

Research Paper



Comparison of temporal changes in flow regime components in two natural and affected by dam construction rivers in Ardabil Province



Raof Mostafazadeh^{1*} | Javanshir Azizi Mobaser² | Shahnaz Mirzaei³

1. Associate Professor, Department of Natural Resources, Faculty of Natural Resources, and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. raoofmostafazadeh@uma.ac.ir
2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Science and Technology, and Member of Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. ja.mobaser22@gmail.com
3. Ph.D in Watershed Management Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. mirzaeishahnaz@gmail.com

Keywords

Base flow, River regime, Flow Duration Curve, Balikhlouchai River, Khiavchai River.

Received: 2024/10/15

Accepted: 2024/12/05

Published: 2025/04/19

ABSTRACT

Introduction

Time series analysis of daily flow and assessing changes in various flow components (maximum, minimum, and baseflow) are fundamental for identifying river regime alterations. River flow regime alteration encompasses changes in various flow components (high flows, low flows, and baseflow), timing, flow duration, and the intensity of changes. The river flow regime can be influenced by various climatic and anthropogenic factors, including land use changes, dam construction, flow diversion, and water abstraction, leading to changes in available water and environmental flow allocation patterns. Various tools have been developed for calculating flow regime alteration indices, identifying trends, and detecting change points. Among these, graphical and charting methods can clearly display changes in patterns and trends. Programming in R is a powerful approach for hydrological data analysis, offering valuable tools for data processing and visualization. The primary advantage of R programming lies in its data analysis capabilities, reproducibility, and flexibility, enabling the storage, modification, and adaptation of codes and analyses.

Methodology

This study compares the changes in flow regime components between two rivers, one natural and one regulated by a dam, in Ardabil Province. Using R programming, various charts, change point analysis, and significant temporal trends were derived for flow statistics, including high flow, low flow, and baseflow. To identify changes in flow characteristics and create screening plots, including data plots, change point detection, and temporal trends for high flow, low flow, and baseflow data, various R packages were utilized, including FlowScreen, ggplot2, grwat, and baseflow. Additionally, Gustard-type flow duration curves for the selected rivers were plotted and analyzed. Furthermore, violin plots of monthly discharge values for the two studied rivers were generated and analyzed.

*Correspondin Author: Raof Mostafazadeh, E-mail: raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

How to cite this article: Mostafazadeh, Raof; Azizi Mobaser, Javanshir; Mirzaei, Shahnaz. (2025). Comparison of temporal changes in flow regime components in two natural and affected by dam construction rivers in Ardabil Province. *Hydrogeomorphology*, 12(42): 137-155.

DOI: [10.22034/hyd.2025.64537.1765](https://doi.org/10.22034/hyd.2025.64537.1765)



Copyright: © by the authors

Publisher: University of Tabriz

Results and Discussion

The results indicate change points in all three flow components (annual maximum, Q_{10} , Q_{25} , low flow, and baseflow) in both natural and regulated rivers, with more pronounced changes occurring in the regulated river after dam construction. In the natural Khiavchai River, high flow and peak discharge showed no significant trends, whereas in the regulated Balikhlochai River, all flow components exhibited significant decreasing trends. The results indicated a logarithmic distribution of monthly river discharge at the Pol-Almas station (before and after dam construction), showing an increase in the frequency of discharge values below the median within the first quartile range. Consequently, the mean monthly discharge decreased, and the data dispersion also changed following dam construction.

Conclusions

Comparison of flow duration curves and violin plots revealed substantial reductions in minimum flows and baseflows in the regulated river, with monthly discharge distributions strongly influenced by dam regulation. Changes in the natural river regime were influenced by variations in snow storage on Mount Sabalan, alterations in snowmelt patterns due to temperature changes, and a decline in precipitation (rain and snow). In contrast, changes in the flow regime components of the Balikhlochai River resulted from the construction of the Yamchi Dam and the utilization of river flow for drinking water supply in Ardabil, irrigation network support for the Yamchi Dam, and water allocation for Lake Shorabil. Comprehensive evaluation of river regime changes and flow components enables prediction of trends and effective water management for environmental flow allocation.



مقایسه تغییرات زمانی مؤلفه‌های رژیم جریان در دو رودخانه طبیعی و تحت تأثیر احداث سد در استان اردبیل



رئوف مصطفی‌زاده^{۱*}، جوانشیر عزیزی مبصر^۲، شهناز میرزایی^۳

۱- دانشیار گروه منابع طبیعی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. raoofmostafazadeh@uma.ac.ir
 ۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی و عضو پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. ja.mobaser22@gmail.com
 ۳- دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. mirzaeishahnaz@gmail.com

چکیده

رژیم جریان رودخانه می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلف اقلیمی و انسانی (تغییر کاربری اراضی، احداث سد، انحراف و برداشت جریان) تغییر نماید و باعث تغییر میزان آب قابل برداشت و تغییر الگوی تخصیص جریان‌های محیط زیستی می‌شود. در این پژوهش تغییرات مؤلفه‌های رژیم جریان در دو رودخانه طبیعی و تحت تأثیر احداث سد در استان اردبیل مورد مقایسه قرار گرفته است. در این تحقیق برای تهیه نمودارهای مختلف، تعیین نقاط تغییر و روندهای زمانی معنی‌دار مربوط به آماره‌های جریان بالا، جریان پایین و یا جریان پایه از برنامه‌نویسی R استفاده شده است. بر اساس نتایج در هر دو رودخانه با جریان طبیعی و تنظیمی، نقاط تغییر در هر سه مؤلفه جریان بالا (حداکثر سالانه، Q_{10} و Q_{25})، جریان پایین و دبی پایه اتفاق افتاده است، در حالی که در رودخانه تنظیمی این تغییرات بعد از احداث سد بیش‌تر بوده است. تغییر مقادیر مؤلفه‌های جریان نشان داد که در رودخانه طبیعی خیاوچای جریان حداکثر و دبی‌های بالا فاقد روند معنی‌دار بوده است. این در حالی است که در رودخانه تنظیم شده بالخلوچای، همه مؤلفه‌های جریان روند کاهشی معنی‌دار را نشان دادند. مقایسه منحنی تداوم جریان و نمودارهای ویولونی دو رودخانه نشان داد که در رودخانه تحت تأثیر احداث سد، مقادیر دبی‌های کمینه و جریان پایه دچار کاهش شدید معنی‌دار شده اند و توزیع مقادیر دبی ماهانه تحت تأثیر اثر تنظیمی است. به‌عنوان نتیجه‌گیری، ارزیابی جامع تغییر رژیم رودخانه و مؤلفه‌های جریان امکان پیش‌بینی روند تغییرات و مدیریت آب از نظر تخصیص جریان محیط زیستی را فراهم خواهد نمود.

کلیدواژه‌ها

دبی پایه، رژیم رودخانه، منحنی تداوم جریان، رودخانه بالیخلوچای، رودخانه خیاوچای

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۳۰

* نویسنده مسئول: رئوف مصطفی‌زاده

raoofmostafazadeh@uma.ac.ir

ارجاع به این مقاله: مصطفی‌زاده، رئوف؛ عزیزی مبصر، جوانشیر؛ میرزایی، شهناز. (۱۴۰۳).

مقایسه تغییرات زمانی مؤلفه‌های رژیم جریان در دو رودخانه طبیعی و

تحت تأثیر احداث سد در استان اردبیل. هیدروژنومورفولوژی، ۱۲(۴۲):

۱۳۷-۱۵۵.

شناسه دیجیتال مقاله : DOI:10.22034/hyd.2025.64537.1765



Copyright: ©2025 by the authors

Publisher: University of Tabriz

مقدمه

رژیم جریان را می‌توان تغییرات در جریان رودخانه به‌عنوان پاسخی به پالس‌های جریان منتقل شده از طریق شبکه آبراهه‌ها در یک حوضه آبخیز نامید (پوف^۱ و همکاران، ۱۹۹۷: ۷۷۰). رژیم جریان نقش کلیدی در تنظیم فرآیندهای ژئومورفیک ایفا می‌کند، کانال‌های رودخانه و دشت‌های سیلابی را شکل می‌دهد، فرآیندهای اکولوژیکی که بر تاریخچه زندگی موجودات آبی حاکم است را تنظیم می‌کند، و تعیین‌کننده اصلی تنوع زیستی موجود در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای است (ریشتر^۲ و همکاران، ۱۹۹۷: ۲۳۲). تغییر رژیم جریان رودخانه شامل تغییرات در مؤلفه‌های مختلف جریان (مقادیر دبی‌های بالا، دبی‌های پایین و جریان پایه)، زمان‌بندی، تداوم جریان و شدت تغییرات است (رزینسکی^۳ و همکاران، ۲۰۲۱: ۴۹۶۲). دبی‌های بالا در دوره‌های بارش شدید و رویدادهای بارش ناگهانی اتفاق می‌افتند، که تغییر آن نشان‌دهنده تغییرات در الگو، مقدار و شدت بارش است که باعث ایجاد سیلاب‌ها، رواناب‌های سریع و تغییرات سطح آب می‌شوند (هنافورد و بویس^۴، ۲۰۱۲: ۱۵۹). دبی‌های پایین در دوره‌های کم‌بارش و خشکسالی جریان دارند و تغییرات آن برآیند تبخیر و تعرق گیاهان، و مصرف آب است، که بر تأمین آب برای اهداف مختلف تأثیر دارند. تغییرات جریان پایه نیز منعکس‌کننده تغییرات در منابع آبی زیرزمینی، روند اشباع خاک و تغذیه آب رودخانه هستند که ضمن تغذیه تالاب‌ها، حیات موجودات در اکوسیستم‌های آبی را تضمین می‌کنند (یائو^۵ و همکاران، ۲۰۲۱: ۲).

تغییر رژیم جریان رودخانه تحت تأثیر عواملی مانند تغییرات در مؤلفه‌های اقلیمی و فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرد (گیسون^۶ و همکاران، ۲۰۰۶: ۴۱۵۶؛ نوروززاده و همکاران، ۲۰۲۳: ۱۶۸). تغییرات در مؤلفه‌های اقلیمی مانند افزایش دما، تغییر الگوی بارش و افزایش تبخیر/تعرق می‌توانند مقدار و زمان‌بندی دبی‌های بالا و پایین و یا ذوب برف را تغییر دهند (اشنایدر^۷ و همکاران، ۲۰۱۳: ۳۲۶). فعالیت‌های انسانی با اهدافی از قبیل تأمین آب، حمل و نقل، کنترل سیل، و تغییر کاربری اراضی بر روی رژیم جریان تأثیر می‌گذارند. تغییر کاربری اراضی تأثیر قابل توجهی بر رژیم جریان دارند، توسعه شهری، گسترش اراضی کشاورزی و تغییر پوشش گیاهی باعث تغییر در نفوذپذیری خاک، تبخیر و تعرق، سرعت رواناب و شاخص جریان پایه می‌شوند (یانگ^۸ و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۹۶۱). افزایش نیاز به آب در کنار تغییر الگوی بارش در اثر تغییرات اقلیمی باعث افزایش احداث سازه‌های مدیریت آب برای تأمین تقاضای بخش‌های مختلف شده است که منجر به تغییر رژیم‌های هیدرولوژیکی رودخانه‌ها شده و نیاز به درک اثرات سدها بر رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها به‌منظور مدیریت جریان رودخانه و حفظ ارزش‌های اکولوژیکی رودخانه ضرورت پیدا نموده است (مصطفی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۴: ۱۰۲). احداث سدها از طریق تنظیم جریان، می‌توانند دبی‌های بالا و پایین را کنترل کنند (امینی و همکاران، ۲۰۱۹: ۲). از طرفی، انحراف و برداشت جریان برای مصارف مختلف دبی‌های پایه را کاهش خواهد داد. کاهش جریان در فصول کم‌آبی می‌تواند اتصال طولی و عرضی را در رودخانه کاهش دهند و حرکت موجودات آبی را محدود کنند. جریان‌های بالا می‌توانند ضمن رفع کمبود اکسیژن جریان و تأمین مواد آلی، آلاینده‌ها را کاهش دهند. پالس‌های جریان بالا معمولاً دسترسی بهتر به مناطق بالا یا پایین دست موجودات متحرک را تسهیل می‌کنند و محدوده تبادل مرطوب زیر بستر رودخانه^۹ را برای تغذیه بی‌مهرگان تغذیه خواهد نمود (پالمر و روحی^{۱۰}، ۲۰۱۹: ۳). افزایش یا کاهش آبدی جریان می‌تواند به تغییر اکوسیستم‌های آبی، تراز آب زیرزمینی، و میزان رسوبات و در نتیجه تخریب گونه‌های زیستی منجر شود (براگ^{۱۱} و همکاران، ۲۰۰۵: ۵۰۸). افزایش تعداد و شدت سیلاب‌ها باعث تخریب زیرساخت‌ها و تلفات انسانی می‌شود و کاهش آبدی رودخانه به کاهش جریان‌های محیط‌زیستی، منجر به تهدید حیات آبیان و تخریب زنجیره غذایی خواهد شد. برای محاسبه شاخص‌های تغییر رژیم جریان، تعیین روندها و نقاط تغییر، ابزارهای مختلفی توسعه یافته است، در این میان، روش‌های گرافیکی و نموداری می‌تواند تغییر در الگوها و روندها را به وضوح نمایش دهد (دیرائور و ویتفیلد^{۱۲}، ۲۰۱۷: ۲). برنامه‌نویسی به زبان R یک روش

1- Poff

2- Richter

3- Wrzesinski

4- Hannaford and Buys

5- Yao

6- Gibson

7- Schneider

8- Yang

9- Hyporheic

10- Palmer and Ruhi

11- Bragg

12- Dierauer and Whitfield

توانمند در تحلیل داده‌های هیدرولوژیک است که امکانات مفیدی در تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها دارد (سونسون^۱ و همکاران، ۲۰۰۵: ۸۱۲). مزیت اصلی برنامه‌نویسی در R، تحلیل داده‌ها، قابلیت تکرارپذیری و انعطاف‌پذیری آن است که امکان ذخیره و تغییر کدها و تحلیل‌ها را فراهم می‌نماید (سالتر^۲ و همکاران، ۲۰۱۹: ۲۹۴۱).

مطالعات متعددی در راستای بررسی تغییرات رژیم جریان رودخانه در داخل و خارج از کشور انجام شده است. اثرات احداث سدهای بزرگ بر شرایط جریان و پارامترهای هیدرولوژیکی رودخانه کرخه توسط آذرنگ و همکاران (۲۰۱۷: ۱۱)، مطالعه شد و به این نتیجه رسیدند که با توجه به احداث سد مخزنی کرخه، تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی در سطح حوضه آبریز کرخه و پیامد آن خشکسالی‌های اخیر تغییرات گسترده‌ای در شرایط رژیم جریان رودخانه کرخه و پارامترهای هیدرولوژیکی آن به وجود آمده است. هم‌چنین بیان نمودند که شعاع هیدرولوژیکی رودخانه نسبت به شرایط قبل از ساخت سد به ازای دبی‌های مشخصه حداقل، متوسط و حداکثر به ترتیب ۳۳ درصد، ۲۸ درصد و ۵۹ درصد کاهش داشته است. تحلیل تغییرات شاخص‌های هیدرولوژیک جریان رودخانه کارون تحت تأثیر احداث سد گتوند توسط نادری و همکاران (۲۰۲۰: ۷۶۵)، با استفاده از رویکرد محدوده تغییرپذیری انجام شد. ایشان با محاسبه پارامترهای هیدرولوژیکی در ایستگاه‌های هیدرومتری ملاثانی و اهواز با استفاده از نرم‌افزار IHA، تغییرات جریان رودخانه کارون را در بازه زمانی سال ۱۳۶۲ تا ۱۳۹۷ مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که مقادیر میانگین دبی در اکثر ماه‌ها، کاهش معنی‌داری داشته‌اند. مقادیر جریان‌های حداکثر جریان روزانه، هفتگی، ماهانه و سه ماهه نشان می‌دهد که احداث سد مذکور، اثر منفی بر دبی جریان رودخانه کارون داشته است. اثرات احداث سد سهند بر شرایط هیدرولوژیکی و شکل هندسی رودخانه توسط اصغری سراسکانرود و پیروزی (۱۴۰۰) مطالعه شد و ایشان به این نتیجه رسیدند که از لحاظ شاخص‌های هیدرولوژیکی Q_5 ، Q_{10} ، Q_{15} ، دبی حداقل، دبی حداکثر و دبی مد، بین دو دوره قبل و بعد از احداث سد تفاوت معناداری دیده می‌شود. هم‌چنین، پس از ارزیابی اثرات احداث سدهای بوستان، گلستان و وشمگیر بر شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیک در حوضه آبخیز گرگانرود توسط دائی‌چینی و همکاران (۲۰۲۲: ۱۸۵)، مشخص شد که شاخص‌های هیدرولوژیک جریان ماهانه 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 آق‌قلا در پایین‌دست سد وشمگیر ۴۹ درصد مقدار دبی جریان رودخانه در دوره‌های بعد از احداث سدها کاهش داشته است. مطالعه تغییرات کمی پارامترهای هیدرولوژیکی جریان و مؤلفه‌های محیط‌زیستی رودخانه جاجرود را در بازه پایین‌دست سد لتیان توسط رضایی^۳ و همکاران (۲۰۲۲: ۷۹۷)، با استفاده از ابزار شاخص تغییرات هیدرولوژیکی و محدوده رویکرد تغییرپذیری در دوره ۷۰ ساله (۱۳۹۶-۱۳۲۶) شان داد که درجه تغییرات تعداد ۲۴ متغیر جریان در دامنه زیاد تا متوسط است، که نشان‌دهنده تغییرات زیاد هیدرولوژیکی رودخانه جاجرود است و متوسط، بیشینه و کمینه جریان در همه ماه‌های سال به ترتیب ۵۷، ۹۴ و ۲۱ درصد کاهش یافته است. هم‌چنین نتایج ایشان نشان داد که بر اساس دامنه تغییرپذیری، شرایط جریان پس از احداث سد لتیان، اکولوژی رودخانه را تأمین ننموده است. تحلیل اثر تنظیمی سد شهرچای بر تغییرات شاخص سلامت هیدرولوژیک جریان در بازه زمانی ۱۹۵۱ الی ۲۰۱۷، توسط مصطفی‌زاده و همکاران (۲۰۲۴: ۱۰۱)، مشخص نمود که میزان انحراف همه زیرشاخص‌های هیدرولوژیک در دوره بعد از احداث سد نسبت به دوره قبل از احداث سد افزایش پیدا کرده است و بیش‌ترین میزان انحراف در زیرشاخص‌ها در دوره‌های مرجع و بهره‌برداری از سد مربوط به شاخص وقوع جریان‌های سیلابی بوده است و هم‌چنین نتایج نشان داد 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.

در خارج از کشور با استفاده از مدل THREW، اثرات تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر رژیم جریان رودخانه لانگانگ-مکونگ^۴ چین، ژنگ^۵ و همکاران (۲۰۲۳: ۱)، نشان دادند که شاخه‌ها و ذخایر فرعی در مسیر رودخانه قبل از رسیدن به مخزن اصلی سدهای بزرگ، موجب کاهش جریان حتی در ماه‌های مرطوب شده است. ایشان هم‌چنین بیان داشتند که تأثیر فعالیت‌های انسانی در طول دوره بررسی

¹- Svensson

²- Slater

³- Rezaei

⁴- Lancang-Mekong

⁵- Zhang

بر روی رژیم رودخانه نسبت به تغییر اقلیم بیش‌تر است. در بررسی تغییرات رژیم جریان رودخانه لیوجیاپینگ در چین طی احداث سد، فنگ^۱ و همکاران (۲۰۲۳: ۱)، از شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی توسعه‌یافته (IIHA) در برآورد شاخص‌ها و از رویکرد محدوده تغییرپذیری و رویکرد هیستوگرام تطبیقی در ارزیابی تغییرات استفاده کردند و بیان کردند که رژیم جریان به‌طور قابل توجهی بعد از احداث سد تغییر کرده است. پیش از ارائه چارچوب کمی‌سازی اثرات اقلیم، کاربری اراضی و سد بر رژیم جریان رودخانه گانجیانگ چین، توسط هووانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۴: ۱)، ابتدا جریان رودخانه تحت عوامل مؤثر با مدل SWAT شبیه‌سازی شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار IHA، تغییرات جریان رودخانه مطالعه شد. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که ساخت سد منجر به افزایش قابل توجه در جریان فصل خشک و شاخص‌های حداقل جریان و در عین حال کاهش شاخص‌های حداکثر جریان شده است. در مقابل، تغییر اقلیم منجر به کاهش شاخص‌های جریان کمینه و افزایش شاخص‌های حداکثر جریان شده است. هم‌چنین تغییرات اقلیم نشان‌دهنده افزایش فراوانی و مدت زمان پالس‌های جریان است. در بررسی تغییرات رژیم رودخانه‌های قطب شمال طی احداث سد و تغییر اقلیم در دوره ۱۲۰-۴۰ ساله پاترو و همکاران (۲۰۲۴: ۱) از خروجی برخی رودخانه‌ها در روسیه، ایالات متحده، کانادا و نروژ، از نرم‌افزار IHA و رویکرد محدوده تغییرپذیری استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد که در طی تغییرات اقلیمی مقدار دبی سالانه افزایش داشته است که در فصل پاییز به‌دلیل تأخیر در زمان بندی وقوع یخبندان بیش‌تر است. هم‌چنین در طی احداث سد‌هایی با اهداف آبیاری، جریان کم رودخانه‌ها در ماه‌های خشک سال افزایش یافته است.

تغییر در رژیم‌های هیدرولوژیکی در اثر اقدامات انسانی مانند احداث سد باعث ایجاد تغییرات مکانی و زمانی در سیستم‌های رودخانه‌ای شده که در نهایت به تخریب خدمات طبیعی اکوسیستم رودخانه و تهدید تنوع زیستی منجر می‌شود (اسفندیاری درآباد و همکاران، ۲۰۱۹؛ نادری و همکاران، ۲۰۲۰: ۷۶۶). برای حفظ سلامت اکولوژی رودخانه، اهمیت بررسی و مدیریت مناسب تغییرات رژیم جریان بسیار حائز اهمیت است. شناسایی الگوهای موجود در داده‌های ثبت شده می‌تواند در تعیین تغییرات ناشی از اثرات انسانی، طبیعی و یا ناهمگنی در داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد (پتر^۳؛ ۲۰۰۹: ۱۰۷۲). به‌طور کلی، تغییرات در مؤلفه‌های اقلیمی و انسانی می‌توانند تأثیرات چندگانه‌ای بر رژیم جریان رودخانه داشته باشند و بررسی این تغییرات و تأثیرات آن‌ها می‌تواند در تدوین سیاست‌ها و استراتژی‌ها برای مدیریت منابع آب و حفاظت از محیط‌زیست مفید باشد. هدف پژوهش حاضر تعیین تغییرات مؤلفه‌های رژیم جریان (تعیین نقاط تغییر و روندهای زمانی معنی‌دار) و مقایسه آن در دو رودخانه طبیعی و تحت تأثیر احداث سد در استان اردبیل است.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش به‌منظور تعیین تغییرات مؤلفه‌های رژیم جریان، رودخانه خیاوچای (ایستگاه پل سلطانی) به‌عنوان یک رودخانه طبیعی و رودخانه بالیخلوچای (ایستگاه پل الماس) به‌عنوان یک رودخانه تحت تأثیر سد در نظر گرفته شده است. موقعیت جغرافیایی رودخانه‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران و استان اردبیل در شکل ۱ نشان داده شده است. رودخانه خیاوچای در بالادست شهر مشگین‌شهر واقع شده و از ارتفاعات سبلان سرچشمه می‌گیرد و از زیرشاخه‌های رودخانه قره‌سو است. با توجه به ماهیت کوهستانی رودخانه، شیب بستر رودخانه در طول مسیر نسبتاً بالا بوده و بستر و کناره‌های رودخانه درشت دانه و مشتمل بر شن و ماسه، سنگ و قله‌سنگ است. وسعت محدوده بالادست رودخانه برابر ۱۱۵ کیلومتر مربع و متوسط بارش منطقه برابر ۳۷۵ میلی‌متر است. اقلیم منطقه مورد مطالعه بر اساس روش طبقه‌بندی دومارتن اصلاح شده به‌عنوان نیمه‌خشک سرد طبقه‌بندی می‌شود. رژیم آبدهی رودخانه خیاوچای از دامنه‌های برفی سبلان سرچشمه می‌گیرد و مقدار متوسط دبی سالانه برابر ۰/۷۶ مترمکعب در ثانیه ثبت شده است (مصطفی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۴: ۷۷۶۰؛ ستایشی نسا و همکاران، ۲۰۲۳). رودخانه دائمی بالیخلوچای از کوه‌های بزقوش و سبلان سرچشمه می‌گیرد و پس از

1- Liujiaping

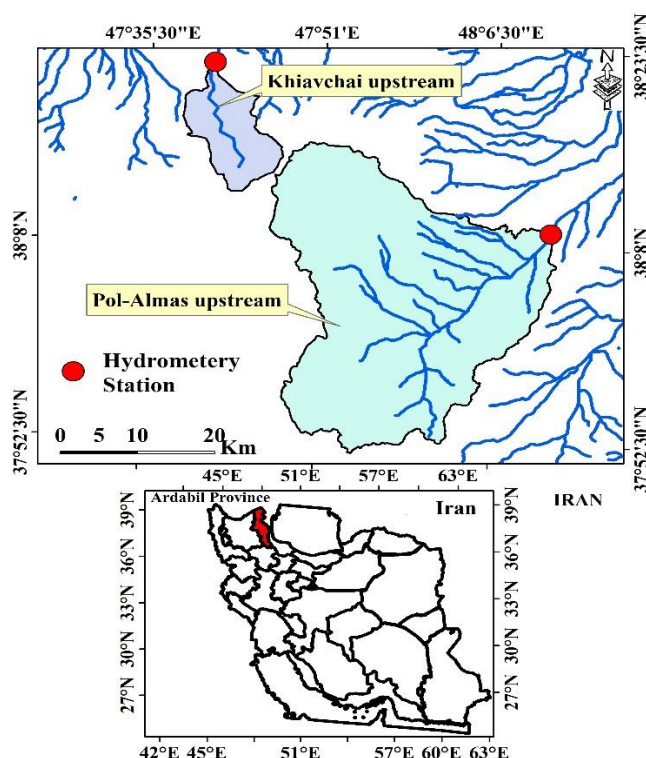
2- Fang

3- Ganjiang

4- Huang

5- Petts

آبیاری اراضی زراعی شهرستان‌های نیر و اردبیل به مخزن سد ذخیره‌ای خاکی یامچی تخلیه می‌شود. ایستگاه هیدرومتری پل الماس در پایین‌دست سد یامچی واقع شده است. مساحت بالادست ایستگاه مذکور حدود ۱۰۷۰ کیلومتر مربع با اقلیم نیمه‌خشک سرد است که تأمین‌کننده ذخیره سد یامچی با حجم مخزن مفید ۸۰ میلیون متر مکعب بوده و به مصرف شرب و کشاورزی شهر اردبیل می‌رسد. متوسط بارش سالانه محدوده بالادست حدود ۳۰۰ میلی‌متر است. میانگین دبی طولانی‌مدت ایستگاه هیدرومتری پل الماس ۳/۱۹ متر مکعب بر ثانیه گزارش شده است (نصیری‌خیای، و همکاران، ۲۰۱۹: ۸۵۵).



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی رودخانه‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران و استان اردبیل

Figure (1): Geographical location of the rivers and river gauge stations in Iran and Ardabil province

روش پژوهش

در این پژوهش، ابتدا داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های پل سلطانی و پل الماس از شرکت آب منطقه‌ای استان اردبیل اخذ شد و در ادامه بر اساس فرمت مورد نیاز مرتب شدند. دوره زمانی داده‌های مورد مطالعه در هر دو ایستگاه منتخب در تحقیق حاضر از سال ۱۳۴۸ تا ۱۴۰۰ بوده است. در ادامه داده‌های دبی روزانه جریان در محیط برنامه‌نویسی R فراخوانی شدند. پس از تبدیل داده‌ها به فرمت سری زمانی تبدیل شدند و در ادامه، برای تعیین تغییرات ویژگی‌های جریان و رسم نمودارهای غربالگری داده‌ها شامل پلات داده‌ها، تعیین نقاط تغییر و روندهای زمانی داده‌های جریان بالا، جریان کم و جریان پایه در محیط نرم‌افزار R از ادامه از پکیج‌های مختلف شامل FlowScreen، ggplot2 و grwat استفاده شدند (ویتفیلد، ۲۰۱۲: ۲۶؛ دیراور^۲ و همکاران، ۲۰۱۷: ۲۷۱؛ اندرسون^۳ و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۰۹).

در بسته مذکور، روند و نقاط تغییر در سری زمانی جریان روزانه تحلیل می‌شود و این ابزار برای ترسیم و محاسبه تعداد زیادی از شاخص‌های جریان است. در بسته مذکور شاخص‌های مختلف برای جریان سیلابی شامل داده‌های حداکثر سالانه، دبی حداکثر، فاصله

¹- Dierauer and Whitfield
²- Dierauer

³- Anderson

زمانی بین وقایع سیلابی، دبی با احتمال وقوع ۸۰ و ۹۰ درصد، زمان وقوع جریان با احتمال وقوع ۲۵ و ۷۵ درصد و فاصله زمانی بین دو دبی مذکور محاسبه می‌شود. هم‌چنین شاخص‌های جریان کمینه شامل دبی با احتمال وقوع ۱۰ و ۲۵ درصد شروع، مرکز و پایان خشکسالی، مدت و بزرگی خشکسالی، داده حداقل سالانه، مدت میانگین جریان ۷ روزه و ۱۰ روزه است (دیراور^۱ و همکاران، ۲۰۱۷). در خصوص جریان پایه نیز شاخص‌های متوسط جریان روزانه، حداقل، متوسط و حداکثر حجم جریان پایه، زمان وقوع ۲۵ و ۷۵ درصد جریان پایه و فاصله زمانی بین آنها محاسبه می‌شود. در بسته مذکور، تفکیک دبی پایه از جریان روزانه بر اساس فیلتر اکهارت^۲ صورت می‌گیرد که در رابطه ۱ نشان داده شده است (اکهارت^۳، ۲۰۱۲).

$$b_k = \frac{(1 - BFI_{max})a b_{k-1} + (1 - a)BFI_{max} y_k}{1 - a BFI_{max}} \quad (1)$$

که در آن، با توجه به اینکه b_k کوچکتر و مساوی y_k است، لذا b جریان پایه، y دبی روزانه و k عدد گام زمانی (روز) است. فیلتر دارای دو پارامتر است: ثابت فروکش a و حداکثر مقدار جریان شاخص جریان پایه BFI_{max} است که برابر نسبت طولانی مدت جریان پایه به جریان کل است که توسط یک الگوریتم برآورد می‌شود.

پس از محاسبه شاخص‌های مستخرج از رژیم جریان رودخانه، در صورت وجود روند تغییرات زمانی معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۵ و ۹۹ درصد، نمودار روند بر اساس صعودی و یا نزولی بودن تغییرات رسم می‌شود (بارد^۴ و همکاران، ۲۰۱۵: ۱۸۲۷). در این بسته آماری، نقاط تغییر و روندهای زمانی معنی‌دار را در شاخص‌های جریان سیلابی، جریان کمینه و جریان پایه بر اساس روش رگرسیون خطی پیش‌سفیدشده محاسبه می‌شود. در پیش‌سفیدسازی^۵ قبل از آزمون روند، اثر خودهمبستگی^۶ از داده‌های سری زمانی با اعمال روش اتورگرسیون حذف می‌شود تا نتایج دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری حاصل شود (فلمینگ و کلارک^۷، ۲۰۰۲؛ بایزید و اونوز^۸، ۲۰۰۷). خودهمبستگی می‌تواند به اشتباه وجود یک روند را نشان دهد یا بر میزان و معنای آماری آن تأثیر بگذارد. در رگرسیون خطی رابطه بین تغییرات شاخص‌های محاسباتی نسبت به زمان تعیین خواهد شد و معنی‌داری این تغییرات از نظر آماری آزمون خواهد شد (نیازی و همکاران، ۲۰۱۲).

علاوه بر این، منحنی تداوم جریان از نوع گوستارد رودخانه‌های انتخابی رسم و مورد تحلیل قرار گرفتند (گوستارد^۹، ۱۹۹۲: ۱). منحنی تداوم جریان رودخانه برای نشان دادن تغییرپذیری جریان رودخانه در یک بازه زمانی خاص استفاده می‌شود. این نمودار بزرگی جریان را در برابر درصد زمانی که یک جریان خاص برابر یا از آن فراتر می‌رود ترسیم می‌کند و اطلاعاتی در خصوص توزیع جریان‌های زیاد، متوسط و کم در داده‌های دبی جریان رودخانه ارائه می‌دهد. منحنی‌های تداوم جریان گوستارد مجموعه‌ای از منحنی‌های استاندارد شده هستند که به‌عنوان الگوهایی برای طبقه‌بندی و مقایسه رژیم‌های جریان در شرایط مختلف هیدرولوژیکی توسعه یافته‌اند. منحنی‌های گوستارد به‌ویژه برای درک اثرات تغییر در مؤلفه‌های موثر بر جریان رودخانه مانند فعالیت‌های انسانی، انحراف جریان و توسعه شهری بر تغییرپذیری جریان مفید هستند (هولمز^{۱۰} و همکاران، ۲۰۰۲). منحنی‌های گوستارد با استاندارد نمودن دبی‌های جریان در مقیاس مشترک، امکان شناسایی آسان‌تر انحراف از الگوهای جریان طبیعی را فراهم می‌کنند (بران و گوستارد^{۱۱}، ۱۹۷۷). منحنی‌های تداوم جریان به‌عنوان معیاری برای ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند و در تعیین پایداری استفاده از آب و استراتژی‌های حفظ یکپارچگی اکولوژی رودخانه از طریق مدیریت جریان زیست محیطی، کنترل سیل و کاهش خشکسالی مفید هستند (ووگل و فنسی^{۱۲}، ۱۹۹۵). در ادامه نمودارهای ویولنی مقادیر دبی جریان ماهانه در دو رودخانه مورد مطالعه ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

نتایج و بحث

1- Dierauer
2- Eckhardt
3- Eckhardt
4- Bard
5- Prewhitening
6- Autocorrelation

7- Fleming and Clarke
8- Bayazit and Önöz
9- Gustard
10- Holmes
11- Beran and Gustard
12- Vogel and Fennessey

برخی از خصوصیات مهم آماری داده‌های دبی روزانه دو رودخانه مورد تحلیل (دارای رژیم جریان طبیعی و رژیم تحت تاثیر سد) در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): ویژگی‌های مهم آماری داده‌های دبی روزانه در دو ایستگاه منتخب در استان اردبیل

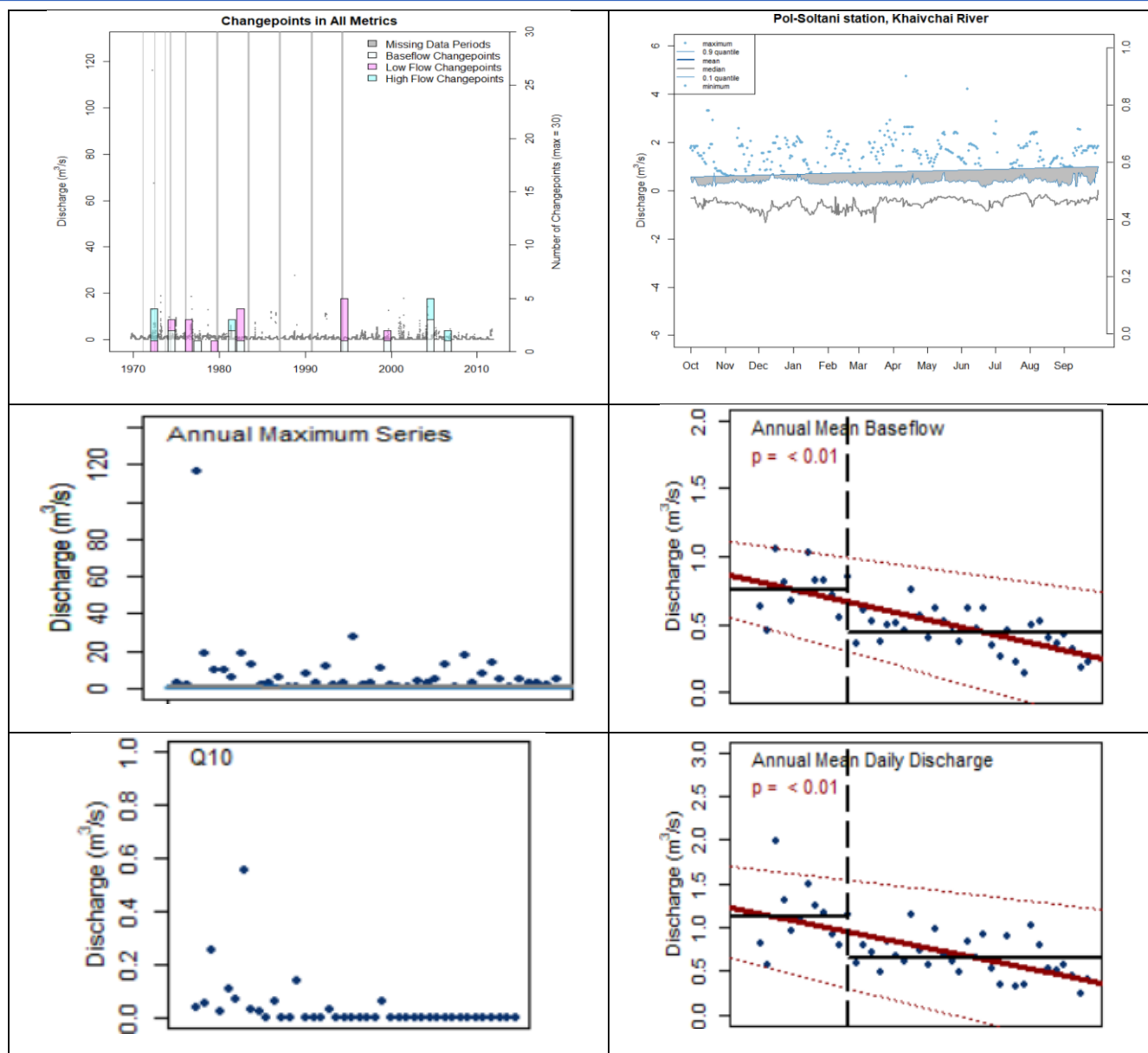
Table (1): Important statistical characteristics of daily discharge data at two selected stations in Ardabil province

ایستگاه پل سلطانی	ایستگاه پل الماس-بعد از احداث سد	ایستگاه پل الماس-قبل از احداث سد	آماره
۰/۷۷	۱/۲۲	۳/۸۰	میانگین
۰/۶۱	۰/۶۲	۳/۴۷	میانه
۰/۰۰	۰/۰۱	۴/۵۰	نما
۱/۵۶	۱/۷۵	۳/۸۳	انحراف از استاندارد
۲/۴۳	۳/۰۵	۱۴/۶۴	واریانس نمونه
۲۲۶۲/۵۲	۴۵/۱۷	۱۷۴/۵۶	کشیدگی
۳۵/۰۲	۴/۳۵	۷/۶۳	چولگی
۱۱۶/۰۰	۳۳/۰۰	۱۴۲/۴۸	دامنه تغییرات
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	حداقل
۱۱۶/۰۰	۳۳/۰۰	۱۴۲/۴۸	حداکثر

اطلاعات ارائه شده در جدول ۱، نشان‌دهنده تفاوت‌های آماری قابل توجهی میان مقادیر آماره‌های مستخرج از داده‌های دبی در ایستگاه پل الماس (در دو دوره قبل و بعد از احداث سد) است. میانگین دبی از ۳/۸۰ قبل از احداث سد به ۱/۲۲ پس از احداث سد کاهش یافته است و میانه نیز از ۳/۴۷ به ۰/۶۲ کاهش پیدا کرده است، بیانگر کاهش قابل توجه در نقاط مرکزی توزیع داده‌ها پس از احداث سد می‌باشد. تغییرات شاخص‌های تغییرپذیری نیز نشان می‌دهد که انحراف معیار مقادیر دبی روزانه از ۳/۸۳ به ۱/۷۵ کاهش یافته، در حالی که واریانس نمونه از ۱۴/۶۴ به ۳/۰۵ کاهش یافته است. این کاهش‌ها نشان‌دهنده نوسانات کم‌تر در داده‌ها و پایدارتر شدن شرایط پس از احداث سد می‌باشد. مقدار نمای داده‌ها نیز از ۴/۵ به ۰/۰۱ کاهش پیدا کرده است، که نشانگر تغییر در الگوی تکرار مقادیر غالب است. شاخص‌های کشیدگی و چولگی نیز تغییرات قابل توجهی دارند. کشیدگی از ۱۷۴/۵۶ به ۴۵/۱۷ کاهش یافته، که نشانگر کاهش مقادیر دبی‌های بزرگ سیلابی است. چولگی از ۷/۶۳ به ۴/۳۵ کاهش یافته، نشان‌دهنده کاهش در عدم تقارن توزیع داده‌ها پس از احداث سد است. دامنه تغییرات نیز از ۱۴۲/۴۸ به ۳۳/۰۰ کاهش یافته است، که نشان‌دهنده کاهش دامنه داده‌های حداکثر دبی روزانه است.

در خصوص تفاوت میان آمار رودخانه‌های خیاوچای (ایستگاه پل سلطانی) و رودخانه بالیخوچای (ایستگاه پل الماس) نیز باید اشاره شود که مقادیر میانگین دبی در ایستگاه پل الماس بعد از احداث سد ۱/۲۲ و در ایستگاه پل سلطانی ۰/۷۷ است، که کاهش ۰/۴۵ را نشان می‌دهد و بیانگر جریان کم‌تر در پل سلطانی است. میانه داده‌ها در هر دو ایستگاه تقریباً یکسان است (۰/۶۲ و ۰/۶۱)، اما نمای داده‌های دبی در ایستگاه پل الماس ۰/۰۱ و در ایستگاه پل سلطانی برابر صفر است که کاهش مقادیر پرتکرار در پل سلطانی را نشان می‌دهد. انحراف معیار و واریانس داده‌ها (۱/۵۶ و ۲/۴۳) در ایستگاه پل سلطانی در مقایسه با ایستگاه پل الماس (۱/۷۵ و ۳/۰۵) کم‌تر است که نشان‌دهنده نوسانات کم‌تر دبی در پل سلطانی است. کشیدگی داده‌ها در پل سلطانی (۲۲۶۲) نسبت به پل الماس (۴۵) بیش‌تر است، همچنین، چولگی بالاتر پل سلطانی (۳۵/۰۲ در برابر ۴/۳۵) عدم تقارن بیش‌تری را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات نیز در پل سلطانی (۱۱۶) نسبت به پل الماس (۳۳) دامنه وسیع‌تری از مقادیر دبی را نشان می‌دهد.

نتایج گرافیکی غربالگری داده‌ها شامل پلات داده‌ها، نقاط تغییر و روندهای زمانی ویژگی‌های مختلف رژیم جریان در ایستگاه‌های پل سلطانی (ایستگاه دارای جریان طبیعی) و پل الماس (رودخانه تحت تأثیر سد) به ترتیب در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است.



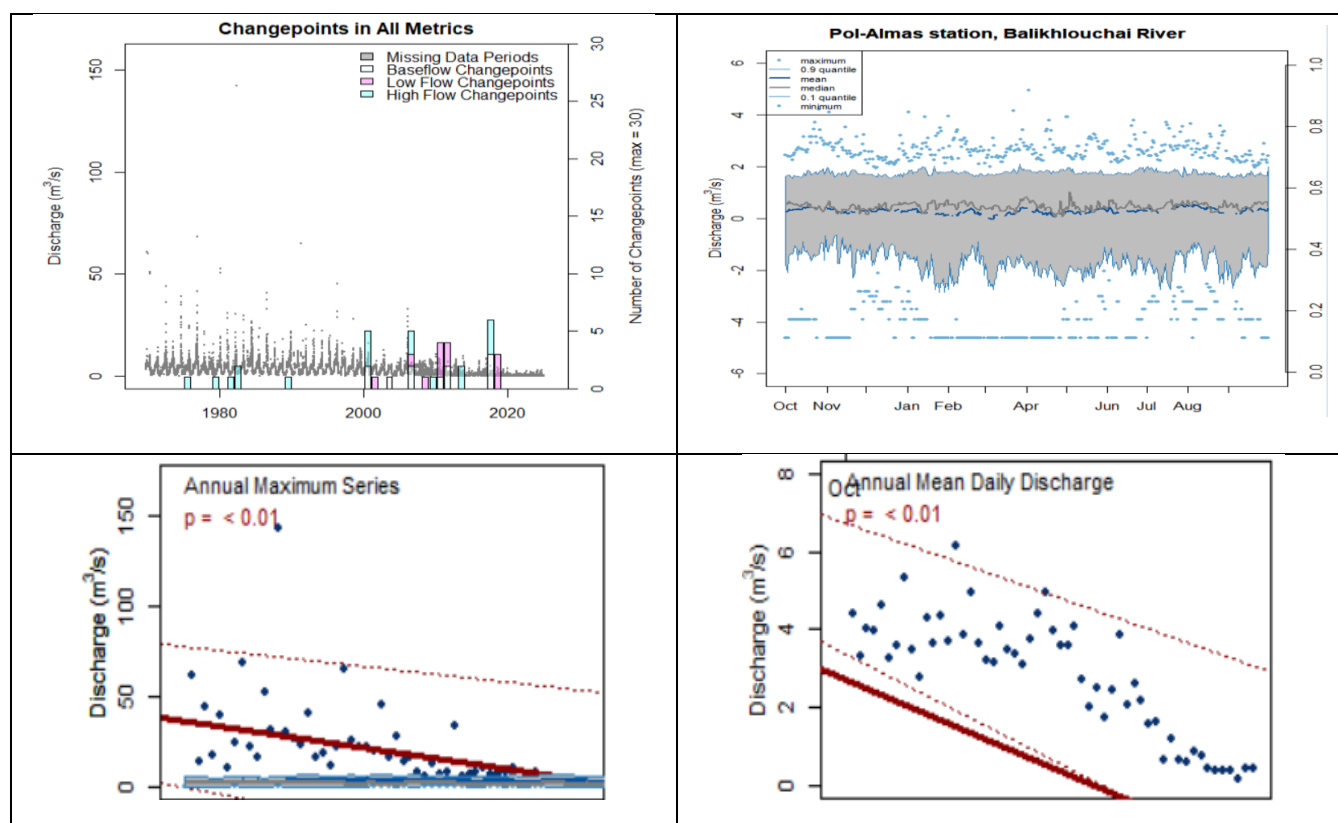
شکل (۲): نمودار تغییرات رژیم جریان، نقاط تغییر و تغییرات مؤلفه‌های جریان ایستگاه پل سلطانی (رودخانه دارای جریان طبیعی)

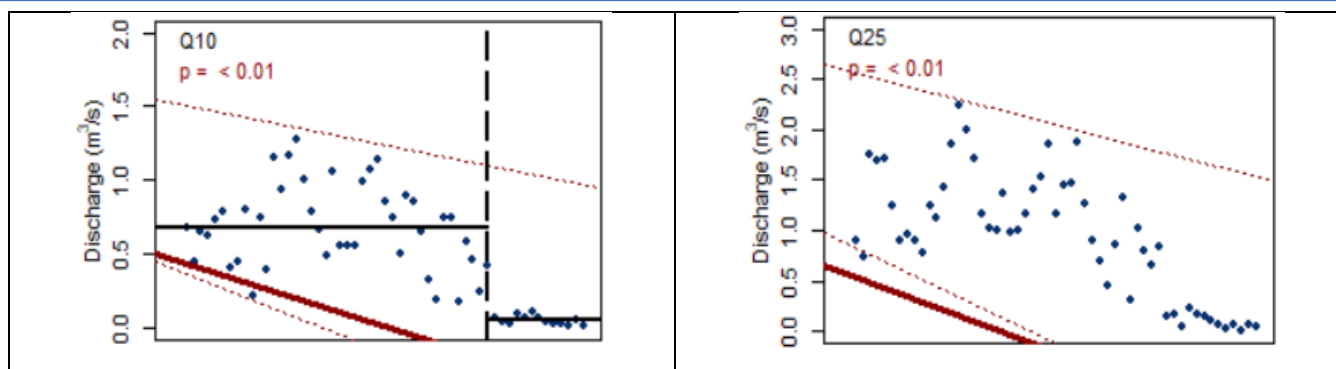
Figure (1): The flow regime changes, change points, and variations in flow components at the Pol-Soltani station (a river with natural flow)

با توجه به شکل (۲) می‌توان گفت که در ایستگاه پل سلطانی نقاط تغییر در هر سه مؤلفه جریان بالا، جریان پایین و دبی پایه اتفاق افتاده است. در خصوص وقوع نقاط تغییر در مؤلفه‌های مختلف رژیم جریان رودخانه می‌توان گفت که این تغییرات ناگهانی می‌تواند ناشی از عوامل مختلف طبیعی و انسانی باشد. از دلایل طبیعی می‌توان به تغییرات اقلیمی، مانند کاهش بارندگی و افزایش دما اشاره کرد که بر میزان تولید رواناب سطحی و نیز تغذیه آب‌های زیرزمینی تأثیر می‌گذارند. تغییر در پوشش گیاهی نیز ممکن است نفوذپذیری خاک را کاهش داده و شدت رواناب سطحی را تغییر دهد. در نتیجه، جریان‌های سیلابی و نیز جریان‌های کمینه دچار نوسانات شدید می‌شوند. هم‌چنین، پدیده‌هایی مانند سیلاب‌های غیرمعمول یا خشکسالی‌های طولانی‌مدت می‌توانند الگوهای رژیم جریان را مختل کرده و نقاط تغییر در سری زمانی ایجاد کنند. در خصوص عوامل انسانی نیز در رودخانه مورد مطالعه می‌توان به مواردی مانند برداشت انحراف جریان اشاره نمود. البته در رودخانه خیاوچای این تغییرات بسیار اندک بوده است و بیش‌تر می‌توان عوامل طبیعی را دخیل دانست. در همین راستا، هووانگ و همکاران (۲۰۲۴)، نیز در مطالعه خود به تأثیر تغییرات اقلیمی بر رژیم جریان رودخانه اشاره کردند. هم‌چنین روند

تغییر دبی‌های حداکثر و جریان بالا (Q_{10}) فاقد روند معنی‌دار بوده‌اند، به عبارتی می‌توان گفت که الگوی وقوع جریان‌های سیلابی در رودخانه مورد مطالعه دارای روند ثابتی در طول زمان بوده است. در حالی که دبی متوسط روزانه جریان و دبی متوسط جریان پایه دارای تغییر کاهشی معنی‌دار هستند.

در همین راستا، آزرنگ و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیق خود کاهش ۳۳ تا ۵۹ درصدی شعاع هیدرولیکی رودخانه کرخه پس از احداث سد را گزارش کردند. نادری و همکاران (۲۰۲۰) نیز کاهش معنی‌دار میانگین دبی در بیشتر ماه‌های سال را پس از احداث سد گتوند نشان دادند، در تحقیق حاضر نیز با کاهش میانگین دبی از $3/80$ به $1/22$ در ایستگاه پل الماس در پایین‌دست سد احداث شده اتفاق افتاده است. علاوه بر این، یافته‌های اصغری سراسکانرود و پیروزی (۱۴۰۰) که تفاوت معناداری در دبی‌های حداقل و حداکثر را نشان دادند، با کاهش دامنه تغییرات و نوسانات دبی روزانه در تحقیق حاضر مشابه است. رضائی و همکاران (۲۰۲۲) کاهش ۵۷ تا ۹۴ درصدی دبی در رودخانه جاجرود را نشان دادند، که با کاهش قابل توجه میانگین و میانه در ایستگاه پل الماس در مطالعه حاضر مطابقت دارد. نتایج مطالعات ژنگ و همکاران (۲۰۲۳) در خصوص اثر تغییر اقلیم و برداشت‌های انسانی بر رژیم دبی جریان در کشور چین و کاهش جریان رودخانه در ماه‌های پرآب نیز همخوانی دارد. علاوه بر این، در مطالعه هووانگ و همکاران (۲۰۲۴) مشخص شد که ساخت سد جریان رودخانه را در فصل خشک افزایش داده است و باعث کاهش شاخص‌های حداکثر جریان شده است.





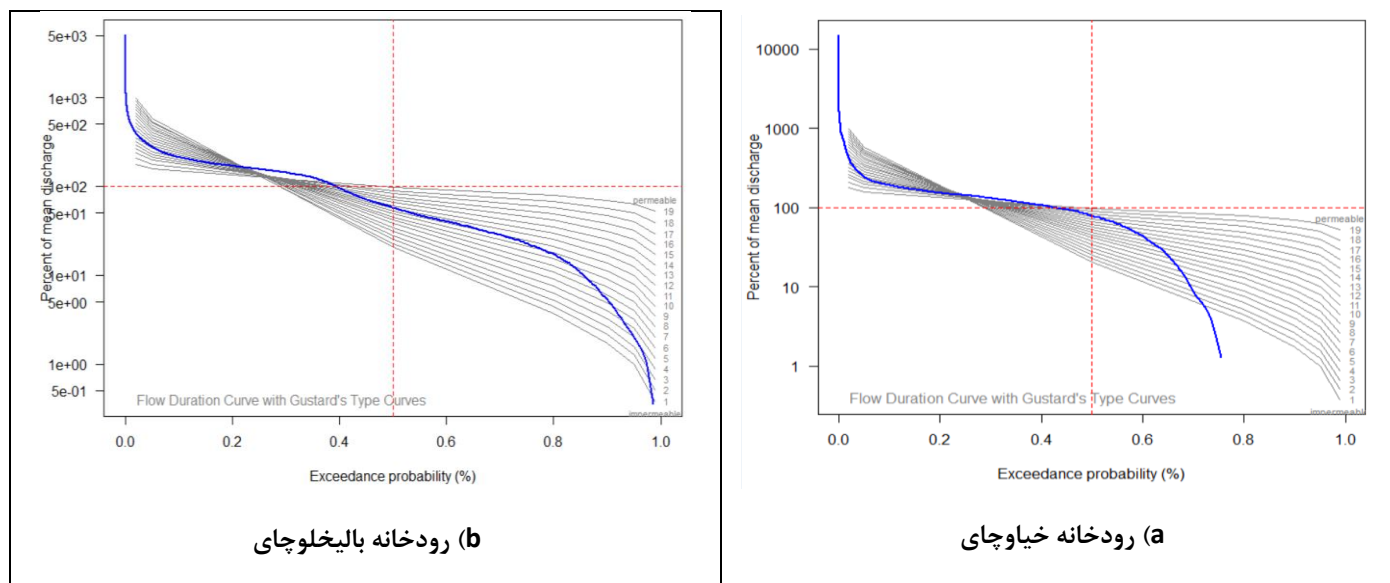
شکل (۳): نمودار تغییرات رژیم جریان، نقاط تغییر و تغییرات مؤلفه‌های جریان ایستگاه پل الماس (رودخانه تحت تأثیر سد)

Figure (2): The flow regime changes, change points, and variations in flow components at the Pol-Almas station (a dam-influenced river).

با توجه به شکل (۳) جریان در ایستگاه پل الماس که تحت تأثیر احداث سد یامچی تنظیم شده است نیز نقاط تغییر را می‌توان با سال احداث سد (۱۳۸۴) همزمان دانست و مشاهده می‌شود که نقاط تغییر در مؤلفه‌های جریان بالا، پایین و دبی پایه مشاهده شده است. هم‌چنین روند کاهشی معنی‌دار در جریان‌های حداکثر سالانه، دبی‌های بالا (دبی با احتمال تجاوز ۱۰ و ۲۵ درصد) و نیز دبی متوسط سالانه مشاهده شده است. روند کاهشی قابل ملاحظه در جریان‌های حداکثر و متوسط پس از احداث سد در مطالعات آذرنگ و همکاران (۲۰۱۷)، نادری و همکاران (۲۰۲۰)، رضائی و همکاران (۲۰۲۲)، و هووانگ و همکاران (۲۰۲۴) نیز مورد تأیید قرار گرفته است.

در خصوص عوامل موثر بر تغییر رژیم جریان رودخانه، روند متغیرهای اقلیمی در ایستگاه تبخیرسنجی بر اساس مطالعه نصیری‌خیای و همکاران (۲۰۱۹) نشان می‌دهد که متغیرهای بارش و دما در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای تغییر معنی‌دار هستند، در حالی که تغییرات روند متغیر تبخیر-تعرق معنی‌دار نیست. به عبارتی می‌توان گفت که بخشی از تغییرات کاهشی در متغیر جریان رودخانه بالیخوچای در ایستگاه پل الماس ناشی از افزایش دما و کاهش بارندگی است. هم‌چنین در خصوص رودخانه خیایوچای و ایستگاه پل الماس، بر اساس نتایج مطالعه اسفندیاری و همکاران (۲۰۲۳) تغییرات آمار بارش و دمای سالانه، به ترتیب دارای روند کاهشی و افزایشی معنی‌دار هستند. در خصوص تغییر کاربری در بالادست حوزه یامچی بر اساس مطالعه مددی و همکاران (۲۰۲۲) در یک دوره ۲۱ ساله، ضمن کاهش سطح مراتع خوب و متوسط، افزایش قابل توجه در وسعت اراضی زراعی (دیم و آبی)، اراضی بایر، مراتع ضعیف و نواحی انسان ساخت اتفاق افتاده است. در خصوص تغییر کاربری در بالادست حوزه خیایوچای هم بر اساس نتایج تحقیق طالبی‌خیای و مصطفی‌زاده (۲۰۲۱) در یک دوره ۳۲ ساله، وسعت مراتع کاهش یافته و به سایر کاربری‌های اراضی تبدیل شده است. بر این اساس می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تأثیر ترکیبی تغییر در مؤلفه‌های اقلیمی و تغییر کاربری اراضی در هر دو رودخانه مورد مطالعه روی تغییرات رژیم جریان رودخانه موثر بوده است.

منحنی تداوم جریان ایستگاه‌های پل سلطانی و پل الماس در شکل (۴) نشان داده شده است.

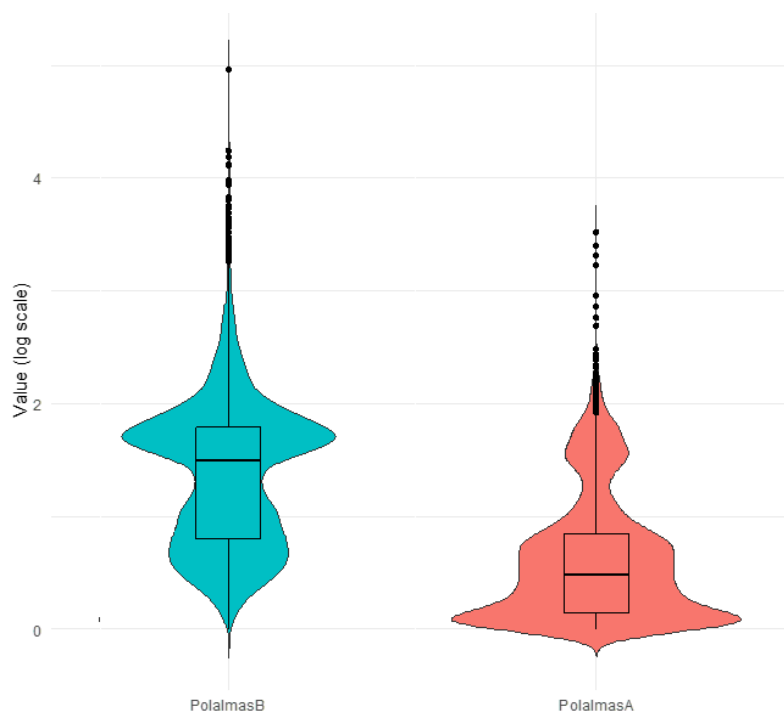


شکل (۴): منحنی تداوم جریان ایستگاه‌های پل سلطانی با جریان طبیعی (سمت راست) و پل الماس با جریان تنظیمی (سمت چپ)

Figure (3): Flow duration curve for the Pol-Soltani station with natural flow (a) and the Pol-Almas station with regulated flow (b)

مقایسه منحنی‌های تداوم جریان در دو رودخانه طبیعی و تنظیم‌شده نشان می‌دهد که در ایستگاه پل الماس، دبی جریان تحت تأثیر احداث سد دچار کاهش شدید دبی‌های کمینه شده است. از آنجا که هدف تحقیق حاضر مقایسه رژیم جریان دو رودخانه در طول دوره طولانی مدت بوده است، لذا منحنی تداوم جریان با هدف مقایسه تغییرات دبی‌های روزانه در کل دوره مطالعاتی ترسیم شده است. قابل ذکر است که ترسیم منحنی‌های تداوم جریان می‌تواند در مقیاس‌های مختلف زمانی (روزانه، هفتگی، ماهانه،) انجام شود، اما در راستای بررسی دقیق‌تر تغییرات، این منحنی‌ها بر اساس داده‌های دبی روزانه جریان ترسیم و تحلیل شده است. در همین راستا، دایچی و همکاران (۲۰۲۲) و پاترو و همکاران (۲۰۲۴)، در نتایج خود بیان کردند که بعد از احداث سد جریان‌های پایین به‌خصوص در ماه‌های خشک سال کاهش یافته است. قابل ذکر است که ذخیره سد یامچی برای مصرف شرب شهر اردبیل، شبکه آبیاری سد یامچی و نیز تأمین حقابه دریاچه شورابیل استفاده می‌شود که بر این اساس دبی‌های کمینه و جریان پایه رودخانه در محل ایستگاه مذکور دچار روند منفی معنی‌دار شده است.

نمودار ویولنی مقایسه مقادیر دبی ماهانه در ایستگاه تحت تأثیر احداث سد در شکل ۵ نشان داده شده است.

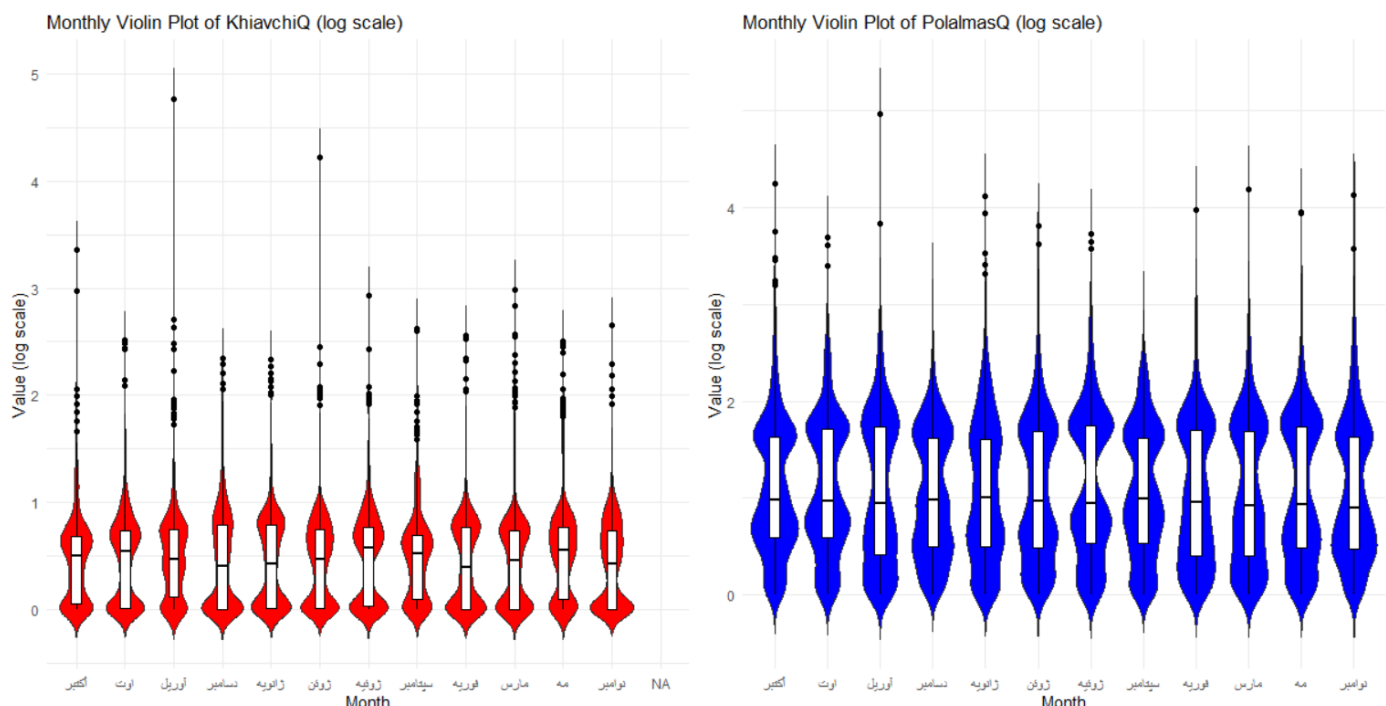


شکل (۵): نمودار ویولنی مقایسه مقادیر دبی ماهانه در ایستگاه تحت تاثیر احداث سد در دوره قبل و بعد از احداث سد (ایستگاه پل الماس)

Figure (4): Violin plot comparing monthly discharge values at the dam-influenced station before and after dam construction (Pol-Almas station)

بر اساس شکل ۵ می‌توان گفت که توزیع لگاریتمی دبی ماهانه جریان رودخانه در ایستگاه پل الماس قبل و بعد از احداث سد مشخص می‌شود که فراوانی دبی‌هایی با مقادیر کم‌تر از میانه در محدوده چارک اول افزایش پیدا کرده است. بنابراین، پس از احداث سد، میانگین دبی ماهانه کاهش یافته و پراکندگی داده‌ها نیز تغییر کرده است که نشان‌دهنده میزان تاثیر احداث سد بر رژیم هیدرولوژیکی رودخانه بر اساس داده‌های ماهانه است.

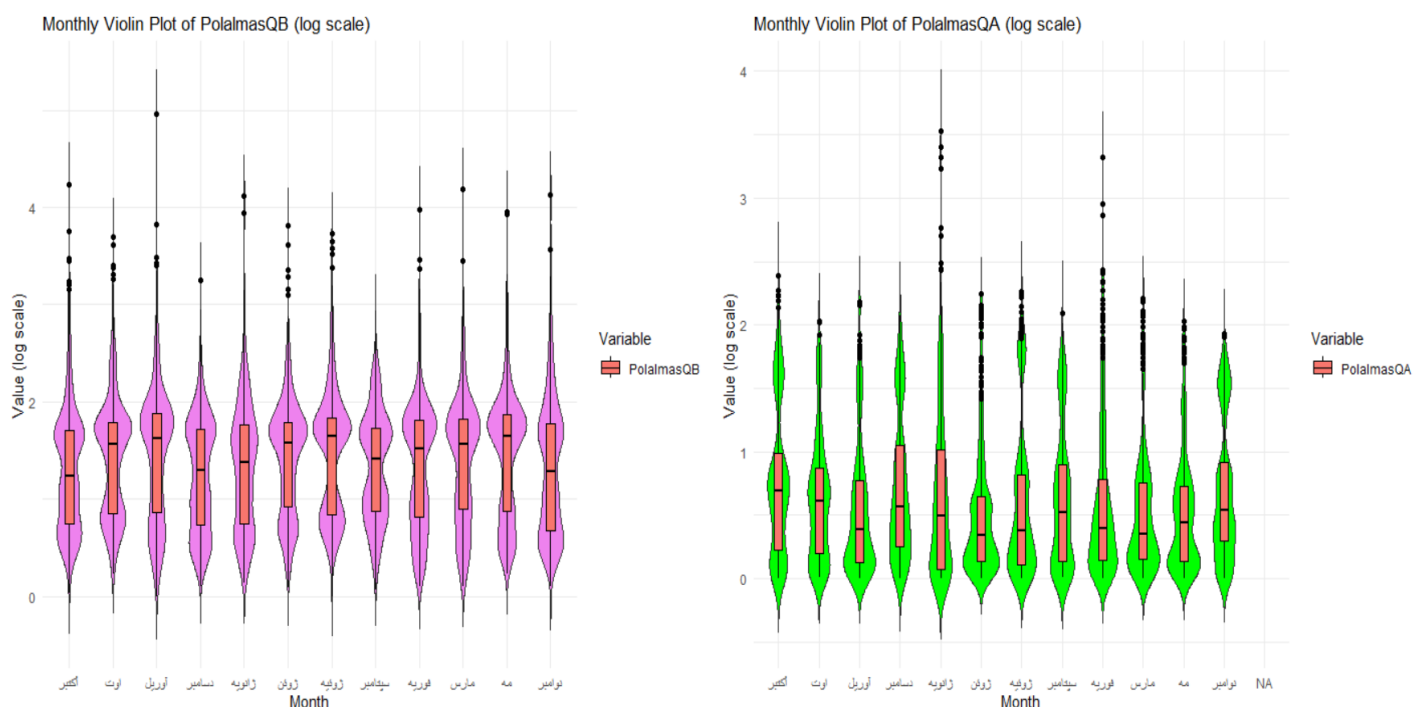
نمودار ویولنی مقایسه مقادیر دبی ماهانه در ایستگاه پل سلطانی با جریان طبیعی و ایستگاه پل الماس با جریان تنظیمی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۶): نمودار ویولنی مقایسه مقادیر دبی ماهانه در ایستگاه پل سلطانی با جریان طبیعی (چپ) و پل الماس با جریان تنظیمی (سمت راست)
Figure (5): Violin plot comparing monthly discharge values at the Pol-Soltani station with natural flow (left) and the Pol-Almas station with regulated flow (right)

بر اساس اطلاعات ارائه شده در شکل ۶، در ایستگاه پل سلطانی که داده‌های رودخانه‌ای با جریان طبیعی را نشان می‌دهد و می‌توان گفت که توزیع مقادیر دبی در اکثر ماه‌ها از یک الگوی یکسان پیروی می‌کند. این در حالی است که در ایستگاه پل الماس، توزیع مقادیر دبی ماهانه در برخی ماه‌ها دچار تغییر شده است. دلیل این تغییرات تأثیر تنظیمی سد مخزنی یامچی است. با توجه به این‌که نمودار ویولنی در ایستگاه پل الماس بر اساس داده‌های کل دوره مطالعاتی (قبل و بعد از احداث سد) ترسیم شده است، لذا نمودار ویولنی در دبی‌های کمینه دارای تراکم بیشتری است که تحت تأثیر داده‌های دبی بعد از احداث سد است و نیز تراکم بیشتر در محدوده دبی‌های زیاد مربوط داده‌های دوره قبل از احداث سد است.

نمودار ویولنی مقایسه مقادیر دبی ماهانه ایستگاه پل الماس با جریان تنظیمی (سمت راست، بعد از احداث سد) و (سمت چپ، قبل از احداث سد) در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل (۷): نمودار ویولنی مقایسه مقادیر دبی ماهانه ایستگاه پل الماس با جریان تنظیمی (سمت چپ، قبل از احداث سد) و (سمت راست، بعد از احداث سد)
Figure (6): Violin plot comparing monthly discharge values at the Pol-Almas station with regulated flow (left, before dam construction) and (right, after dam construction)

بر اساس اطلاعات شکل ۷ می‌توان گفت که میانگین دبی ماهانه در ایستگاه پل الماس پس از احداث سد کاهش یافته است. این امر نشان‌دهنده تاثیر احداث سد بر روی جریان رودخانه و اثر تنظیمی سد است. همچنین می‌توان گفت که در دوره بعد از احداث سد، پراکندگی دبی ماهانه کاهش یافته است. شکل ویولن‌ها در دو دوره زمانی متفاوت نشان می‌دهد که الگوی فصلی دبی نیز تحت تاثیر احداث سد تغییر کرده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷، در دوره قبل از احداث سد، داده‌ها در اکثر ماه‌ها دارای توزیع نسبتاً پراکنده‌ای هستند، در حالی که در دوره بعد از احداث، تغییرپذیری داده‌ها در برخی ماه‌ها به شدت کاهش یافته است که نشان‌دهنده تاثیر قابل توجه احداث سد است. یکی از تاثیرات مهم احداث سد، کاهش میانه داده‌ها است که با کاهش دبی پایه جریان مرتبط است و از طرفی با رهاسازی کنترل شده آب از سد، نوسانات جریان رودخانه کاهش می‌یابد و در نتیجه، تغییرپذیری داده‌ها کم‌تر می‌شود، در این خصوص، در نمودارهای ویولنی، ضخامت هر ویلن نشان‌دهنده تراکم داده‌ها در آن ناحیه است که به تشخیص تفاوت‌ها کمک خواهد نمود. نمایش داده‌ها در مقیاس لگاریتمی می‌تواند به بهتر نشان دادن تغییرات در مقادیر دبی‌های کم کمک نماید.

نتیجه‌گیری

رودخانه‌ها در اغلب نقاط کشور ایران بر اثر تغییرات اقلیمی و دخالت‌های انسانی مانند سد، افزایش بهره‌برداری از آب برای مصارف کشاورزی و شهری و انتقال آب بین حوضه‌ای تغییرات زیادی یافته‌اند. این تغییرات منجر به کاهش کل جریان رودخانه شده که اثرات منفی روی خدمات هیدرولوژیکی و اکولوژیکی حوضه و در نتیجه آسیب‌پذیری مردم وابسته به این خدمات می‌شود. در این تحقیق تغییرات رژیم جریان رودخانه در دو رودخانه طبیعی و تحت تاثیر احداث سد بررسی شد. در این راستا، نمودارهای گرافیکی مختلف، تعیین نقاط تغییر و روندهای زمانی معنی‌دار مربوط به آماره‌های جریان بالا، جریان پایین و یا جریان پایه با استفاده از برنامه‌نویسی R تهیه شد. بر اساس نتایج، در ایستگاه دارای جریان طبیعی (پل سلطانی)، وقوع نقاط تغییر در هر سه مؤلفه جریان بالا، پایین و دبی پایه، روند کاهشی معنی‌دار دبی متوسط و جریان پایه، روند غیرمعنی‌دار مقادیر دبی‌های حداکثر و جریان بالا (Q_{10}) و شکل طبیعی منحنی تداوم جریان مشاهده شد. تغییرات مذکور را می‌توان به تاثیر تغییر در مقدار ذخیره برفی کوهستان سبلان، تغییر رژیم ذوب برف در اثر

تغییرات دما، کاهش میزان بارش نزولات (باران و برف) نسبت داد. از طرفی در ایستگاه دارای جریان تنظیمی (پل الماس)، وقوع نقاط تغییر در هر سه مؤلفه جریان بالا، پایین و دبی پایه اتفاق افتاده است و روند کاهشی معنی دار دبی متوسط سالانه، دبی حداکثر سالانه، دبی‌های بالا (دبی با احتمال تجاوز ۱۰ و ۲۵٪) مشاهده شد و نیز منحنی تداوم جریان تغییر شکل یافته است. میانگین دبی روزانه در ایستگاه پل الماس پس از احداث سد از ۳/۸۰ به ۱/۲۲ و میانه از ۳/۴۷ به ۰/۶۲ کاهش یافته، که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه در مقادیر مرکزی توزیع داده‌ها است. انحراف معیار و واریانس نیز کاهش یافته‌اند، بیانگر نوسانات کمتر و پایداری بیشتر پس از احداث سد. در ایستگاه پل سلطانی، میانگین دبی کمتر (۰/۷۷ در برابر ۱/۲۲) و کشیدگی و چولگی بیشتر (۲۲۶۲ و ۳۵/۰۲ در برابر ۴۵ و ۴/۳۵) نسبت به پل الماس مشاهده شده که نشان‌دهنده عدم تقارن و تنوع بالاتر مقادیر است. دامنه تغییرات نیز در پل سلطانی (۱۱۶) بیشتر از پل الماس (۳۳) بوده، بیانگر دامنه وسیع‌تر مقادیر دبی در این ایستگاه است. تغییرات در مؤلفه‌های رژیم جریان رودخانه بالیخلوچای در اثر احداث سد یامچی و بهره‌برداری از جریان رودخانه با هدف مصرف آب شرب شهر اردبیل، تامین شبکه آبیاری سد یامچی، حقایب دریاچه شورابیل بوده است. در مجموع، در هر دو رودخانه مورد مطالعه، نقاط تغییر در هر سه مؤلفه جریان بالا (حداکثر سالانه، Q_{10} و Q_{25})، جریان پایین و دبی پایه اتفاق افتاده است، در حالی که در رودخانه تنظیمی این تغییرات بعد از احداث سد بیش‌تر بوده است. مقایسه منحنی تداوم جریان رودخانه طبیعی و تنظیمی نشان داد که ایستگاه پل الماس، دبی جریان تحت تأثیر احداث سد دچار کاهش شدید دبی‌های پایه و جریان کمینه شده است. منحنی‌های تداوم جریان Gustrad ترسیم شده نشان‌دهنده انحراف جریان طبیعی در رودخانه بالیخلوچای در اثر احداث سد است. در مجموع می‌توان گفت که ارزیابی گرافیکی رژیم جریان رودخانه امکان ارزیابی جامع تغییرات در مؤلفه‌های مختلف را فراهم خواهد نمود و ارزیابی سهم تغییرات در اثر عوامل اقلیمی و انسانی از موارد پیشنهادی در پژوهش‌های آتی است. اطلاع از میزان تغییرات آبدهی جریان رودخانه، می‌تواند در مدیریت منابع آب سطحی بر اساس تغییر در مؤلفه‌های مختلف جریان، تخصیص جریان محیط‌زیستی و حفظ ارزش‌های اکولوژیک رودخانه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

References

- 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. *Earth Space Phys*, 45(2), 1-15.
- Anderson, E., Chlumsky, R., McCaffrey, D., Trubilowicz, J., Shook, K. R., & Whitfield, P. H. (2019). R-functions for Canadian hydrologists: a Canada-wide collaboration. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 44(1), 108-112.
- Asghari Saraskanrood, S., & Piroozi, E. (2021). Investigation of the effects of construction of Sahand dam on the hydrological conditions of the river and analysis of changes in the geometric shape of Qaranqoochay canal (from the lower reaches of Sahand dam to Khorasanak village). *Environmental Erosion Research Journal*, 11(3), 99-122.
- Azarang, F., Telvari, A., Sedghi, H., & Shafai Bajestan, M. (2017). Large Dam Effects on Flow Regime and Hydraulic Parameters of river (Case study: Karkheh River, Downstream of Reservoir Dam). *Water and Soil*, 31(1), 11-27.
- Bard, A., Renard, B., Lang, M., Giuntoli, I., Korck, J., Koboltschnig, G., ... & Volken, D. (2015). Trends in the hydrologic regime of Alpine rivers. *Journal of Hydrology*, 529, 1823-1837.
- Bayazit, M., & Önöz, B. J. H. S. J. (2007). To prewhiten or not to prewhiten in trend analysis?. *Hydrological Sciences Journal*, 52(4), 611-624.
- Beran, M. A., & Gustard, A. (1977). A study into the low-flow characteristics of British rivers. *Journal of Hydrology*, 35(1-2), 147-157.
- Bragg, O. M., Black, A. R., Duck, R. W., & Rowan, J. S. (2005). Approaching the physical-biological interface in rivers: a review of methods for ecological evaluation of flow regimes. *Progress in Physical Geography*, 29(4), 506-531.
- Daechini, F., Vafakhah, M., & Moosavi, V. (2022). Impacts of Dam Construction on Indicators of Hydrologic Alterations in the Gorganroud Watershed. *Iranian journal of Ecohydrology*, 9(1), 185-198.

- Dierauer, J. R., Whitfield, P. H., & Allen, D. M. (2017). Assessing the suitability of hydrometric data for trend analysis: The 'FlowScreen' package for R. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 42(3), 269-275.
- Dierauer, J. R., Whitfield, P. H., & Allen, D. M. (2017). Assessing the suitability of hydrometric data for trend analysis: The 'FlowScreen' package for R. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 42(3), 269-275.
- Dierauer, J., & Whitfield, P. (2017). Package 'FlowScreen'. The Comprehensive R Archive Network (CRAN).
- Eckhardt, K. (2012). Analytical sensitivity analysis of a two parameter recursive digital baseflow separation filter. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(2), 451-455.
- Esfandiyari Darabad, F., Gholizadeh Aghbelagh, M., Nasiri Khiavi, A., & Alimohammadi, M. (2023). Changes of Flow Regime Variables Under the Influence Climatic Components of Precipitation and Temperature in Some Rivers of Sabalan Mountain. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 17(62), 11-22.
- 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.
- Fang, G., Yan, M., Dai, L., Huang, X., Zhang, X., & Lu, Y. (2023). Improved indicators of hydrological alteration for quantifying the dam-induced impacts on flow regimes in small and medium-sized rivers. *Science of the Total Environment*, 867, 161499.
- Fleming, S. W., & Clarke, G. K. (2002). Autoregressive noise, deserialization, and trend detection and quantification in annual river discharge time series. *Canadian Water Resources Journal*, 27(3), 335-354.
- Gibson, J. J., Prowse, T. D., & Peters, D. L. (2006). Hydroclimatic controls on water balance and water level variability in Great Slave Lake. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(19), 4155-4172.
- Gustard, A., Bullock, A., & Dixon, J. M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom. *Institute of Hydrology*.
- Hannaford, J., & Buys, G. (2012). Trends in seasonal river flow regimes in the UK. *Journal of Hydrology*, 475, 158-174.
- Holmes, M. G. R., Young, A. R., Gustard, A., & Grew, R. (2002). A region of influence approach to predicting flow duration curves within ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(4), 721-731.
- Huang, Y., Huang, B., Zhang, K., Qin, T., & Yan, D. (2024). Novel framework for quantifying dam construction, climate change, and land-use change impacts on flow regime: A case study in Ganjiang River Basin, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 55, 101918.
- Madadi, A., Faal Naziri, M., & Piroozi, E. (2022). Evaluation of land use changes and its effects on soil erosion in the basin upstream of Yamchi Dam in Ardabil, using ARAS multi-criteria decision algorithm and modern remote sensing methods. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(2), 52-70.
- Mostafazadeh, R., Nasiri Khiavi, A., & Ghabelnezam, E. (2024). Temporal changes and flow pattern analysis using Colwell indices in mountainous rivers. *Environment, Development and Sustainability*, 26(3), 7757-7774.
- Mostafazadeh, R., Zabihi Silabi, M., & Kazemi, M. (2024). Temporal analysis of river flow health index of the Shahrchai river under the dam regulating effect. *Hydrogeomorphology*, 11(39), 101-121.
- Naderi, M., Alioghli, S., Pourgholam Amiji, M., Fazloulou, R., & Ghojoghi, A. (2020). Analysis of Changes in Hydrological Indices of Karun River Flow before and after periods Gotvand Dam Using Range of Variability Approach. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(3), 765-782.
- 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 .
- 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.
- Niazi, F., Mofid, H., & Fazel Modares, N. (2014). Trend analysis of temporal changes of discharge and water quality parameters of Ajichay River in four recent decades. *Water Quality, Exposure and Health*, 6(1), 89-95.
- Norouzzadeh, H., Hasanpour Kashani, M. and Rasoulzadeh, A. (2023). Estimating the contribution of climate change and human activities on river discharge variations (Case Study: GharehSoo River). *Water and Soil Management and Modelling*, 3(4), 168-180. doi: 10.22098/mmws.2023.12255.1219
- Palmer, M., & Ruhi, A. (2019). Linkages between flow regime, biota, and ecosystem processes: Implications for river restoration. *Science*, 365(6459), eaaw2087.
- Patro, E. R., Ghadimi, S., Shahrood, A. J., Fazel, N., Makarieva, O., & Haghighi, A. T. (2024). Flow regime alteration in Arctic rivers due to dam operations and climate change. *Global and Planetary Change*, 237, 104442.
- Petts, G. E. (2009). Instream flow science for sustainable river management 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(5), 1071-1086.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., ... & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769-784.
- Rezaei, M., Yasi, M., & Farhoudi, J. (2022). Investigating the impact of dam construction on the eco-hydrological parameters of rivers (Jajrud River - downstream of Latian Dam). *Iranian journal of Ecohydrology*, 9(4), 797-814.
- Richter, B., Baumgartner, J., Wigington, R., & Braun, D. (1997). How much water does a river need?. *Freshwater biology*, 37(1), 231-249.
- Schneider, C., Laizé, C. L. R., Acreman, M. C., & Flörke, M. (2013). How will climate change modify river flow regimes in Europe?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 325-339.
- Setayeshi Nasaz, H., Asghari Saraskanrood, S., Mostafazadeh, R., & Madadi, A. (2023). Investigating changes in the hydrological flow regime and the environmental flow component of EFCs in Khiachai River in a 30-year period. *Hydrogeomorphology*, 10(37), 43-25.
- Slater, L. J., Thirel, G., Harrigan, S., Delaigue, O., Hurley, A., Khouakhi, A., ... & Smith, K. (2019). Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(7), 2939-2963.
- Svensson, C., Kundzewicz, W. Z., & Maurer, T. (2005). Trend detection in river flow series: 2. Flood and low-flow index series/Détection de tendance dans des séries de débit fluvial: 2. Séries d'indices de crue et d'étiage. *Hydrological Sciences Journal*, 50(5).
- Talebi Khiavi, H., & Mostafazadeh, R. (2021). Land use change dynamics assessment in the Khiavchai region, the hillside of Sabalan mountainous area. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-15.
- Vogel, R. M., & Fennessey, N. M. (1995). Flow duration curves II: A review of applications in water resources planning 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31(6), 1029-1039.
- Whitfield, P. H. (2012). Why the provenance of data matters: Assessing fitness for purpose for environmental data. *Canadian Water Resources Journal/Revue Canadienne des Ressources Hydriques*, 37(1), 23-36.
- Wrzesiński, D. (2021). Flow regime patterns and their changes. *Management of water resources in Poland*, 163-180.
- Yang, H. H., Jaafar, O., El-Shafie, A., & Abdullah, S. M. S. (2011). Impact of land-use changes toward base-flow regime in Lui and Langat Dengkil sub-basin. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(21), 4960-4976.
- Yao, L., Sankarasubramanian, A., & Wang, D. (2021). Climatic and landscape controls on long-term baseflow. *Water Resources Research*, 57(6), e2020WR029284.
- Zhang, K., Morovati, K., Tian, F., Yu, L., Liu, B., & Olivares, M. A. (2023). Regional contributions of climate change and human activities to altered flow of the Lancang-mekong river. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50, 101535.