



University of Tehran Press

ECO HYDROLOGY

Home Page: <https://ije.ut.ac.ir>

Online ISSN: 2423-6101

Evaluation of Environmental Flows in a River using Eco-hydrology and Hydraulic Methods, based on the Natural Flow Regime (Case study: Darerud River, Aras Basin)

Hossein Fakheri¹ , Mehdi Yasi ^{*2}

1. M.Sc. in Water Science and Engineering, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: hossein.fakheri@ut.ac.ir
2. Corresponding author, Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: m.yasi@ut.ac.ir

Article Info

Article type
Research Article

Article history:

Received 13 March 2026
Revised 07 May 2026
Accepted 15 June 2026
Available online 22 June 2026

Keywords:

Environmental Flows,
Natural Flow,
Eco-Hydrology
Methods,
Hydraulic Methods,
Aras Basin.

ABSTRACT

Objective: This study presents an integrated framework for environmental flow assessment by combining ecohydrological and hydraulic methods based on the reconstructed natural flow regime.

Method: Long-term hydrometric records from the Darerud River at the Moshiran hydrometric station were analyzed. The natural flow regime was first reconstructed, after which environmental flows were estimated using the Tennant, Modified Tennant, Tessman, Aquatic Base Flow, Flow Duration Curve (FDC), Flow Duration Curve Shifting (FDC-Shifting), Desktop Reserve Model (DRM), Range of Variability Approach (RVA), hydraulic Wetted Perimeter, and Water Quality methods.

Results: The observed mean annual discharge of the Darerud River at the Moshiran station is 11.8 m³/s, whereas the reconstructed natural flow regime yields a mean annual discharge of 21.6 m³/s. Using the Tennant method, the required environmental flow is 2.2 m³/s during the first six months of the water year, and 6.5 m³/s for the next six months. In contrast, the Modified Tennant, Tessman, Flow Duration Curve Shifting (FDC-Shifting), and Desktop Reserve Model (DRM) methods produce distributed monthly environmental flows that reflect the natural seasonal flow regime. The corresponding mean annual environmental flows are 4.7, 10.7, 7.5, and 7.6 m³/s. The Aquatic Base Flow, Flow Duration Curve (FDC), hydraulic method (wetted perimeter curve slope), hydraulic method (maximum curvature), and water quality methods estimate constant environmental flows of 8.3, 6.3, 12.5, 8.9, and 8.1 m³/s, respectively. The Range of Variability Approach (RVA), however, presents a yearly flexible environmental flow range between 9.6 and 27.6 m³/s, rather than prescribing a single discharge value.

Conclusions: The Modified Tennant, FDC-Shifting (Class D), DRM (Class B/C) methods are considered to be more reasonable approaches for the Darerud River. These three methods present the mean annual environmental flows of 4.7, 7.5, and 7.6 m³/s, respectively, corresponding to 22%, 35%, and 35% of the mean annual natural flow regime. The Spearman rank correlation coefficients are 0.99, 0.98, and 0.92, respectively. These three methods represent seasonal environmental flow variability in consistent with the hydrological characteristics of the natural river system. The findings of this study provide a flexible scientific tool for river management and the conservation of flow-dependent ecosystems in the Darerud watershed.

Cite this article: Fakheri, H., Yasi, M. (2026). Evaluation of Environmental Flows in a River Using Eco-hydrology and Hydraulic Methods, Based on the Natural Flow Regime (Case Study: Darerud River, Aras Basin). *Journal of Ecohydrology*, 13(2), 1241-1267. <https://doi.org/10.22059/ije.2026.414537.1914>



© Hossein Fakhari, Mehdi Yasi

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ije.2026.414537.1914>

Extended Abstract

Introduction

In recent decades, increasing exploitation of surface water resources and the construction of hydraulic infrastructures, such as dams and water diversion schemes, have substantially altered the natural flow regimes of rivers. These alterations have directly and indirectly affected the structure and functioning of river ecosystems, threatening the sustainability of aquatic and riparian habitats. Consequently, the concept of environmental flows has become a fundamental component of sustainable water resources management and strategic water resources planning. Environmental flows refer to the quantity, timing, and quality of water flows required to sustain freshwater and estuarine ecosystems, together with the ecological processes, biodiversity, and ecosystem services that depend on them.

Method

The present study aimed to estimate environmental flow requirements using integrated ecohydrological and hydraulic approaches based on the reconstructed natural flow regime of the Darerud River in the Aras Basin. For this purpose, 54 years of hydrometric records (1970–2024) from the Moshiran hydrometric station were compiled, quality-controlled, and corrected. The natural flow regime was then reconstructed by removing the effects of human interventions to provide a reference condition for environmental flow assessment. Environmental flow requirements were subsequently estimated using the Tennant, Modified Tennant, Tessman, Aquatic Base Flow, Flow Duration Curve (FDC), Flow Duration Curve Shifting (FDC-Shifting), Desktop Reserve Model (DRM), Range of Variability Approach (RVA), Hydraulic-Wetted Perimeter, and Water Quality methods.

Results

The Tennant method, which is based on fixed percentages of the mean annual flow (MAF), recommends environmental flows of 2.2 m³/s for the first six months of the water year and 6.5 m³/s for the next six months. In contrast, the Modified Tennant method uses the long-term mean monthly flow instead of the mean annual flow, allowing environmental flow rates to vary seasonally. Accordingly, the estimated environmental flows for October to September are 0.8, 1.2, 1.4, 1.4, 1.5, 2.1, 12.7, 15.5, 9.8, 1.6, 0.8, and 7.0 m³/s, respectively.

The Tessman method determines the environmental flows by comparing the long-term mean monthly flow with the mean annual flow and applying predefined allocation rules. The resulting environmental flows for October to September are 8.3, 8.6, 8.6, 8.6, 8.6, 8.6, 16.9, 20.7, 13.0, 8.6, 8.3, and 9.3 m³/s, respectively. The Aquatic Base Flow method defines the environmental flow as the discharge of the driest month in the long-term natural flow regime, yielding a constant value of 3.8 m³/s. Similarly, the FDC method adopts the Q₉₀ flow rate, resulting in a constant environmental flow value of 3.6 m³/s.

The FDC-Shifting method, with selected environmental management classe (D), estimates monthly environmental flows of 1.5, 3.2, 4.7, 4.6, 5.6, 8.2, 14.9, 17.1, 12.5, 6.6, 2.1, and 8.7 m³/s from October to September, respectively.

The DRM estimates environmental flow according to the allowable level of hydrological alteration from the natural flow regime. The corresponding environmental flows for October to September are 4.5, 5.0, 4.5, 4.6, 4.9, 5.8, 7.9, 14.3, 11.5, 8.2, 5.3, and 14.4 m³/s, respectively.

Unlike the previous methods, the RVA defines a flexible range of environmental flows rather than a single value. The estimated lower and upper limits for October to September are 0.6–5.5, 6.0–16.2, 7.5–23.3, 10.8–24.3, 11.8–24.2, 15.2–29.2, 23.1–51.9, 30.0–78.4, 8.3–49.3, 2.0–21.6, 0.3–4.5, and 0.2–2.4 m³/s, respectively.

The Hydraulic Wetted Perimeter method is based on the relationship between river discharge and wetted perimeter. As discharge increases, the wetted perimeter initially increases rapidly until reaching a breakpoint beyond which further increases in discharge produce only marginal increases in wetted perimeter. This breakpoint is identified using two approaches. The curve slope method estimates a constant environmental flow of 12.5 m³/s, whereas the maximum curvature method recommends a constant environmental flow of 8.9 m³/s throughout the year.

The Water Quality method defines environmental flow as the minimum discharge required to maintain the most critical water quality parameter within the prescribed environmental standard during the critical low-flow period. Using this criterion, the estimated minimum environmental flow is 8.1 m³/s.

Conclusions

Comparison of the different methods indicated that fixed-percentage approaches tend to oversimplify the required environmental flows, whereas methods based on the natural flow regime provide a more realistic representation of the temporal variability required to sustain riverine ecosystems. Accordingly, the Modified Tennant, FDC-Shifting (Class D), and DRM (Class B/C) methods are the best selections for the Darerud River. These methods estimate mean annual environmental flows of 4.7, 7.5, and 7.6 m³/s, respectively, corresponding to 22%, 35%, and 35% of the mean annual natural flow. The Spearman rank correlation coefficients are 0.99, 0.98, and 0.92, respectively. These three methods represent seasonal environmental flow variability in consistent with the hydrological characteristics of the natural river system. The findings of this study provide a flexible scientific tool for river management and the conservation of flow-dependent ecosystems in the Darerud watershed.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge Mr. Engre. Golamreza Farhoomand, from Iran Water Resources Management Company, for providing with information and guidance over the period of this study. The authors would also like to thank anonymous referees for their constructive comments.



ارزیابی جریان محیط زیستی از روش‌های اکوهیدرولوژیکی و هیدرولیکی بر اساس رژیم طبیعی جریان در رودخانه (مطالعه موردی: دره رود - حوضه ارس)

حسین فاخری^۱، مهدی یاسی^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hossein.fakheri@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، استاد مهندسی رودخانه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: m.yasi@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	هدف: این پژوهش با هدف ارائه یک نمونه کاربردی از تلفیق روش‌های مختلف اکو - هیدرولوژیکی - هیدرولیکی برای برآورد جریان محیط زیستی، براساس رژیم طبیعی جریان در یک رودخانه انجام شده است.
تاریخچه مقاله:	روش پژوهش: در این تحقیق، داده‌های بلندمدت رودخانه دره رود در ایستگاه هیدرومتری مشیران مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا طبیعی‌سازی داده‌های جریان انجام شد. سپس جریان محیط زیستی با بهره‌گیری از روش‌های اکوهیدرولوژیکی شامل تنانت، تنانت اصلاح‌شده، تسمن، جریان پایه آبریزان، منحنی تداوم جریان (FDC)، انتقال منحنی تداوم جریان (FDC-Shifting)، ذخیره رو میزی (DRM)، محدوده تغییرپذیری (RVA)، روش هیدرولیکی محیط خیس‌شده و روش کیفیت آب مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۱	یافته‌ها: آبدهی رودخانه دره رود (ایستگاه مشیران) در شرایط حاضر ۱۱/۸ مترمکعب بر ثانیه است که پس از طبیعی‌سازی رژیم جریان به مقدار ۲۱/۶ مترمکعب بر ثانیه افزایش می‌یابد. روش تنانت برای شش ماه اول سال آبی مقدار ۲/۲ و برای شش ماه دوم برابر ۶/۵ مترمکعب بر ثانیه؛ روش تنانت اصلاح‌شده، تسمن، FDC-Shifting و DRM برای هر ماه مقداری متفاوت و متناسب با الگوی جریان طبیعی به‌ترتیب با مقدار متوسط جریان سالانه ۴/۷، ۱۰/۷، ۷/۵ و ۷/۶ مترمکعب بر ثانیه؛ روش جریان پایه آبریزان، FDC، هیدرولیکی (شیب منحنی)، هیدرولیکی (حداکثر انحناء) و کیفیت آب مقدار ثابت به‌ترتیب ۸/۳، ۶/۳، ۱۲/۵، ۸/۹ و ۸/۱ مترمکعب بر ثانیه و روش RVA، محدوده‌ای بین متوسط جریان سالانه ۹/۶ تا ۲۷/۶ مترمکعب بر ثانیه را برای جریان محیط زیستی برآورد می‌کند.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۷	نتیجه‌گیری: مقایسه روش‌ها نشان داد رویکردهای شاخص درصدی تمایل به ساده‌سازی رفتار جریان داشته، در حالی که روش‌های مبتنی بر انطباق با رژیم طبیعی جریان ماهانه، تصویر واقع بینانه‌تری از نیاز اکوسیستم ارائه می‌کنند. بنابراین کاربرد سه روش تنانت اصلاح‌شده، FDC-Shifting در کلاس D و DRM در کلاس B/C به‌ترتیب با متوسط جریان ۴/۷، ۷/۵ و ۷/۶ مترمکعب بر ثانیه، معادل ۲۲، ۳۵ و ۳۵ درصد متوسط سالانه جریان طبیعی با ضریب همبستگی ۰/۹۹، ۰/۹۸ و ۰/۹۲، انطباق بیشتری با شرایط هیدرولوژیکی حوضه دره رود و بازنمایی تغییرات زمانی جریان دارند. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مبنای علمی برای مدیریت رودخانه و زیست‌بوم‌های وابسته در حوضه آبریز دره رود مورد استفاده قرار گیرد.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱	
کلیدواژه‌ها:	
جریان محیط زیستی،	
جریان طبیعی،	
روش‌های اکوهیدرولوژی،	
روش‌های هیدرولیکی،	
حوضه ارس.	

استناد: فاخری، حسین؛ یاسی، مهدی. (۱۴۰۵). ارزیابی جریان محیط زیستی از روش‌های اکوهیدرولوژیکی و هیدرولیکی بر اساس رژیم طبیعی جریان در رودخانه (مطالعه موردی: دره رود - حوضه ارس). *مجله اکوهیدرولوژی*، ۱۳(۲)، ۱۲۴۱ - ۱۲۶۷.



<https://doi.org/10.22059/ije.2026.414537.1914>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © حسین فاخری، مهدی یاسی.

مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان یکی از اجزای مهم چرخه هیدرولوژیکی، طی هزاران سال با حفظ رژیم طبیعی جریان، نقش اساسی در پایداری اکوسیستم‌های آب شیرین، انتقال رسوبات، چرخه مواد مغذی، حفظ تنوع زیستی و تعدیل اثرات نوسانات اقلیمی ایفا کرده‌اند (پاف^۱ و همکاران، ۱۹۹۷؛ بان و آرتینگتون^۲، ۲۰۰۲). با این حال، طی دهه‌های اخیر، توسعه گسترده منابع آب، احداث سدها، برداشت‌های فزاینده آب، تغییر کاربری اراضی و سایر مداخلات انسانی، موجب تغییر قابل توجه رژیم طبیعی جریان بسیاری از رودخانه‌های جهان شده و عملکرد اکولوژیکی آن‌ها را با مخاطرات جدی مواجه ساخته است (نیلسون^۳ و همکاران، ۲۰۰۵؛ ریشر^۴ و همکاران، ۱۹۹۷).

در چارچوب توسعه پایدار، مدیریت منابع آب مستلزم ایجاد تعادل میان نیازهای انسانی و الزامات اکولوژیکی رودخانه‌ها است. یکی از ابزارهای مهم دستیابی به این تعادل، تعیین و تخصیص جریان محیط زیستی است. بر اساس تعریف ارائه شده در اعلامیه بریزبین، جریان محیط زیستی رژیم جریانی است که شامل مقدار، زمان‌بندی و کیفیت آب مورد نیاز برای حفظ اکوسیستم‌های آبرزی، خدمات اکوسیستمی و معیشت جوامع وابسته به رودخانه است (آرتینگتون^۵ و همکاران، ۲۰۱۸). از این رو، تخصیص جریان محیط زیستی پیش از برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری از منابع آب، یکی از اصول بنیادین مدیریت پایدار رودخانه‌ها محسوب می‌شود و امکان تأمین هم‌زمان نیازهای اکولوژیکی و مصارف انسانی را فراهم می‌سازد.

فعالیت‌های انسانی نظیر احداث سدها، تغییر کاربری اراضی و برداشت‌های بیش از حد از منابع آب، از مهم‌ترین عوامل برهم‌زننده رژیم طبیعی جریان رودخانه‌ها به شمار می‌روند (پاف و همکاران، ۱۹۹۷؛ بان و آرتینگتون، ۲۰۰۲). مطالعات جهانی نشان می‌دهد بخش قابل توجهی از رودخانه‌های بزرگ جهان بر اثر توسعه زیرساخت‌های آبی، تنظیم جریان و سایر مداخلات انسانی دچار تغییرات هیدرولوژیکی شده‌اند و بسیاری از اکوسیستم‌های آب شیرین تحت فشار قرار گرفته‌اند (نیلسون و همکاران، ۲۰۰۵؛ ووروسمارتی^۶ و همکاران، ۲۰۱۰). در ایران نیز، توسعه گسترده منابع آب، احداث سدها و افزایش برداشت از منابع آب سطحی، موجب تغییر رژیم طبیعی جریان بسیاری از رودخانه‌ها شده و ضرورت توجه به نیازهای زیست‌محیطی رودخانه‌ها را بیش از پیش آشکار ساخته است (مدنی، ۲۰۱۴). یکی از رویکردهای نوین برای مقابله با این چالش، ارزیابی و تخصیص جریان محیط زیستی است که به عنوان بخشی از مدیریت پایدار منابع آب شناخته می‌شود. جریان محیط زیستی، جریان مطلوبی است که باید در رودخانه باقی بماند تا بتواند کارکردهای اکولوژیکی و زیستگاهی خود را حفظ کند. رودخانه دره‌رود در استان اردبیل، به عنوان یکی از زیرحوضه‌های مهم ارس، طی دهه‌های اخیر با تغییرات هیدرولوژیکی ناشی از بهره‌برداری‌ها و احداث سدهایی همچون سبلان، یامچی، ستارخان و عمارت روبه‌رو بوده است. سد عمارت روی دره‌رود و در پایین‌دست ایستگاه مشیران، با مخزن ۱۸۲ میلیون متر مکعب، در مرحله آگیری است، که به دلایلی هنوز کامل نشده است. این شرایط ضرورت انجام مطالعه‌ای برای ارزیابی جریان محیط زیستی را آشکار می‌سازد. بنابراین، هدف اصلی در طرح پیشنهادی، علاوه بر ارائه یک نمونه کاربردی برای برآورد جریان محیط زیستی از تلفیق روش‌های مختلف اکو - هیدرولوژیکی - هیدرولیکی؛ ارزیابی میزان جریان محیط زیستی برآورد شده براساس رژیم جریان طبیعی (یعنی رژیم جریانی که مطابق با اکوسیستم رودخانه است) با جریان مشاهداتی (یعنی رژیم جریان فعلی رودخانه که تحت تأثیر تنظیم سد و مصارف است)، است. همچنین، نتایج این پژوهش با مقالات و طرح‌های مطالعاتی پیشین در ایستگاه مطالعاتی منتخب این پژوهش مقایسه شد.

1. Poff
2. Bunn & Arthington
3. Nilsson
4. Richter
5. Arthington
6. Vörösmarty

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

۱. مبانی نظری پژوهش

جریان طبیعی‌سازی شده به عنوان جریانی تعریف می‌شود که در نبود فعالیت‌های انسانی مانند سدسازی، انحراف جریان، برداشت آب یا تغییر کاربری اراضی، در رودخانه برقرار می‌بود. این جریان بازسازی‌شده، مبنای اصلی برای ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی و مطالعات محیط زیستی است (ریشتر^۱ و همکاران، ۱۹۹۶).

جریان محیط زیستی مفهومی است که در پاسخ به تغییرات گسترده رژیم‌های طبیعی رودخانه‌ها بر اثر فعالیت‌های انسانی مطرح شد. این مفهوم به میزان، زمان‌بندی، تداوم و کیفیت جریان آبی اشاره دارد که برای حفظ ساختار، کارکرد و تنوع زیستی اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و خدماتی که برای جوامع انسانی فراهم می‌آورند، ضروری است. در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، نخستین تلاش‌ها برای تعریف جریان محیط زیستی در ایالات متحده و استرالیا با رویکرد حداقل جریان انجام شد (تنتانت^۲، ۱۹۷۶). اما با پیشرفت دانش بوم‌شناسی رودخانه‌ای، رویکردهای نوینی توسعه یافتند که علاوه بر کمیت آب، به کیفیت، تداوم و الگوهای فصلی جریان نیز توجه داشتند. در این چارچوب، جریان محیط زیستی دیگر فقط «مقداری از آب» برای زنده نگه داشتن رودخانه تلقی نمی‌شود، بلکه به عنوان رژیم پویا و چندبعدی جریان شناخته می‌شود که باید در تعامل با فرایندهای اکوهیدرولوژیکی حفظ شود (آکرمن و دانبار^۳، ۲۰۰۴). سازمان‌های بین‌المللی نظیر IUCN، UNESCO-IHP و WMO، جریان محیط زیستی را بخشی از مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) می‌دانند و تأکید دارند که تخصیص آب برای محیط زیست باید در کنار نیازهای انسانی، کشاورزی و صنعتی در تراز تصمیم‌گیری لحاظ شود. از سوی دیگر، در ایران نیز بر اساس قانون حفاظت، احیا و مدیریت تالاب‌ها (۱۳۹۶) و ماده ۶۲ قانون برنامه چهارم توسعه، وزارت نیرو و سازمان حفاظت محیط زیست مکلف به تعیین و تخصیص جریان محیط زیستی برای رودخانه‌ها و تالاب‌ها شده‌اند. روش‌های برآورد جریان محیط زیستی به طور کلی به چهار گروه اصلی اکوهیدرولوژیکی، هیدرولیکی، شبیه‌سازی زیستگاه و جامع تقسیم می‌شوند (آرتینگتون^۴ و همکاران، ۲۰۱۸).

۲. پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در خصوص ارزیابی و برآورد جریان محیط زیستی تا کنون انجام شده است. بیشتر روش‌های موجود توسط (آکرمن و دانبار^۵، ۲۰۰۴) و آرتینگتون و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شده است. در حوضه مطالعاتی ارس و به‌خصوص در دره‌رود نیز مطالعاتی برای برآورد جریان محیط زیستی انجام یافته، که در زیر ارائه شده است.

۱-۲. پیشینه پژوهش در منطقه مطالعاتی

جباریان امیری و همکاران (۱۳۹۷) در حوضه آبخیز آبگرم، رودخانه هروچای برای برآورد جریان محیط زیستی از سه روش مدل‌سازی بارش - رواناب، روش هیدرولوژیک و مدل پارامترهای تغییر هیدرولوژیکی استفاده کردند؛ بر اساس نتایج این تحقیق روش‌های هیدرولوژیکی به دلیل عملی‌تر بودن و زمان کوتاه‌تر محاسبه در تعیین جریان محیط زیستی انتخاب شدند و از روش منحنی تداوم جریان، مقدار جریان محیط زیستی ۰/۱۹ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد.

نصیری خیای و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیق خود نقش سد سیلان رودخانه قره‌سو اردبیل را در میزان تغییر مؤلفه‌های جریان محیط زیستی در دو ایستگاه ارباب کندی (قبل از سد سیلان) و دوست بیگلو (بعد از سد سیلان) با استفاده از نرم‌افزار

1. Richter
2. Tennant
3. Acreman & Dunbar
4. Arthington
5. Acreman & Dunbar

IHA در دوره آماری ۱۳۸۴ - ۱۳۹۳ بررسی کردند. احداث سد باعث افزایش ۵۹ درصدی جریان‌های حد پایین شد و بده اوج جریان در ایستگاه بعد از سد روند متعادل‌تری دارد که به دلیل اثر تنظیمی سد مخزنی سبلان است.

نادری و همکاران (۱۳۹۹) جریان زیست‌محیطی رودخانه قره‌سو با استفاده از روش‌های مختلف هیدرولوژیکی و هولستیک شامل تنانت، منحنی تداوم جریان، جریان پایه آزیان، انتقال منحنی تداوم جریان، کمبود جریان اکولوژیکی و مدل ذخیره رومیزی برآورد و مقایسه شد. نتایج نشان داد روش‌های مختلف مقادیر متفاوتی برای جریان زیست‌محیطی ارائه می‌کنند و روش انتقال منحنی تداوم جریان (FDC-Shifting) در کلاس مدیریتی C، با تخصیص حدود ۴۸/۵ درصد جریان طبیعی رودخانه، مناسب‌ترین گزینه برای حفظ سلامت اکوسیستم رودخانه قره‌سو معرفی شد.

رئوف و علی اوغلی (۱۴۰۰) در پژوهشی روی رودخانه بالیخلوچای، جریان محیط زیستی طی دوره آماری ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۳ با استفاده از روش‌های تنانت، تسمن، منحنی تداوم جریان و نرم‌افزار IHA ارزیابی شد. نتایج نشان داد مقادیر برآوردشده جریان محیط زیستی در روش‌های مختلف تفاوت قابل توجهی دارند و بهره‌برداری از سد یامچی موجب تغییرات متوسط تا زیاد در شاخص‌های هیدرولوژیکی و مؤلفه‌های اکولوژیکی جریان شده است؛ به گونه‌ای که حدود ۳۸/۶ درصد از پارامترهای هیدرولوژیکی و ۶/۵ درصد از مؤلفه‌های محیط زیستی جریان تحت تأثیر قرار گرفته‌اند.

ستایشی نسا و همکاران (۱۴۰۲) در ارزیابی مؤلفه‌های جریان محیط زیستی (EFCs) در رودخانه خیابوچای با استفاده از نرم‌افزار IHA نشان دادند طی دوره‌های اخیر، مقادیر جریان‌های کمینه، جریان پایه و تداوم رژیم طبیعی رودخانه به طور محسوسی کاهش یافته، در حالی که تعداد روزهای با بده صفر، فراوانی و تداوم جریان‌های کم‌آبی و نرخ تغییرات جریان افزایش یافته است. همچنین، تشدید رخداد جریان‌های حدی و کاهش پیوستگی جریان بیانگر افت سلامت هیدرولوژیکی و اکولوژیکی رودخانه است که عمدتاً به کاهش بارندگی، وقوع خشکسالی و کاهش آبدهی نسبت داده شده است.

مصطفی‌زاده و همکاران (۱۴۰۴) مطالعه کردند که رژیم جریان رودخانه‌ها تحت تأثیر عوامل انسانی، به‌ویژه احداث سد، دچار تغییرات معناداری در مؤلفه‌های جریان بالا، جریان پایین و جریان پایه می‌شود. نتایج نشان داد رودخانه تنظیم‌شده نسبت به رودخانه طبیعی کاهش بیشتری در جریان‌های کمینه و پایه و تغییر محسوس‌تری در الگوی رژیم جریان داشته است که بر مدیریت و تخصیص جریان‌های محیط زیستی تأثیر مستقیم دارد.

۲-۲. پیشینه پژوهش در رودخانه مورد مطالعه

مهندسین مشاور لار (۱۳۹۰) برای مطالعات ارزیابی اثرات محیط زیستی طرح سد عمارت (EIA) نیاز آبی محیط زیستی دره‌رود در بازه پایین‌دست سد عمارت را محاسبه کردند. در این مطالعات که بر اساس روش تنانت صورت گرفته است؛ برای شش ماه اول سال آبی ۶۶۰ لیتر بر ثانیه و برای شش ماه دوم ۱۹۹۰ لیتر بر ثانیه جریان محیط زیستی در نظر گرفته شد. در اصلاحیه گزارش، براساس قضاوت کارشناسی نیز برآوردی به صورت ماهانه ارائه شده است، و توصیه شده که رهاسازی نیاز آبی محیط زیست نباید از این میزان کمتر شود.

در بسیاری از حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک، ضرایب ثابت روش تنانت به تعیین جریان‌های بسیار کم منجر می‌شود، به طوری که در چند کیلومتر ابتدایی بر اثر تبخیر و نفوذ در بستر ناپدید شده، و سبب قطع پیوستگی عرضی و طولی رودخانه و خشک شدن بستر در ماه‌های کم‌آبی می‌شود (صدقی اصل و پورصالحان^۱، ۲۰۲۵). به طور نمونه در رودخانه بشار، مقادیر بده تنانت بسیار کمتر از نیاز زیستی ماهیان شاخص بوده است (مظلومی^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). این مشکل در رودخانه‌های هند (با شرایط اقلیمی مشابه ایران) نیز گزارش شده است (خان^۳ و همکاران، ۲۰۲۴).

1. Sedghi-Asl & Poursalehan

2. Mazloomi

3. Khan

جباریان امیری (۱۳۹۵) بده جریان محیط زیستی ۲۹ رودخانه داخلی در حوضه‌های آبخیز محدوده مدیریتی شرکت آب منطقه‌ای اردبیل را بررسی کرد. هدف اصلی از این مطالعات، تعیین بده محیط زیستی از سه روش (مدل‌سازی بارش - رواناب، روش هیدرولوژیک FDC و مدل تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک) بوده است. بر اساس این نتایج، روش هیدرولوژیک FDC (با جریان پایه رودخانه معادل Q_{75} یا Q_{90}) برای برآورد بده محیط زیستی تعداد ۲۹ رودخانه - ایستگاه هیدرومتری استان پیشنهاد شده است. در این مطالعات حداقل بده محیط زیستی رودخانه دره‌رود در ایستگاه هیدرومتری مشیران $0/507$ متر مکعب در ثانیه (معادل Q_{90} منحنی تداوم جریان و برابر با $6/5$ درصد از بده متوسط سالیانه رودخانه) برآورد شده است.

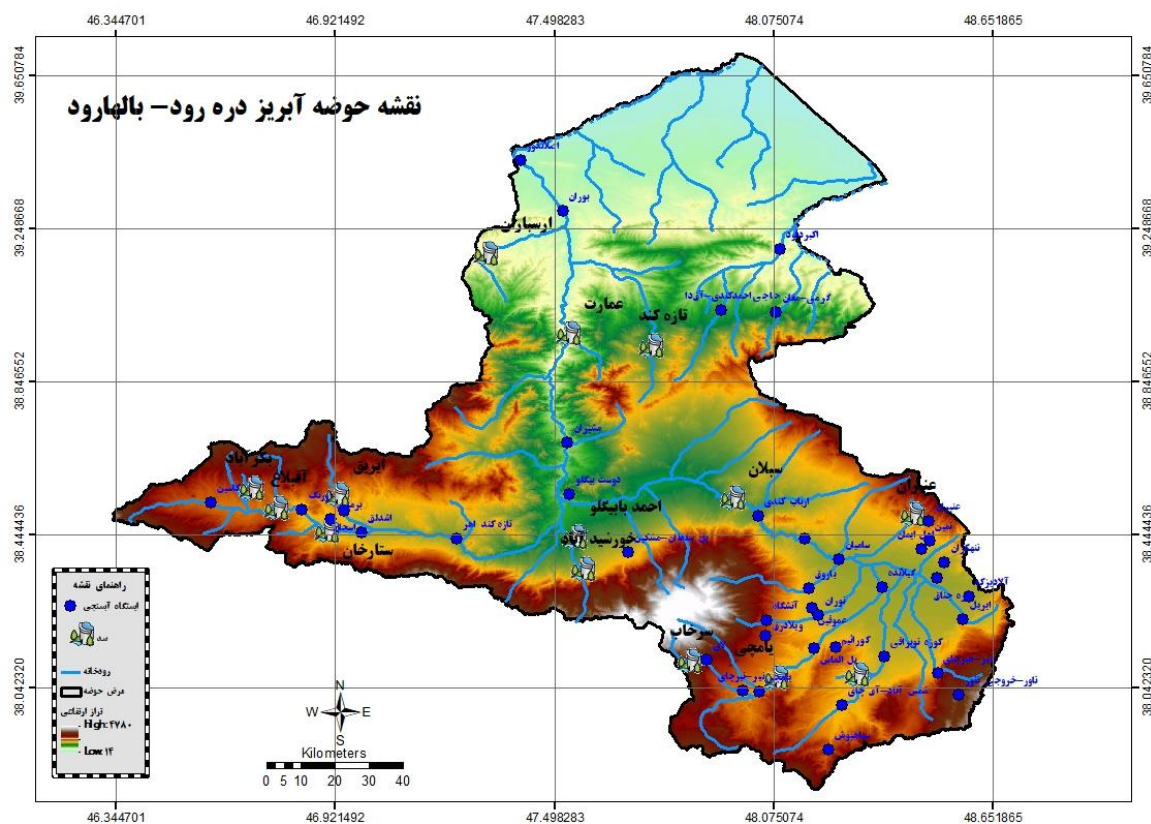
قاسمی، ولی‌نسب و محمدپور (۱۴۰۱) جریان محیط زیستی رودخانه دره‌رود استان اردبیل در ایستگاه هیدرومتری مشیران را براساس دوره آماری ۳۰ ساله، با روش‌های هیدرولوژیک و اکوهیدرولوژیک (Tessman, Arkansas, Tennant, ABF و FDC-Shifting) با هدف حفاظت از اکوسیستم آبی و آبریزان برآورد کردند. و روش FDC Shifting در کلاس مدیریتی B را به دلیل حفظ عملکرد زیستگاه نسبت به دیگر روش‌های استفاده شده در ارجحیت قرار دادند.

بررسی سوابق پژوهش در بازه مطالعاتی رودخانه دره‌رود نشان می‌دهد مطالعات پیشین عمدتاً بر تعداد محدودی از روش‌های هیدرولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی، دوره‌های آماری کوتاه‌تر و داده‌های شاهد متمرکز بوده‌اند. همچنین در این مطالعات، نقش رژیم جریان طبیعی، روش‌های نوین اکوهیدرولوژیکی و هیدرولیکی، ارزیابی آماری و مقایسه جامع روش‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برای برآورد جریان محیط زیستی در پژوهش حاضر، از داده‌های بلندمدت برای طبیعی‌سازی رژیم جریان استفاده شده است. همچنین، مجموعه کامل‌تری از روش‌های ساده و کاربردی مورد آزمون قرار گرفته، و نتایج به صورت منطقی و با شاخص‌های آماری مقایسه شده است.

روش پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دره‌رود، به وسعت بیش از ۱۳۶۰۰ کیلومترمربع است. بیشترین ارتفاع آن ۴۸۱۱ در ارتفاعات سبلان و کمترین ارتفاع آن ۴۳۵ متر است. این حوضه در شرق و جنوب شرق با ارتفاعات حصاربلاغی، باغر و داغ و خلخال در جنوب با ارتفاعات سبلان در غرب با ارتفاعات ایرداغ و اهرچای و کلیبر محدود شده است. سرشاخه‌های اصلی دره‌رود، اهرچای و رودخانه قره‌سو هستند که در نزدیکی دوست‌بیگلو به یکدیگر می‌پیوندند و محدوده مطالعاتی از این قسمت شروع می‌شود. این رودخانه در حوضه آبریز رودخانه ارس که در شبکه دریای خزر قرار دارد تبدیل به یکی از رودخانه‌های پرآب داخلی شده است و به عنوان یکی از شاخه‌های رودخانه ارس شناخته می‌شود. حوضه این رودخانه در محدوده بین طول جغرافیایی 46° تا 45° و عرض جغرافیایی 37° تا 39° قرار دارد و شامل بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل می‌شود. مساحت حوضه آبریز دره‌رود در محل پیوند به رود ارس، بیش از ۱۳۶۰۰ کیلومتر مربع است. شکل ۱ سیمای حوضه دره‌رود را نشان می‌دهد.



شکل ۱. حوضه آبریز دره رود

روی رودخانه دره رود، دو ایستگاه آب‌سنجی وجود دارد که برای این مطالعات ایستگاه آب‌سنجی مشیران به دلیل قرار گرفتن در ابتدای محدوده مطالعاتی انتخاب شد. ایستگاه مشیران از قدیمی‌ترین ایستگاه‌های هیدرومتری ایران بوده، که در دوران بنگاه مستقل آبیاری (سال ۱۳۲۹) تأسیس شده است. متوسط آبدهی بلندمدت این ایستگاه ۱۱/۹ مترمکعب بر ثانیه با سطح حوضه ۱۱۲۹۳ (Km²) و ارتفاع ۶۸۰ متر است. با توجه به وجود نقص آماری، دوره آماری ۵۴ ساله از سال آبی ۱۳۴۹ - ۱۳۵۰ تا سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۳ به عنوان دوره مناسب این مطالعات انتخاب شد. داده‌های ایستگاه مشیران از طریق نامه‌نگاری بین دانشگاه تهران و شرکت مدیریت منابع آب تهیه شد.

۲. طبیعی‌سازی جریان

روش‌های برآورد جریان محیط زیستی به‌خصوص روش‌های نوین که بر تحلیل شاخص‌های هیدرولوژیکی مبتنی هستند؛ مستقیم از رژیم طبیعی جریان استخراج می‌شوند. در صورت استفاده از جریان تنظیم‌شده، نتایج این شاخص‌ها دچار انحراف می‌شود و تفسیر اکولوژیکی آن‌ها با خطا همراه بود. طبیعی‌سازی جریان پیش‌نیاز اجرای صحیح این روش‌ها و تضمین‌کننده اعتبار نتایج آن‌هاست (ریشر^۱ و همکاران، ۲۰۰۳). روش‌های مختلفی جهت طبیعی‌سازی جریان (مانند: روش گسترش، روش منطقه‌ای بر اساس منحنی تداوم زمان جریان، روش SAR بر اساس روش منطقه‌ای) وجود دارد. در این مطالعات با توجه به اینکه جریان طبیعی به رژیم جریانی گفته می‌شود که اثر مداخلات انسانی نظیر تنظیم سدها، برداشت آب، انحراف جریان و سایر مصارف از آن حذف شده باشد (پاف^۲ و همکاران، ۱۹۹۷) و در اختیار قرار گرفتن اطلاعات جریان بدون تنظیم سدهای بالادست و مصارف از شرکت مدیریت منابع آب، حوضه ارس، جریان طبیعی به شرح زیر به دست آمد.

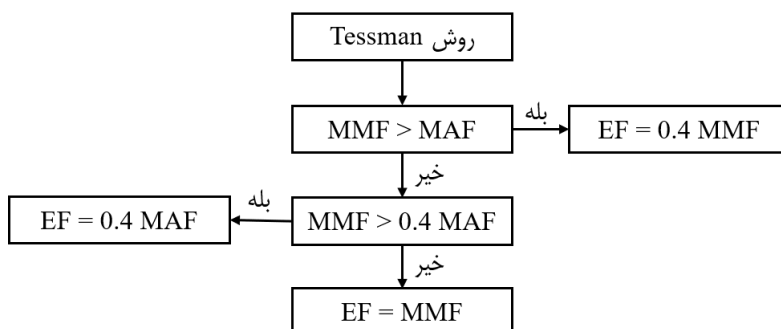
1. Richter
2. Poff

سه سری داده از شرکت مدیریت منابع آب دریافت شد؛ سری اول آبدهی رودخانه در شرایط فعلی (جریان مشاهداتی) که توسط ایستگاه‌های آب‌سنجی اندازه‌گیری شده است، سری دوم شامل داده‌هایی است که اثر تنظیم سدها از جریان مشاهداتی حذف می‌شود (جریان غیرتنظیمی). سری سوم شامل اطلاعات مصارف است. در این مطالعه با توجه به تعریف جریان طبیعی که پیش‌تر گفته شد اطلاعات مصارف به جریان غیرتنظیمی اضافه شد.

۳. برآورد جریان محیط زیستی

روش تنانت یکی از روش‌های قدیمی و پرکاربرد هیدرولوژیکی برآورد جریان محیط زیستی نخستین بار در ایالت مونتانا (ایالات متحده آمریکا) در دهه ۱۹۷۰ میلادی توسعه یافت (تنانت^۱، ۱۹۷۶). هدف اصلی این روش، ارائه راهکاری ساده و سریع برای تعیین جریان‌های مورد نیاز محیط زیستی در رودخانه‌هایی بود که داده‌های هیدرولوژیکی آن‌ها در دسترس است، اما اطلاعات زیستی و اکولوژیکی محدود است. اساس روش تنانت بر این فرض استوار است که سلامت زیستگاه‌های آبریان و اکوسیستم رودخانه‌ای مستقیم با میزان جریان موجود نسبت به میانگین جریان سالانه مرتبط است. بنابراین، با اختصاص درصدی از میانگین جریان سالانه به عنوان جریان محیط زیستی در ماه‌ها یا فصل‌های مختلف، می‌توان شرایط زیستی مطلوب یا قابل قبول را حفظ کرد (تنانت، ۱۹۷۶؛ ثارمه^۲، ۲۰۰۳). در این روش، جریان‌های محیط زیستی معمولاً به صورت درصدی از میانگین جریان سالانه تعیین می‌شوند. این روش در ایران ۲ بار اصلاح شد و در اصلاحیه دوم الگویی تکامل یافته از روش اصلی است که در آن به جای یک درصد ثابت از میانگین جریان سالانه (MAF)، درصدهای متفاوت برای هر ماه از میانگین جریان ماهانه بلندمدت (MMF) پیشنهاد می‌شود. در این روش در ماه‌هایی که (MMF) کمتر از (MAF) است (ماه‌های کم‌جریان)، ضریب ۰/۳ استفاده می‌شود و برای حالت برعکس (ماه‌های پر جریان)، ضریب ۰/۱ اعمال می‌شود.

روش تسمن یکی از روش‌های توسعه‌یافته از مدل تنانت است که در سال ۱۹۸۰ توسط تسمن ارائه شد. این روش با هدف رفع محدودیت‌های روش تنانت و در نظر گرفتن تغییرات فصلی جریان رودخانه‌ها طراحی شد (تسمن^۳، ۱۹۸۰). در حالی که روش تنانت تنها از میانگین جریان سالانه (MAF) برای تخمین جریان محیط زیستی استفاده می‌کرد، روش تسمن علاوه بر آن از میانگین جریان ماهانه (MMF) نیز با استفاده از یک الگوی مقایسه‌ای بهره می‌گیرد تا نوسانات طبیعی فصلی در رژیم جریان بهتر بازتاب یابد (ثارمه، ۲۰۰۳؛ اسمختین، رونگا و دول^۴، ۲۰۰۶). روندنمای روش تسمن برای ارزیابی جریان‌های محیطی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲. روندنمای روش تسمن برای ارزیابی جریان‌های محیط زیستی

1. Tennant
2. Tharme
3. Tessen
4. Smakhtin, Revenga & Döll

در روش جریان پایه آبزبان که توسط نهادهای محیط زیستی آمریکا توسعه یافت، فرض می‌شود میانگین بلندمدت جریان در خشک‌ترین ماه سال برای ماهی‌ها کافی است مگر اینکه جریان اضافی‌ای برای نیازهای تخم‌ریزی و تولید مثل آن‌ها لازم باشد. هدف اصلی روش تعیین «حداقل جریان لازم برای بقا» طی سال است، نه جریان‌های کامل اکولوژیک. این روش برای رودخانه‌های فصلی که دبی جریان صفر می‌شود کارایی ندارد.

منحنی تداوم جریان^۱ (FDC) یکی از ابزارهای بنیادی در تحلیل رفتار هیدرولوژیکی رودخانه‌هاست که توزیع آماری جریان را در بازه‌های زمانی مختلف نمایش می‌دهد. این منحنی نشان می‌دهد یک مقدار مشخص از بده چه درصدی از زمان در رودخانه جاری بوده و بنابراین، الگوی فراوانی و تداوم جریان را به صورت جامع و بدون وابستگی به ترتیب زمانی رخدادها ارائه می‌کند (وگل و فنسی^۲، ۱۹۹۴). در این روش بده متناظر درصدی که معمولاً ۹۰ است را در تمام روزهای سال به عنوان جریان محیط زیستی در نظر می‌گیرند.

انتقال منحنی تداوم جریان^۳ (FDC-Shifting) نخستین بار توسط اسماکتین، رونگا و دول (۲۰۰۴) در مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب توسعه یافت. این روش مبتنی بر استفاده از منحنی تداوم جریان به عنوان نمایش‌گر الگوی آماری تغییرات بده رودخانه طی زمان است. در این روش، فرض بر این است که بخش‌های مختلف منحنی تداوم جریان (نظیر بده‌های بالا، متوسط و پایین) به طور مستقیم با نیازهای زیستی موجودات آبی و سلامت اکوسیستم مرتبط هستند. بنابراین، با جابه‌جا کردن منحنی تداوم جریان طبیعی به سمت پایین می‌توان رژیم جریان تعدیل‌شده‌ای را تعریف کرد که بیانگر شرایط جریان محیط زیستی است. در این روش برای محاسبه جریان محیط زیستی از نرم‌افزار GEFC استفاده می‌شود (اسماختین، رونگا و دول^۴، ۲۰۰۴؛ اسماکتین و آنپوتاس^۵، ۲۰۰۶).

روش محدوده تغییرپذیری^۶ (RVA) نخستین بار توسط ریشتر و همکاران (۱۹۹۷) در چارچوب رویکرد شاخص‌های تغییر هیدرولوژیکی توسعه یافت. هدف اصلی آن، حفظ الگوی طبیعی تغییرپذیری جریان رودخانه‌ها است؛ زیرا پویایی جریان طی زمان یکی از عوامل کلیدی در پایداری اکوسیستم‌های رودخانه‌ای محسوب می‌شود. بر اساس فلسفه این روش، نه تنها مقدار میانگین جریان بلکه دامنه نوسانات، فراوانی، مدت‌زمان، زمان وقوع و نرخ تغییرات جریان نیز برای سلامت اکولوژیکی سیستم رودخانه حیاتی است. بنابراین، به جای تعیین تنها یک عدد ثابت به عنوان جریان محیط زیستی، یک محدوده قابل قبول از تغییرات جریان طبیعی را پیشنهاد می‌کند که در آن، شرایط اکولوژیکی و فرایندهای زیستی حفظ می‌شوند. این روش در نرم‌افزار (IHA) قابل اجرا است و داده‌های هیدرولوژیکی را با گام زمانی روزانه دریافت می‌کند و تمامی شاخص‌های هیدرولوژیکی و مؤلفه‌های جریان محیط زیستی را بر اساس سری زمانی روزانه محاسبه می‌کند. استفاده از داده‌های روزانه امکان تحلیل دقیق بزرگی، مدت، فراوانی، زمان وقوع و نرخ تغییرات جریان را فراهم می‌کند (ریشتر^۷ و همکاران، ۱۹۹۷).

روش ذخیره رومیزی^۸ (DRM) یکی از روش‌های توسعه‌یافته برای برآورد جریان‌های محیط زیستی است که توسط پژوهشگران انستیتو تحقیقات آب آفریقای جنوبی در اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی طراحی شد و هدف آن، برآورد نیاز محیط زیستی رودخانه‌ها با استفاده از داده‌های حداقلی هیدرولوژیکی است، بدون آنکه نیاز به مدل‌سازی اکوهیدرولوژیکی پیچیده داشته باشد. روش DRM در اصل بر پایه داده‌های هیدرولوژیکی بلندمدت، شاخص‌های آماری جریان و ویژگی‌های مورفولوژیکی حوضه

1. Flow Duration Curve
2. Vogel & Fennessy
3. Flow Duration Curve shifting
4. Smakhtin, Revenga & Döll
5. Smakhtin & Anputhas
6. Range of Variability Approach
7. Richter
8. Desktop Reserve Model

آبریز طراحی شده است. در این روش بر اساس اهداف مدیریتی و شرایط محیط زیستی وضعیت اکولوژیکی هدف از کلاس A (طبیعی) تا کلاس F (به شدت تخریب شده) تعیین می‌شود (هیوز و مانستر^۱، ۲۰۰۰ و هیوز و هنارت^۲، ۲۰۰۳).

روش‌های گفته شده در بالا تمامی زیرمجموعه روش‌های اکوهیدرولوژیکی است.

روش‌های مبتنی بر کیفیت آب یکی از رویکردهای مکمل در ارزیابی جریان محیط زیستی محسوب می‌شوند تعیین جریان محیط زیستی باید به گونه‌ای باشد که متغیرهای کلیدی کیفیت آب در محدوده‌های قابل قبول محیط زیستی باقی بمانند. حدود مجاز متغیرها بر اساس استانداردها یا معیارهای حفاظتی تعیین می‌شود. جریان محیط زیستی باید تضمین کند که کیفیت آب حتی در پایین دست تخلیه‌ها از این آستانه‌ها تجاوز نکند. متغیری که در شرایط بحرانی‌تری نسبت به سایر متغیرها باشد؛ جهت برآورد جریان محیط زیستی انتخاب می‌شود. کمترین بدهی که کیفیت آب را در محدوده مجاز نگه می‌دارد به عنوان جریان محیط زیستی مبتنی بر کیفیت آب انتخاب می‌شود. این بده معمولاً در شرایط کم‌آبی بحرانی تعیین می‌شود. برای برآورد جریان محیط زیستی از روش کیفیت آب، از رابطه ۱ با عنوان معادله Q استفاده می‌شود (چوبانگلوس، برتون و استنسل^۳، ۲۰۰۳).

$$(Q_1 + Q_c) \times C_0 = (Q_1 \times C_1) + (Q_2 \times C_2) \quad (1)$$

که در این رابطه:

Q ₁	بده اولیه
Q ₂	بده ثانویه
C ₁	غلظت اولیه
C ₂	غلظت ثانویه
Q _c	بده لازم که باید به غلظت اولیه اضافه شود تا به غلظت مطلوب برسد
C ₀	غلظت مطلوب است.

غلظت و بده ثانویه برای شرایطی است که در محل پایش متغیرها جریان دیگری وارد شود.

در روش هیدرولیکی محدوده خیس شده فرض می‌شود که بین محدوده خیس شده (P) با بده جریان (Q) رابطه‌ای غیرخطی وجود دارد. در محدوده‌ای خاص از این رابطه، تغییرات P در مقابل Q کاهش می‌یابد؛ یعنی با افزایش بده، مقدار محدوده خیس شده تقریباً ثابت می‌ماند. این نقطه شکست در منحنی P-Q به عنوان جریان محیط زیستی بهینه یا حداقل جریان لازم برای حفظ زیستگاه‌های آبی در نظر گرفته می‌شود (آنیر و همکاران^۴، ۲۰۰۴). رابطه بین محیط ترشده و بده روی چهار مقطع فرضی از حالت تقریباً مستطیل تا تقریباً مثلث استخراج شد که طبق نتایج برای مجرای اصلی رودخانه تقریباً مستطیل شکل، این

1. Hughes & Münster
2. Hughes & Hannart
3. Tchobanoglous, Burton & Stensel
4. Annear

رابطه به صورت لگاریتمی و برای مجرای اصلی رودخانه تقریباً مثلث شکل، به صورت توانی است که رابطه لگاریتمی با توجه به مقاطع رودخانه دره رود مناسب است. نقطه عطف در این روش به دو طریق محاسبه می‌شود:

۱. شیب منحنی: نقطه شکست با مشتق‌گیری از رابطه ۲ و قرار دادن آن برابر یک، به دست می‌آید.

$$\frac{dy}{dx} = 1 \rightarrow \frac{a}{Q} = 1 \quad (2)$$

در این رابطه x معرف بده جریان و y معرف محیط خیس شده است.

۲. حداکثر انحنا: تعیین نقطه انحنای ماکزیمم، روش دیگری برای مشخص کردن نقطه شکست است. نسبت انحنا در هر تابع از رابطه ۳ به دست می‌آید. نقطه‌ای که در آنجا k حداکثر است به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای تعیین حداقل جریان محیط زیستی می‌تواند مد نظر باشد. در رابطه ۳، k = انحنا منحنی بده - محیط خیس شده، Q = بده بر حسب متر مکعب بر ثانیه و a = ضریب حاصل از برازش منحنی بده در مقابل محیط خیس شده است.

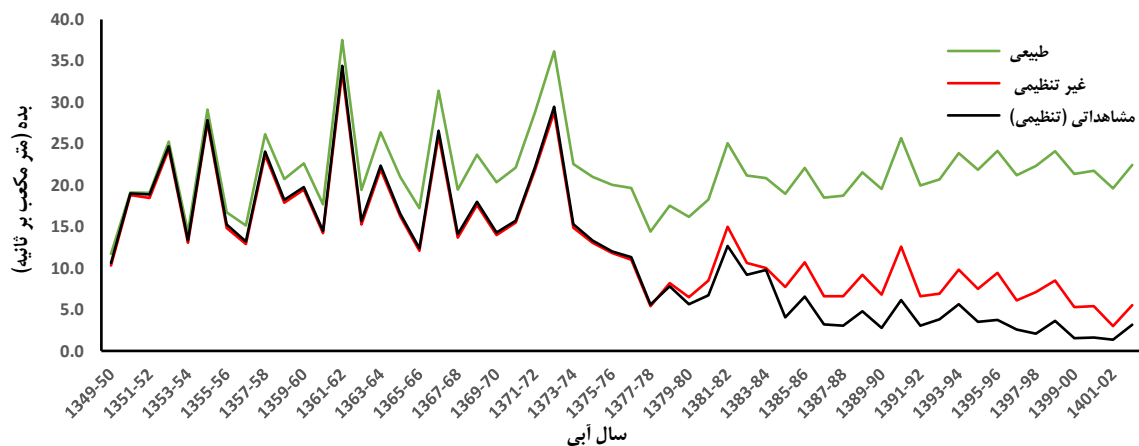
$$k = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \rightarrow k = \frac{\left|\frac{-a}{Q^2}\right|}{\left[1 + \left(\frac{a}{Q}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

بحث و یافته‌های پژوهش

۱. طبیعی سازی جریان

در این تحقیق جهت طبیعی سازی داده‌های جریان در ایستگاه مشیران (رودخانه دره‌رود) در دوره شاخص آماری ۵۴ ساله (سال آبی ۱۳۵۰ - ۱۴۰۳) استفاده شد. سه سری داده‌های مربوط به جریان در شبکه آبراهه‌ای دره‌رود در بالادست بازه مشیران، از شرکت مدیریت منابع آب، دفتر حوضه ارس، دریافت شد. سری اول آبدهی رودخانه در شرایط فعلی (جریان مشاهداتی) که توسط ایستگاه‌های آبنسجی اندازه‌گیری شده است. سری دوم شامل داده‌هایی است که اثر تنظیم سدها از جریان مشاهداتی حذف می‌شود (جریان غیرتنظیمی). سری سوم شامل اطلاعات مصارف آب بوده است. با مشاوره کارشناسان حوضه ارس شرکت مدیریت منابع آب و آب منطقه‌ای اردبیل، برای بازسازی جریان طبیعی از جمع سری داده‌های میدانی دوم و سوم استفاده شد. مقایسه جریان مشاهداتی با جریان غیرتنظیمی (جریانی که اثر سازه‌های تنظیمی از جریان مشاهداتی حذف شده است) در جدول ۱ و شکل ۳ نشان می‌دهد تا قبل از سال ۱۳۷۷ این دو نمودار تقریباً منطبق بر هم هستند. اما پس از این سال مقدار جریان غیر تنظیمی بیشتر از جریان مشاهداتی می‌شود که نشان‌دهنده قرار گرفتن جریان رودخانه تحت تأثیر تنظیم سدها است. زمان بهره‌برداری سدهای بالادست نتایج به دست آمده را تأیید می‌کند. در سال ۱۳۸۳ با بهره‌برداری سد یامچی و در سال ۱۳۸۵ با بهره‌برداری از سد سبلان شاهد افزایش اختلاف این دو نمودارها هستیم. سپس با اضافه کردن مصارف به جریان غیر تنظیمی، جریان طبیعی حاصل می‌شود و با مقایسه جریان طبیعی با جریان غیر تنظیمی و مشاهداتی، دریافت می‌شود از آنجا که اختلاف بین جریان مشاهداتی و غیرتنظیمی در برابر اختلاف بین جریان مشاهداتی و طبیعی کم است؛ تغییرات جریان عمدتاً ناشی از مصارف نسبت به مدیریت مخازن است. همچنین، اختلاف زیاد جریان غیرتنظیمی با جریان طبیعی نشان می‌دهد تغییرات ایجاد شده فراتر از اصلاح برنامه تخصیص سدها است و احیای رودخانه به اقدامات ساختاری یا مدیریتی گسترده‌تری نیاز دارد. مقایسه تغییرات متوسط آبدهی ماهانه مشاهداتی، غیر تنظیمی و طبیعی دره‌رود برای ایستگاه مشیران در شکل ۴ و جدول ۱ ارائه شده است. این مقایسه امکان تحلیل تغییرات فصلی جریان را فراهم می‌کند. در مقایسه جریان مشاهداتی با جریان غیرتنظیمی، عمده اختلاف در ۶ ماه اول سال آبی وجود دارد که نشان از ذخیره آب برای فصل‌های کشاورزی در منطقه دره‌رود است، اما در

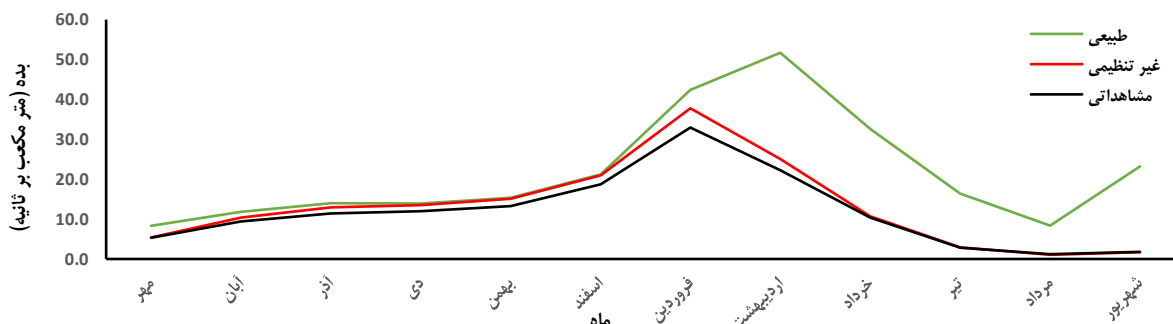
مقایسه این دو جریان با جریان طبیعی، بیشینه جریان از فروردین به اردیبهشت انتقال پیدا کرده است. این بیشینه جریان به دلیل ذوب برف در این منطقه است، اما با توجه به شروع کشاورزی این آورد برای آبیاری زمین‌های منطقه استفاده می‌شود.



شکل ۳. مقایسه بده سالانه تنظیمی و غیر تنظیمی و طبیعی دره‌رود (ایستگاه مشیران) (m^3/s)

جدول ۱. مقایسه تغییرات متوسط آبدهی ماهانه مشاهداتی، غیر تنظیمی و طبیعی دره‌رود - ایستگاه مشیران (m^3/s)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
جریان													
مشاهداتی	۵/۳	۹/۴	۱۱/۴	۱۲/۰	۱۳/۳	۱۸/۷	۳۲/۹	۲۲/۲	۱۰/۳	۲/۸	۱/۲	۱/۸	۳۷۱/۶
غیر تنظیمی	۵/۴	۱۰/۴	۱۲/۹	۱۳/۵	۱۵/۱	۲۰/۹	۳۷/۸	۲۵/۰	۱۰/۷	۲/۹	۱/۱	۱/۷	۴۱۳/۴
طبیعی	۸/۳	۱۱/۸	۱۴/۰	۱۳/۹	۱۵/۴	۲۱/۲	۴۲/۴	۵۱/۷	۳۲/۶	۱۶/۴	۸/۳	۲۳/۲	۶۸۵/۵



شکل ۴. مقایسه تغییرات متوسط آبدهی ماهانه مشاهداتی، غیر تنظیمی و طبیعی دره‌رود - ایستگاه مشیران (m^3/s)

۲. برآورد جریان محیط زیستی

با توجه به توصیه‌های موجود در روش تنانت، دسته‌بندی قابل قبول که برای ۶ ماه اول سال آبی ۱۰ درصد و برای ۶ ماه دوم سال آبی ۳۰ درصد متوسط جریان سالانه (۲۱/۶ مترمکعب بر ثانیه) یعنی مقادیر ۲/۲ و ۵/۵ مترمکعب بر ثانیه را به عنوان جریان محیط زیستی در نظر می‌گیرد، انتخاب شد. اما با توجه به متغیر بودن مقدار جریان محیط زیستی نسبت به زمان، یک مقدار ثابت برای ۶ ماه نمی‌تواند نیاز محیط زیستی رودخانه را تأمین کند.

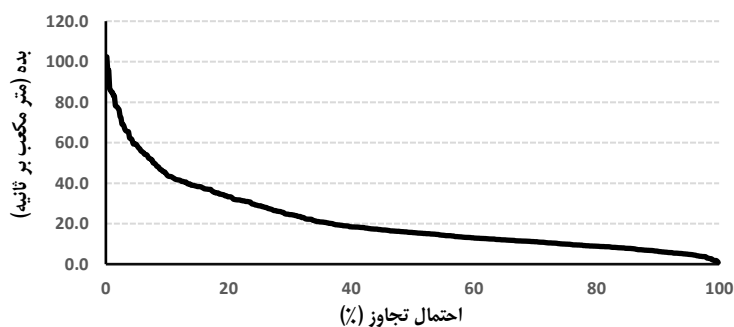
روش تنانت اصلاح‌شده که در ماه‌هایی که متوسط جریان کمتر از متوسط جریان سالانه است (ماه‌های کم‌جریان)، ضریب ۰/۱ برای حالت برعکس (ماه‌های پر جریان)، ضریب ۰/۳ را در متوسط جریان ماهانه اعمال می‌کند، بازه بین ۰/۸ تا

۱۵/۵ مترمکعب بر ثانیه با متوسط ۴/۷ مترمکعب بر ثانیه را به عنوان جریان محیط زیستی در نظر گرفت که باعث شد جریان به دست آمده تا حدی از الگوی جریان طبیعی پیروی کند.

در روش تسمن پس از انجام الگوریتم گفته شده در شکل ۲، مقدار جریان محیط زیستی برای هر ماه به دست آمد. که بازه بین ۸/۳ تا ۲۰/۷ مترمکعب بر ثانیه با متوسط ۱۰/۷ مترمکعب بر ثانیه را به عنوان جریان محیط زیستی در نظر گرفت. که مشاهده می شود درست است که تا حدی با الگوی توزیع ماهانه جریان طبیعی یکسان است، اما با توجه به روش شناسی آن، برای ماه های آبان تا اسفند جریان یکسانی را در نظر گرفته، اما در مجموع مقدار بیشتری برای جریان محیط زیستی نسبت به روش تنانت اصلاح شده به دست آورده است.

در روش جریان پایه آبیان (ABF) لازم است خشک ترین ماه در بین میانگین بلندمدت جریان طبیعی در ماه های سال را پیدا کنیم و آن را به عنوان حداقل جریان برای تمام ماه ها در نظر بگیریم. کمترین میزان آبدی ماهانه جریان طبیعی در هرود - ایستگاه مشیران برای مهر و مرداد با مقدار ۸/۳ متر مکعب بر ثانیه است که این میزان به عنوان جریان محیط زیستی باید در تمام ماه ها تأمین شود.

در روش FDC، منحنی تداوم جریان با استفاده از آمار آبدی ماهانه ۵۴ ساله به دست آمده که در شکل ۵ ارائه شده است. معمولاً Q_{90} به عنوان جریان محیط زیستی در نظر گرفته می شود. این دبی برای کلیه ماه های سال ثابت فرض می شود که مقدار Q_{90} در ایستگاه مشیران برابر ۶/۳ متر مکعب بر ثانیه است.



شکل ۵. منحنی تداوم جریان آبدی طبیعی در هرود (ایستگاه مشیران)

در روش FDC-Shifting، جریان محیط زیستی را در ۶ کلاس مدیریتی (A تا F) که درصدی از میانگین جریان سالانه جهت انتقال منحنی تدام جریان است؛ تولید می کند. درصدهای هر کلاس مدیریتی در جدول ۲ مشخص شده است. کلاس مدیریتی D به عنوان جریان محیط زیستی در این پژوهش انتخاب شد. در کلاس های A، B و C رودخانه در شرایط اکولوژیکی بهتری قرار می گیرد، ولی در تأمین مصارف دچار مشکل می شود. از طرف دیگر، کلاس های پایین تر اکوسیستم منطقه را دچار مشکل می کند. در کلاس مدیریتی D، بده جریان محیط زیستی ماهانه در بازه بین ۱/۵ تا ۱۷/۱ با متوسط ۷/۵ مترمکعب بر ثانیه قرار دارد، که معادل ۳۴ درصد متوسط جریان سالانه است. نتایج این روش تا حد قابل قبولی از الگوی توزیع جریان ماهانه طبیعی پیروی می کند. در چشم انداز ۲۰ ساله نقشه راه آب کشور، سهم جریان محیط زیستی حدود ۳۳ درصد از منابع آب تجدیدپذیر است که به عنوان یک معیار در انتخاب روش مناسب باید مورد نظر قرار گیرد. با بازتوانی رودخانه و دستیابی به کلاس مدیریتی D، می توان برای کلاس بالاتر برنامه ریزی کرد.

در روش DRM، جریان محیط زیستی را در ۷ کلاس مدیریتی (A تا D) تولید می کند. درصدهای هر کلاس مدیریتی در جدول ۳ مشخص شده است. کلاس مدیریتی B/C هم به دلیل نزدیکی درصد در نظر گرفته با درصد کلاس انتخابی در روش FDC-Shifting و هم به دلایل مطرح شده در روش قبل به عنوان کلاس منتخب در این روش برای ایستگاه مشیران در نظر گرفته شد. جریان محیط زیستی محاسبه شده بازه بین ۴/۵ تا ۱۴/۴ با متوسط ۷/۶ مترمکعب بر ثانیه است. روش DRM در

آفریقای جنوبی توسعه یافت است و با توجه به اینکه هنوز این روش برای رودخانه‌های ایران اصلاح نشده؛ نتایج در این پژوهش از همان فرضیات و پارامترهای روش اصلی به دست آمده است.

جدول ۲. متوسط جریان محیط زیستی در کلاس‌های مدیریتی روش FDC-Shifting در نرم‌افزار GEFC، دره‌رود (ایستگاه مشیران)

کلاس طبقه‌بندی	A	B	C	D	E	F
عنوان طبقه‌بندی	طبیعی	اندک تغییر یافته	نسبتاً تغییر یافته	تا حد زیادی تغییر یافته	به شدت تغییر یافته	به طرز بحرانی تغییر یافته
میزان درصد جریان از متوسط جریان سالانه	۷۶/۱	۵۸/۲	۴۴/۷	۳۴/۲	۲۶/۱	۱۹/۵
متوسط جریان محیط زیستی (m^3/s)	۱۶/۴	۱۲/۶	۹/۷	۷/۴	۵/۶	۴/۲

جدول ۳. متوسط جریان محیط زیستی در کلاس‌های مدیریتی روش DRM، دره‌رود (ایستگاه مشیران)

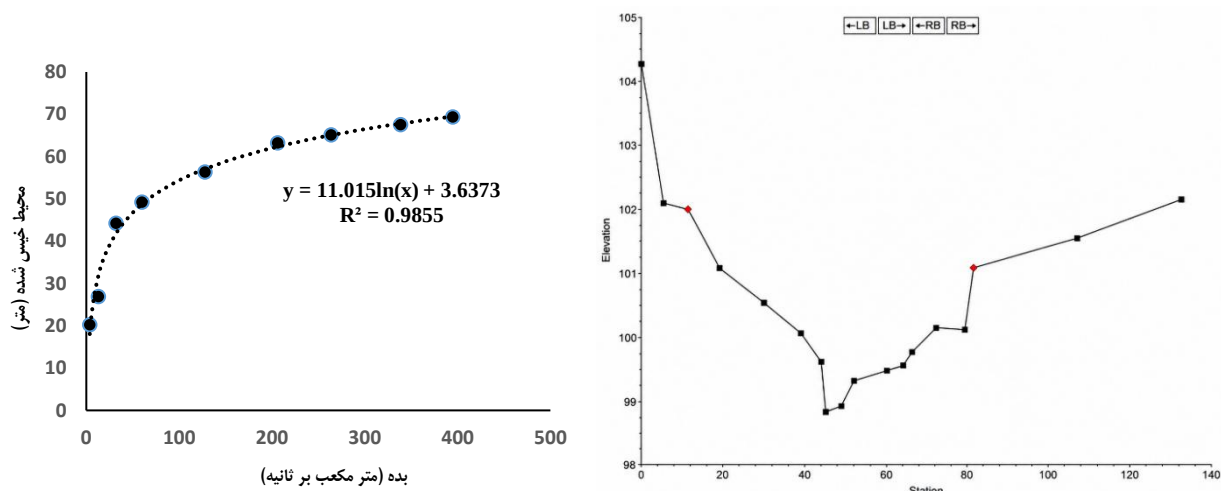
کلاس طبقه‌بندی	A	A/B	B	B/C	C	C/D	D
میزان درصد جریان از متوسط جریان سالانه	۶۱/۹	۵۱/۴	۴۱/۱	۳۵/۰	۲۹/۶	۲۸/۱	۲۵/۶
متوسط جریان محیط زیستی (m^3/s)	۱۳/۴	۱۱/۱	۸/۹	۷/۶	۶/۴	۶/۱	۵/۵

همان‌طور که در روش محدوده تغییرپذیری (RVA) مشخص شد، محدوده‌ای که از جریان طبیعی الگو گرفته شده تا سلامت رودخانه را تحت تأثیر قرار ندهد تعریف می‌شود. برای این روش از نرم‌افزار IHA استفاده شده است. برای مقایسه نتایج برآورد جریان محیط زیستی از روش‌های مختلف، دوره زمانی ماهانه برای توزیع جریان طی سال مورد نظر قرار گرفت. از این‌رو، برای مشخص شدن محدوده تغییرپذیری جریان در توزیع ماهانه، از بین ۳۲ پارامتر IHA، ۱۲ پارامتر گروه اول یعنی بزرگی جریان‌های ماهانه مورد استفاده قرار گرفت. برای حد پایین در ۱۲ ماه سال بازه بین ۰/۲ تا ۳۰/۰ با متوسط ۹/۶ مترمکعب بر ثانیه و برای حد بالا در ۱۲ ماه سال بازه بین ۲/۴ تا ۷۸/۴ با متوسط ۲۷/۶ مترمکعب بر ثانیه را در نظر گرفت از این محدوده می‌توان به عنوان محدوده‌ای جهت حد مجاز جریان محیط زیستی استفاده کرد. علت در نظر گرفتن محدوده‌ای بیشتر از حد جریان طبیعی، در نظر گرفتن تخلیه‌ها مانند فاضلاب و زهاب کشاورزی به رودخانه است که با این کار آستانه‌ای برای مقدار مجاز تخلیه در نظر گرفته می‌شود.

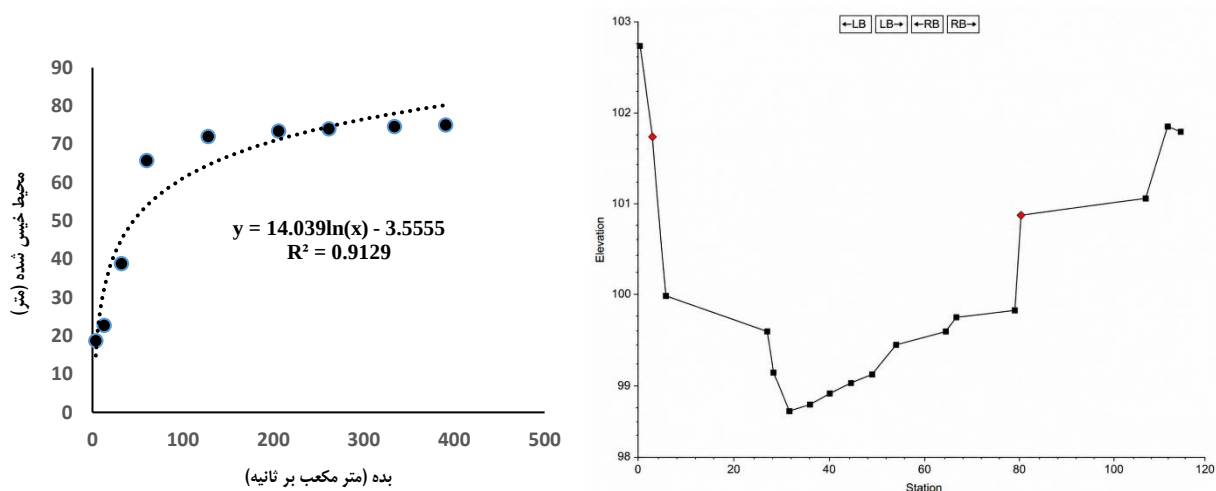
در روش کیفیت آب، آمار متغیرهای کیفیت آب رودخانه دره‌رود در ایستگاه مطالعاتی مشیران (شرکت آب منطقه‌ای اردبیل) مورد بررسی قرار گرفت. برای استفاده از رابطه Q جهت محاسبه بده محیط زیستی، از مقدار متغیر TDS که در بین سایر متغیرها با توجه به استاندارد EPA ایالات متحده آمریکا از مقدار بحرانی تری برخوردار است؛ استفاده شد. در متغیر TDS بحرانی‌ترین غلظت در تاریخ ۱۳۸۹/۱۰/۱۵ با مقدار ۱۸۹۰ (mg/L) و در بده ۲/۱ مترمکعب بر ثانیه اتفاق افتاده است که در رابطه Q به ترتیب مقادیر C_1 و Q_1 را به خود اختصاص می‌دهد. برای مقادیر C_2 و Q_2 با توجه به اینکه در دره‌رود (ایستگاه مشیران)، جریان دیگری به محل پایش اضافه نمی‌شود مقدار صفر می‌دهیم. همچنین با توجه به استاندارد EPA ایالات متحده آمریکا، که غلظت ۵۰۰ (mg/L) به عنوان مقدار TDS مطلوب در نظر گرفته می‌شود؛ برای C_0 اختصاص می‌یابد. با توجه به نتایج رابطه Q، اگر بده ۶ مترمکعب بر ثانیه را به بده رودخانه یعنی ۲/۱ مترمکعب بر ثانیه اضافه کنیم؛ متغیر TDS به غلظت مطلوب می‌رسد. در نتیجه جریان محیط زیستی از روش کیفیت آب در بازه ایستگاه مشیران برابر ۸/۱ مترمکعب بر ثانیه است. با توجه به اینکه این مقدار از بحرانی‌ترین متغیر در بحرانی‌ترین روز به دست آمده است، این مقدار کیفیت آب را در حد انتظار محیط زیست تأمین می‌کند.

برای انجام روش هیدرولیکی محدوده خیس‌شده، اطلاعات و مقاطع بالادست و پایین‌دست بازه مشیران وارد مدل HEC-RAS شد. برای دو مقطع منحنی برازش‌شده لگاریتمی بده - محیط خیس‌شده (آبراهه اصلی) استخراج شد. در شکل‌های ۶ و ۷، مقطع عرضی و منحنی برازش‌شده لگاریتمی بده - محیط خیس‌شده (آبراهه اصلی) به ترتیب برای بالادست و پایین‌دست بازه مشیران ارائه شده است. تحلیل منحنی بده - محیط خیس‌شده نشان می‌دهد در بازه بده‌های کمتر از مقدار آستانه، افزایش جریان موجب فعال شدن بخش‌های قابل توجهی از بستر رودخانه می‌شود؛ امری که نقش اساسی در تأمین زیستگاه‌های مناسب برای

آبزیان کفزی و حفظ پیوستگی زیستگاه‌های درون جریانی ایفا می‌کند. در مقابل، پس از رسیدن به بده آستانه، افزایش جریان عمدتاً به صورت افزایش سرعت جریان بروز می‌یابد و تأثیر آن بر گسترش سطح تماس آب و بستر محدودتر می‌شود. بده متناظر با نقطه تغییر شیب منحنی به عنوان جریان محیط زیستی پیشنهادی در این روش شناسایی شد. نقطه شکست از دو طریق شیب منحنی و حداکثر انحنا برای مقاطع بالادست و پایین‌دست بازه مشیران برآورد شد. متوسط مقدار برآورد شده بین مقاطع بالادست و پایین‌دست به عنوان جریان محیط زیستی در نظر گرفته شد. در روش شیب منحنی مقدار ۱۱ مترمکعب بر ثانیه برای بالادست و مقدار ۱۴ مترمکعب بر ثانیه برای پایین‌دست به دست آمد که متوسط آن برابر ۱۲/۵ مترمکعب بر ثانیه به عنوان جریان محیط زیستی این روش است. در روش حداکثر انحنا مقدار ۷/۸ مترمکعب بر ثانیه برای بالادست و مقدار ۹/۹ مترمکعب بر ثانیه برای پایین‌دست به دست آمد که متوسط آن برابر ۸/۹ مترمکعب بر ثانیه به عنوان جریان محیط زیستی این روش است. در هر دو روش تعیین نقطه شکست مقدار جریان محیط زیستی از بالادست به پایین‌دست افزایش می‌یابد که علت آن افزایش مساحت مقاطع است. در مقایسه بین نتایج شیب منحنی و حداکثر انحنا، با توجه به اینکه نتیجه حاصل از حداکثر انحنا به غیر از دو ماه مرداد و مهر، در سایر ماه‌ها از مقدار متوسط ماهانه جریان طبیعی کمتر است و در آن دو ماه نیز اختلاف کمی با متوسط ماهانه جریان طبیعی دارد به عنوان روش منتخب هیدرولیکی انتخاب و مقدار آن برابر با ۸/۹ مترمکعب بر ثانیه است.



شکل ۶. مقطع عرضی و منحنی برازش شده لگاریتمی بده - محیط خیس شده آبراهه اصلی، دره رود (بالادست ایستگاه مشیران)



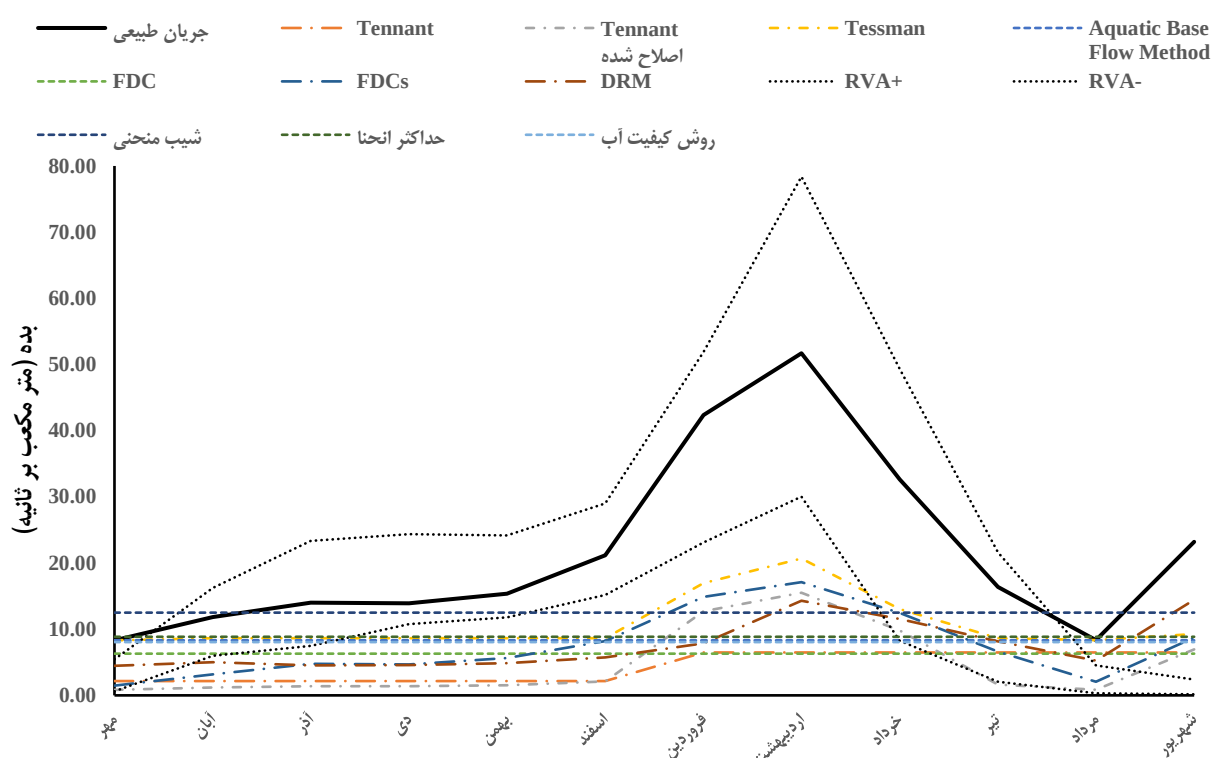
شکل ۷. مقطع عرضی و منحنی برازش شده لگاریتمی بده - محیط خیس شده آبراهه اصلی، دره رود (پایین‌دست ایستگاه مشیران)

مقادیر برآورد جریان محیط زیستی از روش‌های مختلف، در جدول ۴ و شکل ۸ مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج اولیه نشان‌دهنده اختلاف متوسط بده جریان طبیعی و مشاهداتی است. در ایستگاه میشران دره‌رود در شرایطی که اثرات سدها و مصارف وجود نداشته باشد آبدهی رودخانه ۲۱/۶ مترمکعب بر ثانیه است، در حالی که در شرایط فعلی این مقدار تا ۱۱/۸ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته؛ یعنی جریان فعلی (مشاهداتی) رودخانه ۵۵ درصد جریان طبیعی است که مصرف ۴۵ درصدی در بالادست این ایستگاه را نشان می‌دهد. روش تنانت، به دلیل اتکا به درصدی ثابت از متوسط جریان سالانه، کمترین حساسیت را نسبت به تغییرات ماهانه و شرایط هیدرولوژیکی محلی نشان داده و مقادیر نسبتاً یکنواختی را ارائه می‌دهد. در مقابل، نسخه اصلاح‌شده روش تنانت با در نظر گرفتن تغییرات ماهانه، مقادیر واقع‌بینانه‌تری نسبت به رژیم طبیعی جریان ارائه کرده و تا حدی عدم انعطاف‌پذیری روش اصلی را کاهش داده است. روش تسمن به‌ویژه در دوره‌های کم‌آبی، جریان‌های محیط زیستی محافظه‌کارانه‌تری را پیشنهاد می‌کند که نشان‌دهنده تمرکز این روش بر حفاظت از جریان پایه و زیستگاه‌های وابسته به آن است. روش جریان پایه آبریان در تمام ماه‌های سال یک مقدار ثابت را در نظر گرفته است که می‌توان از مقدار آن در تصمیم‌گیری‌های برنامه تخصیص در فصل تخم‌ریزی گونه شاخص منطقه استفاده کرد. روش‌های مبتنی بر منحنی تداوم جریان FDC و FDC-Shifting دامنه وسیع‌تری از تغییرات جریان را منعکس می‌کنند. اما در روش FDC در نهایت یک مقدار ثابت در تمام ماه‌ها در نظر گرفته می‌شود در مقابل روش FDC-Shifting و DRM، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات رژیم جریان دارند و به ویژه در بازنمایی جریان‌های کم‌دوره و جریان‌های پایه عملکرد دقیق‌تری از خود نشان می‌دهند. روش RVA، امکان تحلیل جامع‌تری از تغییرات ناشی از بهره‌برداری را فراهم می‌کنند. نتایج این روش‌ها نشان می‌دهد فقط حفظ یک مقدار حداقل جریان نمی‌تواند تضمین‌کننده سلامت اکولوژیکی رودخانه باشد و حفظ دامنه تغییرات طبیعی جریان از اهمیت بالایی برخوردار است. در بخش روش‌های هیدرولیکی، نتایج روش محیط خیس‌شده که از دو معیار شیب منحنی و حداکثر انحنا استخراج شده‌اند، اختلاف مشخصی را در تعیین نقطه شکست جریان نشان می‌دهند. معیار حداکثر انحنا معمولاً به مقادیر جریان محافظه‌کارانه‌تری منجر شده، در حالی که روش شیب منحنی مقادیر نسبتاً بالاتری را پیشنهاد می‌کند. در نهایت، روش مبتنی بر کیفیت آب با تمرکز بر حفظ شرایط مناسب کیفیت آب رودخانه، جریان محیط زیستی را از منظر متفاوتی ارزیابی می‌کند. نتایج این روش نشان می‌دهد در برخی دوره‌ها، جریان‌های پیشنهادی سایر روش‌ها ممکن است برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها و حفظ کیفیت مطلوب آب کافی نباشند، که این موضوع بر ضرورت تلفیق رویکردهای کمی و کیفی در برآورد جریان محیط زیستی تأکید دارد. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد روش‌های مختلف، بسته به هدف مدیریت، مقیاس زمانی و شرایط هیدرولوژیکی، خروجی‌های متفاوتی ارائه می‌دهند. از این‌رو، استفاده تلفیقی از روش‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفی می‌تواند چارچوبی جامع‌تر و قابل‌اعتمادتر برای تعیین جریان محیط زیستی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوضه آبریز دره‌رود فراهم آورد.

جدول ۴. مقایسه نتایج توزیع ماهانه جریان محیط زیستی دره‌رود (ایستگاه میشران) (m^3/s)

ماه	روش		جریان محیط زیستی									
	جریان مشاهداتی	جریان طبیعی	روش اکوهیدرولوژیکی					روش هیدرولیکی محیط خیس‌شده				
			Tennant	Tennant اصلاح شده	Tessman	ABF	FDC	FDC-Shifting	DRM	RVA	شیب منحنی	حداکثر انحنا
مهر	۵/۳	۸/۳	۲/۲	۰/۸	۸/۳	۸/۳	۶/۳	۱/۵	۴/۵	۰/۶	۵/۵	۱۲/۵
آبان	۹/۴	۱۱/۸	۲/۲	۱/۲	۸/۶	۸/۳	۶/۳	۳/۲	۵/۰	۶/۰	۱۶/۲	۱۲/۵
آذر	۱۱/۴	۱۴/۰	۲/۲	۱/۴	۸/۶	۸/۳	۶/۳	۴/۷	۴/۵	۷/۵	۲۳/۳	۱۲/۵
دی	۱۲/۰	۱۳/۹	۲/۲	۱/۴	۸/۶	۸/۳	۶/۳	۴/۶	۴/۶	۱۰/۸	۲۴/۳	۱۲/۵
بهمن	۱۳/۳	۱۵/۴	۲/۲	۱/۵	۸/۶	۸/۳	۶/۳	۵/۶	۴/۹	۱۱/۸	۲۴/۲	۱۲/۵
اسفند	۱۸/۷	۲۱/۲	۲/۲	۲/۱	۸/۶	۸/۳	۶/۳	۸/۲	۵/۸	۱۵/۲	۲۹/۰	۱۲/۵

فروردین	۳۲/۹	۴۲/۴	۶/۵	۱۲/۷	۱۶/۹	۸/۳	۶/۳	۱۴/۹	۷/۹	۲۳/۱	۵۱/۹	۱۲/۵	۸/۹	۸/۱
اردیبهشت	۲۲/۲	۵۱/۷	۶/۵	۱۵/۵	۲۰/۷	۸/۳	۶/۳	۱۷/۱	۱۴/۳	۳۰/۰	۷۸/۴	۱۲/۵	۸/۹	۸/۱
خرداد	۱۰/۳	۳۲/۶	۶/۵	۹/۸	۱۳/۰	۸/۳	۶/۳	۱۲/۵	۱۱/۵	۸/۳	۴۹/۳	۱۲/۵	۸/۹	۸/۱
تیر	۲/۸	۱۶/۴	۶/۵	۱/۶	۸/۶	۸/۳	۶/۳	۶/۶	۸/۲	۲/۰	۲۱/۶	۱۲/۵	۸/۹	۸/۱
مرداد	۱/۲	۸/۳	۶/۵	۰/۸	۸/۳	۸/۳	۶/۳	۲/۱	۵/۳	۰/۳	۴/۵	۱۲/۵	۸/۹	۸/۱
شهریور	۱/۸	۲۳/۲	۶/۵	۷/۰	۹/۳	۸/۳	۶/۳	۸/۷	۱۴/۴	۰/۲	۲/۴	۱۲/۵	۸/۹	۸/۱
متوسط	۱۱/۸	۲۱/۶	۴/۳	۴/۷	۱۰/۷	۸/۳	۶/۳	۷/۵	۷/۶	۹/۶	۲۷/۶	۱۲/۵	۸/۹	۸/۱
درصد از MAF	۵۵	۱۰۰	۲۰	۲۲	۵۰	۳۹	۲۹	۳۵	۳۵	۴۵	۱۲۸	۵۸	۴۱	۳۷



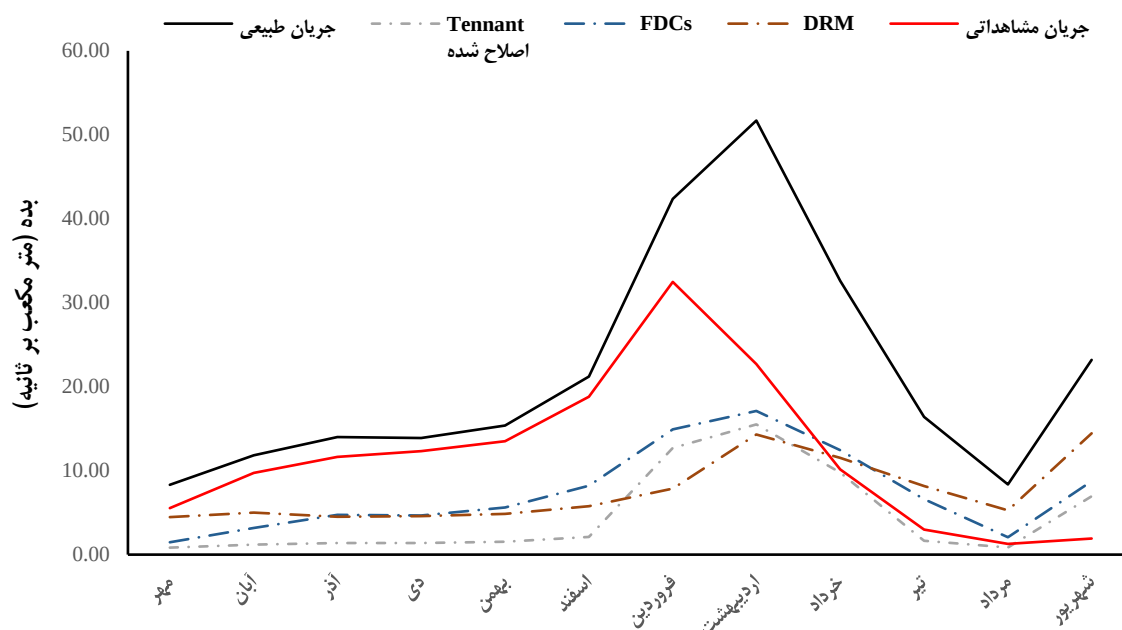
شکل ۸. مقایسه نتایج توزیع ماهانه جریان محیط زیستی دره رود (ایستگاه مشیران) (m^3/s)

با توجه به تنوع روش‌های به‌کاررفته در این پژوهش، انتخاب نهایی روش‌های برآورد جریان محیط زیستی بر اساس معیارهایی نظیر توان بازنمایی رژیم طبیعی جریان، حساسیت به تغییرات زمانی، قابلیت انطباق با شرایط هیدرولوژیکی حوضه و کاربرپذیری در مدیریت رودخانه انجام شده است. همچنین، عملکرد آماری روش‌های مختلف برآورد جریان محیط زیستی نسبت به رژیم جریان طبیعی دره‌رود با چهار شاخص آماری (ضریب همبستگی اسپیرمن و شاخص‌های خطا RMSE، MAE و Bias) در جدول (۵) ارائه و مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی برای روش‌های با مقدار خروجی ثابت و یکتا (مانند روش‌های هیدرولیکی، FDC، Water Quality و Aquatic Base Flow) قابل محاسبه نیست، زیرا انحراف معیار آن صفر است. از این‌رو برای این روش‌ها، از شاخص‌های آماری خطا (مانند RMSE، MAE و Bias) استفاده شده است. بر اساس نتایج جدول ۵، روش تنانت اصلاح‌شده با ضریب همبستگی اسپیرمن ۰/۹۹ بیشترین انطباق را با الگوی فصلی جریان طبیعی نشان داد بیانگر توانایی بالای این روش در بازنمایی تغییرات زمانی رژیم جریان است. همچنین، روش FDC-Shifting با ضریب همبستگی ۰/۹۸ و مقادیر مناسب RMSE و MAE، علاوه بر حفظ روند طبیعی تغییرات جریان، از نظر

میزان خطا نیز عملکرد مطلوبی ارائه داد. هرچند ضریب همبستگی روش DRM (برابر ۰/۹۲) نسبت به دو روش یادشده کمتر است، اما این روش به دلیل مبتنی بودن بر کلاس‌های مدیریتی اکولوژیکی و امکان انتخاب سناریوهای مختلف حفاظت از رودخانه، از قابلیت بالایی در تصمیم‌گیری مدیریتی برخوردار است. بنابراین، با در نظر گرفتن هم‌زمان میزان انطباق با رژیم طبیعی جریان، شاخص‌های خطا و قابلیت کاربرد در مدیریت منابع آب، روش‌های تنانت اصلاح‌شده، FDC-Shifting و DRM به عنوان مناسب‌ترین روش‌های برآورد جریان محیط زیستی برای رودخانه دره‌رود (ایستگاه مشیران) معرفی می‌شوند. در شکل ۹ مقایسه این روش‌ها در کنار متوسط ماهانه جریان مشاهداتی و جریان طبیعی ارائه شده است. در روش تنانت اصلاح شده برای ماه‌های خرداد، تیر و مرداد؛ جریان محیط زیستی اختلاف ناچیزی با جریان مشاهداتی دارد و برای شهریور جریان کافی برای حق آبه محیط زیستی وجود ندارد. همچنین، در روش‌های FDC-Shifting و DRM از ماه خرداد تا شهریور جریان محیط زیستی برآوردشده در رودخانه موجود نیست. این مسئله را می‌توان به طور مستقیم به افزایش شدت بهره‌برداری از منابع آب و توسعه بهره‌وری در حوضه آبریز نسبت داد؛ به گونه‌ای که رژیم جریان مشاهداتی به طور قابل ملاحظه‌ای از رژیم جریان طبیعی که مبنای محاسبات جریان محیط زیستی است فاصله گرفته است.

جدول ۵. مقایسه عملکرد آماری روش‌های مختلف برآورد جریان محیط زیستی نسبت به رژیم جریان طبیعی دره‌رود (ایستگاه مشیران) بر اساس ضریب همبستگی اسپیرمن و شاخص‌های خطا (RMSE، MAE و Bias)

روش	Spearman (ρ)	RMSE (m^3/s)	MAE (m^3/s)	Bias (m^3/s)
Tennant	۰/۸۵	۲۱/۰۸	۱۷/۲۵	-۱۷/۲۵
Modified Tennant	۰/۹۹	۱۸/۹۱	۱۶/۹۵	-۱۶/۹۵
Tessman	۰/۹۷	۱۴/۵۰	۱۰/۹۲	-۱۰/۹۲
Aquatic Base Flow	—	۱۸/۷۵	۱۳/۳۰	-۱۳/۳۰
FDC	—	۲۰/۲۲	۱۵/۳۰	-۱۵/۳۰
FDC-Shifting	۰/۹۸	۱۶/۴۸	۱۴/۱۲	-۱۴/۱۲
DRM	۰/۹۲	۱۷/۷۳	۱۴/۰۲	-۱۴/۰۲
RVA (Lower limit)	۰/۸۸	۱۴/۲۲	۱۱/۹۵	-۱۱/۹۵
RVA (Upper limit)	۰/۹۱	۱۲/۶۴	۱۰/۵۲	-۵/۹۵
Hydraulic (Wetted Perimeter)	—	۱۶/۰۴	۱۰/۶۲	-۹/۱۰
Hydraulic (Maximum Curvature)	—	۱۸/۳۳	۱۲/۹۰	-۱۲/۷۰
Water Quality	—	۱۸/۸۹	۱۳/۵۰	-۱۳/۵۰



شکل ۹. مقایسه نتایج روش‌های منتخب جریان محیط زیستی با جریان طبیعی و مشاهداتی دره‌رود - ایستگاه مشیران (m^3/s)

مقایسه نتایج روش‌های منتخب در این مطالعات با گزارش‌های مطالعاتی منابع دیگر برای دره‌رود (ایستگاه مشیران) در جدول ۶ ارائه شده است. در مطالعات EIA سد عمارت (در محل پایین‌دست ایستگاه مشیران) که توسط شرکت مهندسين مشاور لار انجام شد، در ابتدا برای دوره آماری ۳۶ ساله (۱۳۴۵ - ۱۳۸۰) نتایج روش تنانت و اصلاحات کارشناسی مشاور ارائه شد، که هر دو مقدار ناچیزی را برای رودخانه‌ای مانند دره‌رود در نظر گرفته بود، اما سپس اصلاحیه‌ای به این مطالعات اضافه شد و جریان محیط زیستی را از روش تنانت اصلاح‌شده برای دوره آماری ۴۵ ساله (۱۳۴۹ - ۱۳۹۳) ارائه داد. مقایسه نتایج نشان داد به دلیل استفاده از داده‌های شاهد بدون طبیعی‌سازی جریان، اختلاف زیادی با نتایج نظیر در این مطالعات در بیشتر ماه‌ها دیده می‌شود. برنامه تخصیص سد عمارت از الگوی جریان مشاهداتی پیروی می‌کند و همچنین، در سه ماه آخر سال آبی که زمان تخم‌ریزی ماهی‌ها در رودخانه دره‌رود است مقدار مناسبی در نظر نگرفتن و این میزان برای محیط زیست ناکارآمد است.

در مطالعات قاسمی و همکاران از روش‌های Tennant، Arkansas، FDC Shifting، Tessman و ABF در دوره آماری ۳۰ ساله (۱۳۷۰ - ۱۳۹۹) استفاده شد و نتایج روش FDC-Shifting در کلاس B به عنوان جریان محیط زیستی در نظر گرفته شد. با وجود اینکه برای ماه‌های پربابی مقدار مناسبی در نظر گرفته نشده است، اما با توجه به مقدار در نظر گرفته‌شده برای سایر ماه‌ها می‌توان نتایج این مطالعات را به عنوان بهترین نتیجه در بین مطالعات پیشین در نظر گرفت.

مطالعات جباریان امیری در ابتدا برای دوره بلندمدت (از سال تأسیس) و سپس به درخواست کارفرما برای دوره آماری کوتاه‌مدت ۵ ساله (۱۳۸۹ - ۱۳۹۳) نیز انجام شد. با توجه به روش‌های استفاده‌شده (FDC و مدل تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک (Q_{75}))، نتایج برای ۱۲ ماه سال یکسان است و بیشترین مقدار این نتایج برای روش مدل تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک (Q_{75}) در دوره بلندمدت با مقدار $2/3$ متر مکعب بر ثانیه است. این مقدار نیاز محیط زیستی رودخانه دره‌رود را نمی‌تواند تأمین کند.

جدول ۶. مقایسه بین نتایج منتخب این مطالعات با مطالعات پیشین دره‌رود (ایستگاه مشیران) (m^3/s)

مطالعات	ماه	جریان محیط زیستی													
		جریان طبیعی	منتخب این مطالعات	مهندسين مشاور لار	وزارت نیرو	فاسمی و... (۱۴۰۱)	جباریان امیری (۱۳۹۵)								
		روش تنانت اصلاح شده	FDC-Shifting روش	DRM روش	مطالعات EIA سد عمارت ۱۳۸۷	فقاوت کارشناسی ۱۳۸۷	مطالعات EIA سد عمارت (اصلاحی) ۱۳۹۰	برنامه تخصیص سد عمارت	روش FDC-Shifting-کلاس B (۱۳۷۰-۱۳۹۹)	FDC روش	داده‌های کوتاه مدت (۱۳۸۹-۱۳۹۳)	FDC روش	داده‌های بلندمدت	مدل تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک (۱۳۸۹-۱۳۹۳) کوتاه مدت	مدل تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک داده‌های بلندمدت
مهر	۸/۳	۰/۸	۱/۵	۴/۵	۰/۷	۱/۴	۰/۶	۰/۵	۱/۲	۰/۰	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳
آبان	۱۱/۸	۱/۲	۳/۲	۵/۰	۰/۷	۱/۱	۱/۱	۰/۷	۳/۵	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
آذر	۱۴/۰	۱/۴	۴/۷	۴/۵	۰/۷	۰/۹	۱/۴	۰/۹	۴/۳	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
دی	۱۳/۹	۱/۴	۴/۶	۴/۶	۰/۷	۰/۶	۱/۴	۱/۰	۴/۵	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
بهمن	۱۵/۴	۱/۵	۵/۶	۴/۹	۰/۷	۰/۶	۱/۶	۱/۰	۴/۷	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
اسفند	۲۱/۲	۲/۱	۸/۲	۵/۸	۰/۷	۰/۶	۲/۳	۱/۳	۵/۷	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
فروردین	۴۲/۴	۱۲/۷	۱۴/۹	۷/۹	۲/۰	۰/۷	۱۱/۶	۲/۲	۸/۰	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
اردیبهشت	۵۱/۷	۱۵/۵	۱۷/۱	۱۴/۳	۲/۰	۰/۹	۷/۸	۱/۶	۶/۱	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
خرداد	۳۲/۶	۹/۸	۱۲/۵	۱۱/۵	۲/۰	۱/۱	۳/۶	۰/۷	۲/۸	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
تیر	۱۶/۴	۱/۶	۶/۶	۸/۲	۲/۰	۱/۴	۱/۰	۰/۲	۱/۰	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
مرداد	۸/۳	۰/۸	۲/۱	۵/۳	۲/۰	۱/۶	۰/۵	۰/۱	۰/۶	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳
شهریور	۲۳/۲	۷/۰	۸/۷	۱۴/۴	۲/۰	۱/۶	۰/۷	۰/۱	۰/۷	۰/۰	۰/۵	۱/۶	۲/۳	۲/۳	۲/۳

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف برآورد جریان محیط زیستی رودخانه دره‌رود بر اساس رژیم جریان طبیعی، مجموعه‌ای از روش‌های اکوهیدرولوژیکی، هیدرولیکی و کیفیت آب به کار گرفته شد و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد حوضه مورد مطالعه دچار توسعه بهره‌برداری زیاد از منابع آب شده است. تغییرات در رژیم طبیعی جریان، تأثیر قابل توجهی بر کاهش جریان‌های پایه، تغییر الگوی فصلی جریان و تضعیف ظرفیت اکولوژیکی رودخانه داشته است، به طوری که متوسط جریان سالانه از مقدار $۲۱/۶$ مترمکعب بر ثانیه در شرایط طبیعی به مقدار $۱۱/۸$ مترمکعب بر ثانیه در شرایط مشاهداتی در محل ایستگاه مشیران کاهش یافته است. پرآب‌ترین ماه از اردیبهشت به فروردین تغییر یافته است. در حال حاضر، در پایین‌دست ایستگاه مشیران، سد عمارت با مخزن ۱۸۲ میلیون متر مکعب در مرحله آگیری است، که به دلایلی هنوز کامل نشده است. با اجرای منحنی فرمان پیش‌بینی‌شده سد، انتظار افزایش چالش‌های محیط زیستی در بازه‌های پایین‌دست سد را باید داشت.

در آزمون یازده روش مختلف هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، روش تنانت اصلاح‌شده، تسمن، FDC-Shifting، DRM و RVA توانایی بیشتری در بازنمایی تغییرات زمانی جریان و نیازهای اکولوژیکی رودخانه دارند. روش تنانت اصلاح‌شده با ضریب همبستگی اسپیرمن $۰/۹۹$ بیشترین انطباق را با الگوی طبیعی تغییرات فصلی جریان نشان داد؛ روش FDC-Shifting با ضریب همبستگی $۰/۹۸$ و مقادیر مناسب شاخص‌های خطا (RMSE و MAE)، عملکرد قابل قبولی در حفظ ویژگی‌های هیدرولوژیکی رژیم طبیعی دارد. اگرچه روش DRM ضریب همبستگی کمتری ($۰/۹۲$) نسبت به دو روش بالا دارد، با توجه به شمول

کلاس‌های مدیریت اکولوژیکی و امکان انتخاب سناریوهای مختلف حفاظت و بهره‌برداری، از ظرفیت بالایی برای تصمیم‌گیری در مدیریت رودخانه برخوردار است. بر این اساس، انتخاب روش برتر در برآورد جریان محیط زیستی نباید تنها بر پایه یک شاخص آماری انجام شود، بلکه لازم است هم‌زمان میزان انطباق با رژیم طبیعی جریان، شاخص‌های ارزیابی خطا و قابلیت کاربرد مدیریتی روش‌ها مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر آن، در چشم‌انداز ۲۰ ساله نقشه راه آب کشور، سهم جریان محیط زیستی حدود ۳۳ درصد از منابع آب تجدیدپذیر تعیین شده است. بر این اساس، سهم جریان محیط زیستی از منابع آب سطحی (رودخانه ها) بیشتر از ۳۳ درصد بوده، که به عنوان یک معیار در انتخاب روش مناسب باید مورد نظر قرار گیرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد سه روش تنانت اصلاح‌شده، FDC-Shifting و DRM گزینه‌های مناسب‌تری برای برآورد توزیع زمانی جریان محیط زیستی در شبکه آبراهه‌های حوضه دره‌رود هستند.

- 1 Acreman, M. C., & Dunbar, M. J. (2004). Defining environmental river flow requirements – A review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(5), 861–876.
- 2 Annear, T., Chisholm, I., Beecher, H., Locke, A., & et al. (2004). Instream Flows for Riverine Resource Stewardship: Revised Edition. Instream Flow Council, Cheyenne, Wyoming.
- 3 Arthington, A. H., Bhaduri, A., Bunn, S. E., Jackson, S. E., Tharme, R. E., Tickner, D., Young, B., Acreman, M., Baker, N., Capon, S., et al. (2018). The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows (2018). *Frontiers in Environmental Science*, 6, 45.
- 4 Bunn, S. E., & Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 30(4), 492–507.
- 5 Ghasemi, A., Valinassab, T., & Mohammadpour, M. (2022). Use of hydrological and ecohydrological methods for the assessment of river environmental flow to protect aquatic animals and aquatic ecosystem. *Iranian Scientific Fisheries Journal*, 31(4), 107-119. [in Persian]
- 6 Hughes, D. A., & Hannart, P. (2003). A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology*, 270(3–4), 167–181.
- 7 Hughes, D. A., & Münster, F. (2000). Desktop Reserve Model: A rapid assessment method for determining environmental flow requirements of rivers. Water Research Commission Report No. TT 120/00. Pretoria, South Africa: Water Research Commission.
- 8 Jabarian Amiri, B. (2017). Determining the environmental flow of rivers in Ardabil province. Applied research plan. *Ardabil Province Regional Water*. Ministry of Energy. [in Persian]
- 9 Jabbarian Amiri, B., Kharazi Bahri, B., & Khayyat Rostami, B. (2018). Comparing three approaches to determine environmental flow for Harou river in Ardabil province. *Journal of Natural Environment*, 71(2), 139–150. [in Persian]
- 10 Khan, I., Zakwan, M., Pulikkal, A.K., Lalthazula, R. (2024). “Environmental flow assessment for the Musi River, India.” *Environment, Development & Sustainability*, 10(19): 1–15.
- 11 Lar consulting engineers. (2012). Environmental impact assessment study: Amart dam plan. Ardabil Province Regional Water Joint Stock Company. Ministry of Energy. [in Persian]
- 12 Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315–328.
- 13 Mostafazadeh, R., Azizi Mobsar, J., & Mirzaei, S. (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. [In Persian]
- 14 Naderi, M., Zakerinia, M., & Salari Jazi, M. (2020). Ecosystems Protecting of Gharasoo River based on Regulation of Environmental Flow Regime using Hydrological Methods, 11(1), 118–136. [in Persian]

- 15 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 Ardabil Province. *Journal of Watershed Management Research*, 10(19), 85–94.[in Persian]
- 16 Nilsson, C., Reidy, C. A., Dynesius, M., & Revenga, C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 308(5720), 405–408.
- 17 Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., et al. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769–784.
- 18 Rauf, M., & Ali Oghli, S. (2021). Estimation of environmental flow in the Balikhloo Chay River and assessment of the impacts of Yamchi Dam operation on the hydrological and environmental flow regime. *Journal of Natural Environment*, 15(1), 163–171. [in Persian]
- 19 Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., & Braun, D. P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174.
- 20 Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., & Braun, D. P. (1997). How much water does a river need?. *Freshwater Biology*, 37(1), 231–249.
- 21 Richter, B. D., Warner, A. T., Meyer, J. L., & Lutz, K. (2003). A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations. *River Research and Applications*, 19(5–6), 497–514.
- 22 Sedghi-Asl, M., Poursalehan, S.J. (2025). “Hydro-environmental flow classification of rivers (case study: Beshar River, Iran).” *Ecological Indicators*, 178.
- 23 Setayeshi Nasaz, H., Asghari Saraskanroud, S., Mostafazadeh, R., & Madadi, A. (2024). Assessment of changes in the hydrological flow regime and environmental flow components (EFCs) in the Khiav Chay River over a 30-year period. *Hydrogeomorphology*, 10(37), 25–43. [In Persian]
- 24 Smakhtin, V. U., & Anputhas, M. (2006). An Assessment of Environmental Flow Requirements of Indian River Basins. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI).
- 25 Smakhtin, V. U., Revenga, C., & Döll, P. (2006). Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments. IWMI Working Paper 42, *International Water Management Institute*, Colombo, Sri Lanka.
- 26 Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). A pilot global assessment of environmental water requirements and availability. *Water International*, 29(3), 307–317.
- 27 Tchobanoglous, G., Burton, F. and H.D. Stensel. 2003. Wastewater engineering: Treatment and reuse. *American Water Works Association Journal*, 95(5), p.201.
- 28 Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1(4), 6–10.

- 29 Tessman, S. A. (1980). Environmental assessment, technical appendix E: Environmental use sector reconnaissance elements of the western Dakotas region of South Dakota study. *U.S. Fish and Wildlife Service*.
- 30 Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assessment: Emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, 19(5-6), 397-441.
- 31 Vogel, R. M., & Fennessy, M. S. (1994). Flow-duration curves I: New interpretations and confidence intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), 485-504.
- 32 Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., et al. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555-561.