوع جریان‌ها سیلابی نیز حاکی از آن است که انحراف جریان‌های سیلابی از شرایط طبیعی در دوره قبل از احداث سد تا حدودی مشابه دوره بعد از احداث سد است. در دوره قبل از احداث سد وقوع جریان‌های سیلابی طی سال‌های ۱۹۹۴ تا ۱۹۸۷ انحراف بسیار زیادی را از شرایط طبیعی تجربه کرده است. در همین راستا در دوره بعد از احداث سد نیز سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۷ انحراف بسیار زیاد از شرایط طبیعی جریان را تجربه کرده‌اند. با این حال نکته قابل توجه این است بعد از احداث سد شهرچای تغییرات فصلی جریان و وقوع جریان‌های سیلابی در تمام سال‌ها دچار انحراف شده است.



شکل (۹): میانگین تغییرات زیرشاخص‌ها و شاخص‌های سلامت هیدرولوژیک جریان در رودخانه شهرچای در دوره‌های زمانی مختلف
 Figure (9): Changes in the average values of sub- indicators and flow health scores in Shahrchay River in different time periods

در شکل ۹ میانگین تغییرات شاخص‌های سلامت هیدرولوژیک جریان در دوره‌های مختلف ارائه شده است. براساس نتایج شکل ۹ می‌توان دریافت میزان انحراف تمامی شاخص‌های مطالعاتی در دوره بعد از احداث سد بیش‌تر از دوره بعد از احداث سد است. با این حال شاخص‌های وقوع جریان‌های سیلابی و تغییرات فصلی جریان بیش‌از سایر شاخص‌ها از شرایط طبیعی جریان انحراف داشته‌اند. برهمین اساس می‌توان دریافت دبی جریان رودخانه شهرچای در مواقع سیلابی توسط سد شهرچای ذخیره و برای مصارف کشاورزی و شرب در سایر فصول رهاسازی می‌شود. از سوی دیگر بیش‌ترین میزان انحراف در شاخص‌های مطالعاتی در دوره مرجع، دوره ساخت سد و دوره بهره‌برداری از سد به ترتیب مربوط به شاخص‌های وقوع جریان‌های سیلابی، جریان حداقل ماهانه و وقوع جریان سیلابی است. این در حالی است که کم‌ترین میزان انحراف در شاخص‌های مطالعاتی در دوره مرجع و بهره‌برداری از سد مربوط به تداوم جریان‌های خیلی کم و در دوره ساخت سد مربوط به وقوع جریان‌های سیلابی است. از طرفی دیگر سلامت هیدرولوژیک جریان در دوره مرجع ۰/۹۲، دوره ساخت سد ۰/۷۷ و دوره بهره‌برداری از سد برابر ۰/۵۱ است. برهمین اساس می‌توان نتیجه گرفت سلامت هیدرولوژیک جریان رودخانه شهرچای در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری از سد شهرچای به ترتیب در حدود ۱۶ و ۴۵ درصد در مقایسه با دوره مرجع کاهش داشته است.

در همین راستا، در پژوهش ریو و همکاران (۲۰۱۵) پس از مطالعه الگوی مکانی رژیم‌های جریان تغییر یافته در رودخانه ساگامی ژاپن مشخص شد که میزان تغییرات بسته به شاخص‌های هیدرولوژیکی متفاوت بوده است. ایشان تغییر ۷۰ درصدی در جریان متوسط در ماه اوت و نیز کاهش ۷۰ درصدی فراوانی پالس‌های جریان بالا را به اهداف عملیاتی تأسیسات کنترل آب نسبت دادند. در ایران نیز، رضایی و همکاران (۱۴۰۲: ۱۵۷) در ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی طالقان‌رود با استفاده از ابزار IHA دریافتند که در طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۶، دبی رودخانه طالقان تحت تاثیر تغییرات اقلیم و تغییرات کاربری اراضی، از نظر تمامی شاخص‌های IHA، دارای روند

کاهش معناداری بوده است. در مطالعه سادات^۱ و همکاران (۲۰۲۰: ۱۵۰۸۱۴) با هدف ارتباط بین سلامت رودخانه و مدیریت منابع آب در رودخانه‌های تنظیم‌شده گویجانگ^۲ و ننجیانگ^۳ و پایین‌دست رودخانه زرد، به این نتیجه رسیدند که تغییر دینامیک جریان بر ویژگی‌های هیدرولوژی و اکولوژی جریان رودخانه تأثیر گذاشته است و شاخص سلامت رودخانه بخش‌های بالادست رودخانه ننجیانگ ضعیف و در بخش‌های پایین‌دست رودخانه زرد بحرانی بوده است. ایشان تأکید کردند که مدیریت منابع آب رودخانه‌های تنظیم‌شده باید اصولی باشد و احتیاط ویژه برای احیای سلامت و اکولوژی رودخانه مدنظر قرار گیرد. در خصوص اهمیت مطالعه اکولوژی رودخانه، نوریس و تامز، (۱۹۹۹: ۱۹۸) تأکید نمودند که بررسی روابط بین متغیرهای محیطی موثر بر زیستگاه‌های آبی مانند ساختار زیستگاه، رژیم جریان، منابع انرژی، کیفیت آب و برهمکنش‌های زیستی و وضعیت بیولوژیکی، در مطالعه سلامت رودخانه مورد نیاز است. ما^۴ و همکاران (۲۰۱۹: ۱۴۴) با پیشنهاد روش مطالعه سلامت رودخانه بر اساس برآورد جریان محیط زیستی رویکردی را ارائه نمودند که امکان در نظر گرفتن وضعیت‌های مختلف سلامت اکوسیستم‌های رودخانه، دامنه‌های مقادیر مختلف جریان، تأثیر وقایع سیلابی و نیز توزیع غیریکنواخت جریان در طول سال را فراهم می‌کند و می‌تواند وضعیت سلامت رودخانه را به‌طور جامع و قابل قبول ارزیابی نماید.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر سلامت هیدرولوژیک رودخانه شهرچای ارومیه تحت تأثیر سد شهرچای ارومیه در محل ایستگاه هیدرومتری بند ارومیه در دوره مطالعاتی ۲۰۱۷-۱۹۵۱ ارزیابی و تحلیل شد. ارزیابی‌های صورت گرفته در سه دوره مرجع، دوره ساخت سد و دوره بهره‌برداری از سد انجام شد. در دوره اول، میزان انحراف سلامت و شاخص‌های هیدرولوژیک مرتبط با آن طی سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۹۳ برآورد شدند. در دوره‌های دوم (۱۹۹۴-۲۰۰۷) و سوم (۲۰۰۷-۲۰۱۷) نیز، میزان انحراف سلامت و شاخص‌های هیدرولوژیک پس از ساخت و بهره‌برداری از سد شهرچای ارزیابی شد. نتایج پژوهش نشان داد سلامت هیدرولوژیک و تمامی شاخص‌های مرتبط با آن در سه دوره مطالعاتی دارای انحراف از شرایط طبیعی بوده‌اند. این حال میزان انحراف از شرایط طبیعی در دوره‌های ساخت و بهره‌برداری از سد بیش‌تر از دوره‌ی قبل از احداث سد بوده است. در همین راستا پس از بهره‌برداری از سد شاخص‌های وقوع جریان‌های سیلابی و تداوم جریان‌های حداکثر به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان انحراف از شرایط طبیعی جریان را تجربه کرده‌اند. از سوی دیگر نتایج حاکی از آن بود که سلامت هیدرولوژیک جریان فقط در سال‌های ۱۹۶۵، ۱۹۶۷، ۱۹۷۳، ۱۹۷۴ و ۱۹۹۶ از شرایط طبیعی انحرافی نداشته است و در بقیه سال‌ها دچار انحراف شده است. همچنین شاخص‌های حجم جریان حداکثر، حداکثر جریان ماهانه، تداوم جریان‌های حداقل، تغییرات فصلی جریان و وقوع جریان‌های سیلابی پس از احداث سد در تمامی سال‌ها پس از احداث سد دچار انحراف شده‌اند. با تکیه بر نتایج پژوهش حاضر می‌توان ادعان کرد بخش عمده‌ای از تغییرات هیدرولوژیک رودخانه شهرچای ناشی از سد شهرچای است. ارزیابی تغییرات هیدرولوژیک جریان رودخانه‌های منتهی به دریاچه ارومیه برای شناسایی میزان تغییر ویژگی‌های هیدرولوژیک ناشی از احداث سدها، تغییر کاربری اراضی و عوامل اقلیمی توصیه می‌شود. همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی ضمن ارزیابی روند تغییرات متغیرهای اقلیمی، سهم عوامل انسانی و اقلیمی در تغییرات سلامت هیدرولوژیک و شاخص‌های مرتبط با آن در رودخانه شهرچای مورد بررسی قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی به شماره قرارداد (۱۴۰۱/د/۹/۲۴۱۰۵) از محل اعتبارات پژوهشی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد. بدینوسیله از حمایت‌های ایشان تقدیر و تشکر به‌عمل می‌آید.

References

Ahmadi, F., Khalili, K., Behmanesh, J., & Verdinzhad, V. (2013). Determination of Climate Changes on Air Temperature and Shahr-Chai River in the West of Urmia Lake Using Trend and Stationarity Analysis. *Irrigation Sciences and Engineering*, 35(4), 97-108. (In Persian).

- Abbas NovinPour, E., Mohammad Hoseinzadeh, M., & Rezaie, H. (2019). The effect of reservoir dam construction on groundwater fluctuations (Case study Reservoir Dam ShahreChay, Urmia Plain, IRAN). *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(4), 75-93. (In Persian).
- Ali, R., Kuriqi, A., Abubaker, S., & Kisi, O. (2019). Hydrologic alteration at the upper and middle part of the Yangtze-river, China: towards sustainable water resource management under increasing water exploitation. *Sustainability*, 11 (19), 5176.
- Amini, H., Esmali-Ouri, A., Mostafazadeh, R., Sharari, M., & Zabihi, M. (2019). Hydrological drought response of regulated river flow under the influence of dam reservoir in Ardabil Province. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(2), 473-486. (In Persian).
- Asadi nia, E., Mohammadi, M., & Vojudi Mehrabani, F. (2017). Assess The Effect Bridges Constructed on Hydraulic Behavior of the River Within the City (Case Study: River City Chai Urmia). *Journal of Engineering & Construction Management*, 1(4), 30-35. (In Persian).
- Asghari Saraskanrood, S., Setayeshi Nasaz, H., Mostafazadeh, R., Madadi, A. (2023). Investigating changes in the hydrological flow regime and the environmental flow component of EFCs in Khiauchai River in a 30-year period. *Hydrogeomorphology*. 10(37): 25-43. doi: 10.22034/hyd.2023.54796.1672. (In Persian).
- Daiechini, F., Vafakhah, M., & Moosavi, V. (2020). Impacts of the Golestan and Voshmgir Dams on Indicators of Hydrologic Alterations in the Gorganroud River Using Range of Variability Approach. *Iranian journal of Ecohydrology*, 7(3), 595-607. doi: 10.22059/ije.2020.301564.1320.
- Esfandiyari 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*, 6(18), 57-77. (In Persian).
- Esfandiyari Darabad, F., Shahbazi Sharfeh, Z., Zabihi Silabi, M., & Mostafazadeh, R. (2023). Temporal changes of the hydrological health index of the Neor wetland outflow in Ardabil province. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 10(2), 275-287. (In Persian).
- Esmaili, R., Lorestani, G., & Baziar, G. (2017). Effects of dam Reservoir on characteristics of meandering river in Gorgan River. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(4), 657-666. (In Persian).
- Gippel, C. J., Marsh, N., & Grice, T. (2012). Flow Health–Software to Assess the Deviation of River Flows from Reference and to Design a Monthly Environmental Flow Regime. Technical Manual and User Guide, Version 2.0.
- Hayes, D. S., Brändle, J. M., Seliger, C., Zeiringer, B., Ferreira, T., & Schmutz, S. (2018). Advancing towards functional environmental flows for temperate floodplain rivers. *Science of the Total Environment*, 633, 1089-1104.
- Islam, A. R. M. T., Talukdar, S., Akhter, S., Eibek, K. U., Rahman, M. M., Pal, S., ... & Mosavi, A. (2022). Assessing the impact of the Farakka Barrage on hydrological alteration in the Padma River with future insight. *Sustainability*, 14 (9), 5233.
- Jiang, S., Zhou, L., Ren, L., Wang, M., Xu, C. Y., Yuan, F., ... & Ding, Y. (2021). Development of a comprehensive framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on river hydrological health variation. *Journal of Hydrology*, 600, 126566.
- Joseph, N., Preetha, P. P., & Narasimhan, B. (2021). Assessment of environmental flow requirements using a coupled surface water-groundwater model and a flow health tool: A case study of Son river in the Ganga basin. *Ecological Indicators*, 121, 107110.
- Kazemi, M., Zabihi Silabi, M., gharemahmudli, S., Jafarpoor, A., & Mohammadi, F. (2023). The effect of dam construction on the hydrological indicators of Shamil and Nyan dams in Hormozgan province. *Ecohydrology*, 10(2): 263-274. doi: 10.22059/ije.2023.354193.1709. (In Persian).
- Khorooshi, S., Mostafazadeh, R., Esmali Ouri, A., & Raof, M. (2017). Spatiotemporal assessment of the hydrologic river health index variations in Ardabil Province Watersheds. *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(2), 379-393. doi: 10.22059/ije.2017.61475.
- 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). *Ecohydrology*, 6(3), 651-671. (In Persian).
- Kumar, A. U., & Jayakumar, K. V. (2020). Hydrological alterations due to anthropogenic activities in Krishna River Basin, India. *Ecological Indicators*, 108, 105663.
- Kuriqi, A., & Ardiçlioglu, M. (2018). Investigation of hydraulic regime at middle part of the Loire River in context of floods and low flow events. *Pollack Periodica*, 13 (1), 145-156.
- Kuriqi, A., Pinheiro, A., Sordo-Ward, A., & Garrote, L. (2017). Trade-off between environmental flow policy and run-of-river hydropower generation in Mediterranean climate. *Eur. Water*, 60, 123-130.
- Li, D., Long, D., Zhao, J., Lu, H., & Hong, Y. (2017). Observed changes in flow regimes in the Mekong River basin. *Journal of Hydrology*, 551, 217-232.
- 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.
- Ma, D., Luo, W., Yang, G., Lu, J., & Fan, Y. (2019). A study on a river health assessment method based on ecological flow. *Ecological modelling*, 401, 144-154.
- Malede, D. A., Alamirew, T., Kosgie, J. R., & Andualem, T. G. (2023). Analysis of land use/land cover change trends over Birr River Watershed, Abbay Basin, Ethiopia. *Environmental and Sustainability Indicators*, 17, 100222.
- Mezger, G., del Tánago, M. G., & De Stefano, L. (2021). Environmental flows and the mitigation of hydrological alteration downstream from dams: The Spanish case. *Journal of Hydrology*, 598, 125732.
- Naderi, M., Sheikh, V., Bahrehmand, A., Komaki, C. B., & Ghangermeh, A. (2023). Analysis of river flow regime changes using the indicators of hydrologic alteration (Case study: Hableroud watershed). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(3), 1-19. 10.22098/MMWS.2022.11430.1129. (In Persian).
- Nasiri Khiavi A, Mostafazadeh R, Esmali-Ouri A, Ghafarzadeh O, Golshan M. (2019). Changes in environmental flow components under the effect of Sabalan Dam in the Qarehsou River of Ardebil Province. *Watershed Management Research*, 10(19), 85-94. (In Persian).
- Norris, R. H., & Thoms, M. C. (1999). What is river health?. *Freshwater Biology*, 41(2), 197-209.
- Petts, G. E. (2009). Instream flow science for sustainable river management 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45 (5), 1071-1086.
- Rezaei, M., Khaleghi, S., & Hosseinzadeh, M. M. (2023). Determination of the hydrological changes of Taleghan River Based on IHA indices. *Hydrogeomorphology*, 10(37), 157-139. doi: 10.22034/hyd.2023.58352.1707
- Richter, B. D., Postel, S., Revenga, C., Scudder, T., Lehner, B., Churchill, A., & Chow, M. (2010). Lost in development's shadow: The downstream human consequences of dams. *Water alternatives*, 3 (2), 14.
- Ryo, M., Iwasaki, Y., Yoshimura, C., & Saavedra V, O. C. (2015). Evaluation of spatial pattern of altered flow regimes on a river network using a distributed hydrological model. *PLoS One*, 10(7), e0133833.
- Sadat, M. A., Guan, Y., Zhang, D., Shao, G., Cheng, X., & Yang, Y. (2020). The associations between river health and water resources management lead to the assessment of river state. *Ecological indicators*, 109, 105814.
- Salajegheh, A., Khalighi, S., Pourebrahim, S., & Beigi, H. (2022). Investigating the trend of temporal and spatial changes in river health using Flow Health (Case Study: Qarasu River). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 9(1), 35-46. (In Persian).
- 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.
- Talukdar, S., & Pal, S. (2018). Impact of dam on flow regime and flood plain modification in Punarbhaba River Basin of Indo-Bangladesh Barind tract. *Water Conservation Science and Engineering*, 3(2), 59-77.
- Zhang, Q., Gu, X., Singh, V. P., & Chen, X. (2015). Evaluation of ecological instream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations. *Journal of Hydrology*, 529, 711-722.