مدیریت آب و آبیاری
دوره ۱۲ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۱
صفحه‌های ۶۲۸-۶۱۵
DOI: 10.22059/jwim.2022.339173.968

مقاله پژوهشی:

نقش طبیعی‌سازی جریان در برآورد حقابه زیست‌محیطی به روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی

شمیم طاهری گرجی[۱]، علی مریدی[۲*]، سید محمدرضا مجدزاده طباطبایی[۳]
۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲. استادیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۳. استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱

چکیده
تعیین حقابه زیست‌محیطی رودخانه‌ها با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی با توجه به اطلاعات در دسترس و هزینه و زمان کم‌تر، بیش‌تر موردتوجه قرار گرفته است. نکته مهم در استفاده از این روش‌ها، مد نظر قراردادن شرایط طبیعی رودخانه با حذف اثر برداشت‌های بالادست است. برای بررسی ضرورت طبیعی‌سازی جریان و تأثیر آن بر تعیین حقابه زیست‌محیطی رودخانه زاینده‌رود در محل ایستگاه سد تنظیمی (قبل از برداشت‌های عمده شرب، صنعت و کشاورزی) و ایستگاه ورزنه (در نزدیکی تالاب گاوخونی و پس از برداشت‌ها و نفوذ آب) به‌عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. حقابه زیست‌محیطی براساس روش تنانت اصلاح‌شده با استفاده از دبی‌های مشاهداتی و طبیعی‌شده در ایستگاه ورزنه، نشان داد که در صورت استفاده از دبی‌های مشاهده‌شده، حقابه زیست‌محیطی در حدود ۰/٦ متر مکعب بر ثانیه به‌دست خواهد آمد که عملاً آبی در رودخانه جریان نخواهد یافت. در صورتی‌که با استفاده از دبی طبیعی‌شده، ١٦ درصد از پتانسیل رواناب حوضه به محیط زیست اختصاص خواهد یافت. حقابه زیست‌محیطی به‌دست‌آمده از روش محیط خیس‌شده با الگوریتم شیب منحنی در ایستگاه سد تنظیمی و ورزنه، به‌ترتیب ١٣ و ١٦درصد از متوسط دبی طبیعی سالانه کل را برآورد کرده است، که این مقدار در محدوده نتایج قابل‌قبول روش تنانت اصلاح‌شده قرار گرفته است. در نتیجه استفاده از روش تنانت اصلاح‌شده به‌دلیل سهولت در محاسبه و ارائه توزیع ماهانه حقابه زیست‌محیطی به شرط استفاده از سری زمانی دبی طبیعی‌شده در محل ایستگاه‌های موردمطالعه توصیه می‌شود.

کلیدواژه‌ها: پایداری جریان، رودخانه زاینده‌رود، روش تنانت اصلاح‌شده، روش محیط خیس‌شده، روش مونتانا.

Role of flow naturalization in estimating environmental flow by hydraulic and hydrological approaches

Shamim Taheri Gorji[1], Ali Moridi[2*], Seyed Mohammadreza Majdzadeh Tabatabaei[3]
1. M.Sc Student, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
3. Assistant Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
Received: February 15, 2022 Accepted: June 11, 2022

Abstract
Determination of the environmental flow of rivers using hydrological and hydraulic methods has received more attention due to the available information and less cost and time. The important point in using these methods is to consider the natural conditions of the river by eliminating the effect of upstream withdrawals. To investigate the necessity of naturalization of the flow and its effect on determination of the ecological water supply of Zayandehroud river at the location of the Sad-e-tanzimi station (before major drinking, industrial and agricultural harvests) and Varzaneh station (near Gavkhuni wetland and after harvest and water infiltration) has been selected as a case study. Based on the Tennant method, using the observed and naturalized flows at Varzaneh station, the ecological watercourse showed that if the observed flows are used, it will obtain about 0.6 cubic meters per second. It turned out that there would be practically no water flowing in the river. If naturalized flow is used, 16 percent of the basin runoff potential will be allocated to the environment. The environmental flow obtained from the wetted perimeter method with the curved slope algorithm at the Sad-e-tanzimi and Varzaneh station has estimated 13 and 16 percent of the annual average natural flow, respectively, which is within the acceptable results of the modified Tennant method. Has been located. As a result, the use of the modified Tennant method is recommended due to the ease of calculating and providing the monthly distribution of environmental water, provided that the naturalized flow time series is used at the study stations.

Keywords: Flow stability, Modified Tennant method, Montana method, Wetted perimeter method, Zayandehroud river.

* نویسنده مسئول Email: a_moridi@sbu.ac.ir

مقدمه

طرح‌های توسعه منابع آب و کشاورزی در کنار آثار مثبت اقتصادی و اجتماعی، منجر به تغییرات در رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها و کاهش آب‌های سطحی پایین‌دست می‌شود. این امر به‌نوبه خود موجب آثار منفی در اکوسیستم رودخانه شده و بقای آن را تهدید می‌کند. شناسایی تغییرات اقلیم بر رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها و تأثیراتی که بر محیط زیست دارند، زمینه توسعه علم برآورد دبی محیط زیستی را فراهم کرد که در آن کیفیت و کمیت آب موردنیاز برای حفاظت اکوسیستم منابع آبی تخمین زده می‌شود (Zhang *et al*., 2010).

به‌منظور تعیین حقابه زیست‌محیطی رودخانه، با توجه به مقیاس مکانی مطالعه، داده‌های موجود، گام زمانی ارزیابی و ظرفیت‌های فنی و مالی، روش‌های مختلفی مورداستفاده قرار می‌گیرند؛ از روش‌های سریع در سطح شناسایی با هدف برنامه‌ریزی کلان منابع آب تا روش‌های دقیق‌تر برای یک رودخانه دارای گونه‌های حفاظت‌شده. در حدود ۲۰۷ روش برای تعیین نیاز آب محیط زیستی رودخانه‌ها در ٤٤ کشور از سراسر جهان شناسایی شده است. این روش‌ها به‌طور عمده در قالب چهار روش متمایز شامل روش‌های هیدرولوژیکی[۲]، هیدرولیکی[۳]، شبیه‌سازی زیستگاه‌ها[٤] و جامع[٥] طبقه‌بندی شده‌اند (Tharme, 2003).

Liu *et al*. (2011) به‌منظور تعیین میزان جریان و سطح آب زیست‌محیطی ماهانه و فصلی رودخانه Huai، از روش شعاع هیدرولیکی زیستی اصلاح‌شده استفاده کردند. نتایج مقایسه این روش با روش‌های تنانت[٦] و محیط خیس‌شده[۷]، مطابقت و توانایی نسبتاً خوب این روش را نشان داد. Moridi *et al*. (2011) در راستای تعیین حقابه زیست‌محیطی پایین‌دست رودخانه گردلان، با استفاده از مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه (مدل HEC-RAS)، رابطه دبی و عمق آب را مشخص کردند. سپس با به‌کارگیری تحلیل نتایج مدل‌سازی در سناریوهای مختلف با استفاده از شاخص‌هایی چون شاخص شکست و شدت خسارت، حداقل دبی زیست‌محیطی را برآورد کردند و با نتایج حاصل از روش تنانت اصلاح‌شده مقایسه نمودند. در مطالعات انجام‌گرفته، در بعضی موارد، دبی محاسباتی به‌روش مدل‌سازی نسبت به نتایج تنانت اصلاح‌شده بیش‌تر و در برخی موارد کم‌تر به‌دست آمده است که بیان داشتند این این خود می‌تواند نشان‌دهنده نقص‌های موجود در روش تنانت باشد. Poursalehan *et al*. (2013) حقابه زیست‌محیطی رودخانه مارون را با استفاده از روش محیط خیس‌شده براساس دو الگوریتم شیب منحنی و حداکثر انحنا برای تعیین نقطه شکست در منحنی دبی-محیط خیس‌شده برآورد کردند. در نهایت روش شیب منحنی، به‌دلیل قرارگرفتن در محدوده قابل‌قبول حاصل از نتایج تنانت و انطباق بیش‌تر با جریان طبیعی رودخانه، به‌عنوان حقابه زیست‌محیطی رودخانه مارون پیشنهاد شد. Kiani (2015) رودخانه زاینده‌رود را در حد فاصل سد زاینده‌رود تا تالاب گاوخونی موردمطالعه قرار داد و حقابه زیست‌محیطی رودخانه زاینده‌رود را برای حفظ اکوسیستم‌های آبی به‌روش هیدرولیکی و با در نظرگرفتن گونه شاخص منطقه با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS تعیین نمود. با توجه به مشخصات فیزیوگرافی، رودخانه زاینده‌رود را به سه بازه تقسیم کرد و کالیبراسیون مدل هیدرولیکی را برای هر بازه انجام داد. درنتیجه پس از کالیبراسیون مدل، دبی زیست‌محیطی رودخانه زاینده‌رود به‌منظور تأمین عمق موردنیاز گونه شاخص در هر بازه تعیین شد. Ahmadi *et al*. (2015) با استفاده از مدل WEAP به شبیه‌سازی منابع آب حوضه و توسعه سناریوهای مختلف بهره‌برداری از منابع آب پرداختند. نتایج مدل نشان داد که در نظرگرفتن شرایطی از جمله

مدیریت مصرف از طریق اصلاح الگوی مصرف، اجرای طرح‌های توسعه و محدودیت توسعه کشاورزی، امکان بهره‌برداری بلندمدت از آبخوان‌های محدوده به‌عنوان منبع مطمئن و مکمل آب سطحی و هم‌چنین بهبود وضعیت‌ها را در پی خواهد داشت. Peng & Sun (2016) در ارزیابی حقابه زیست‌محیطی رودخانه‌ای در چین، با استفاده از روش شبیه‌سازی زیستگاه و روش هیدرولوژیکی تنانت نشان دادند که به‌منظور تأمین زیستگاه مناسب برای نمونه ماهی غالب رودخانه، رژیم زیست‌محیطی معادل ۲۷/۷ درصد از متوسط دبی رودخانه، موردنیاز می‌باشد. براساس نتایج آن‌ها، مقدار دبی به‌دست‌آمده از روش شبیه‌سازی زیستگاه نزدیک به دبی پیشنهادی روش تنانت برای سطوح خوب و خیلی خوب می‌باشد. Stewardson *et al.* (2017) نشان دادند که سیاست‌های جدی که دولت در جهت حفاظت از محیط زیست آب، تدوین کرده است باعث شده اواسط دهه ۱۹۹۰ در استرالیا تلاش‌هایی برای برنامه‌ریزی و تحول حقابه‌های زیست‌محیطی صورت گیرد و این تلاش در پاسخ به کاهش وضعیت زیست‌محیطی، عملکرد و تنوع زیستی رودخانه‌ها با شدت بیش‌تری انجام شده است. آن‌ها ذکر کردند که نتیجه موفقیت‌آمیز در مدیریت حقابه زیست‌محیطی در گرو برنامه‌ریزی، اجرا، نظارت و ارزیابی می‌باشد. Fattahpour *et al.* (2018) حقابه زیست‌محیطی رودخانه سفیدرود را با کمک روش‌های هیدرولوژیکی (تنانت و منحنی تداوم جریان)، هیدرولیکی (محیط خیس‌شده با دو الگوریتم شیب منحنی و حداکثر انحنا) و شبیه‌سازی زیستگاه بررسی کردند. در نهایت روش شبیه‌سازی زیستگاه و حداکثر انحنای محیط خیس‌شده برای تعیین حقابه زیست‌محیطی و بهبود شرایط اکوسیستم منطقه به‌عنوان روش بومی رودخانه سفیدرود پیشنهاد شد. Shahreza *et al.* (2018) بیان کردند که افزایش فعالیت‌های انسانی در سطح حوضه آبریز کرخه، منجربه کاهش آبدهی ورودی به سد کرخه شده تأمین نیازهای کشاورزی پایین‌دست سد را با مشکلاتی روبه‌رو کرده است. از این رو، با استفاده از مدل‌سازی شبکه عصبی، سری زمانی رواناب طبیعی این حوضه را در ۲۰ ایستگاه هیدرومتری محاسبه کردند. Asadpour *et al.* (2021) با به‌کارگیری روش‌های هیدرولوژیکی تنانت و جریان پایه آبزیان و روش هیدرولیکی محیط خیس‌شده با الگوریتم شیب منحنی به بررسی و محاسبه حقابه زیست‌محیطی رودخانه‌های دیناچال و پسیخان واقع در استان گیلان پرداختند. در بررسی‌های به‌عمل‌آمده مشخص شد که وضعیت رودخانه دیناچال نسبت به رودخانه پسیخان به مراتب بهتر و پایدارتر است. هم‌چنین روش جریان پایه آبزیان نسبت به روش تنانت و محیط خیس‌شده از دقت کم‌تری برخوردار است. Saedi *et al.* (2021) به بررسی تأثیر تغییرات اقلیم بر تأمین و در دست‌بودن آب حوضه زاینده‌رود پرداختند. در این مطالعه برای مدیریت بهتر، از ابزار ارزیابی خاک و آب (مدل SWAT) برای توسعه مدل هیدرولوژیکی حوضه استفاده شد.

با توجه به این‌که تاکنون محاسبه حقابه زیست‌محیطی به روش‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی به‌طور قابل‌ملاحظه طی مطالعات زیادی انجام شده است، اما اثر طبیعی‌سازی جریان در آن دیده نشده است؛ نمی‌توان کارهای انجام‌شده را به‌صورت کاربردی در احیای زیست‌بوم رودخانه به‌کار گرفت. زیرا برای احیای زیست‌بوم رودخانه، نیاز به طبیعی‌سازی جریان (احیای شرایط اولیه رودخانه قبل از برداشت‌ها) می‌باشد. بنابراین فرایند طبیعی‌سازی جریان، نقش مؤثری در احیای زیست‌بوم رودخانه و مدیریت زیستی آن خواهد داشت.

مواد و روش‌ها

در این بخش، مفاهیم و مراحل انجام محاسبات طبیعی‌سازی جریان و روش‌های هیدرولوژیکی و

هیدرولیکی تعیین حداقل دبی زیست‌محیطی، ارائه می‌شود.

طبیعی‌سازی جریان

منابع آب قابل‌برداشت را می‌توان به دو گروه آب‌های سطحی و زیرزمینی تقسیم کرد. آب‌های سطحی و زیرزمینی داخل حوضه و بین حوضه‌ها به‌صورت شبکه‌ای به هم پیوسته و مرتبط به هم می‌باشند، به‌طوری‌که میزان آب‌های سطحی و زیرزمینی در دشت‌های مجاور، سهم مهمی در جریان زیست‌محیطی رودخانه و تالاب دارند. با رشد جمعیت و توسعه بی‌رویه در حوضه‌های آبریز (به‌ویژه توسعه زمین‌های کشاورزی)، برداشت از منابع آب زیرزمینی و سطحی افزایش یافته و رقابت میان مصرف‌کنندگان (مانند شهری، صنایع و کشاورزی) نیز برای دستیابی بیش‌تر به این منابع افزایش یافته است که باعث افزایش میزان آب برداشت‌شده از سفره‌های آب زیرزمینی در نتیجه افت آب زیرزمینی شده و با گذشت زمان منجربه کاهش جریان زیستی رودخانه و تالاب می‌شود (Jafari *et al*., 2021; Dogrul *et al*., 2016; Qureshi & Massih, 2003).

با توجه به شرایط موجود رودخانه‌ها، شرایط زیستی آبزیان می‌تواند از اهمیت قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار باشد. لذا باید همواره سعی بر آن شود که رودخانه را به‌صورت طبیعی (حذف اثر توسعه و برداشت آب در بالادست) در نظر گرفت. یا به‌عبارت دیگر، شرایطی که می‌توان به‌کمک آن رودخانه را به لحاظ زیست‌بوم احیا نمود، مدنظر قرار داد. در طبیعی‌سازی سری زمانی جریان رودخانه، تلاش بر این است که داده‌های سال‌های بعد از دخالت انسان (استحصال آب، احداث سد، تغییر در رواناب در اثر توسعه و ...) حذف یا اصلاح شوند (Shahreza *et al*., 2018).

روند طبیعی‌سازی جریان عبارت است از:

- جمع‌آوری داده‌های دبی و بارش ماهانه برای دوره آماری موردنظر
- حذف برداشت‌های ثبت‌شده از آب رودخانه
- اصلاح روند سری زمانی آبدهی

تعیین حقابه زیست‌محیطی

روش تنانت اصلاح‌شده

روش تنانت یا مونتانا از یک روش هیدرولوژیکی ساده برای تعیین حقابه زیست‌محیطی محسوب می‌شود که حداقل دبی لحظه‌ای را که در طول زمان برای حفظ شرایط رودخانه در سطح انتخاب‌شده باید حفظ شود، تعیین می‌کند. در این روش، حقابه زیست‌محیطی به‌صورت درصدهای مختلفی از متوسط دبی سالانه رودخانه در یک منطقه ویژه، برای حفظ کیفیت زیستگاه ماهیان تعیین می‌شود. با توجه به نشریه استاندارد وزارت نیرو، سطح قابل‌قبول از این روش، معادل ۳۰ درصد دبی متوسط سالانه برای ماه‌های فروردین تا شهریور (به‌عنوان دوره پرآبی) و ۱۰ درصد متوسط دبی سالانه برای ماه‌های مهر تا اسفند (به‌عنوان دوره کم‌آبی) می‌باشد (Standard 557, 2011). درصدهای پیشنهادی از متوسط دبی سالانه در این روش برای حفاظت از سطوح مختلف سلامت زیست‌بوم در جدول (۱) آورده شده است.

Table 1. Proposed values of Tennant for fish and wildlife habitat (Tennant, 1976)

Targets	Proposed percentages of the average annual river flow (%)	
	Autumn-Winter	Spring-Summer
Maximum	200	
Optimum range	60-100	
Outstanding	40	60
Excellent	30	50
Good	20	40
Acceptable	10	30
Poor	10	10
Severe degradation	0-10	0-10

با توجه به این‌که روش هیدرولوژیکی تنانت در رودخانه‌های بزرگ و دائمی ایالات مرکزی-غربی آمریکا موردمطالعه قرار گرفته است، کاربرد آن برای رودخانه‌های فصلی و نیز برای رودخانه‌هایی که دارای نوسانات شدید آبدهی ماهانه هستند، با مسائل و مشکلاتی روبه‌رو است. عمده این مسائل شامل در نظرگرفتن نوسانات فصلی و ماهانه آبدهی رودخانه و در نتیجه آن محاسبه درصد بالایی از متوسط ماهانه دبی رودخانه به‌عنوان حقابه زیست‌محیطی رودخانه می‌باشد. این امر به این دلیل است که در این روش، حقابه زیست‌محیطی برحسب درصدی از متوسط دبی سالانه تعیین می‌شود. لذا در ماه‌های کم‌آبی، بدون توجه به کاهش شدید آبدهی رودخانه، حقابه زیست‌محیطی به‌صورت درصد مشخصی از متوسط درازمدت دبی سالانه درنظر گرفته می‌شود.

بررسی‌های به‌عمل‌آمده و هم‌چنین تجارب مهندسین مشاور در تعیین دبی محیط زیستی سدها، نشان‌دهنده آن است که روش تنانت با ماهیت رژیم جریانی رودخانه‌های ایران مطابقت ندارد. جهت رفع این چالش از روش تنانت، روش تنانت اصلاح‌شده ارائه شده است. به این ترتیب که، برای ماه‌هایی که متوسط دبی ماهانه در آن‌ها کم‌تر از متوسط دبی سالانه کل است (ماه‌های کم‌آبی)، ضریب ۰/۳ و برای ماه‌هایی که متوسط دبی ماهانه در آن‌ها بیش‌تر از متوسط دبی سالانه کل است (ماه‌های پرآبی)، ضریب ۰/۱ در نظر گرفته شود. و به‌جای متوسط دبی سالانه، برای هر ماه از متوسط دبی ماهانه همان ماه استفاده می‌شود (Moridi *et al*., 2011).

روش محیط خیس‌شده

روش محیط خیس‌شده از روش‌های مبتنی بر مطالعات میدانی است که حداقل جریان آب لازم درون یک رودخانه را محاسبه می‌کند. این روش از اندازه‌گیری‌های صحرایی یا مدل‌سازی هیدرولیکی برای تعیین این که چطور محیط خیس‌شده یک آبراهه موردمطالعه با جریان تغییر می‌کند، استفاده می‌نماید. در این روش زیستگاه‌ها به‌طور صریح لحاظ نمی‌شوند بلکه فرض می‌شود که با حفظ محیط خیس‌شده مناسب کانال در محل زیستگاه‌های مهم، حیات آبزیان حفظ خواهد شد (Standard 557, 2011).

مراحل کاربرد این روش به‌ترتیب زیر شرح داده شده است (Gippel & Stewardson, 1998):

- رسم نمودار تغییرات دبی- محیط خیس‌شده به‌صورت بی‌بعد در مقطع عرضی. در این خصوص، این تغییرات در مقطع عرضی تا حداکثر مقدار دبی یعنی متوسط دبی سالانه کل، محاسبه می‌شود. بدین ترتیب که متوسط دبی سالانه کل، از متوسط دبی‌های ماهانه در طول ۳۰ سال به‌دست می‌آید. سپس به‌ازای هر سطح آب، مساحت و محیط خیس‌شده، دبی متناظر با آن محاسبه می‌شود (رابطه ۱). این فرایند تا متوسط دبی سالانه کل ادامه می‌یابد (بی‌بعدسازی بدین صورت انجام می‌شود که اعداد دبی و محیط خیس‌شده به‌دست‌آمده از گام قبل، بر حداکثر مقدارشان تقسیم می‌شوند یعنی $q = \frac{Q}{Qmax}$ و $p = \frac{P}{Pmax}$).

$$Q = \frac{S^{1/2}}{n}\frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} \quad (۱)$$

که در آن Q: دبی (m^3/s)، n: ضریب زبری مانینگ، S: شیب بستر (بی بعد)، A: سطح مقطع جریان (m^2)، P: محیط خیس‌شده جریان (m) می‌باشند.

- برازش بهترین رابطه از میان نقاط منحنی بی‌بعد دبی- محیط خیس‌شده، داده می‌شود. با توجه به تغییر شکل مقاطع عرضی از مثلث تا مستطیل، معمولاً برای مقطع مثلثی شکل، نمودار توانی (رابطه ۲) و برای مقطع مستطیلی شکل، نمودار لگاریتمی (رابطه ۳) بهترین برازش را دارند.

$$P = q^b \quad (۲)$$

$$P = aln(q) + 1 \quad (۳)$$

a و b: ضرایب حاصل از برازش رابطه منحنی از بین نقاط منحنی بی‌بعد هستند.

– با مشخص‌شدن رابطه حاصل از برازش منحنی توانی یا لگاریتمی، اقدام به تعیین نقطه شکست در منحنی می‌شود.

در این پژوهش با استفاده از روش شیب منحنی، اقدام به تعیین نقطه شکست در منحنی شده است که مراحل آن به شرح زیر است:

– برابر قراردادن مشتق معادله به‌دست‌آمده از مرحله قبل با یک و محاسبه آن.

همان‌طورکه در شکل (۱) مشخص شده است، نقطه شکست بیانگر محلی از منحنی است که تا آن نقطه، به‌ازای تغییرات کمی در دبی، تغییرات زیادی در محیط خیس‌شده مشاهده می‌شود و بعد از آن نقطه، با تغییرات زیادی در دبی، شاهد تغییرات اندکی در محیط خیس‌شده هستیم. از نظر ریاضی، نقطه شکست منحنی جایی است که مماس (تانژانت) بر آن نقطه، با افق زاویه ٤٥ درجه بسازد (شیب برابر با یک باشد) (رابطه ٤).

$$dp/dq = 1 \quad (٤)$$

بر این اساس، اگر معادله نمودار منتخب لگاریتمی باشد، از رابطه (٥) و اگر توانی باشد از رابطه (٦) برای محاسبه استفاده می‌شود.

$$a = q \quad (٥)$$

$$bq^{b-1} = 1 \quad (٦)$$

– با ضرب q به‌دست‌آمده از مرحله قبل در دبی حداکثر (متوسط دبی سالانه کل)، حقابه زیست‌محیطی برای مقطع مورد نظر بدست می‌آید.

منطقه موردمطالعه

رودخانه زاینده‌رود از مهم‌ترین رودخانه‌های فلات مرکزی ایران به‌شمار می‌آید که از ارتفاعات زاگرس واقع در دامنه‌های شرقی زردکوه استان چهارمحال بختیاری سرچشمه می‌گیرد. مساحت حوضه آبریز رودخانه حدود ٤١٥٠٠ کیلومترمربع می‌باشد. طول این رودخانه از سرچشمه تا تالاب گاوخونی ٤٠٠ کیلومتر از سمت غرب به شرق می‌باشد. در پژوهش حاضر، محدوده موردمطالعه، رودخانه زاینده‌رود از محل سد زاینده‌رود تا تالاب گاوخونی می‌باشد. طول این محدوده حدود ٣٥٤/٩ کیلومتر است که شامل تعداد زیادی ایستگاه هیدرومتری می‌باشد. در این پژوهش دو ایستگاه هیدرومتری سد تنظیمی به‌عنوان اولین ایستگاه هیدرومتری بعد از سد زاینده‌رود و ورزنه (نزدیک‌ترین ایستگاه به تالاب گاوخونی) موردمطالعه قرار گرفته‌اند (شکل ٢) (Kiani, 2015).

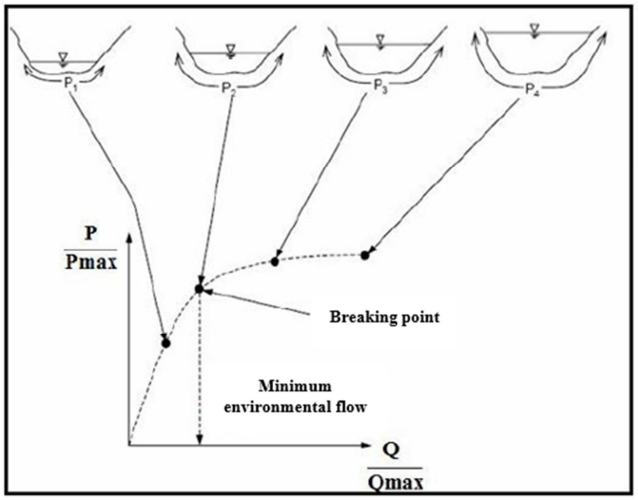

Figure 1. Flow-Wetted perimeter relationship and location of the breaking point of the curve (Standard 557, 2011)

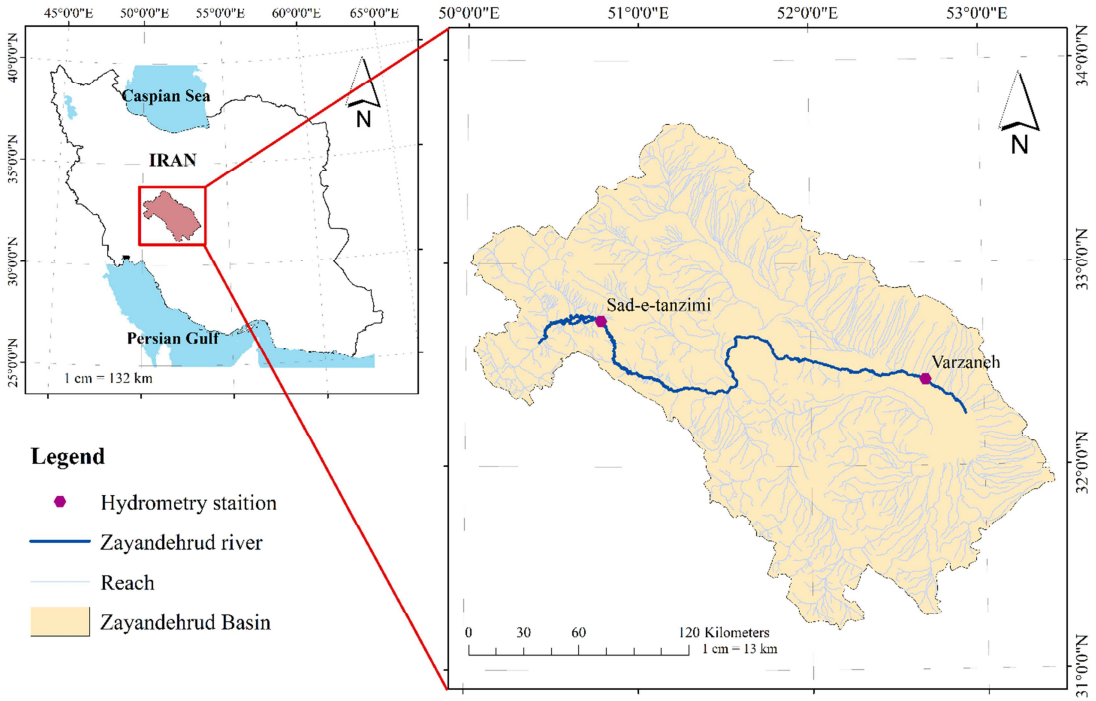

Figure 2. Location of Zayandehroud basin and hydrometric stations

بحث و نتایج

طبیعی‌سازی جریان

مقایسه سری زمانی بارش در دوره آماری موردمطالعه (شکل‌های ۳ و ٤) حاکی از آن است که میزان بارش، دچار تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای نشده است. این در حالی است که روند تغییرات دبی‌های مشاهده‌شده از بالادست به سمت پایین‌دست رودخانه، دستخوش تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای شده است. در این رابطه، اختلاف دبی‌های مشاهده‌شده در مقایسه با دبی‌های طبیعی‌سازی‌شده در ایستگاه سد تنظیمی در طول مدت آمار موردمطالعه، قابل‌ملاحظه نمی‌باشد (شکل ۵). زیرا در فرایند طبیعی‌سازی در محدوده این ایستگاه، فقط تأثیر انتقال آب بین حوضه‌ای وجود دارد. در این خصوص اختلاف دبی‌های مشاهداتی و طبیعی‌سازی‌شده به سمت پایین‌دست افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در پایین‌ترین ایستگاه (ایستگاه ورزنه) به حداکثر مقدار خود می‌رسد (شکل ٦، جدول ۲). این الگو می‌تواند ناشی از نفوذ آب و برداشت‌های انجام‌شده از آب رودخانه برای اهداف کشاورزی، شهری و صنعتی در حد فاصل ایستگاه سد تنظیمی تا ایستگاه ورزنه باشد.

روش تنانت اصلاح‌شده

با توجه به توضیحات مندرج در بخش مواد و روش‌ها، در این روش برای ماه‌هایی از سال که متوسط دبی ماهانه در آن‌ها کم‌تر از متوسط دبی سالانه کل است (ماه‌های کم‌آبی)، ضریب ۰/۳ و برای ماه‌هایی از سال که متوسط دبی ماهانه در آن‌ها بیش‌تر از متوسط دبی سالانه کل است (ماه‌های کم‌آبی)، ضریب ۰/۱ اختصاص داده شده است که این ضرایب برای متوسط دبی ماهانه همان ماه استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده از این روش که با استفاده از دبی‌های مشاهداتی و طبیعی در ایستگاه‌های سد تنظیمی و ورزنه انجام شده است، به شرح جدول (۳)

می‌باشد. در شکل (۷)، متوسط دبی طبیعی سالانه کل، متوسط دبی‌های طبیعی ماهانه و هم‌چنین حقابه‌های زیست‌محیطی به‌دست‌آمده در دو ایستگاه سد تنظیمی و ورزنه نشان داده شده است.

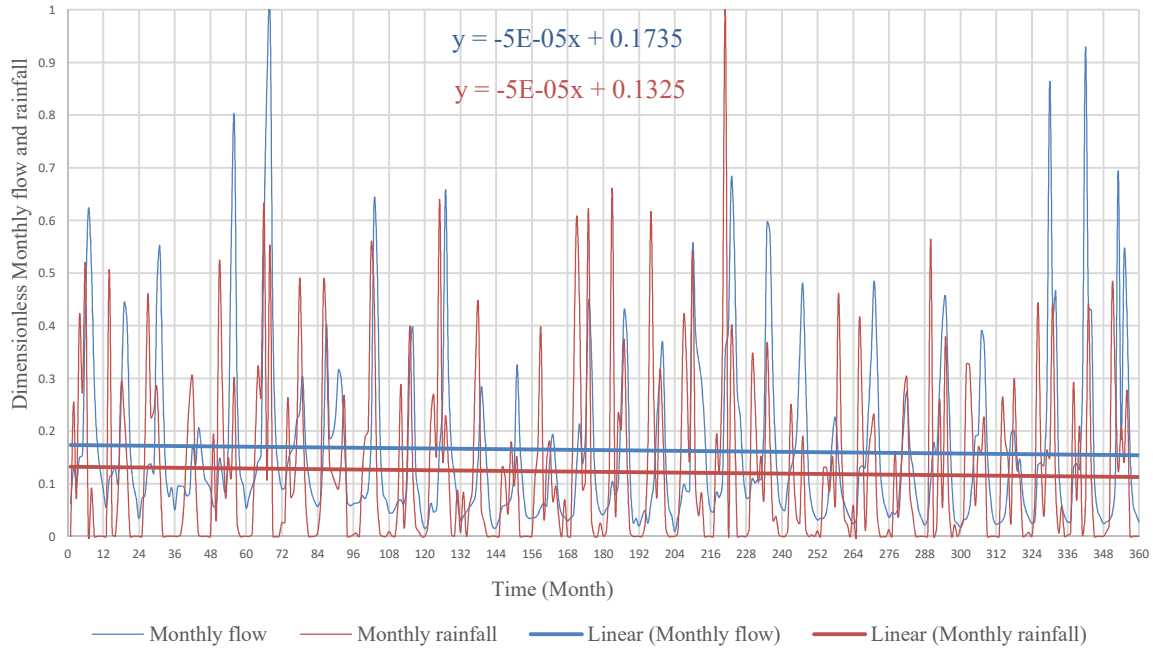

Figure 3. Monthly precipitation and flow at Sad-e-tanzimi station (1987-2016)

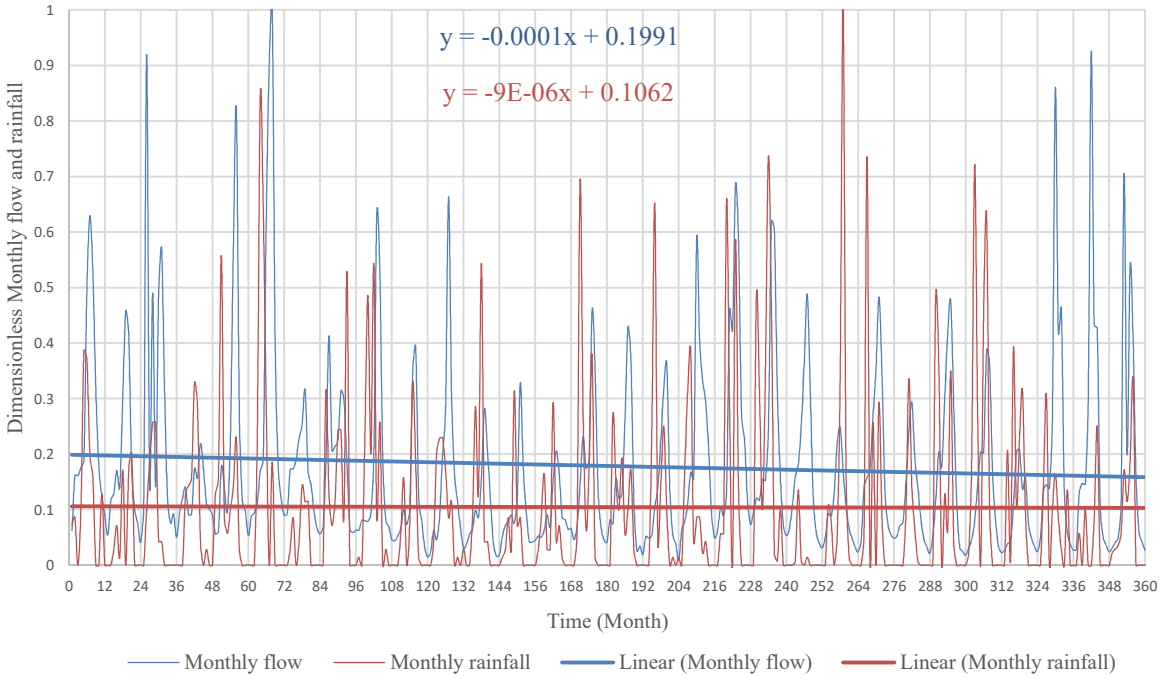

Figure 4. Monthly precipitation and flow at Varzaneh station (1987-2016)

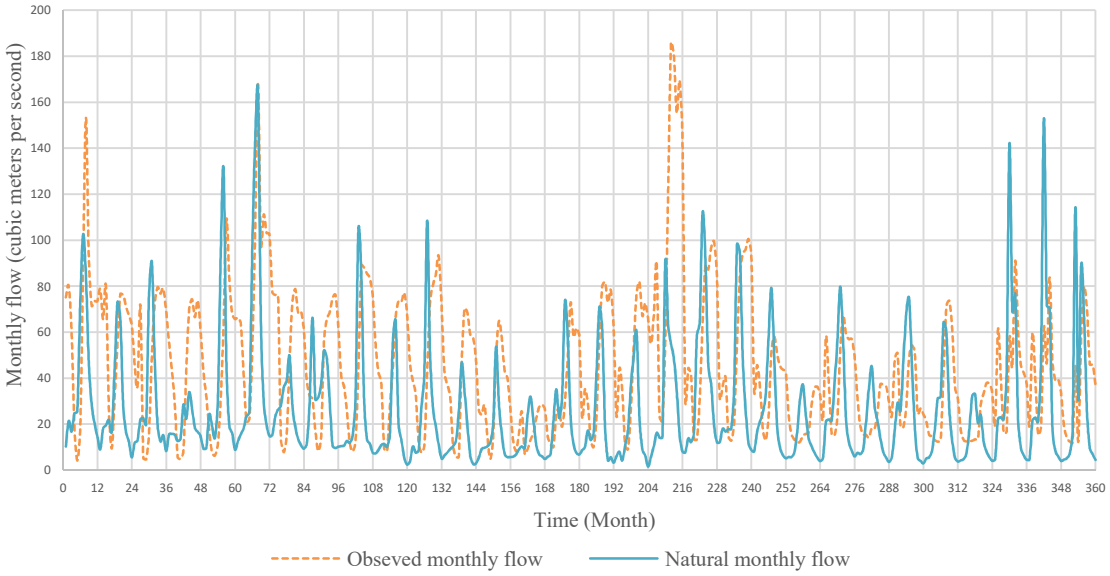

Figure 5. Comparison of observed and natural monthly flow at Sad-e-tanzimi station (1987-2016)

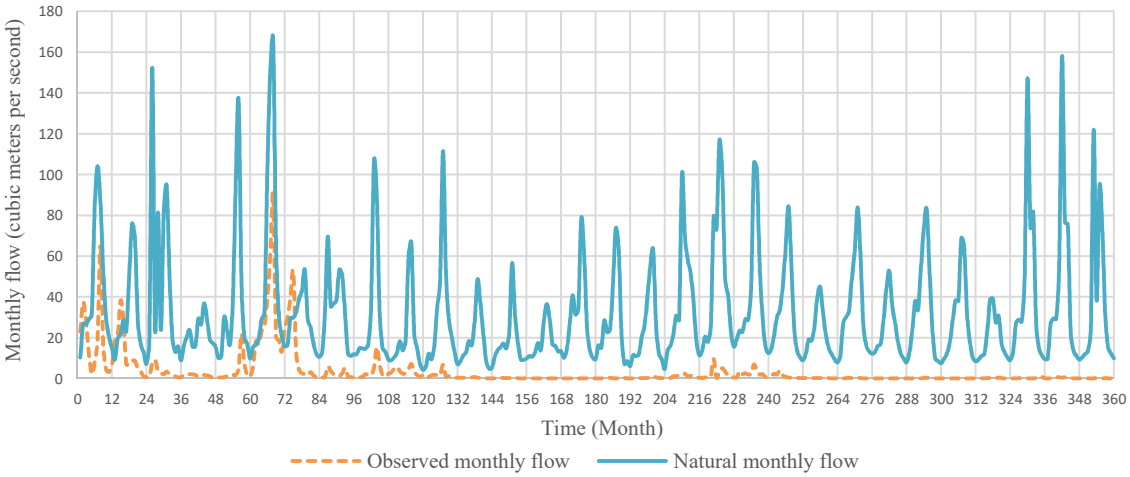

Figure 6. Comparison of observed and natural monthly flow at Varzaneh station (1987-2016)

Table 2. Comparison of observed and natural Flows in Sad-e-tanzimi and Varzaneh stations in different month (values in m^3/s)

Station	Flow	Oct.		Nov.		Dec.		Jan.		Feb.		March		April		May		June		July		Aug.		Sep.		Annual	
		Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural	Observed	Natural
Sad-e-tanzimi		37.2	7.9	40.2	13.1	36.5	17.1	15	18.6	12.7	28.9	22.8	51	49.4	69.8	75.4	59.9	72.6	26.8	65.8	14.3	65.8	9.7	57.7	6.6	45.9	27
Varzaneh		2.9	12.1	4.7	22.6	5.7	22.9	3.5	27.7	2.3	36.1	2.6	56.7	4.4	74.4	7.1	64.2	3.2	30.2	1.6	17.4	0.9	12.7	1.4	9.7	3.4	32.2

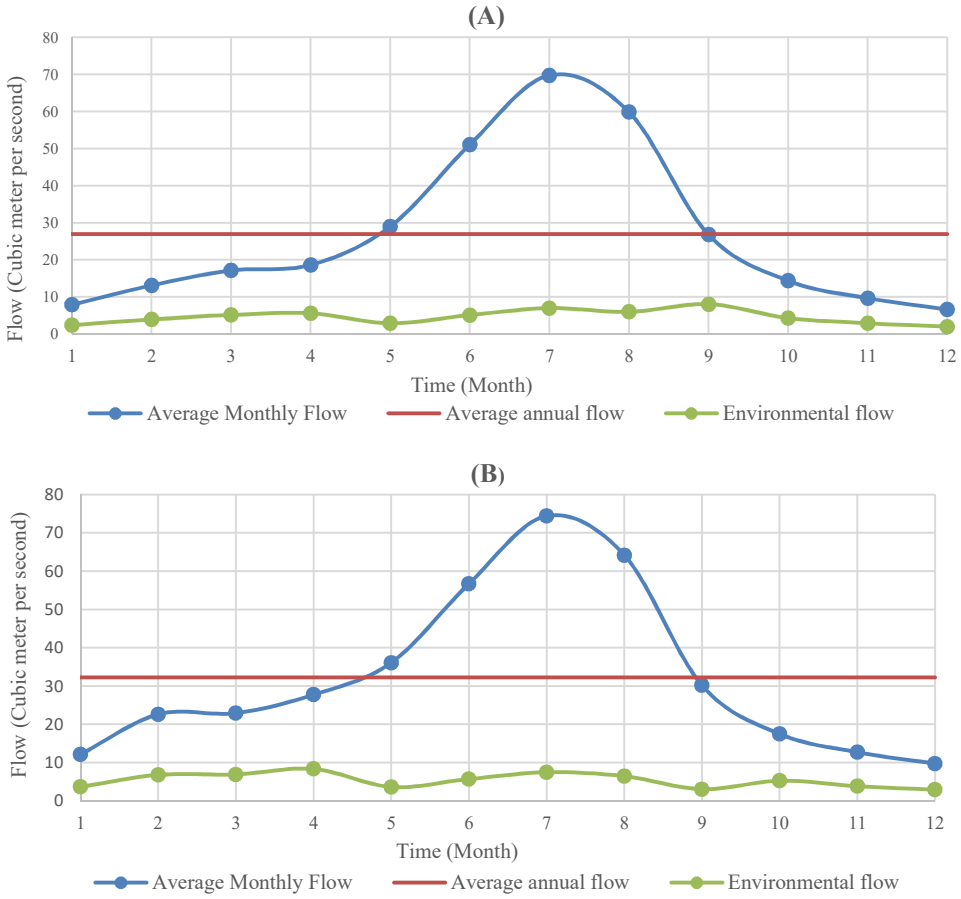

Figure 7. Changes in monthly and average annual natural flow, and environmental flow for: (A). Sad-e-tanzimi and (B). Varzaneh stations (1987-2016)

Table 3. Results of the modified Tennant method in Sad-e-tanzimi and Varzaneh stations in different month (values in m^3/s)

Station	Environmental flow	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	March	April	May	June	July	Aug.	Sep.	Annual
Sad-e-tanzimi	Observed flow	11.1	12.1	11	4.5	3.8	6.8	4.9	7.5	7.3	6.6	6.6	5.8	7.3
	Natural flow	2.4	3.9	5.1	5.6	2.9	5.1	7	6	8	4.3	2.9	2	4.6
Varzaneh	Observed flow	0.9	0.5	0.6	0.3	0.7	0.8	0.4	0.7	0.9	0.5	0.3	0.4	0.6
	Natural flow	3.6	6.8	6.7	8.3	3.6	5.7	7.4	6.4	3	5.2	3.8	2.9	5.3

نتایج حاصل از روش تنانت اصلاح‌شده که بر روی دبی‌های طبیعی ماهانه، در ایستگاه‌های سد تنظیمی و ورزنه انجام شده است، به‌ترتیب ۱۷ و ۱٦ درصد از متوسط دبی طبیعی سالانه کل را به‌عنوان حقابه زیست‌محیطی برآورد کرده است. هم‌چنین نتایج حاصل از این روش که بر روی دبی‌های مشاهداتی ماهانه، در ایستگاه‌های سد تنظیمی و ورزنه انجام شده است، به‌ترتیب ۲۷ و دو درصد از متوسط دبی طبیعی سالانه کل رودخانه زاینده‌رود به‌عنوان حقابه زیست‌محیطی محاسبه کرده است. در ایستگاه سد تنظیمی، محاسبه حقابه زیست‌محیطی براساس داده‌های مشاهداتی نسبت به تعیین دبی براساس داده‌های طبیعی افزایش داشته است. دلیل آن وجودانتقال آب بین‌حوضه‌ای از سرشاخه‌های کارون می‌باشد. همان‌طورکه در جدول ارائه شده است، در ایستگاه ورزنه با استفاده از دبی‌های مشاهداتی، حقابه زیست‌محیطی در حدود ۰/٦ مترمکعب بر ثانیه به‌دست آمده است، که عملاً آبی در رودخانه جریان نخواهد یافت، که دلیل آن برداشت‌های عمده شرب، صنعت و کشاورزی در حد فاصل ایستگاه سد تنظیمی تا ورزنه می‌باشد.

روش محیط خیس‌شده

مقاطع عرضی مربوط به ایستگاه سد تنظیمی و ورزنه در شکل (A–۸) به‌همراه نمودار بی‌بعد دبی–محیط خیس‌شده و منحنی برازش داده‌شده بر آن در شکل (B–۸) آورده شده‌اند. به‌منظور تعیین نقطه شکست در منحنی برازش داده‌شده در شکل (B–۸) از الگوریتم شیب منحنی (براساس توضیحات مندرج در مواد و روش‌ها) برای دو ایستگاه مذکور استفاده شده است (C–۸).

بدین ترتیب، مقطع عرضی ایستگاه سد تنظیمی، مستطیلی شکل و مقطع عرضی ایستگاه ورزنه، مثلثی شکل در نظر گرفته شده است. در این رابطه به مقطع مستطیلی شکل، برازش لگاریتمی و به مقطع مثلثی شکل برازش توانی داده شده است. معادله به‌دست‌آمده از برازش منحنی دبی–محیط خیس‌شده برای هر یک از مقاطع و هم‌چنین حقابه زیست‌محیطی تعیین‌شده در هر ایستگاه توسط این روش، در جدول (٤) ارائه شده است.

Table 4. Equations adopted for each station and related minimum environmental flow

Station	Wetted perimeter-Flow equation	Correlation coefficient	Environmental flow
Sad-e-tanzimi	$y = 0.1329\ln(x) + 0.9101$	0.9536	3.4
Varzaneh	$y = 0.9074x^{0.2429}$	0.9803	5.9

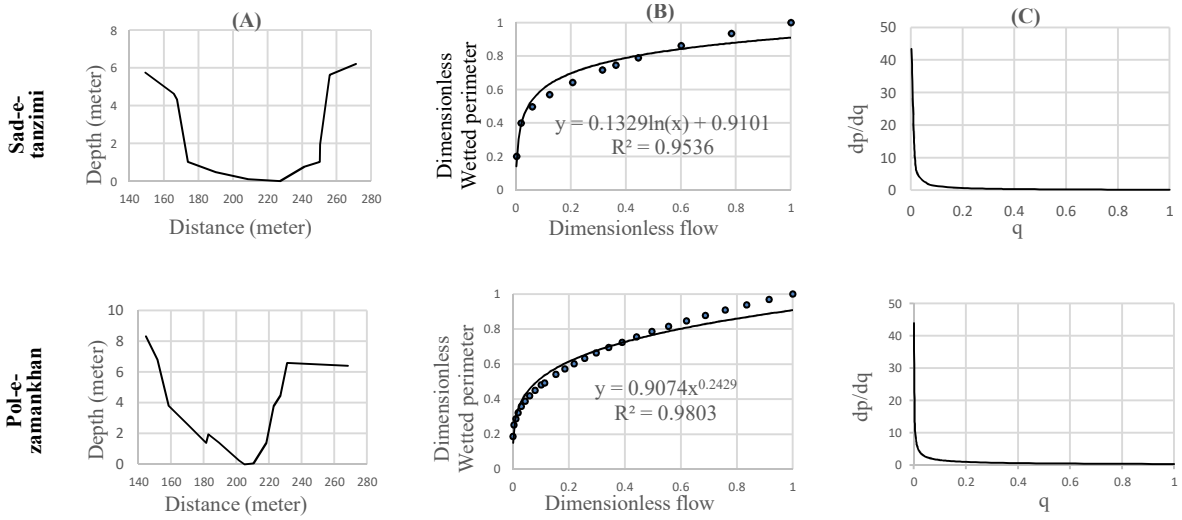

Figure 8. Characteristics of wetted perimeter method related to selected cross sections of Zayandehroud river: (A). Cross sections, (B). Dimensionless flow wetted-perimeter and fitted curve, and (C). Slope curve

با توجه به جدول (٤) و شکل (٨)، نتایج حاصل از تعیین نقطه شکست منحنی با استفاده از الگوریتم شیب منحنی برای ایستگاه‌های سد تنظیمی و ورزنه به‌ترتیب، ١٣ و ١٦ درصد از متوسط دبی طبیعی سالانه کل رودخانه را به‌عنوان حقابه زیست‌محیطی برآورد کرده است.

در نهایت، منحنی تداوم جریان با استفاده از توزیع ویبول در مقیاس لوگ- نرمال برای دبی‌های طبیعی ماهانه در دو ایستگاه سد تنظیمی و ورزنه به‌منظور مقایسه بهتر حقابه‌های زیست‌محیطی حاصل با یکدیگر، رسم شده است. حقابه زیست‌محیطی به‌دست‌آمده از روش‌های موردمطالعه، نسبت به متوسط دبی طبیعی سالانه کل برحسب درصد مقایسه خواهد شد (شکل ٩).

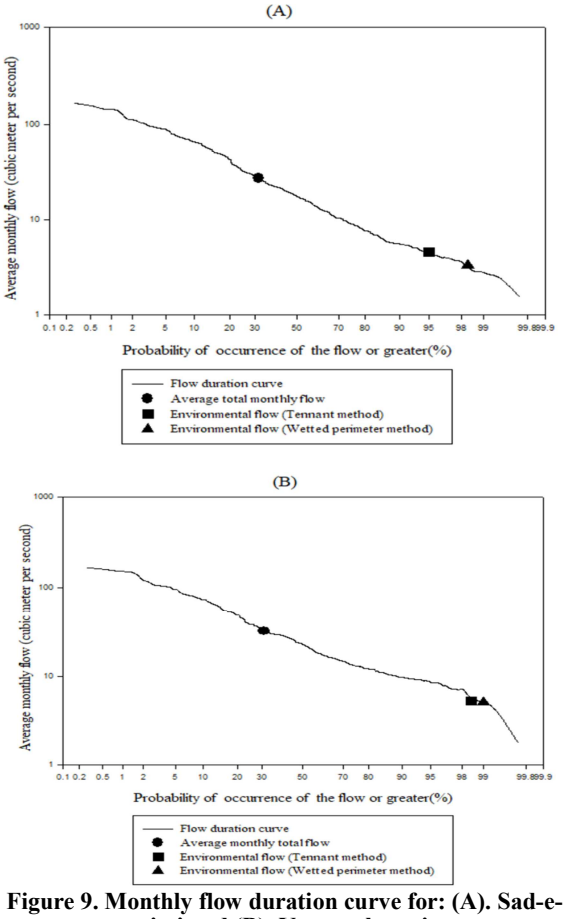

Figure 9. Monthly flow duration curve for: (A). Sad-e-tanzimi and (B). Varzaneh stations

به این‌صورت که حقابه زیست‌محیطی به‌دست‌آمده از روش محیط خیس‌شده با الگوریتم شیب منحنی در ایستگاه‌های سد تنظیمی و ورزنه که به‌ترتیب ١٣ و ١٦ درصد از متوسط دبی طبیعی سالانه کل رودخانه را برآورد کرده است، مقادیری کم‌تر و نزدیک به نتایج به‌دست‌آمده از روش تنانت اصلاح‌شده را نشان می‌دهد. روش تنانت اصلاح‌شده، در ایستگاه‌های سد تنظیمی و ورزنه، به‌ترتیب ١٧ و ١٦ درصد از متوسط دبی طبیعی سالانه کل را به‌عنوان حقابه زیست‌محیطی محاسبه کرده است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ابتدا فرایند طبیعی‌سازی جریان صورت گرفته است. هدف از این فرایند، بازگرداندن ساختار و عملکرد اکوسیستم رودخانه زاینده‌رود به شرایط طبیعی‌اش می‌باشد، که به‌نوبه خود در پیش‌بینی رواناب حوضه در محل ایستگاه‌های هیدرومتری موردمطالعه، با حذف برداشت‌های بالادست، قابل انجام است. سپس روش‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی تعیین حقابه زیست‌محیطی با استفاده از دبی‌های طبیعی‌سازی‌شده انجام گرفته‌اند.

مقایسه سری زمانی بارش در دوره آماری موردمطالعه، حاکی از آن است که میزان بارش، دچار تغییرات قابل ملاحظه‌ای نشده است. در واقع الگوی بارش در دو ایستگاه سد تنظیمی و ورزنه، تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته است. این در حالی است که روند تغییرات دبی‌های مشاهده‌شده از بالادست به سمت پایین‌دست رودخانه، دستخوش تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای شده است. در این رابطه، اختلاف دبی‌های مشاهده‌شده در مقایسه با دبی‌های طبیعی‌سازی‌شده در ایستگاه سد تنظیمی در طول مدت آمار موردمطالعه، قابل‌ملاحظه نمی‌باشد. زیرا در فرایند طبیعی‌سازی در محدوده این ایستگاه، فقط تأثیر انتقال آب

بین حوضه‌ای وجود دارد. در این خصوص اختلاف دبی‌های مشاهداتی و طبیعی‌سازی‌شده به سمت پایین‌دست افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در پایین‌ترین ایستگاه (ایستگاه ورزنه) به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این الگو می‌تواند ناشی از نفوذ آب و برداشت‌های انجام‌شده از آب رودخانه برای اهداف کشاورزی، شهری و صنعتی در حد فاصل ایستگاه سد تنظیمی تا ایستگاه ورزنه باشد. بنابراین توصیه می‌شود که در حد فاصل ایستگاه سد تنظیمی تا ورزنه، رودخانه نیاز به برنامه‌ریزی لازم برای احیای زیست‌بوم را داشته باشد.

به‌منظور بررسی میزان تأثیر و اهمیت طبیعی‌سازی جریان که موضوع اصلی این مقاله است، مقدار حقابه زیست‌محیطی براساس روش تنانت با استفاده از داده‌های مشاهده‌شده و طبیعی‌شده در ایستگاه سد تنظیمی و ورزنه محاسبه شده است. همان‌طورکه نتایج نشان داده است، در ایستگاه پایین‌دست ورزنه، در صورت استفاده از دبی‌های مشاهداتی، حقابه زیست‌محیطی در حدود ۰/٦ مترمکعب بر ثانیه به‌دست خواهد آمد که عملاً آبی در رودخانه جریان نخواهد یافت. در صورت استفاده از دبی طبیعی‌شده، جریان برای محاسبه حقابه زیست‌محیطی، مقدار دبی ۵/۳ مترمکعب بر ثانیه به‌دست خواهد آمد، که عملاً ١٦ درصد از پتانسیل رواناب حوضه به محیط زیست اختصاص خواهد یافت.

در این مطالعه هم‌چنین، حقابه زیست‌محیطی رودخانه موردمطالعه با استفاده از روش محیط خیس‌شده در محدوده قابل‌قبول روش تنانت اصلاح‌شده قرار گرفته است. در نتیجه استفاده از روش تنانت اصلاح‌شده به‌دلیل سهولت در محاسبه و ارائه توزیع ماهانه حقابه زیست‌محیطی به شرط استفاده از سری زمانی دبی طبیعی‌شده در محل ایستگاه‌های موردمطالعه توصیه می‌شود.

از مطالعات مشابهی که در زمینه تعیین حقابه زیست‌محیطی رودخانه زاینده‌رود انجام شده است می‌توان به پژوهش Kiani (2015) اشاره کرد. وی با استفاده از مدل‌سازی HEC-RAS، حقابه زیست‌محیطی این رودخانه را از حدفاصل سد زاینده‌رود تا تالاب گاوخونی، برای عمق موردنیاز گونه شاخص موردمطالعه، در سه بازه رودخانه به‌ترتیب ۱۰، ۹ و ۱۰/۵ مترمکعب بر ثانیه بدست آورد که در حدود ۵۰ درصد بیش‌تر از حقابه زیست‌محیطی برآوردشده از روش‌های پژوهش حاضر است.

ازآنجایی‌که روش‌های مورداستفاده در این پژوهش از روش‌های سریع تعیین حداقل دبی زیست‌محیطی رودخانه می‌باشند و هیچ‌کدام پارامترهای زیستی را در محاسبه حقابه زیست‌محیطی استفاده نمی‌کنند، مطالعات بیش‌تر برای شناسایی شاخص‌های زیستی و شرایط مطلوب زیستگاه و محدوده تحمل گونه‌های هدف (روش‌های شبیه‌سازی زیستگاه و جامع)، پیشنهاد می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

1. Environmental Flow Assessment
2. Hydrological approaches
3. Hydraulic approaches
4. Habit Simulation approaches
5. Holistic approaches
6. Tennant
8. Wetted perimeter

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

منابع

1. Ahmadi, A., Zadehvakili, N., Safavi, H. R., & Ohab Yazdi, S. A. (2015). Development of a dynamic planning model for surface and groundwater allocation, case study: Zayandehroud river basin. *Iran-Water Resources Research*, *11*(1), 22-32. (In Persian)
2. Asadpour, S., Abgun, A., Nazari, A., & Ebrahimi, K. (2021). Estimation and comparison of ecological Flow of Dinachal and Pesikhan rivers. In: Proceeding of *19th Iranian Hydraulic Conference*, 15 february, Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)

3. Dogrul, E. C., Kadir, T. N., Brush, C. F., & Chung, F. I. (2016). Linking groundwater simulation and reservoir system analysis models: The case for California's Central Valley. *Environmental Modelling and Software*, 77, 168-182.
4. Fattahpour, F., Ebrahimi, K,. & Bayat, S. (2018). Determination of the environmental Flow of Sefidrood, *Echo Hydrology*, *5*(3), 753-762. (In Persian)
5. Gippel, C. J., & Stewardson, M. J. (1998). Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows. *River Research and Applications*, *14*(1), 53-67.
6. Jafari, T., Kiem, A. S., Javadi, S., Nakamura, T., & Nishida, K. (2021). Using insights from water isotopes to improve simulation of surface water-groundwater interactions. *Science of The Total Environment*, 798, 149-253.
7. Kiani, N. (2015). *Assessment of environmental flows suply strategies in rivers and wetlands*. Master dissertation, Shahid beheshti University, Iran. (In Persian)
8. Liu, C., Zhao, C., Xia, J., Sun, C., Wang, R., & Lui, T. (2011). An instream ecological flow method for data-scarce regulated rivers. *Journal of Hydrology*, *398*(1-2), 17-25.
9. Moridi, A., Sarang, A., Tofigh, M., Eftekharian, L., & Feizi, H. (2011). Estimation of minimum downstream environmental flow of dams, challenges and solutions. In: Proceeding of *2th National Conference*. 18 May, Zanjan, Iran. (In Persian)
10. Peng, L., & Sun, L. (2016). Minimum instream flow requirement for the water-reduction section of diversion-type hydropower station: a case study of the Zagunao River, China. *Environmental Earth Sciences*, *75*(17), 1-8.
11. Poursalehan, S. J., Sedghi Asl, M., & Parvizi, M. (2013). Use of hydraulic method to estimate the minimum environmental flow of the Maroon River. In: Proceeding of *17th National Congress of Civil Engineering*, 7 May, Shahid Nikbakht School of Engineering, Zahedan, Iran. (In Persian)
12. Qureshi, A.S. & Massih, I. (2003). Managing soil salinity through conjunctive use of surface water and ground water: A simulation study. *ICID Asian Regional workshop*, Chines, Taipei. pp. 233-247.
13. Saedi, F., Ahmadi, A., & Abbaspour, K. C. (2021). Optimal water allocation of the Zayandeh-Roud Reservoir in Iran based on inflow projection under climate change scenarios. *Journal of Water and Climate Change*, *12*(5), 2068-2081.
14. Shahreza, F., Moridi, A., & Mousavi Nadoushani, S. S. (2018). Estimating Stationary Inflow Time Series for Planning Water Resources at the Basin Level (Case Study: Karkheh Watershed). *Iran-Water Resources Research*, *13*(4), 168-173. (In Persian)
15. Standard 557, (2011). *Guide to determination of the water requirements of aquatic ecosystems*. (In Persian)
16. Stewardson, M. J., Webb, J. A., & Horne, A. (2017). Environmental Flows and Eco-Hydrological Assessments in Rivers. Decision Making in Water Resources Policy and Management: An Australian Perspective, December, 113-132.
17. Tennant, D. L. (1976). Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources Fisheries, 1, 6-10.
18. 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.
19. Zhang, Z., Dehoff, A. D., Pody, D., & Balay, J. W. (2010). Detection of streamflow change in the susquehanna River Basin. *Water Resources Management*, *24*(10), 1947-1964. (In Persian)