

Comparative evaluation of different methods for estimating environmental flow in the Zayandehroud River with emphasis on the Physical Habitat Simulation Model (PHABSIM)

ABSTRACT

Estimation of the aquatic ecosystems environmental flow is considered important factors to prevent the negative effects of controlling and regulating surface flows on river habitats. The purpose of this research is to evaluate the environmental flow of Zayandehroud river by the Physical Habitat Simulation method in comparison with Tennant and Range of Variability Approach. The study area was determined from the Zayandehroud Dam downstream to the Gavkhuni Wetland and was divided into 3 reaches, which includes 8 hydrometric stations. The flow statistical series used in this research was collected from establishment year beginning of hydrometric stations until the last year when data was available from Isfahan Regional Water Department and then normalized and included in calculations. Also, by using average value score of fish species according to the experts, the target species of this research were determined for the upstream, middle and downstream areas, *Capoeta damascina*, *Capoeta aculeata* and *Aphanius isfahanensis*. According to the results, the environmental flow estimated the PHABSIM is 60%, the RVA is 49% and the tennant is 26% of the river average annual flow. The results show that the simultaneous use of the PHABSIM and RVA methods can provide a more accurate method that is more compatible with the ecological characteristics of the Zayandehroud River for estimating environmental flow. Compared to empirical methods such as Tennant, this combination allows for more practical results; however, further evaluation under different hydrological conditions could help strengthen the validity of the results.

Keywords: *Ecohydraulic, habitat suitability, PHABSIM, river management.*

ارزیابی تطبیقی روش‌های مختلف بر آورد جریان محیط‌زیستی در رودخانه زاینده‌رود با تاکید بر مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه (PHABSIM)

چکیده

تخمین جریان محیط‌زیستی اکوسیستم‌های آبی، یکی از مهم‌ترین عوامل برای جلوگیری از تأثیرات منفی کنترل و تنظیم جریان‌های سطحی بر زیستگاه‌های رودخانه‌ای محسوب می‌شود. هدف از انجام این تحقیق ارزیابی جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود به روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه PHABSIM در مقایسه با روش‌های هیدرولوژیکی تنانت و دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه می‌باشد. محدوده مطالعاتی حداقل پایین‌دست سد زاینده‌رود تا تالاب گاوخونی تعیین گردید و به ۳ بازه تقسیم شد که شامل ۸ ایستگاه هیدرومتری می‌باشد. سری آماری جریان مورد استفاده در تحقیق حاضر از ابتدای سال تاسیس ایستگاه‌های هیدرومتری تا آخرین سالی که داده‌ها موجود بودند (۱۳۹۷) از اداره آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری و سپس طبیعی‌سازی گردید و در محاسبات لحاظ شد. همچنین با استفاده از ارزیابی میانگین امتیاز ارزش گونه‌های ماهی از نظر کارشناسان مربوطه، گونه‌های هدف این تحقیق برای بازه بالادست، میان‌دست و پایین‌دست به ترتیب سیاه‌ماهی ریز فلس، سیاه‌ماهی درشت فلس و آفانیوس گورخری تعیین شدند. جریان محیط‌زیستی برآورد شده در روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه PHABSIM ۶۰٪، دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه ۴۹٪ و تنانت ۲۶٪ میانگین جریان سالانه رودخانه می‌باشد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری هم‌زمان از روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه و رویکرد دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه می‌تواند روشی دقیق‌تر و سازگارتر با ویژگی‌های اکولوژیکی رودخانه زاینده‌رود برای برآورد جریان زیست‌محیطی ارائه دهد. در مقایسه با روش‌های تجربی مانند تنانت، این ترکیب امکان ارائه نتایج کاربردی‌تر را فراهم می‌سازد؛ هرچند ارزیابی بیشتر در شرایط هیدرولوژیکی متفاوت می‌تواند به تقویت اعتبار نتایج کمک کند.

کلیدواژه‌ها: اکوهیدرولیک، ساماندهی رودخانه، مطلوبیت زیستگاه، PHABSIM

مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان سامانه‌های آبی مهم در هر حوضه آبریز، اکثراً زیستگاه‌های ارزشمندی برای آبزیان محسوب می‌شوند، به همین دلیل متخصصان و کارشناسان مربوطه جایگاه ویژه‌ای برای آن‌ها در برنامه‌های توسعه و بهره‌برداری منابع آب در نظر می‌گیرند. جریان محیط‌زیستی، میزان جریان‌یابی است که برای حفظ سلامت و پایداری اکوسیستم در پهنه آبی مورد نیاز است که می‌تواند از جنبه‌های مختلف تعریف شود. تخمین جریان محیط‌زیستی، یکی از مهم‌ترین عوامل برای جلوگیری از تأثیرات منفی کنترل و تنظیم جریان‌های سطحی بر زیستگاه‌ها به حساب می‌آید. در اکثر کشورهای در حال توسعه، حداقل اطلاعات لازم برای تعیین وضعیت کیفی رودخانه‌ها موجود نمی‌باشد و به همین دلیل روش‌های کامل و منعطفی برای تخمین جریان محیط‌زیستی وجود ندارد که این موجب سختی و دشواری کنترل و حفظ زیستگاه این رودخانه‌ها می‌گردد (Shokoohi & Amini, 2013). با انجام مطالعاتی در جهت شناخت وضعیت طبیعی رودخانه، می‌توان رودخانه را احیا نموده و به وضعیت مطلوب بازگرداند. الگوی توزیع و ساختار جوامع ماهیان رودخانه‌ای در طی سالیان اخیر به دلیل فعالیت‌های انسانی شدیداً دستخوش تغییر شده است. (ایوب زاده و همکاران، ۱۳۹۷). مفهوم جریان زیست‌محیطی حدود ۵۰ سال پیش برای رودخانه‌ها تعریف شد که در اکثر کشورها به آن کمترین جریان زیست‌محیطی نیز گفته می‌شود (مصطفوی، ۱۳۹۲). شناسایی حدود مجاز اعمال تغییرات در رژیم طبیعی رودخانه و کنار آمدن با عدم قطعیت‌های گسترده در این رابطه، چالش اصلی در تخمین جریان زیست‌محیطی می‌باشد. مدیریت و تخصیص جریان محیط‌زیستی رودخانه‌ها ضرورتی انکارناپذیر برای حفظ اکوسیستم‌های موجود در حوضه‌های آبریز محسوب می‌شود (علیزاده، ۱۳۹۶). در کشور برای رودخانه‌های دارای گونه‌های با ارزش بیولوژیکی بالا، نیاز به مطالعات گوناگون به منظور استفاده از روش‌های جدید و دقیق در جهت برآورد جریان محیط‌زیستی و بررسی اعتبار به‌کارگیری آن می‌باشد. قابل توجه است که در این زمینه، انجام مطالعات کاربردی و قابل اجرا در ایران بسیار محدود بوده است و جریان زیست‌محیطی اکثر رودخانه‌های ارزشمند نظیر زاینده‌رود از منظر بیولوژیکی در کشور تاکنون به اندازه کافی مورد بررسی قرار نگرفته است. این امر نشان می‌دهد که برآورد جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود نیاز مبرم و ضروری به بررسی و مقایسه رویکردهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و کاربردی کردن روش‌های تحقیق در این زمینه دارد.

رودخانه زاینده‌رود به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب در مرکز ایران، طی دهه‌های اخیر به‌شدت تحت تأثیر بهره‌برداری‌های انسانی، تغییرات اقلیمی و توسعه ناپایدار قرار گرفته و جریان پایه آن در بسیاری از بازه‌های زمانی کاهش چشمگیری یافته است. این کاهش، نه‌تنها کارکردهای اقتصادی و اجتماعی رودخانه را تحت تأثیر قرار داده، بلکه پایداری زیستگاه‌های آبزیان و ساختار اکولوژیک آن را نیز با تهدید جدی مواجه کرده است. در این میان، جریان زیست‌محیطی به‌عنوان حداقل جریان مورد نیاز برای حفظ عملکردهای بوم‌شناختی رودخانه، نقشی کلیدی در مدیریت پایدار منابع آب ایفا می‌کند. با این حال، تاکنون روش‌های گوناگونی برای برآورد این جریان پیشنهاد شده است که تفاوت‌های قابل توجهی در دقت، قابلیت تعمیم‌پذیری و پیچیدگی فنی دارند. به‌ویژه در ایران، اغلب مطالعات به روش‌های ساده یا هیدرولوژیکی اکتفا کرده‌اند و کمتر به روش‌های دقیق‌تری مانند مدل‌های شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه توجه شده است. در نتیجه مشخص نیست که کدامیک از روش‌های رایج تخمین جریان زیست‌محیطی در شرایط رودخانه‌ای خاص زاینده‌رود (با رژیم متغیر، بستر ناهمگون و شرایط تنش‌آبی شدید) عملکرد دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری دارند. این ابهام می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های نادرست مدیریتی و آسیب بیشتر به اکوسیستم رودخانه شود.

برای پاسخ به این چالش، در این تحقیق با رویکردی تطبیقی، عملکرد چند روش مختلف برآورد جریان زیست‌محیطی (از جمله روش‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه) در بازه‌ای از رودخانه زاینده‌رود مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به‌طور خاص، مدل فیزیکی زیستگاه به‌عنوان روش مرجع و دقیق، مبنای مقایسه قرار خواهد گرفت تا مشخص شود سایر روش‌ها تا چه میزان می‌توانند جایگزین مناسبی برای آن باشند. این رویکرد علاوه بر شناسایی مناسب‌ترین روش برای شرایط خاص رودخانه زاینده‌رود، می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر رودخانه‌های نیمه‌خشک ایران نیز مورد استفاده قرار گیرد.

پیشینه پژوهش

محققین مختلفی در سراسر جهان در زمینه ارزیابی جریان محیط‌زیستی رودخانه با روش‌های گوناگون از جمله روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه مطالعاتی داشته‌اند. حاجی اسماعیلی (۱۳۹۳) تأثیر پارامترهای هیدرولیکی جریان بر وضعیت مطلوبیت زیستگاه گونه‌ی ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان در رودخانه دلیچای را با استفاده از مدل شبیه‌سازی زیستگاه PHABSIM بررسی کرد. نتایج نشان داد همخوانی مناسبی بین تراز سطح آب شبیه‌سازی شده توسط دو مدل PHABSIM و HEC-RAS وجود دارد و به‌طور کلی در تمامی فصول، وضعیت رودخانه

دلیجای برای قزل‌آلای رنگین‌کمان بالغ، نسبت به دو گروه سنی دیگر مطلوب‌تر است و شرایط زیستی رودخانه در فصل مربوط به هر گروه سنی مناسب می‌باشد. اسدی و همکاران (۱۳۹۳) عوامل تعیین‌کننده در انتخاب‌پذیری و ترجیح زیستگاه سیاه‌ماهی در رودخانه سیاه‌رود (از سرشاخه‌های حوضه رودخانه سفیدرود) را بررسی کردند. نتایج نشان داد ترجیح رفتاری در محدوده عمق‌های ۱۷ تا ۳۸ سانتی‌متری می‌باشد و در عمق‌های زیاد و خیلی کم کاهش پیدا می‌کرد. سیاه‌ماهی محدوده زیادی از سرعت آب بین ۰/۴۴ تا ۰/۵۶ متر بر ثانیه را انتخاب کرده و بیشتر بستر سنگلاخی را برای زیستن ترجیح می‌دهد. بنابراین برخی فعالیت‌های انسانی که در رودخانه در حال انجام است سبب تغییر در ویژگی‌های محیطی مانند عرض، عمق، سرعت جریان و بستر رودخانه می‌شود، ممکن است پراکنش سیاه‌ماهی را در این رودخانه تحت تاثیر قرار بدهد. Conder & Annear (1987) در پژوهشی ارتباط سطح قابل استفاده وزنی به دست آمده از PHABSIM و جمعیت دو گونه ماهی قزل‌آلا را در رودخانه وایومینگ بررسی کردند. نتایج این ارزیابی‌ها نشان داد که وقتی یک ویژگی به جز سرعت بیش‌ترین تأثیر را بر جمعیت قزل‌آلا و تغییر دبی دارد، تخمین‌های WUA (مساحت قابل استفاده وزنی) ممکن است نامعتبر باشد و بین WUA و جمعیت ماهی‌های موجود ارتباط وجود دارد اما ماهیت این ارتباط در هر رودخانه‌ای متفاوت است. (Vismara et al., 2001) با روش IFIM و نرم‌افزار شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه PHABSIM منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه ماهی قزل‌آلا را با دو رویکرد تک‌متغیره و دو متغیره مورد بررسی قرار دادند. برای مقایسه روش‌ها روابط دبی - سطح قابل استفاده وزنی با استفاده از هر دو روش تولید منحنی مطلوبیت محاسبه شد که نتایج متفاوت بود و نشان داد که در مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه به منحنی‌های رویکرد تک‌متغیره برای تولید روابط دبی - سطح قابل استفاده وزنی نیاز است. (Moir et al., 2005) با نرم‌افزار PHABSIM زیستگاه ماهی سالمون را در مرحله تخم‌ریزی را شبیه‌سازی کردند و تأثیر شاخص‌های مطلوبیت زیستگاه بر خروجی مدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که PHABSIM قادر به پیش‌بینی زیستگاه ماهی سالمون در مرحله تخم‌ریزی است و استفاده درست از منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه بسیار مهم و بحرانی است. (Gard 2009) به مقایسه شبیه‌سازی مدل‌های PHABSIM و River2D برای ماهی قزل‌آلا در مرحله تخم‌ریزی پرداخت. نتایج نشان داد، در هر دو مدل مطلوبیت (حاصل از عمق، سرعت و بستر) مکان‌های تخم‌ریزی به طور معناداری از مطلوبیت سایر قسمت‌ها بیشتر است. (Beecher et al., 2010) کاربرد مدل PHABSIM و منحنی سطح قابل استفاده وزنی (WUA - دبی) را در دوره درازمدت جهت تعیین معیارهای مطلوبیت زیستگاه ماهی سالمون ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش جریان تابستانه جمعیت ماهی سالمون افزایش یافت. ارتباط بین سطح قابل استفاده وزنی ماهی سالمون نابالغ و دبی نشان داد که بیشترین مقدار زیستگاه در جریانی اتفاق می‌افتد که کمتر از جریان حداقل اندازه‌گیری شده بود و مقدار زیستگاه با افزایش جریان کاهش یافت. (Shim et al., 2016) در تحقیقی بیان کردند مدل‌های مطلوبیت زیستگاه را می‌توان به مدل‌های هیدرولیکی زیستگاه و مدل فیزیولوژیکی زیستگاه تقسیم کرد و اشاره کردند که مدل‌های هیدرولیکی زیستگاه از متغیرهای هیدرولیکی مانند (سرعت، عمق، بستر) استفاده می‌کنند، در مقابل مدل فیزیولوژیکی زیستگاه برای پاسخ فیزیولوژیک در برابر متغیر آب و هوایی مناسب هست اما فاقد تفسیر اثرات فیزیکی زیستگاه (متغیرهای هیدرولیکی) هستند. آن‌ها برای غلبه بر چنین محدودیت‌هایی به وسیله ترکیب کردن مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه PHABSIM و مدل فیزیولوژیکی زیستگاه CLIMEX، مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه محیط‌زیست EHSM^۱ را معرفی نموده که قادر است اثر متغیرهای محیطی را بیشتر از هر مدل معمولی دیگری بررسی کند. (Sedighkia & Abdoli 2021) کارایی روش ترکیبی سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی با الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم را برای ارزیابی و شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه در رودخانه پارک ملی لار ایران برای گونه قزل‌آلای خال‌قرمز را بررسی کردند. بر اساس نتایج، شاخص‌های اندازه‌گیری نشان می‌دهند که این مدل برای ارزیابی و شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه در رودخانه‌ها قدرت خوبی دارد و روش ترکیبی سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی با الگوریتم بهینه‌سازی علف‌های هرز مهاجم برای شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه قدرتمند و قابل اعتماد است. مظلومی و همکاران (۱۴۰۱) الگوی زمانی تأمین جریان محیط‌زیستی رودخانه بشار در دوره‌های کم‌آبی و پربابی مطابق رژیم طبیعی جریان و تأمین نیازهای زیستگاهی در مراحل مختلف چرخه زندگی ماهیان را با مقایسه مشخصات عمق آب و سرعت جریان مطلوب در زیستگاه‌های رودخانه، ارائه نمودند. (Kim et al., 2024) یک رویکرد جامع با توسعه روش‌های نظارت بلندمدت و مدل‌سازی دینامیک جریان اکولوژیک رودخانه را ارائه دادند. در این رویکرد، ادغام تجزیه و تحلیل‌های آب حوضه با سناریوهای رشد جمعیت ماهی تحت شرایط مختلف جریان در مدیریت موثر زیستگاه رودخانه مدنظر قرار گرفت. (Park et al., 2024) ارزیابی سازگاری زیستگاه ماهی را با استفاده از

¹ Weighted Usable Area

² Instream Flow Incremental Methodology

³ Ecological Habitat Suitability Modeling

مدل‌های HEC-RAS^۱ و SWAT^۲ انجام دادند. هدف این تحقیق بررسی واکنش زیستگاه نوعی ماهی به تغییرات جریان با استفاده از تحلیل سری زمانی هیدرودینامیک و کیفیت آب و تعیین حداقل جریان زیست‌محیطی بود. نتایج این تحقیق جریان زیست‌محیطی پیشنهادی را ۰/۴۸ مترمکعب بر ثانیه معرفی کرد و مشخص شد که دمای بالا به‌ویژه در فصل گرما بیشترین تأثیر منفی را بر زیستگاه داشت و مدل ترکیبی روش موثری برای مدیریت جریان زیست‌محیطی معرفی شد. (Kang & Lee (2024) جریان بهینه زیست‌محیطی فصلی در رودخانه تان را برای حفظ زیستگاه گونه‌ای ماهی با استفاده از مدل PHABSIM و HEC-RAS برآورد کردند. طبق نتایج، برای بهار، جریان متناسب با WUA بین ۹۰ الی ۱۰۰ درصد در تابستان و پاییز - زمستان برآورد شد و پیشنهاد افزایش جریان در بهار برای حفظ سلامت زیست‌محیطی ارائه شد.

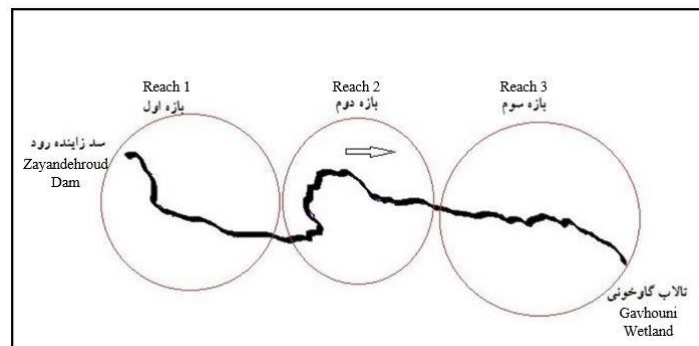
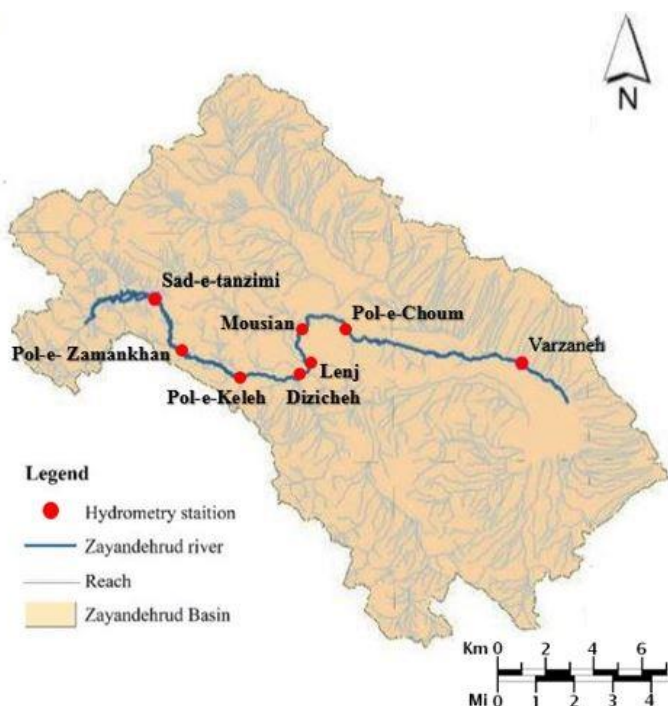
هدف از انجام این تحقیق ارزیابی جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود به روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه در مقایسه با روش‌های هیدرولوژیکی تئوریک و دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه است. در نهایت نتایج روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه با سایر روش‌های انجام شده در این تحقیق مقایسه می‌گردند تا بهترین روش ارزیابی جریان محیط‌زیستی در رودخانه زاینده‌رود پیشنهاد گردد.

روش‌شناسی پژوهش

حوضه آبریز درجه دو زاینده‌رود با مساحت ۴۱۵۵۲/۳ کیلومتر مربع جزء حوضه آبریز فلات مرکزی محسوب می‌شود و به عنوان حوضه اول از منطقه ششم و با کد مطالعاتی ۴۲ مشخص شده است که بین مختصات جغرافیایی ۵۰° ۰۲' و ۵۳° ۲۲' طول شرقی و ۳۱° ۱۲' تا ۳۳° ۴۲' عرض شمالی واقع شده است. این حوضه تغییرات آب و هوایی قابل توجهی دارد. به عنوان مثال در ناحیه چلگرد در غرب این حوضه بارش متوسط سالانه بیشتر از ۱۴۰۰ میلیمتر می‌باشد اما در شرق حوضه و در حوالی تالاب گاوخونی متوسط بارش سالانه کمتر از ۱۰۰ میلیمتر است (شیرانی و همکاران، ۱۳۸۵). سرچشمه رودخانه زاینده‌رود از کوه‌های زاگرس مرکزی به ویژه زردکوه بختیاری می‌باشد و پس از پیمودن مسیر در کویر مرکزی ایران و در امتداد شرق، سرانجام به تالاب گاوخونی واقع در شرق اصفهان ختم می‌شود و به عنوان یک زهکش برای حوزه آبخیز زاینده‌رود عمل می‌کند. طول این رودخانه از سرچشمه تا تالاب گاوخونی حدوداً ۴۰۵ کیلومتر از سمت غرب به شرق می‌باشد. این رودخانه که یکی از مهمترین و پرآب‌ترین رودخانه‌های کشور محسوب می‌شود، در عین حال بزرگترین رودخانه فلات مرکزی ایران نیز به شمار می‌رود. از مجموع چندین شاخه کوچک و پرآب به نام‌های آب‌زری، چمرود، دره نعل‌اشگنان، دره خوربه، دره قاضی، دره دولت‌آباد، دره سودجان، دره درکه‌آباد، دره اورگان و دره قلعه شاهرخ، شبکه رودخانه‌ای شاخه اصلی زاینده‌رود تشکیل شده است (احمدی تودشکی، ۱۳۹۴). رودخانه زاینده‌رود حاوی گونه‌های با ارزش مختلفی است و از نظر محیط‌زیستی بسیار حائز اهمیت می‌باشد؛ بنابراین تامین حداقل جریان محیط‌زیستی مورد نیاز این رودخانه از ملزومات به حساب می‌آید که بایستی تمهیدات و اقداماتی جامع و کاربردی برای مدیریت و تخصیص آن اعمال شود. انتخاب محدوده مطالعاتی رودخانه زاینده‌رود در تحقیق حاضر، با استفاده از مطالعات گذشته و بازه‌بندی‌های انتخاب شده در پژوهش‌های مربوط به برآورد جریان محیط‌زیستی در رودخانه زاینده‌رود در نظر گرفته شده است (طاهری گرجی و همکاران، ۱۴۰۱). محدوده مطالعاتی در این تحقیق، حداقل سد زاینده‌رود تا تالاب گاوخونی به طول ۳۵۴/۹ کیلومتر مشخص شده است و به ۳ بازه و ۸ ایستگاه هیدرومتری تقسیم شده است. اولین ایستگاه مطالعاتی در این پژوهش ایستگاه سد تنظیمی می‌باشد که به عبارتی اولین ایستگاه هیدرومتری بعد از سد زاینده‌رود محسوب می‌شود و ایستگاه ورزنه که نزدیک‌ترین ایستگاه به تالاب گاوخونی می‌باشد به عنوان آخرین ایستگاه مطالعاتی در نظر گرفته شده است (شکل ۱). جدول ۱ اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری در بازه مطالعاتی را نشان می‌دهند.

¹ Hydrologic Engineering Centers River Analysis System

² Soil and Water Assessment Tool



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی در حوضه آبریز و رودخانه زاینده‌رود (۱۸)

جدول ۱. اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری در بازه مطالعاتی

ایستگاه هیدرومتری	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی (UTM)	عرض جغرافیایی (UTM)	سال تاسیس
سد تنظیمی	۱۹۹۲	۴۷۹۹۱۰	۳۶۲۰۵۱۰	۱۳۴۶
پل زمانخان	۱۸۸۰	۴۹۰۱۱۰	۳۵۹۵۶۷۹	۱۳۲۸
پل کله	۱۷۵۰	۵۲۱۷۶۶	۳۵۸۲۸۱۹	۱۳۲۸
دیزچه	۱۶۸۰	۵۴۸۸۱۵	۳۵۸۱۵۳۶	۱۳۸۱
لنج	۱۶۷۲	۵۵۲۴۳۳	۳۵۸۴۱۷۱	۱۳۵۹
موسیان	۱۶۲۱	۵۴۹۳۸۱	۳۶۰۴۵۱۰	۱۳۷۴
پل چوم	۱۵۵۱	۵۷۲۲۹۲	۳۶۰۵۵۴۲	۱۳۶۴
ورزنه	۱۴۶۹	۶۵۶۳۹۳	۳۵۸۸۶۰۹	۱۳۲۸

روش این تحقیق برگرفته از مقاله تحلیل رویکردهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در برآورد محدوده جریان مطلوب زیست‌محیطی رودخانه زاینده‌رود است و با مراجعه به مقاله مذکور می‌توان شرح مفصلی از روش تحقیق را مشاهده نمود (رجبی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳). در تحقیق حاضر از دو روش هیدرولوژیکی تنانت و دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه، جهت مقایسه با روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه برای ارزیابی جریان محیط‌زیستی استفاده شد. روش‌های هیدرولوژیکی با استفاده از آمارهای تاریخی جریان رودخانه، جریان زیست‌محیطی را به صورت درصدی از میانگین آورد سالانه رودخانه یا به صورت جریان با احتمال تجاوز مشخص از روی منحنی تداوم جریان در مقیاس زمانی سالانه، فصلی یا ماهانه محاسبه می‌کنند (Postel et al., 1996). با استفاده از مدل یک‌بعدی شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه شرایط هیدرولیکی رودخانه و شبیه‌سازی شرایط زیستی حاکم بر گونه هدف در بازه مطالعاتی انجام خواهد شد. در ابتدا واسنجی و شبیه‌سازی تراز سطح آب و پس از آن واسنجی و شبیه‌سازی سرعت‌ها ارائه می‌شود. در نهایت آنالیز توزیع فراوانی به منظور تعیین احتمال اشغال شدن یک میکروزیستگاه توسط گونه هدف انجام می‌شود (Beecher et al., 2010). داده‌های مورد استفاده در این تحقیق از طریق مطالعات کتابخانه‌ای، سایت‌های علمی، سازمان‌ها و مراکز علمی معتبر و گزارش مطالعات میدانی توسط کارشناسان اکوهیدرولیک تهیه شد و داده‌ها هیدرولوژیکی از اداره آب منطقه‌ای استان اصفهان گردآوری شد. در ادامه به صورت کامل‌تر روش‌های استفاده شده در این تحقیق شرح داده شده‌اند.

روش تنانت: محققى به نام تنانت در طى انجام تحقیقات خود، بر مبنای داده‌های برداشت شده از رودخانه، درصدی از متوسط جریان سالانه (AAF) را حفظ برای شرایط هیدرولوژیکی و مطلوبیت زیستگاه در رودخانه ارائه کرد (Tenant, 1976). جدول ۲ نحوه محاسبه جریان بهینه محیط‌زیستی را بر اساس متوسط جریان سالیانه نشان می‌دهد و به محققین و کارشناسان این امکان را می‌دهد که این جریان را بسیار ساده و بدون نیاز به جمع‌آوری اطلاعات بیشتر در محل محاسبه کنند. جهت کاربردی نمودن نتایج این تحقیق، کاهش محاسبات اضافه و مقایسه دقیق‌تر، فقط سه حالت عالی، خوب و قابل قبول ارزیابی گردید.

جدول ۲. رژیم‌های پیشنهادی جریان پایه در روش تنانت جهت تعیین جریان محیط‌زیستی (Tenant, 1976)

توصیف جریان	پاییز - زمستان (%)	بهار - تابستان (%)
عالی	۳۰	۵۰
خوب	۲۰	۴۰
قابل قبول	۱۰	۳۰

روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه (RVA): این روش هیدرولوژیکی پیچیده را که ریچتر و همکاران (۱۹۹۶) توسعه دادند، برای استفاده در رودخانه‌های تنظیم شده می‌باشد که حفاظت از کارکرد زیستگاه‌های طبیعی و بومی و حفظ تنوع زیستی طبیعی از اهداف اولیه مدیریت رودخانه می‌باشد. برای اجرای روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه، حداقل به آمار ۲۰ ساله جریان نیاز است و از یک محدوده قراردادی از تغییرپذیری مبنی بر ± 1 انحراف استاندارد از میانگین و یا از چارک‌های ۲۵ یا ۷۵ درصد استفاده می‌کند. سپس پیشنهاد می‌شود که مدیریت طرح‌های توسعه منابع آب به گونه‌ای صورت گیرد که توزیع مقادیر سالیانه پارامترهای IHA تا حد امکان به توزیع پارامترها در شرایط طبیعی نزدیک باشد. چنانچه اغلب سری‌های زمانی هیدرولوژیکی پس از توسعه در محدوده مقادیر طبیعی پارامترهای IHA قرار گیرد به این معنی است که اثرات طرح‌های توسعه روی اکولوژی رودخانه کم است و هنوز در شرایط نسبتاً طبیعی قرار دارد. نرم‌افزار شاخص‌های رژیم متغیر هیدرولوژیکی (IHA) توسط کمیسیون نگهداری جنگل‌ها و شیل‌ات و منابع طبیعی به عنوان ابزاری با کاربرد آسان برای محاسبه مشخصات رژیم‌های هیدرولوژیکی طبیعی و تغییر یافته ارائه شده است. این نرم‌افزار برای هر نوع داده روزانه هیدرولوژیکی از قبیل جریان‌های رودخانه، تراز رودخانه، سطوح آب زیرزمینی یا ترازهای دریاچه قابل استفاده می‌باشد. مزیت روش IHA این است که می‌تواند داده‌های هیدرولوژیکی روزانه ورودی را به تعداد سری‌های قابل مدیریت از پارامترهای هیدرولوژیکی مرتبط با اکولوژی خلاصه کند. این نرم‌افزار از داده‌های روزانه جریان برای محاسبات استفاده می‌کند. نرم‌افزار IHA، ۶۷ پارامتر آماری را محاسبه می‌کند که این پارامترها به دو گروه پارامترهای IHA و پارامترهای مولفه‌های جریان محیط‌زیستی تقسیم می‌شوند. تعداد ۳۳ پارامتر IHA و ۳۴ پارامتر EFC وجود دارد. این نرم‌افزار گزینه‌های زیادی دارد که می‌تواند برای کنترل محاسبه این پارامترها مورد استفاده قرار گیرند. یکی از قابلیت‌های مهم این نرم‌افزار امکان مقایسه دو دوره زمانی مجزا و یا تحلیل روند در یک دوره زمانی منفرد است. اگر رودخانه مورد مطالعه با یک تغییر ناگهانی از قبیل احداث سد مواجه شده باشد، IHA می‌تواند برای تحلیل تأثیرات آن بر رژیم جریان از طریق محاسبه پارامترهای هیدرولوژیکی دو دوره قبل و بعد از احداث سد بکار رود. پارامترهای IHA با استفاده از آمار پارامتریک (میانگین/انحراف استاندارد) یا آمار ناپارامتریک (صدک) محاسبه می‌شوند. برای اکثر وضعیت‌ها آمار ناپارامتریک گزینه بهتری می‌باشد زیرا بیشتر داده‌های هیدرولوژیکی دارای چولگی (غیرنرمال) می‌باشند (فرض کلیدی آمار پارامتریک این است که داده‌ها دارای توزیع نرمال می‌باشند). اما برای وضعیت‌های معین تناوب سیلاب یا متوسط ماهیانه حجم جریان، آمار پارامتریک ترجیح داده می‌شود. پارامترهای هیدرولوژیکی محاسبه شده توسط IHA بر اساس سال آبی در جداول خروجی دسته‌بندی می‌شوند. سال آبی پیش فرض در IHA از یک اکتبر تا سی سپتامبر می‌باشد، اما این پیش فرض در IHA قابل تغییر است. در آخر وقتی تحلیل تغییرات بین دو دوره زمانی انجام می‌شود نرم‌افزار این امکان را برای کاربر فراهم می‌کند که روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه (RVA) را بکار برد. باید دقت شود که تحلیل RVA فقط برای پارامترهای IHA امکان دارد و برای پارامترهای EFC قابل محاسبه نمی‌باشد (Richter et al., 1996).

روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه: مدل‌های مختلفی تا کنون در سطح جهانی برای شبیه‌سازی زیستگاه ارائه شده است که اولین و رایج‌ترین مدل ریاضی در این زمینه مدل PHABSIM می‌باشد. این مدل توسط سازمان نقشه‌برداری و سرویس حیات وحش ایالات متحده

¹ Average Annual Flow

² Range of Variability Approach

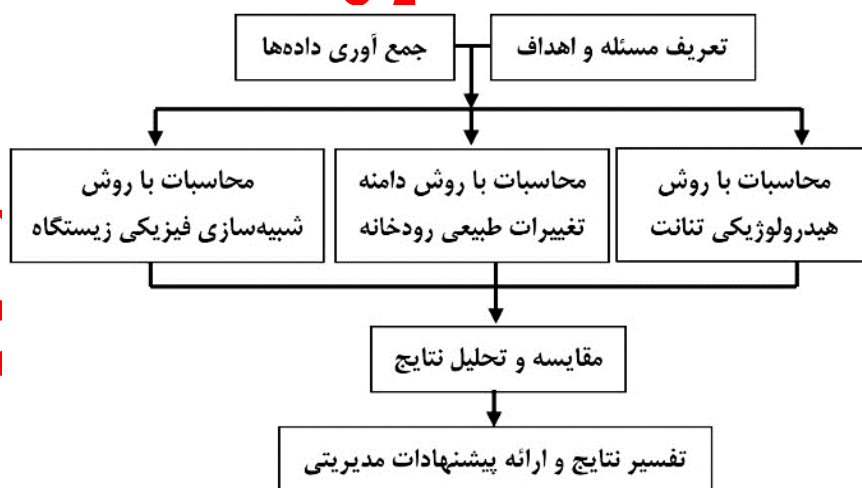
³ Indicator of Hydrological Alteration

⁴ Environmental Flow Components

در دهه ۱۹۷۰ به عنوان بخشی از روش افزایشی جریان جاری رودخانه‌ای ارائه شده است (Bovee, 1997). مدل PHABSIM شرایط هیدرولیکی حاکم بر رودخانه را به صورت یک‌بعدی شبیه‌سازی می‌کند. در گام بعد، شرایط زیستی حاکم بر گونه هدف را در بازه مطالعاتی شبیه‌سازی و مساحت قابل استفاده از لحاظ محیط‌زیستی را برای گونه محاسبه و برآورد می‌کند. در واقع خروجی استاندارد این مدل، منحنی مساحت قابل استفاده وزنی (WUA) می‌باشد که در هر بازه برای گونه هدف در دوره زیستی مورد بررسی قابل استخراج است. مساحت قابل استفاده وزنی در یک دبی خاص در بازه رودخانه از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$WUA = \left(\sum_{i=1}^n A_i \cdot CSI_i / L \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن، A_i سطح هر سلول، CSI_i شاخص مطلوبیت ترکیبی هر سلول و L طول بازه می‌باشد. این خروجی می‌تواند با داده‌های سری زمانی دبی رودخانه ترکیب و داده‌های سری زمانی را ایجاد کند. با توجه به منحنی استخراج شده، تأثیر رژیم‌های مختلف جریان بر میزان زیستگاه در دسترس قابل بررسی است. از این رو شرایط زیستگاهی مستقیماً به نیازمندی گونه هدف مرتبط می‌شود (Bovee, 1997). داده‌های ورودی این مدل پس از تعریف پروژه جدید عبارتند از: داده‌های مربوط به مقاطع عرضی رودخانه شامل فاصله هر مقطع از مقطع پایین‌دست، تراز دبی، شیب خط انرژی، فاکتور وزنی بالادست^۱، تراز سطح آب مشاهده شده در مقطع، دبی اندازه‌گیری شده در مقطع و مختصات نقاط برداشت شده در هر مقطع شامل فاصله از ابتدای مقطع، ارتفاع کف آبراهه و سرعت. بعد از ورود داده‌ها و بررسی آن‌ها، واسنجی و شبیه‌سازی تراز سطح آب با استفاده از یک و یا ترکیبی از سه مدل STGQ، MANSQ و یا WSP انجام می‌شود. مرحله بعدی واسنجی و شبیه‌سازی توزیع سرعت در مقاطع عرضی با استفاده از مدل VELSIM می‌باشد. در همین مرحله ورود داده‌های مربوط به منحنی‌های معیارهای مطلوبیت زیستگاه نیز برای گونه‌های هدف و دوره‌های رشد مختلف گونه هدف صورت می‌گیرد. در نهایت با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی زیستگاه شامل HABEF، HABTAE و یا HABTAM و تنظیم گزینه‌های لازم یا مطلوب مدل‌سازی، شبیه‌سازی زیستگاه انجام شده و منحنی‌های مربوط از جمله منحنی دبی-فریگی زیستگاه برای گونه‌های هدف استخراج خواهد شد (حاجی‌اسماعیلی، ۱۳۹۳). لازم به ذکر است که با استفاده از ارزیابی میانگین امتیاز ارزش گونه‌ها از نظر کارشناسان مربوطه، گونه‌های هدف این تحقیق برای بازه بالادست، میان‌دست و پایین‌دست به ترتیب سیاه‌ماهی ریزفلس، سیاه‌ماهی درشت‌فلس و آفانیوس گورخری تعیین شدند. در شکل ۲، فلوچارت کلی این تحقیق ارائه شده است.



شکل ۲. فلوچارت مطالعه حاضر

یافته‌های پژوهش

ضروری‌ترین اقدام برای تحلیل روش‌های انجام شده، بررسی آمار تاریخی جریان رودخانه می‌باشد به همین دلیل در ابتدا به برخی مشخصات آماری جریان رودخانه زاینده‌رود در یک مقطع زمانی مشخص در جدول ۳ اشاره شده است. در تحقیق حاضر، سری آماری جریان مورد استفاده

¹ Combined Suitability Index

² SZF: Stage of Zero Flow

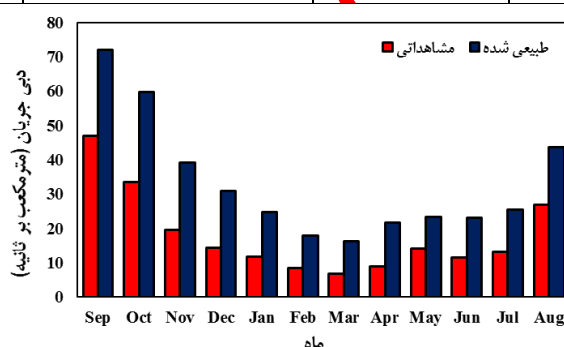
³ Upstream Weighting Factor

⁴ HSC: Habitat Suitability Criteria

از ابتدای سال تاسیس ایستگاه‌های هیدرومتری تا آخرین سالی که داده‌ها موجود بودند یعنی سال ۱۳۹۷ در نظر گرفته شده است. اطلاعات و داده‌هایی نظیر مقادیر دبی متوسط روزانه برای کلیه ایستگاه‌های هیدرومتری موجود در رودخانه زاینده‌رود از اداره آب منطقه‌ای اصفهان جمع‌آوری شد. از آنجایی که برای انجام مطالعات مربوط به برآورد جریان محیط‌زیستی و مطلوبیت زیستگاه نیاز به داده‌های طبیعی جریان است، لازم است که با استفاده از روش‌های طبیعی‌سازی، داده‌های جریان را اصلاح کرد تا دقت و کارایی نتایج تحقیق افزایش یابد. عملیات طبیعی‌سازی جریان برای هر ایستگاه از سال تاسیس آن تا آخرین سالی که داده‌های جریان موجود بود صورت گرفت و در محاسبات اعمال گردید. این عملیات با برآورد بارش و آبدهی رودخانه برای دوره آماری مدنظر و برداشت‌های آب در بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری برای سال‌هایی که جریان دستخوش تغییرات انسانی نظیر احداث سد زاینده‌رود، برداشت آب و ... شده بود صورت گرفت و به آبدهی مشاهداتی اضافه گردید. در نهایت روند سری زمانی آبدهی اصلاح شد و طبیعی‌سازی جریان صورت گرفت. در شکل ۳ داده‌های مشاهداتی و طبیعی‌شده جریان رودخانه زاینده‌رود ارائه شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. طبق اطلاعات هیدرولوژیکی موجود، در شهریور ماه تا آبان ماه بیشترین دبی آب رودخانه زاینده‌رود اتفاق می‌افتد که بارندگی زیاد و عدم برداشت آب جهت مصارف گوناگون در منطقه از دلایل اصلی آن می‌باشد.

جدول ۳. مشخصات آماری جریان در ایستگاه‌های منتخب مطالعاتی (m3.s-1)

ایستگاه هیدرومتری	دوره آماری	دبی متوسط سالانه	حداقل جریان سالانه	حداکثر جریان سالانه
سد تنظیمی	۱۳۴۶-۱۳۹۷	۳۴/۳	۱۶/۸	۶۳/۶
پل زمانجان	۱۳۲۸-۱۳۹۷	۳۲/۲	۲۰/۹	۷۱/۴
پل کله	۱۳۲۸-۱۳۹۷	۳۳/۴	۱۸/۵	۵۲/۳
دیزچه	۱۳۸۱-۱۳۹۷	۳۳	۲۱/۳	۶۶/۶
لنج	۱۳۵۹-۱۳۹۷	۳۳/۵	۱۵/۲	۵۹/۷
موسیان	۱۳۷۴-۱۳۹۷	۳۲/۹	۱۱/۳	۴۷/۴
پل چوم	۱۳۶۴-۱۳۹۷	۳۳	۱۳	۷۰/۳
ورزنه	۱۳۲۸-۱۳۹۷	۳۴/۲	۱۵/۹	۷۲/۳
میانگین		۳۳/۲	۱۶/۶	۶۲/۹



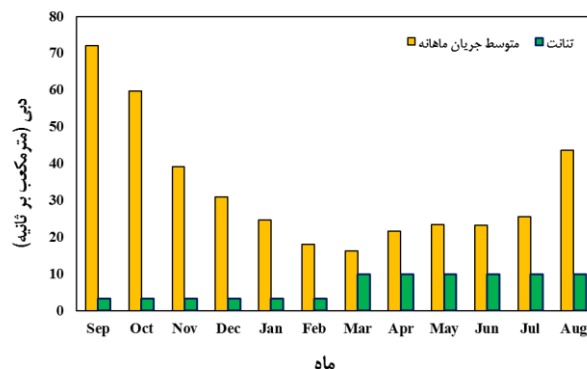
شکل ۳. مقایسه داده‌های مشاهداتی و طبیعی شده جریان کل رودخانه زاینده‌رود

با توجه به جدول ۴، جریان محیط‌زیستی برای رودخانه زاینده‌رود به روش تنانت برای سه وضعیت قابل قبول، خوب و عالی محاسبه گردید که برای فروردین ماه تا شهریور ماه به ترتیب برابر ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد میانگین جریان سالانه و همچنین برای مهرماه تا اسفند ماه برابر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد میانگین جریان سالانه می‌باشد. توزیع ماهیانه جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود را با استفاده از روش تنانت در وضعیت قابل قبول (حداقل‌ترین وضعیت ممکن برای زیست بومی) را در مقایسه با متوسط جریان ماهانه (MMF) در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق نتایج روش تنانت، در بازه‌ی مطالعاتی وضعیت جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود مورد قبول می‌باشد و دچار کمبود نیست اما مقادیر پیشنهادی بسیار کمتر از متوسط جریان ماهانه می‌باشد و پیش‌بینی می‌شود که برای تامین نیاز محیط‌زیستی رودخانه کافی نیست. نتایج نشان می‌دهد که درصد تخصیص جریان محیط‌زیستی از فروردین ماه تا شهریور ماه، به دلیل گرمی هوا و کمبود آب بیشتر می‌شود؛ بنابراین باید برنامه‌ای همه‌جانبه و عادلانه برای ذینفعان رودخانه تدوین گردد تا در تامین جریان محیط‌زیستی تداخلی ایجاد نشود.

جدول ۴. برآورد جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود به روش تنانت ($m^3.s^{-1}$)

وضعیت	قابل قبول	خوب	عالی
-------	-----------	-----	------

نیمه اول سال	۹/۹	۱۳/۳	۱۶/۶
نیمه دوم سال	۳/۳	۶/۶	۹/۹
میانگین	۶/۶	۹/۹	۱۳/۳



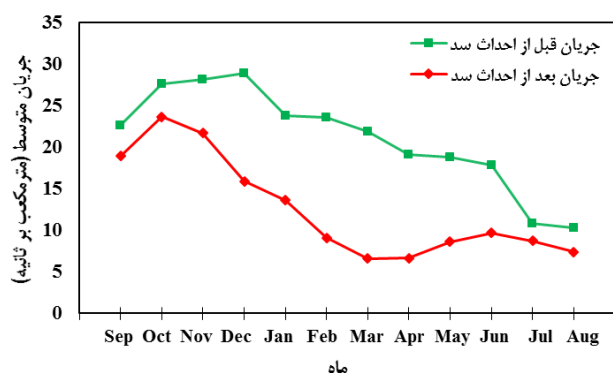
شکل ۴. نمودار توزیع ماهیانه جریان زیست محیطی رودخانه زاینده‌رود با استفاده از روش تنانت در وضعیت قابل قبول

با استفاده از داده‌های دبی روزانه ایستگاه‌های مطالعاتی معرفی شده، روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه برای رودخانه زاینده‌رود مورد بررسی قرار گرفت. برای محاسبه جریان محیط‌زیستی توسط این روش، از نرم‌افزار IHA استفاده شد. برای اجرای این نرم‌افزار، داده‌های جریان به فایل قابل قبول نرم‌افزار یعنی فایل Text تبدیل و وارد نرم‌افزار شدند. دوره آماری مورد استفاده برای ایستگاه‌های مطالعاتی از سال آبی دو دوره قبل و بعد از سال تاسیس سد زاینده‌رود (سال ۱۳۵۰-۱۳۵۱) در نظر گرفته شد و عملیات طبیعی‌سازی بر روی آن‌ها صورت گرفت. در تحقیق حاضر، پارامترهای گروه اول IHA (مقادیر ماهانه جریان) بررسی شدند زیرا هم‌راستا با هدف این تحقیق یعنی برآورد جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود می‌باشند و فقط به نتایج این گروه نیاز است. اما غیر از پارامترهای گروه اول، نتایج یک پارامتر حدی مهم بنام جریان صفر (یکی از ۳۳ پارامتر IHA که بیانگر تعداد روزهایی است که رودخانه فاقد جریان آب است و خشک می‌باشد) ارائه گردید که این پارامتر در برخی مواقع می‌تواند عامل نابودی قابل توجهی از ارگانیسم‌های آبی رودخانه و تهدیدی برای تغییر دادن کیفیت و پیوستگی اکولوژیکی در بلندمدت باشد اما با این حال در برخی اوقات وجود جریان صفر نیز ضروری می‌باشد و سیکل طبیعی رودخانه به آن نیازمند است. با توجه به نتایج جدول ۵، در زمان قبل از احداث سد زاینده‌رود، برای جریان‌های حداکثر حدود ۶۴ روز جریان صفر مشاهده می‌شود اما بعد از احداث سد جریان صفری مشاهده نشده است که این هم تأثیرات مثبت و هم منفی دارد زیرا در شرایط اصلی و طبیعی رودخانه بایستی روزهایی با جریان صفر وجود داشته باشد ولی بعد از احداث سد از این حالت طبیعی خارج شده است اما از سویی دیگر، باعث پیوستگی اکولوژیکی و بهبود شرایط زندگی ارگانیسم‌های آبی رودخانه نیز می‌شود. با توجه به جدول ۵، در همه ماه‌ها و دوره‌ی بعد از احداث سد نسبت به دوره قبل از احداث سد، متوسط جریان کاهشی بوده است. این میزان کاهش یافته، نسبت به ماه‌های مختلف تفاوت دارد که دلیل اصلی آن تنظیمات برنامه‌ریزی شده خروجی جریان از سد، عدم نیاز آب کشاورزی در برخی ماه‌ها و نیز برداشت‌های کشاورزی در ماه‌های کشت می‌باشد. همچنین از عوامل مؤثر دیگر بر نتایج بدست آمده، تغییرات اقلیمی در طول سال‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق می‌باشد. این مفهوم به درستی در شکل ۶ نشان داده شده است. اهداف RVA که مرز حداقل و حداکثر جریان محیط‌زیستی مورد نیاز رودخانه محاسبه شده توسط نرم‌افزار را نشان می‌دهند، بر مبنای $\pm SD$ از میانگین می‌باشند؛ به غیر از مواردی که این اهداف خارج از محدوده حداقل و حداکثر پارامترها در دوره قبل از احداث سد باشند که در این مواقع از چارک‌های ۲۵٪ و ۷۵٪ به عنوان اهداف RVA یاد می‌شود. به جهت درک دقیق‌تر نتایج، در شکل‌های ۵ و ۶ نمودارهای متوسط جریان ماهانه رودخانه در دوره‌های قبل و بعد از احداث سد زاینده‌رود و نمودار توزیع ماهانه جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود با روش RVA در دوره قبل و بعد از احداث سد در مقابل متوسط جریان ماهانه رودخانه ارائه و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

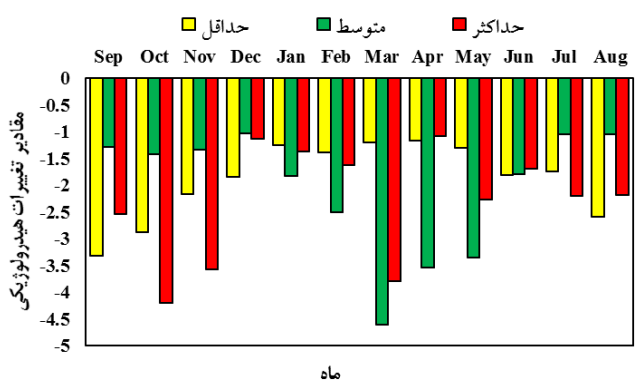
جدول ۵. نتایج تغییرات پارامترهای IHA در روش RVA برای رودخانه زاینده‌رود ($m^3.s^{-1}$)

پارامترهای شاخص	جریان‌های قبل از احداث سد	جریان‌های بعد از احداث سد	اهداف RVA
-----------------	---------------------------	---------------------------	-----------

تغییرات هیدرولوژیکی	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	حداکثر	حداکثر
مهر	۲۱/۹	۵/۲	۴۳/۲	۶/۶	۴	۱۷	۵/۶	۷/۷
آبان	۱۹/۱	۶/۲	۵۲/۱	۶/۶	۴/۴	۱۲/۴	۶/۳	۷/۲
آذر	۱۸/۸	۸	۵۶/۹	۸/۶	۶	۱۵/۹	۷/۸	۱۰/۸
دی	۱۷/۸	۶/۸	۵۳/۴	۹/۷	۶/۶	۴۷/۵	۸/۱	۱۲/۲
بهمن	۱۰/۸	۵/۷	۳۸/۳	۸/۷	۳/۱	۲۸	۷/۸	۱۰/۸
اسفند	۱۰/۳	۷/۶	۳۱/۵	۷/۴	۳	۱۹/۳	۹/۲	۱۲/۹
فروردین	۲۲/۶	۱۱/۴	۱۴۰	۱۸/۹	۲/۵	۳۷	۱۸/۳	۳۸/۲
اردیبهشت	۲۷/۶	۱۸/۸	۱۲۹/۹	۲۳/۷	۵/۳	۱۱۶/۷	۲۳/۹	۵۰/۷
خرداد	۲۸/۲	۱۷/۵	۱۲۴/۷	۲۱/۷	۵/۲	۵۵	۲۱	۲۳/۶
تیر	۲۸/۹	۹/۵	۴۷/۲	۱۵/۹	۵/۳	۳۷/۹	۱۵/۶	۱۷/۶
مرداد	۲۳/۸	۵/۵	۴۴/۶	۱۳/۶	۵/۲	۲۰/۲	۱۱/۹	۱۴/۴
شهریور	۲۳/۶	۵/۲	۴۲/۸	۹/۱	۵	۱۹/۶	۷/۶	۱۱/۸
تعداد روزهای جریان صفر	۰		۶۴	۰	۰	۰	۰	۰

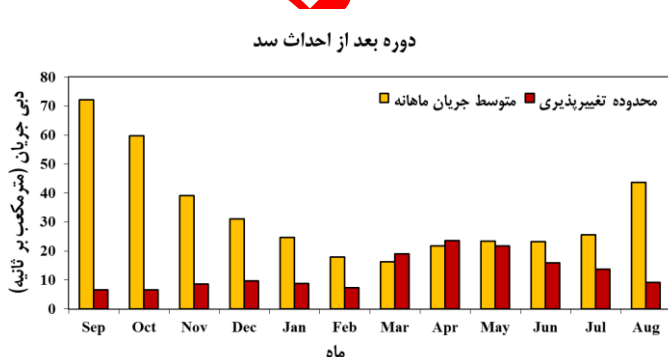


(ب) (B)

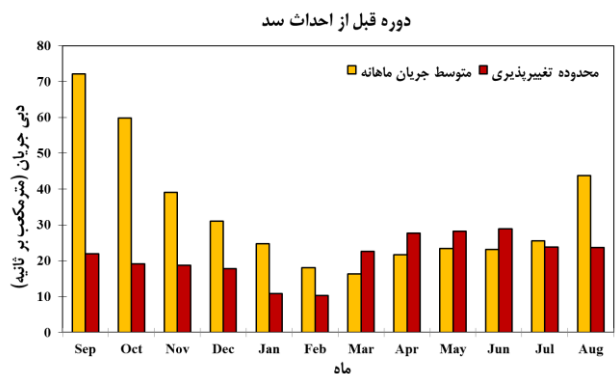


(الف) (A)

شکل ۵. الف) تغییرات هیدرولوژیکی پارامترهای ماهانه IHA در رودخانه زاینده‌رود (ب) متوسط جریان ماهیانه رودخانه در دو دوره قبل و بعد از احداث سد زاینده‌رود



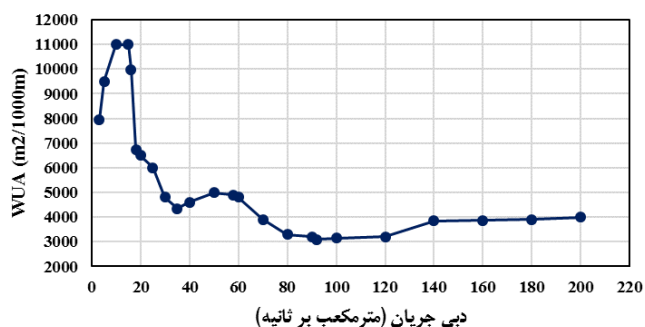
شکل ۶. نمودار توزیع ماهانه جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود با روش RVA در دوره قبل و بعد از احداث سد



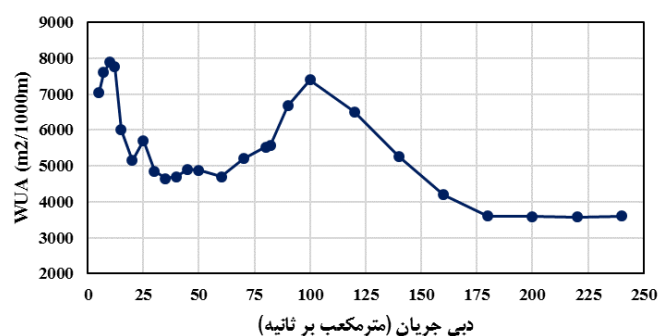
برای انجام شبیه‌سازی زیستگاهی رودخانه زاینده‌رود، از مدل شبیه‌سازی زیستگاه PHABSIM استفاده شد. ابتدا با زیربرنامه STGQ شبیه‌سازی تراز سطح آب انجام شد و در مرحله بعد، با استفاده از زیربرنامه شبیه‌سازی سرعت VELSIM، سرعت در نقاط مختلف مقاطع

انتخابی شبیه‌سازی گردید. برای انجام شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه، مدل زیستگاهی HABTAE در PHABSIM مورد استفاده قرار گرفت. مطلوبیت رودخانه زاینده‌رود در دبی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۷ نمودار دبی - فیزیکی زیستگاه رودخانه زاینده‌رود برای گروه سنی بالغ گونه‌های هدف در ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در اکثر ایستگاه‌ها با افزایش دبی، ابتدا WUA نیز افزایش می‌یابد و از نقطه‌ای به بعد افزایش دبی موجب کاهش WUA و حتی به ثبات رسیدن تدریجی آن می‌شود. جدول ۶ حداکثر زیستگاه در دسترس برای ایستگاه‌های مطالعاتی رودخانه زاینده‌رود در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این نتایج مشخص است که جریان آب بیشتر لزوماً به معنی زیستگاه در دسترس بیشتر نمی‌باشد.

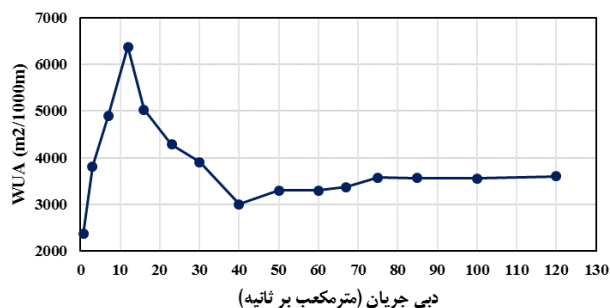
ایستگاه پل زمانخان / گونه سیاه ماهی ریزفلس



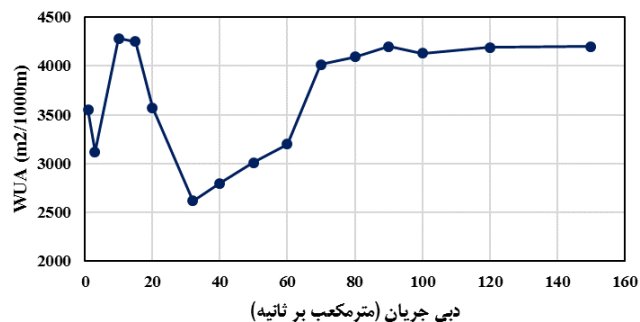
ایستگاه سد تنظیمی / گونه سیاه ماهی ریزفلس



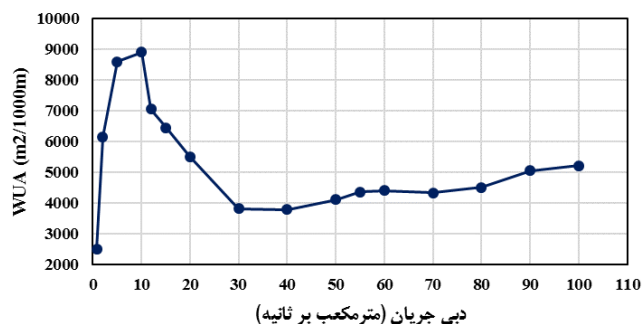
ایستگاه دیزچه / گونه سیاه ماهی ریزفلس



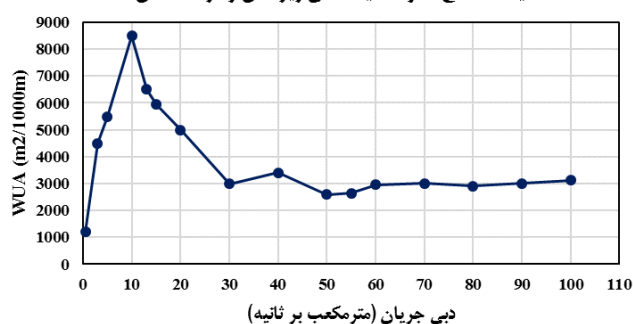
ایستگاه پل کله / گونه سیاه ماهی ریزفلس

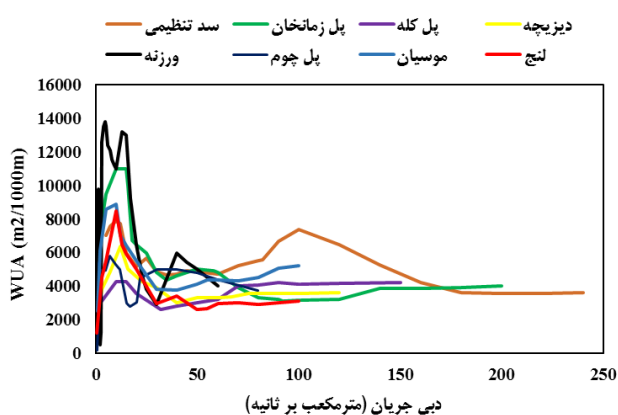
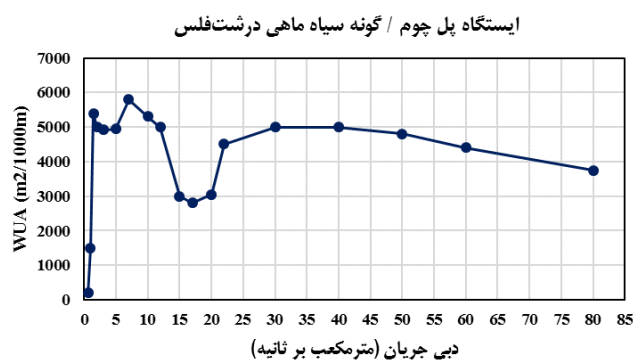
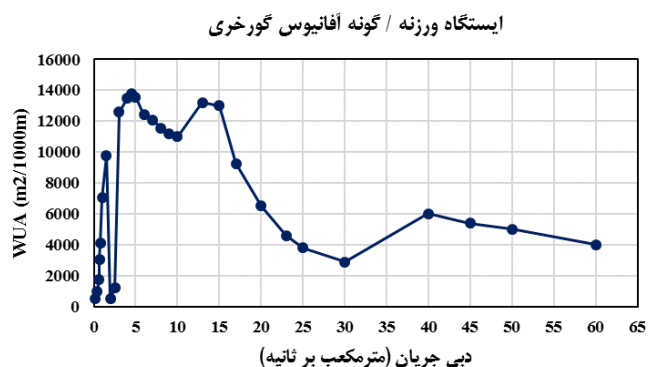


ایستگاه موسیان / گونه سیاه ماهی درشت‌فلس



ایستگاه لنج / گونه سیاه ماهی ریزفلس و درشت‌فلس





محرمانه

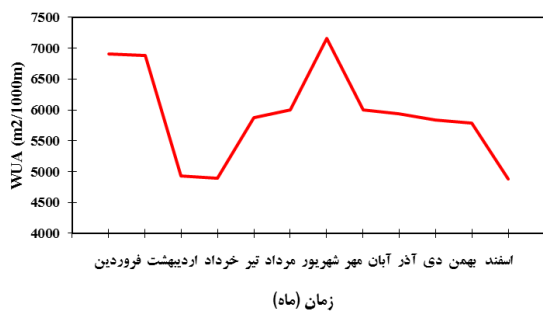
شکل ۷. نمودار دبی - فیزیکی زیستگاه در ایستگاه‌های مطالعاتی رودخانه زاینده‌رود

جدول ۶. حداکثر زیستگاه در دسترس ایستگاه‌های مطالعاتی (m3.s-1)

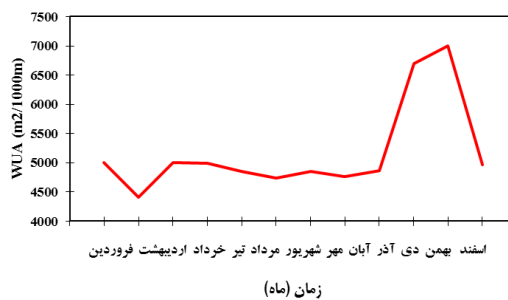
ایستگاه	گونه هدف	دبی (m3.s-1)	حداکثر WUA (m2/m)
سد تنظیمی	سیاه ماهی ریزفلس	۱۰	۷۹۰۴
پل زمانخان	سیاه ماهی ریزفلس	۱۰	۱۱۱۲
پل کله	سیاه ماهی ریزفلس	۱۰	۴۲۸۱
دیزبچه	سیاه ماهی ریزفلس	۱۰	۶۳۷۷
لنج	سیاه ماهی ریزفلس و درشت‌فلس	۱۰	۸۵۰۴
موسیان	سیاه ماهی درشت‌فلس	۱۰	۸۹۲۳
پل چوم	سیاه ماهی درشت‌فلس	۷	۵۸۱۱
ورزنه	آفانیوس گورخری	۴/۵	۱۳۸۴۹

با ترکیب نمودار دبی - فیزیکی زیستگاه و نمودار سری زمانی دبی جریان رودخانه، نمودار سری زمانی زیستگاه رودخانه استخراج و در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی رودخانه زاینده‌رود، حداکثر WUA در بهمن ماه و در برخی ایستگاه‌ها در مهرماه و حتی تیرماه می‌باشد. همچنین در اکثر ایستگاه‌های بالادست رودخانه، در آذرماه الی بهمن ماه مطلوبیت فیزیکی زیستگاه بهبود یافته و رو به افزایش می‌باشد اما در ایستگاه‌های پایین‌دست رودخانه، وضعیت مطلوبیت فیزیکی زیستگاه از فروردین ماه الی تیر ماه می‌باشد. جهت مقایسه بهتر نمودارها، در شکل ۸ به دو حالت مختلف سری زمانی ایستگاه‌های مختلف ارائه شده‌اند. جدول ۷ به طور کامل حداکثر زیستگاه در دسترس برای ماه‌های مختلف در ایستگاه‌های مطالعاتی این تحقیق را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، در این ماه‌ها شرایط زیستگاهی برای گونه‌های هدف مورد بررسی در دوره بالغ به لحاظ مساحت زیستگاه‌های مناسب در دسترس در بهترین وضعیت ممکن قرار دارد، بنابراین از لحاظ تخم‌ریزی نیز شرایط زیستی مناسبی در این فصول برای این گروه سنی فراهم می‌باشد.

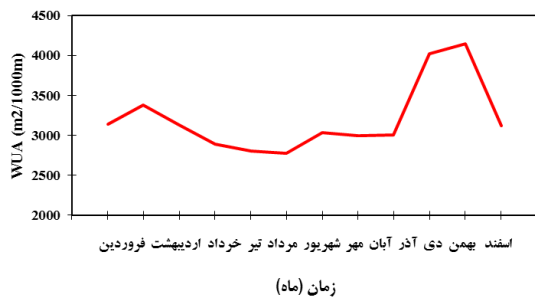
سری زمانی ایستگاه سد تنظیمی



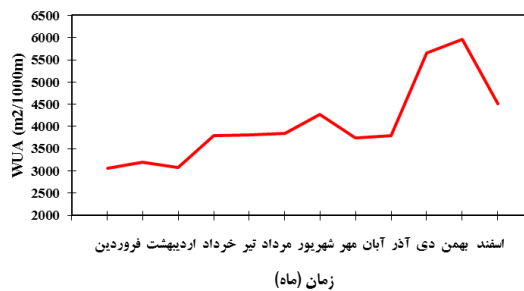
سری زمانی ایستگاه پل زمانخان



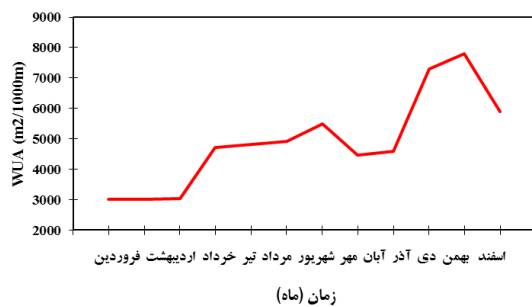
سری زمانی ایستگاه پل کله



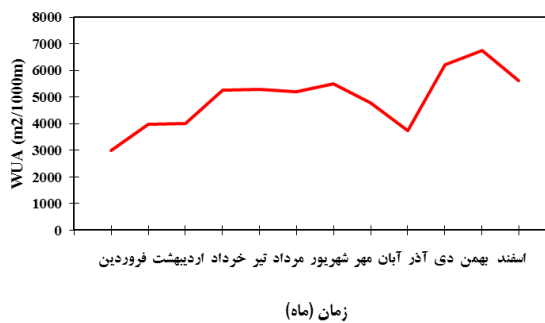
سری زمانی ایستگاه دیزپچه



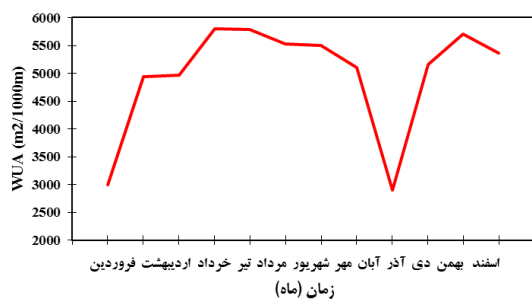
سری زمانی ایستگاه لنج



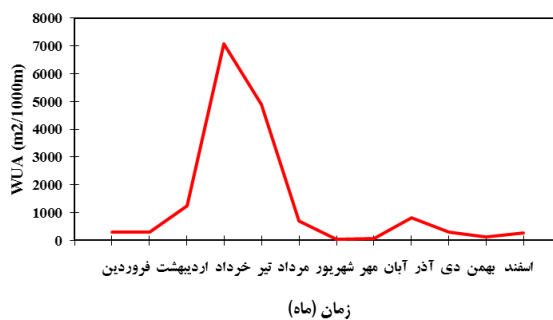
سری زمانی ایستگاه موسیان

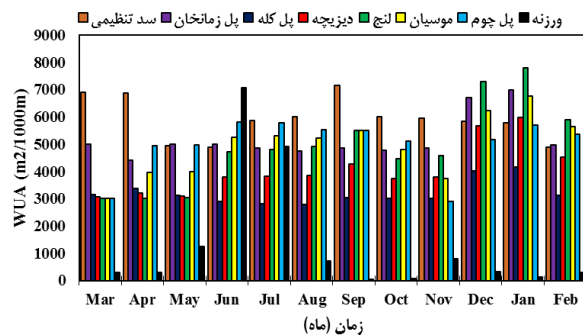
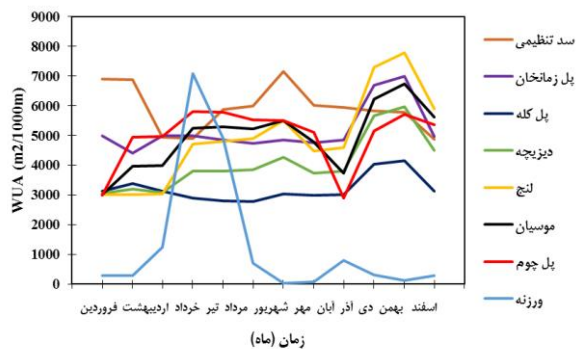


سری زمانی ایستگاه پل چوم



سری زمانی ایستگاه ورزش





شکل ۸. مقایسه سری زمانی ایستگاه‌های مطالعاتی رودخانه زاینده‌رود

جدول ۷. حداکثر زیستگاه در دسترس در ماه‌های مختلف ایستگاه‌های مطالعاتی

ایستگاه	ماه	حداکثر WUA (m2/m)
سد تنظیمی	مهر	۷۱۰۰
پل زمانخان	بهمن	۶۹۰۰
پل کله	بهمن	۴۱۰۰
دیزبچه	بهمن	۵۹۰۰
لنج	بهمن	۷۷۰۰
موسیان	بهمن	۶۷۰۰
پل چوم	تیر	۵۸۰۰
ورزنه	تیر	۷۰۰۰

جهت استخراج محدوده جریان محیط‌زیستی مناسب رودخانه زاینده‌رود برای گونه هدف، نیاز است که اطلاعات مقاطع در چند بازه دبی وارد شود. با توجه به آمار دبی سالانه ایستگاه‌های مطالعاتی رودخانه زاینده‌رود، میانگین دبی سالانه رودخانه زاینده‌رود برابر $17/998$ مترمکعب بر ثانیه، میانگین حداکثر دبی سالانه برابر $43/495$ مترمکعب بر ثانیه و میانگین حداقل دبی سالانه برابر $4/320$ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. با توجه به این اطلاعات، از دبی ۴ تا ۴۵ مترمکعب بر ثانیه، دبی‌هایی جهت شبیه‌سازی در نظر گرفته شد. به طور کلی، هدف این بود که در بازه در نظر گرفته شده تمامی دبی‌های مهم رودخانه را پوشش دهد. دبی‌های در نظر گرفته شده عبارتند از: $7/63$ ، $16/63$ ، $27/40$ و $40/99$. برای شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه، منحنی‌های مطلوبیت گونه‌های هدف وارد PHABSIM شد. برنامه هر مقدار مطلوبیت بزرگتر از صفر را به عنوان ضریب موثر در محاسبه WUA در نظر می‌گیرد. بنابراین همواره این احتمال وجود دارد که یک زیستگاه کم کیفیت با مساحتی زیاد وارد محاسبات WUA شود، در صورتی که ممکن است شرایط زندگی ماهیان در آن ناحیه بسیار دشوار باشد. به همین منظور در ماژول شبیه‌ساز زیستگاه در PHABSIM گزینه‌ای در نظر گرفته شد که به وسیله آن می‌توان مطلوبیت را محدود کرد تا مطلوبیت‌های کم کیفیت در WUA در نظر گرفته نشوند. برای بدست آوردن حداکثر دبی قابل برداشت از رودخانه برای حفظ اکوسیستم در همان حالت اولیه و به نحوی که آسیبی متوجه آن نشود، قانون کاملاً مشخصی وجود ندارد ولی بسیاری از سازمان‌های مسئول بخش آب در کشورهای استرالیا و آمریکا به این نتیجه رسیده‌اند که کاهش جریان تا حدی که $10 - 15$ درصد از فضای در اختیار موجودات زنده از دست برود، معادل حد نهایی قابل تحمل برای اکوسیستم می‌باشد (Thompson, 2015 & Keenan et al., 2012). WUA برای دبی متوسط سالانه هر رودخانه، معادل WUA بهینه آن می‌باشد. با توجه به دبی جریان ماهانه، دبی معادل ۱۵ درصد کاهش زیستگاه (WUA) برای ماه‌های سال محاسبه می‌شود که این نتایج در جدول ۸ ارائه شده است. جدول ارائه شده بیانگر رژیم جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود می‌باشد که در مقایسه با مقادیر میانگین جریان ماهانه بالاتر می‌باشد. همچنین میانگین جریان محیط‌زیستی پیشنهادی این روش در مقایسه با میانگین جریان سالانه رودخانه بیشتر است و بدیهی است که این مقدار تخصیص از جریان رودخانه به رژیم جریان محیط‌زیستی در تمامی ماه‌های سال به شکل پیوسته نمی‌تواند عملی باشد و مشکلات متعددی را برای دیگر بخش‌های منتفع از جریان رودخانه فراهم می‌کند. در نتیجه روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه برای رودخانه زاینده‌رود در خصوص برآورد جریان محیط‌زیستی به غیر از چند ماه، عملکرد نسبتاً ضعیفی دارد.

جدول ۸. جریان محیط‌زیستی کل رودخانه زاینده‌رود با روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه

ماه	میانگین جریان ماهانه (m ³ /s)	WUA (m ² /m)	۱۵٪ کاهش WUA (m ² /m)	دبی معادل ۱۵٪ کاهش WUA (m ³ /s)
-----	--	-------------------------	----------------------------------	--

فروردین	۴۰/۹	۳۸۱۰۵	۳۳۳۸۹	۳۷/۳
اردیبهشت	۳۳/۴	۳۳۶۵۵	۲۸۶۰۷	۳۸/۶
خرداد	۱۹/۵	۴۷۵۳۰	۴۰۴۰۱	۲۲/۴
تیر	۱۴/۳	۵۸۳۰۵	۴۹۵۵۹	۱۷/۶
مرداد	۱۱/۷	۵۹۳۲۰	۵۰۳۷۸	۱۵/۲
شهریور	۸/۴	۵۶۹۷۵	۴۸۴۲۹	۶/۵
مهر	۶/۸	۵۴۱۲۷	۴۶۰۰۸	۵/۲
آبان	۸/۹	۵۷۵۵۷	۴۸۹۲۳	۶/۱
آذر	۱۴/۲	۵۸۸۹۰	۵۰۰۵۷	۱۸/۵
دی	۱۱/۶	۵۸۷۶۷	۴۹۹۵۲	۱۹/۱
بهمن	۱۳/۳	۵۹۹۱۰	۵۰۹۲۴	۱۶/۹
اسفند	۲۶/۹	۳۷۹۸۵	۳۳۲۸۷	۳۷/۷
میانگین	۱۷/۵	۵۱۷۵۲	۴۳۹۸۹	۲۰/۱

در جدول ۹، توزیع ماهانه جریان محیط‌زیستی روش‌های انجام شده در این تحقیق مقایسه شدند. طبق نتایج، جریان محیط‌زیستی برآورد شده به روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه ۶۰٪، دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه ۴۹٪ و تنانت ۲۶٪ میانگین جریان سالانه رودخانه محاسبه شده است. روش مورد استفاده وزارت نیرو روش تنانت می‌باشد که پرواضح است همه‌ی روش‌های استفاده شده در این تحقیق متوسط و دامنه جریان بیشتری نسبت به آن پیشنهاد می‌دهند پس قطعاً روش تنانت جهت تأمین جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود کافی نیست و در این خصوص باید در سطح مدیریتی و اجرایی بازنگری صورت گیرد. روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه بیشترین درصد تخصیص جریان محیط‌زیستی را برای رودخانه زاینده‌رود پیشنهاد داده است که از نظر اجرایی و با توجه به سایر ذینفعان و مصرف‌کنندگان رودخانه به سختی می‌توان از آن استفاده نمود و احتمالاً موجب منازعات و اختلافات آبی خواهد شد و اجرای آن نیازمند برنامه‌ریزی و سطح مدیریتی قدرتمند و عادلانه خواهد بود اما با این حال نمی‌توان اعتبار روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه را به دلیل ارجحیت قرار دادن گونه شاخص رودخانه از نظر محیط‌زیستی را نادیده گرفت. روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه درصد نسبتاً معقولانه‌تر و قابل‌اجراتری نسبت به سایر روش‌ها پیشنهاد داده است که باید حتماً مدنظر مدیران و کارشناسان مربوطه در امر تخصیص حبابه محیط‌زیستی قرار گیرد و حتی با توجه به جدول ۹، برای هر ماه جریان محیط‌زیستی مجاز و مناسب برآورده شده را جهت تخصیص در نظر گرفته و جریان را با توجه به این برنامه کنترل کنند. البته روش محدوده تغییرپذیری برای فروردین الی تیرماه مقادیر بسیار بالایی در نظر گرفته است که بهتر است برای این ماه‌ها از مقادیر برآورد شده روش‌های دیگر استفاده نمود. به طور کلی روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه در ۴ ماه از سال و روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه در ۸ ماه از سال بیشترین درصد جریان محیط‌زیستی را به خود اختصاص داده‌اند که بیانگر تأثیر گونه زیستی در برآورد جریان محیط‌زیستی رودخانه می‌باشد.

جدول ۹. مقایسه توزیع ماهانه جریان محیط‌زیستی روش‌های معرفی شده در این تحقیق برای کل رودخانه زاینده‌رود ($m^3.s^{-1}$)

ماه	MMF	تنانت		دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه		شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه	
		%	Q	%	Q	%	Q
مهر	۷۲	۴/۶	۳/۳	۷/۸	۵/۷	۳۷/۳	۵۱/۸
آبان	۵۹/۸	۵/۵	۳/۳	۱۰/۵	۶/۳	۳۸/۶	۶۴/۵
آذر	۳۹/۱	۸/۵	۳/۳	۱۹/۹	۷/۸	۲۲/۴	۵۷/۳
دی	۳۰/۹	۱۰/۷	۳/۳	۲۶/۲	۸/۱	۱۷/۶	۵۶/۸
بهمن	۲۴/۷	۱۳/۴	۳/۳	۳۱/۵	۷/۸	۱۵/۲	۶۱/۵
اسفند	۱۸	۱۸/۴	۳/۳	۵۱/۱	۹/۲	۶/۵	۳۵/۹
فروردین	۱۶/۲	۶۱/۳	۹/۹	۱۱۲/۴	۱۸/۳	۵/۲	۳۲/۳
اردیبهشت	۲۱/۷	۴۵/۹	۹/۹	۲۳/۹	۱۱۰/۲	۶/۱	۲۸/۲
خرداد	۲۳/۴	۴۲/۶	۹/۹	۲۱	۸۹/۸	۱۸/۵	۷۸/۹
تیر	۲۳/۲	۴۲/۹	۹/۹	۱۵/۶	۶۷/۴	۱۹/۱	۸۲/۵

مرداد	۲۵/۵	۹/۹	۳۹	۱۱/۹	۴۶/۷	۱۶/۹	۶۶
شهریور	۴۳/۷	۹/۹	۲۲/۸	۷/۶	۱۷/۴	۳۷/۷	۸۶/۲
میانگین	۳۳/۲	۶/۶	۲۶/۳	۱۱/۹	۴۹/۲	۲۰/۱	۶۰/۵

بحث

روش تنانت به عنوان یکی از روش‌های کلاسیک و ساده برآورد جریان زیست‌محیطی، تنها بر پایه درصدی از جریان متوسط سالانه (مانند ۱۰٪ یا ۳۰٪) عمل می‌کند. در این تحقیق مشخص شد که نتایج این روش اغلب کلی و غیرسفارشی بوده و برای رودخانه زاینده‌رود که دارای نوسانات شدید هیدرولوژیکی، وضعیت تنش‌آبی مزمن و بستر ناهمگون است، کارایی قابل قبولی ندارد. همچنین مقادیر پیشنهادی توسط تنانت یا بیش از حد محافظه‌کارانه هستند یا در فصول خشک، کاملاً غیرقابل اجرا از نظر مدیریت منابع آب می‌باشند. این روش وابسته به شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی ثابت است و تغییرپذیری بین‌سالانه را لحاظ نمی‌کند. بر اساس مقایسه کمی، مشاهده شد که مقادیر برآورد شده توسط روش تنانت در برخی ماه‌ها با نیازهای زیستی ناسازگار بودند و حتی در برخی موارد با جریان واقعی موجود فاصله زیادی داشتند.

روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه نیز به عنوان یک روش آماری/هیدرولوژیکی پیشرفته، بر اساس تحلیل سری زمانی داده‌های جریان و تعیین محدوده‌های طبیعی تغییرات شاخص‌های رژیم جریان عمل می‌کند. مزایای اصلی این روش عبارتند از: اتکای کم به داده‌های اکولوژیک و میدانی، قابلیت کاربرد در رودخانه‌های با اطلاعات اکولوژیکی ناقص و امکان تحلیل تغییرات رژیم طبیعی جریان در گذر زمان. در این تحقیق، روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه توانست الگوهای تغییر جریان و سطح آسیب به رژیم طبیعی رودخانه زاینده‌رود را با دقت بالا تحلیل کند و مقادیر نسبتاً منطقی برای جریان زیست‌محیطی در ماه‌های مختلف ارائه دهد. با این حال، روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه فاقد ارزیابی مستقیم از پاسخ زیستی گونه‌ها به جریان است و به‌تنهایی نمی‌تواند جایگزین روش‌های اکولوژیکی دقیق‌تر مانند شبیه‌سازی زیستگاه شود.

روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه، که در این تحقیق با استفاده از داده‌های مورفولوژیک، هیدرولیکی و زیستی اجرا شد، به دلیل در نظر گرفتن نیازهای اکولوژیک واقعی گونه‌های هدف (مانند ماهیان بومی) و همچنین تحلیل پاسخ زیستگاه به جریان‌های مختلف، توانست ارزش زیستی هر سناریوی جریان را با دقت بالا تعیین کند. مهم‌ترین مزایای این روش عبارتند از: بررسی دقیق رابطه بین هیدرودینامیک رودخانه و زیستگاه گونه‌های آبرزی، استفاده از داده‌های محلی و بوم‌محور برای بومی‌سازی مدل و توانایی شبیه‌سازی چندین سناریوی جریان و تحلیل تغییرات سطح، عمق و سرعت. با این حال، این روش دارای برخی چالش‌ها نیز هست. اجرای مدل نیازمند داده‌های میدانی با دقت بالا در چند بازه زمانی و مکانی، صرف زمان و منابع زیاد برای کالیبراسیون مدل و تجهیزاتی اندازه‌گیری تخصصی می‌باشد. با این وجود، خروجی حاصل از این روش از اعتبار زیست‌محیطی بالایی برخوردار است و برای تصمیم‌گیری‌های دقیق مدیریتی بسیار ارزشمند است.

بر اساس مطالعات نادری و همکاران (۱۳۹۷) برای رودخانه قره‌سو، صدیق‌کیا و همکاران (۱۳۹۴) برای رودخانه دلیچای و Shokoochi & Hong (2011) برای رودخانه کاظم‌رود ثابت شد که استفاده از روش هیدرولوژیکی تنانت با توجه به اینکه با دخالت کمترین پارامترهای موثر به تخصیص جریان اقدام می‌کند، برآورد نامناسبی از جریان محیط‌زیستی برای رودخانه‌ها انجام می‌دهد که در بلندمدت منجر به تخریب و نابودی محیط زیست و مرگ اکولوژیکی رودخانه می‌شود. نتایج کار محققان یاد شده در مطالعه موردی حاضر نیز تأیید می‌گردد. همچنین در مطالعه مرید و همکاران (۱۳۹۵) برای رودخانه کردان، دایی‌چینی و همکاران (۱۴۰۰) برای رودخانه گرگان‌رود و خسروی و همکاران (۱۴۰۰) برای رودخانه خرمارود مشخص شد که روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه یک دامنه مناسب و منطقی برای جریان محیط‌زیستی رودخانه‌ها پیشنهاد می‌دهد و نسبت به سایر روش‌های هیدرولوژیکی ارجحیت دارد که این موضوع در تحقیق حاضر نیز تأیید شد. همچنین با توجه به مطالعات نادری و همکاران (۱۳۹۷)، روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه به دلیل در اولویت قرار دادن موجود زنده یا گونه شاخص، مقادیر بیشتر و مطمئن‌تری نسبت به سایر روش‌ها ارائه کرده است و اعتبار این روش در تحقیق حاضر نیز مورد تأیید می‌باشد.

از نقاط قوت این تحقیق می‌توان به دقت بالای مدل‌های استفاده شده، رویکرد تطبیقی، پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی و کاربرپذیری اکولوژیک اشاره کرد. استفاده از مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه باعث شد برخلاف روش‌های کلی و تجربی، نیازهای واقعی گونه‌های آبی در شرایط خاص زاینده‌رود به‌درستی در نظر گرفته شود. مقایسه روش‌های مذکور دیدگاهی جامع از عملکرد روش‌ها در شرایط محلی ارائه داد و خروجی روش‌ها قابلیت اجرا و استفاده در سیاست‌گذاری منابع آب را دارند. لازم به ذکر است که برآورد جریان‌ها در این تحقیق بر اساس داده‌های میدانی و اکولوژیک انجام شد که در اکثر مطالعات مشابه در ایران نادیده گرفته می‌شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به ضروری بودن تخمین جریان محیط‌زیستی مطلوب رودخانه، کاربرد روش‌های تنانت، دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه و شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه در سه بازه‌ی مطالعاتی از رودخانه زاینده‌رود بررسی گردید. نتایج حاصله نشان داد که مقادیر پیشنهادی روش تنانت برای وضعیت قابل قبول محیط‌زیستی منطقه، به ترتیب برای نیمه اول سال (فصل کم آب) و نیمه دوم سال (فصل پرآبی)، ۹/۹۶ و ۳/۳۲ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. با اینکه نتایج روش تنانت نشان‌دهنده مطلوبیت وضعیت جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود و عدم کمبود آن می‌باشد اما مقادیر پیشنهادی نسبت به متوسط جریان ماهیانه بسیار کمتر است و به احتمال زیاد برای تامین نیاز محیط‌زیستی رودخانه کافی نیست. از طرفی دیگر، در نیمه اول سال، به دلیل کمبود آب و گرمی هوا، درصد تخصیص جریان محیط‌زیستی نیز باید بیشتر باشد و برای ذینفعان رودخانه برنامه‌ای همه‌جانبه و عادلانه تدوین شود تا دخالتی در تامین جریان محیط‌زیستی نیز صورت نگیرد. ارزیابی روش دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه نشان داد که احداث سد زاینده‌رود تأثیر منفی بر محدوده پایین‌دست رودخانه (مخصوصاً در ماه‌های گرم سال) داشته است و باعث کاهش جریان و پارامترهای RVA شده است. این کاهش جریان نسبت به ماه‌های مختلف متفاوت است که دلیل آن تنظیمات برنامه‌ریزی شده جریان خروجی از سد، برداشت‌های کشاورزی در ماه‌های کشت و عدم نیاز آب کشاورزی در برخی ماه‌ها می‌باشد. تغییرات اقلیمی نیز در طول سال‌های آماری مورد مطالعه تحقیق حاضر می‌تواند بر نتایج موثر باشد. از بررسی مقادیر حداقل اهداف RVA و میانگین آن مشخص است که جریان محیط‌زیستی برآورد شده نسبت به روش هیدرولوژیکی تنانت مناسب‌تر است و می‌توان از آن استفاده موثری کرد چون با توجه به ضرورت تخصیص جریان به بخش‌های دیگر نظیر کشاورزی، شرب، صنعت و ... از نظر مدیریتی قابل اجرا خواهد بود. نتایج روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها با افزایش دبی، ابتدا WUA نیز افزایش می‌یابد و از نقطه‌ای به بعد افزایش دبی موجب کاهش WUA و حتی به ثبات رسیدن تدریجی آن می‌شود و جریان آب بیشتر لزوماً به معنی زیستگاه در دسترس بیشتر نمی‌باشد. به طور کلی، رژیم جریان محیط‌زیستی رودخانه زاینده‌رود به روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه، در مقایسه با مقادیر میانگین جریان ماهانه بالاتر می‌باشد و بدیهی است که این مقدار تخصیص از جریان رودخانه به رژیم جریان محیط‌زیستی در تمامی ماه‌های سال به شکل پیوسته نمی‌تواند عملی باشد و مشکلات متعددی را برای دیگر بخش‌های منتفع از جریان رودخانه فراهم می‌کند. در نتیجه روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه برای رودخانه زاینده‌رود در خصوص برآورد جریان محیط‌زیستی به غیر از چند ماه، عملکرد نسبتاً ضعیفی دارد. اما می‌توان در ماه‌های فروردین تا تیر ماه و آذرماه و اسفند ماه جهت تخصیص جریان محیط‌زیستی رودخانه از آن بهره گرفت. طبق نتایج، روش شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه مقادیر متفاوتی نسبت به روش‌های تنانت و دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه ارائه داد که این نشان می‌دهد چنانچه اولویت برنامه‌ریزی منابع آب با حفظ زیستگاه و توسعه پایدار باشد و برنامه‌ریزی رهاسازی آب در رودخانه با روش‌های هیدرولوژیکی نظیر تنانت در نظر گرفته شود، به دلیل عدم هم‌خوانی با اقلیم و رودخانه‌های ایران، شرایط مناسب برای گونه‌های شاخص رودخانه مهیا نخواهد شد و در پی آن تخریب‌ریزی در رودخانه انجام نمی‌شود و برای جلوگیری از وارد شدن خسارت‌های جبران‌ناپذیر به اکوسیستم‌های آبی، باید نگرش مدیران به سمت روش‌های زیستگاه‌محور تغییر یابد.

در نتیجه با توجه به مقایسه روش‌های انجام شده در این تحقیق، جریان محیط‌زیستی برآورد شده به ترتیب در روش شبیه‌سازی

فیزیکی زیستگاه ۶۰٪، دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه ۴۹٪ و تنانت ۲۶٪ میانگین جریان سالانه رودخانه می‌باشد. روش‌های دامنه تغییرات طبیعی جریان رودخانه و شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه هر دو درصدهای نسبتاً معقولانه‌تر و قابل اجراتری نسبت به روش تنانت پیشنهاد داده‌اند که باید حتماً مدنظر مدیران و کارشناسان مربوطه در امر تخصیص حقابه محیط‌زیستی قرار گیرد و می‌توان گفت که این روش‌ها قادر به حفاظت از رژیم طبیعی جریان برای نگهداری از ارزش‌های اکولوژیکی رودخانه زاینده‌رود و استقرار شرایط مطلوب برای زیستن گونه‌های آبرزی می‌باشند. بنابراین، روش‌های مذکور با توجه به مزایا و معایبی که دارند و متناسب با شرایط هر پروژه، می‌توانند در امور مدیریتی و برنامه‌های اجرایی مهندسان و متخصصان اکوهیدرولیکی استفاده گردند و به برآورد یک محدوده جریان محیط‌زیستی مطلوب برای رودخانه زاینده‌رود و مدنظر قرار دادن آن در طرح‌ها و پروژه‌های ساماندهی و احیای رودخانه کمک کنند. جهت توسعه و مطالعات تکمیلی این مطالعه، با در نظر گرفتن شرایط بحرانی رودخانه زاینده‌رود پیشنهاد می‌شود که علاوه بر تکمیل اطلاعات جامع اکولوژیکی رودخانه زاینده‌رود، از دیگر روش‌های موجود و توسعه‌یافته جهت ارزیابی جریان محیط‌زیستی برای رودخانه زاینده‌رود با تاکید بر ارزش زیستگاهی آن استفاده گردد و مقایسه آن‌ها با روش‌های انجام شده در این تحقیق الزام‌آور است زیرا پیدا کردن مناسب‌ترین و بهینه‌ترین روش برآورد جریان محیط‌زیستی، از میزان خسارات وارده و اثرات منفی بر زیستگاه‌های رودخانه‌ای و عواقب جبران‌ناپذیر آن برای ذینفعان رودخانه می‌کاهد. همچنین ایستگاه‌های هیدرومتری و بازه‌های دیگر رودخانه زاینده‌رود در صورت امکان مورد ارزیابی محیط‌زیستی قرار گیرند. ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان زیست‌محیطی، در نظر گرفتن چند گونه‌ای زیستی به جای یک گونه هدف، بررسی مشارکت ذی‌نفعان در تعیین جریان زیست‌محیطی و اعتبارسنجی میدانی نتایج مدل شبیه‌سازی زیستگاه از دیگر پیشنهادات این تحقیق جهت توسعه آن است.

منابع

- احمدی تودشکی، مهناز. (۱۳۹۴). محاسبه حداقل جریان محیط‌زیستی و برآورد خسارت اقتصادی رودخانه (مطالعه موردی: حوزه زاینده‌رود). پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان. کرمان.
- اسدی، هادی، ستاری، مسعود، و ایگدری، سهیل. (۱۳۹۲). بررسی عوامل تعیین‌کننده در انتخاب‌پذیری و ترجیح زیستگاه سیاه‌ماهی در رودخانه سیاهرود (از سرشاخه‌های حوزه رودخانه سفیدرود). مجله علمی سیالات ایران. ۳۳(۳)، ۱-۱۰.
- ایوب‌زاده، سید علی، صدیق کیا، مهدی، و حاجی‌اسماعیلی، محبوبه. (۱۳۹۷). مقدمه‌ای بر اکوهیدرولیک و شبیه‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای. پژوهشکده مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس.
- حاجی‌اسماعیلی، محبوبه. (۱۳۹۳). تأثیر پارامترهای هیدرولیکی جریان بر ماهی قزل‌آلای رنگین‌کمان در رودخانه با استفاده از مدل شبیه‌سازی زیستگاه PHABSIM. پایان‌نامه مقطع کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب گرایش سازه‌های آبی. گروه سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی. دانشگاه تربیت مدرس. تهران.
- خسروی، غلامرضا، سعدالدین، امین، اونی، مجید، بهره‌مند، عبدالرضا، و مصطفوی، حسین. (۱۳۹۸). طبقه‌بندی و تعیین تغییرات رژیم جریان آب رودخانه‌ای با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی IHA (مطالعه موردی: رودخانه خرمارود - استان گلستان). مجله اکوهیدرولوژی. ۶(۳)، ۶۷۱-۶۵۱.
- دایی‌چینی، فاطمه، وفاه‌خواه، مهدی، موسوی، وحید، و ذبیحی‌سیلابی، مصطفی. (۱۴۰۰). برآورد شاخص‌های جریان محیط زیستی در پایین‌دست سدهای گلستان و وشمگیر. مجله اکوهیدرولوژی. ۸(۳)، ۶۷۷-۶۹۰.
- شیرانی، کورش، چیت‌ساز، وحید، مدرس، رضا. (۱۳۸۵). توسعه پایگاه اطلاعات رودخانه در حوزه زاینده‌رود با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری بهینه از منابع آب حوزه‌های کارون و زاینده‌رود. شهرکرد.
- صدیق کیا، مهدی، ایوب‌زاده، سید علی، حاجی‌اسماعیلی، محبوبه. (۱۳۹۴). بررسی الزامات برآورد جریان محیط‌زیستی در رودخانه‌ها با روش‌های هیدرواکولوژیکی (مطالعه موردی: رودخانه دلیچای واقع در استان تهران). مجله اکوهیدرولوژی. ۲(۳).
- طاهری گرجی، شمیم، مریدی، علی، مجدزاده طباطبایی، سید محمدرضا. (۱۴۰۱). نقش طبیعی‌سازی جریان در برآورد حقابه محیط‌زیستی به روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی. مجله مدیریت آب و آبیاری دانشگاه تهران. ۱۲(۳)، ۶۱۵-۶۲۸.

علیزاده، سهیلا. (۱۳۹۶). ارزیابی جریان محیط زیستی رودخانه آجی چای با روش های اکو-هیدرولوژیکی. *پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب*. گروه مهندسی آب. دانشکده کشاورزی. دانشگاه ارومیه.

مرید، ریحانه، دلاور، مجید و ایگدری، سهیل. (۱۳۹۵). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان محیط زیستی رودخانه با استفاده از شاخص های هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: رودخانه کردان). *محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران*. ۶۹(۴)، ۱۱۰۹-۱۱۲۷.

مصطفوی، سمیه. (۱۳۹۲). ارزیابی جریان محیط زیستی رودخانه با روش های اکو-هیدرولوژیکی (مطالعه موردی رودخانه باراندوزچای). *پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب*. گروه مهندسی آب. دانشکده کشاورزی. دانشگاه ارومیه.

مظلومی، زهرا، نعمتی ورنوسفاندرا، محمد. و مدرس، رضا. (۱۴۰۱). ارزیابی جریان زیستی رودخانه بشار به روش هیدرولوژیک تنانت بر اساس نیازهای زیستی ماهیان شاخص. *مجله علمی پژوهشی اکولوژی کاربردی*. ۱۱(۳)، ۱-۱۹.

نادری، محمد حسن، ذاکری نیا، مهدی. و سالاری جزی، میثم. (۱۳۹۷). به کارگیری مدل PHABSIM در تبیین رژیم اکولوژیکی رودخانه به منظور برآورد جریان محیط زیستی و مقایسه با روش های هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: رودخانه قره سو). *مجله اکوهیدرولوژی*. ۵(۳)، ۹۴۱-۹۵۵.

References

- Ahmadi Toudeshki, Mahnaz. (2016). Computation of river minimum flow and estimation of economic losses (Case study: Zayandeh Rood river basin). *The thesis for the master of science degree in Water Resources Engineering*. Faculty of Agriculture. Shahid Bahonar University of Kerman. 81p. (In Persian)
- Alizadeh, Soheila. (2017). Evaluation of environmental flows in the Ajichay river using eco-hydrological methods. *The thesis for the master of science degree in Hydraulic Structures*. Department of Water Engineering. Faculty of Agriculture. University of Urmia. 154p. (In Persian)
- Asadi, Hadi., Sattari, Masoud. & Eagderi, Soheil. (2014). The determinant factors underlying habitat selectivity and preference for Black fish *Capoeta capoeta gracilis* in Siyahrud River (a tributary of Sefidrud River basin). *Iranian Fisheries Science Research Institute*. 23 (3), 1-9 (In Persian)
- Ayyoubzadeh, Seyed. Ali., Sedighkia, Mehdi., & Hajiesmaeili, Mahboobeh. (2018). *Ecohydraulics and simulation of river habitats*. Water engineering research institute Tarbiat Modares University. 288p. (In Persian)
- Beecher, Hal A., Caldwell, Brad A., DeMond, Suzanne. Brett, Seiler, Dave, & Boessow, Steven N. (2010). An empirical assessment of PHABSIM using long-term monitoring of coho salmon smolt production in Bingham Creek, Washington. *North American Journal of Fisheries Management*. 30 (6), 1529-1543.
- Bovee, K. D. (1997). Data Collection Procedures for the Physical Habitat Simulation System, *U.S. Geological Survey: Midocontinent Ecological Science Center*.
- Conder, Allen L. & Annear, Thomas C. (1987). Test of Weighted Usable Area Estimates Derived from a PHABSIM Model for Instream Flow Studies on Trout Streams. *North American Journal of Fisheries Management*. 7(3), 339-350.
- Daiechini, Fatemeh., Vafakhah, Mehdi., Moosavi, Vahid. & Zabihi Silabi, Mostafa. (2021). Estimation of Environmental Flow Indicators in the Downstream of Golestan and Voshmgir Dams. *Ecohydrology*, 8(3), 677-690. (In Persian)
- Gard, Mark. (2009). Comparison of spawning habitat predictions of PHABSIM and River2D models. *International Journal of River Basin Management*. 7(1), 55-71.
- Hajiesmaeili, Mahboobeh. (2014). Effect of flow hydraulic parameters on Rainbow Trout in the river using Physical Habitat Simulation Model (PHABSIM). *The thesis for the master of science degree in Department of Water Structures Engineering*. Faculty of Agriculture. Tarbiat Modares University. Tehran. (In Persian)
- Kang, Hyeon-Seok. & Lee, Min-Jung. (2024). Assessing and Optimizing ecological flow rates for the habitat of Zacco platypus in the Tan River. *Water*, 16(18), 2583.
- Keenan, Laura., Thompson, Mike. and Mzila, Doug. (2012). Freshwater allocation and Availability in the Wellington Region: State and Trends. *Wellington: NIWA*.
- Khosravi, Gholamreza., Sadodin, Amin., Ownegh, Majid., Bahremand, Abdolreza., & Mostafavi, Hossein. (2019). Classification and identification of changes in river flow regime using the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) Case study: (The Khormarud River- Tilabad Watershed- Golestan Province). *Ecohydrology*. 6(3), 651-671. (In Persian)
- Kim Young. Jun., Wu Dian., Lee Joo. Heon., Kim Jong. Suk., Park Seo. Yeon. (2024). Evaluation and securing of ecological flow by linking fish growth scenarios and basin water budget analysis. *Ecological Indicators*, 158, 111468.
- Mazloomi, Zahra., Nemat Varnosfaderany, Mohammad. & Modarres, Reza. (2022). Evaluating the Environmental Flow of Beshar River, Using Tennant's Hydrological Method Based on the Biological Requirements of Indicator Fishes. *Iranian Journal of Applied Ecology*. 11(3), 1-19. (In Persian)

- Moir, Hamish., Gibbins, C. N., Soulsby, C. & Youngson, Alan. F. (2005). PHABSIM Modelling of Atlantic Salmon Spawning Habitat in an Upland Stream: Testing the Influence of Habitat Suitability Indices on Model Output. *River Research and Applications*. 21(9), 1021-1034.
- Morid, Reihaneh., Delavar, Majid., & Eagderi, Soheil. (2015). Impact assessment of climate on environmental flows by using hydrological indicators – Case study of Kordan River. *Journal of natural environment, natural resources of Iran*. 69(4), 1109-1127. (In Persian)
- Mostafavi, Somayeh. (2013). Evaluation of environmental flow in river using eco-hydrological methods (Case study: The Barandoozchi river). *The thesis for the master of science degree in Water Resources Engineering*. Faculty of Agriculture. University of Urmia. 137p. (In Persian)
- Naderi, Mohammad. Hasan., Zakerinia, Mehdi., & Salarijazi, Meisam. (2018). Application of the PHABSIM model in Explaining the Ecological Regime of the River in order to Estimate the Environmental Flow and Compare with Hydrological Methods (Case Study: Gharasoo River). *Ecohydrology*. 5(3), 941-955. (In Persian)
- Park, Jinseok., Jang, Seongju., Lee, Hyeokjin., Gou, Jaesun. & Song, Inhong. (2024). Evaluation of fish habitat suitability based on stream hydrodynamics and water quality using SWAT and HEC-RAS linked simulation. *Scientific Reports*, 14, 19236.
- Postel, Sandra. L., Daily, Gretchen. C., Ehrlich, Paul. R. (1996). Human Appropriation of Renewable Freshwater. *Science* 271, 785-788.
- Rajabizadeh, Yousef., Qaderi, Kourosh., Hajiesmaeili, Mahboobeh. & Malekpour Shahraki, Mohammad Mahdi. (2024). Analysis of Hydrological and Hydraulic Approaches in Suitable Environmental Flow Range Estimation of Zayandehroud River. *Journal of Water and Soil Conservation*. (In Persian)
- Richter, Brian. D., Baumgartner, Jeffrey. V., Powell, Jennifer., Braun, David. P. (1996). A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conserv Biol*. 10(4), 1163-1174.
- Sedighkia, Mehdi. & Abdoli, Asghar. (2021). Efficiency of coupled invasive weed optimization-adaptive neuro fuzzy inference system method to assess physical habitats in streams. *SN Applied Sciences*. 3(2), 194.
- Sedighkia, Mehdi., Ayyoubzadeh, Seyed. Ali., & Hajiesmaeili, Mahboobeh. (2015). Investigation on the necessities of Instream Flow Needs assessment in the rivers using hydro-ecological methods (Case study: Delichai river in Tehran, Iran). *Journal of Ecohydrology*. 2(3), 289-300. (In Persian)
- Shokoohi, Alireza. & Amini, Majid. (2013). Introducing a new method to determine rivers' ecological water requirement in comparison with hydrological and hydraulic methods. *Int. J. Environ. Sci. Technol*. 11, 747-756.
- Shokoohi, Alireza. & Hong, Yang. (2011). Using hydrologic and hydraulically derived geometric parameters of perennial rivers to determine minimum water requirements of ecological habitats (case study: Mazandaran Sea Basin, Iran). *HYDROLOGICAL PROCESSES*. 25, 3490-3498.
- Shim, Taeyong., Bae, Eunhye. & Jung, Jinho. (2016). Application of Habitat Suitability Models for Assessing Climate Change Effects on Fish Distribution. *Ecology and Resilient Infrastructure*. 3 (2), 134-142.
- Shirani, Kourosh., Chitsaz, Vahid., & Modares, Reza. (2006). Development of river information database in Zayandehroud basin using geographic information systems. *1st Conference on Optimum Utilization of Water Resources*. Shahrekord, Iran. (In Persian)
- Taheri Gorji, Shamim., Moridi, Ali., & Majdzadeh Tabatabaei, Seyed. Mohammadreza. (2022). Role of flow naturalization in estimating environmental flow by hydraulic and hydrological approaches. *Journal of Water and Irrigation Management*. 12(3), 615-628. (In Persian)
- Tenant, Donald. Leroy. (1976). Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources. *Fisheries*. 1, 6-10.
- Thompson, Mike. (2015). Minimum Flow Recommendations for the Wellington Region.
- Vismara, Renato., Azzellino, Arianna., Bosi, R., Crosa, G. & Gentili, Gaetano. (2001). Habitat Suitability Curves for Brown Trout (*Salmo Trutta Fario L.*) in the River Adda, Northern Italy: Comparing Univariate and Multivariate Approaches. *Regulated Rivers: Research and Management*. 17, 37-50.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Zayandehroud River, as one of the most important water resources in central Iran, has been severely affected by human exploitation, climate change, and unsustainable development in recent decades, and its base flow has decreased significantly in many time periods. This decrease has not only affected the economic and social functions of the river, but also seriously threatened the sustainability of aquatic habitats and its ecological structure. To respond to this challenge, in this study, with a comparative approach, the performance of several different methods of estimating environmental flow (including hydrological, hydraulic methods, and the physical habitat simulation model) in a section of the Zayandehroud River is evaluated.

Materials and Methods

Providing the minimum required environmental flow of the Zayandehroud River is considered a requirement for which comprehensive and practical measures and measures must be applied for its management and allocation. The study area in this study is the distance from the Zayandehroud Dam to the Gavkhuni Wetland and is divided into 3 intervals and 8 hydrometric stations. The first station in this study is the Sad-Tanzimi station, and the Varzaneh station, which is the closest station to the Gavkhuni Wetland, is considered as the last study station. In the present study, two hydrological methods, Tennant and RVA, were used for comparison with the physical habitat simulation method to evaluate the environmental flow.

Results

In this study, it was found that the results of Tennant method are often general and non-customized and do not work well for the Zayandehroud River, which has severe hydrological fluctuations, chronic water stress conditions, and a heterogeneous bed. Also, the values proposed by Tennant are either too conservative or are completely impractical in terms of water resources management in dry seasons. The RVA method was able to analyze the flow change patterns and the level of damage to the natural regime of the Zayandehroud River with high accuracy and provided relatively reasonable values for the environmental flow in different months. However, the RVA method lacks a direct assessment of the biological response of species to flow and cannot replace more accurate ecological methods such as habitat simulation. The physical habitat simulation method, which was implemented in this study using morphological, hydraulic, and biological data, was able to determine the biological value of each flow scenario with high accuracy by considering the real ecological needs of target species and analyzing the habitat response to different flows. The output of this method has high environmental validity and is very valuable for accurate management decisions.

Conclusion

According to the comparison of the methods carried out in this study, the estimated environmental flow in the physical habitat simulation method is 60%, the RVA is 49%, and the Tennant method is 26% of the average annual river flow, respectively.

The RVA and physical habitat simulation methods have both suggested relatively more reasonable and feasible percentages than the Tennant method, which should be taken into account by relevant managers and experts in allocating environmental rights, and it can be said that these methods are capable of protecting the natural flow regime to maintain the ecological values of the Zayandehroud River and establish favorable conditions for the survival of aquatic species. Therefore, the aforementioned methods, considering their advantages and disadvantages and appropriate to the conditions of each project, can be used in management

matters and executive plans of engineers and ecohydraulic specialists and help estimate a desirable environmental flow range for the Zayandehroud River and consider it in river management and restoration plans and projects.

Author Contributions

Conceptualization, Yousef Rajabizadeh and Kourosh Qaderi; methodology, Yousef Rajabizadeh, Mahboobeh Hajiesmaeili and Mohammad Hasan Naderi; software, Yousef Rajabizadeh, Kourosh Qaderi and Mahboobeh Hajiesmaeili; validation, Yousef Rajabizadeh, Kourosh Qaderi and Mohammad Hasan Naderi; formal analysis, Yousef Rajabizadeh and Mohammad Mehdi Ahmadi; investigation, Yousef Rajabizadeh, Kourosh Qaderi and Mohammad Hasan Naderi; resources, Yousef Rajabizadeh and Mohammad Mehdi Malekpour; data curation, Yousef Rajabizadeh and Mohammad Mehdi Malekpour; writing—original draft preparation, Yousef Rajabizadeh and Mohammad Mehdi Ahmadi; writing—review and editing, Yousef Rajabizadeh and Mohammad Mehdi Malekpour; visualization, Yousef Rajabizadeh and Mohammad Hasan Naderi; supervision, Yousef Rajabizadeh and Mahboobeh Hajiesmaeili; funding acquisition, Yousef Rajabizadeh. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.” All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.