

## برآورد حقابه زیست‌محیطی رودخانه قطورچای با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی

سعید حبیبی آلاگوز<sup>۱</sup>، محمدتقی ستاری<sup>۲\*</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناس ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. استادیار، گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۴/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۱۰/۱۴)

### چکیده

تخصیص حقابه زیست‌محیطی رودخانه‌ها به‌عنوان حلقه مفقوده در مدیریت پایدار منابع آب در ایران، ضرورتی انکارناپذیر برای حفظ اکوسیستم‌های موجود در حوضه‌های آبریز کشور و همچنین جلوگیری از مرگ تالاب‌ها و دریاچه‌های منتهی به رودخانه‌هاست. در این مقاله حقابه زیست‌محیطی رودخانه قطورچای، که از زیرحوضه‌های مهم حوضه آبریز ارس است، با استفاده از چهار روش هیدرولوژیکی شامل تنانت، تسمن، شاخص تداوم جریان، اسمختین و دو روش اکوهیدرولوژیکی شامل تغییر منحنی تداوم جریان و مدل ذخیره رومیزی مطالعه شد. از بین روش‌های یادشده، روش تغییر منحنی تداوم جریان در کلاس اکولوژیکی C عمدتاً به علت سازگاری بیشتر با شرایط هیدرولوژیکی و اکولوژیکی نسبت به سایر روش‌ها و با توجه به در نظر گرفتن محدودیت‌های اکولوژیکی منطقه مطالعه‌شده و انعطاف‌پذیری آن در ماه‌های کم‌آبی و پرآبی به‌عنوان روش مناسب انتخاب شد. نتایج نشان داد برای حفظ حیات رودخانه قطورچای در کمترین وضعیت اکولوژیکی قابل قبول (کلاس مدیریت زیست‌محیطی C)، باید شدت جریان متوسط سالانه ۶/۹۴ مترمکعب بر ثانیه (معادل با ۴۸ درصد جریان طبیعی رودخانه) در داخل رودخانه جریان داشته باشد. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد به‌طور متوسط سالانه ۶/۵ مترمکعب در ثانیه آب از رودخانه قطورچای وارد رودخانه ارس می‌شود که این میزان تقریباً معادل با حقابه زیست‌محیطی محاسبه‌شده است.

**کلیدواژگان:** تغییر منحنی تداوم جریان، حقابه زیست‌محیطی، روش‌های اکوهیدرولوژیکی، روش‌های هیدرولوژیکی، رودخانه قطورچای.

## مقدمه

ایران در حالی با کمبود منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی مواجه است که در سال‌های اخیر به علت مصرف بی‌رویه آب در بخش کشاورزی و مهار گسترده آب‌های سطحی از طریق سدها، بسیاری از دریاچه‌ها و تالاب‌های کشور به واسطه بی‌توجهی به تخصیص حقایق زیست‌محیطی یا خشک شده‌اند و یا در آستانه خشک شدن قرار دارند. برداشت بی‌رویه آب برای مقاصد مختلف، از مصارف کشاورزی گرفته تا صنعت و تأمین آب شرب، از جریان رودخانه می‌کاهد و زیستگاه درون رودخانه را تغییر داده و اکوسیستم‌های آبی را در معرض تخریب قرار می‌دهد. بررسی منابع نشان می‌دهد نه تنها در ایران بلکه در سایر کشورها نیز به علت بی‌توجهی به حقایق زیست‌محیطی مشکلات عدیده‌ای برای مدیران بخش آب و محیط زیست فراهم کرده است.

برگمپ و همکارانش با مطالعه ۲۲۵ حوضه در سراسر جهان، به این نتیجه رسیدند که ۸۳ مورد (۳۷ درصد) از رودخانه‌ها به شدت و ۵۴ مورد (۲۴ درصد) دیگر به‌طور متوسط آسیب دیده‌اند. به این منظور و برای کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از برداشت آب رودخانه‌ها، دانشی با عنوان «جریان زیست‌محیطی» ایجاد شد که هدف آن پاسخ به این سؤال است که «تا چه حد می‌توان شرایط طبیعی رودخانه را برای بهره‌برداری از منابع آب و یا توسعه منابع آب دگرگون کرد به گونه‌ای که به اکوسیستم رودخانه آسیبی وارد نشود و یا آسیب وارد شده در حد قابل تحمل محیط زیست رودخانه باشد؟» [۱].

برای مدیریت رودخانه، نیازهای زیست‌محیطی اغلب به‌عنوان مجموعه‌ای از دبی‌های جریان با مقدار، زمان وقوع، فراوانی و دوام جریان معین تعریف می‌شود. این جریان‌ها، که شرایط مستعد نگهداری مجموعه‌ای از زیستگاه‌های آبی و فرایندهای اکوسیستم را فراهم می‌کنند، با عناوینی همچون جریان زیست‌محیطی<sup>۱</sup>، نیاز آب زیست‌محیطی<sup>۲</sup> و تقاضای آب زیست‌محیطی<sup>۳</sup> تعریف شده و فرایند محاسبه این جریان‌ها نیز ارزیابی جریان زیست‌محیطی<sup>۴</sup> نامیده می‌شود [۲].

اکولوژیست‌ها عقیده دارند که ضابطه اصلی برای محاسبه جریان زیست‌محیطی باید شامل حفظ الگوهای زمانی و مکانی جریان رودخانه باشد. تغییرپذیری جریان بر تنوع ساختاری و عملکردی رودخانه‌ها و سیلاب‌دشت آنها تأثیرگذار است و بر تنوع گونه‌های رودخانه نیز اثر می‌گذارد. بنابراین، جریان زیست‌محیطی نباید فقط شامل مقادیر مورد نیاز آب باشد، بلکه باید بتواند به این سؤال که «این آب کی و چطور باید در رودخانه جاری شود؟» نیز پاسخ دهد [۲].

روش‌های متعددی برای تعیین جریان‌های زیست‌محیطی وجود دارد. بیشتر این روش‌ها را می‌توان در چهار گروه مجزا به نام روش‌های هیدرولوژیکی، درجه‌بندی هیدرولوژیکی، شبیه‌سازی زیستگاه و نیز روش جامع طبقه‌بندی کرد [۱].

این روش‌ها به‌طور معناداری از نظر اهداف، اطلاعات ورودی مورد نیاز و دقت نتایج خروجی با یکدیگر متفاوت‌اند. روش‌های مختلف برای اهداف مختلف شامل برنامه‌ریزی جامع منابع آب تا زمان‌بندی تفصیلی مدیریت رهاسازی از سدها مد نظر قرار گیرند [۳].

در یک بررسی جریان زیست‌محیطی در مدیریت به‌هم‌پیوسته منابع آب، به‌رغم توسعه روش‌های جامع ارزیابی جریان زیست‌محیطی به این مهم دست یافته شد که هیچ‌یک از روش‌ها به‌خوبی جریان‌های زیست‌محیطی را به خدمات اکوسیستم پیوند نمی‌دهند. به علاوه، روش‌های جامع موجود به اطلاعات گسترده‌ای نیاز دارند که این بزرگ‌ترین محدودیت کاربرد روش‌های یادشده به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه است [۴].

با مطالعه روی ۱۵۱ مقطع عرضی از ۷۰ رودخانه در غرب ایالات متحده نتیجه گرفته شده است که روش Tennant در رودخانه‌های با شیب کم (کمتر از ۱ درصد) کاربردی‌تر است و در رودخانه‌هایی با شیب بیشتر، روش Tennant باید با احتیاط بیشتری استفاده شود و محدود به مراحل برنامه‌ریزی پیشنهادی جریان زیست‌محیطی باشد. همچنین، از روش Tennant باید در سناریوهای حفاظت جریان درون رودخانه‌ای استفاده کرد، نه در سناریوهای احیا و بازگردانی [۵].

در مطالعه‌ای روی رودخانه‌ها در آنتاریو کانادا از سه روش Tessman, Tennant و ترکیبی از Q<sub>50</sub> و Q<sub>90</sub> ماهیانه،

1. Environmental Flow
2. Environmental water Requirements
3. Environmental Flow Requirements
4. Environmental Flow Assessment

روش کیفیت آب (رابطه Q)، استفاده شد و با مقایسه نتایج روش‌های یادشده، روش FDC Shifting پیشنهاد شد [۱۱].

مطالعه جریان زیست‌محیطی رودخانه باراندوزچای (استان آذربایجان غربی) با استفاده از پنج روش هیدرولوژیکی و اکولوژیکی نشان داد برای حفظ رودخانه باراندوزچای در کمترین وضعیت اکولوژیکی قابل قبول (کلاس مدیریت زیست‌محیطی C) روش FDC Shifting نتایج بهتری ارائه می‌دهد [۱۲].

در مطالعه جریان زیست‌محیطی رودخانه سیمینه رود به‌عنوان یکی از رودخانه‌های پرآب استان آذربایجان غربی، از بین سه روش هیدرولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی روش FDC Shifting به دلیل در نظر گرفتن کلاس‌های مدیریت زیستی و انعطاف آن در برابر تغییرات بده جریان، انتخاب و پیشنهاد شد [۱۳].

مطالعه جریان زیست‌محیطی رودخانه زولاچای در استان آذربایجان غربی نیز روش FDC Shifting را نسبت به سایر روش‌های اکوهیدرولوژیکی مناسب دانست. علت این امر انعطاف روش یادشده نسبت به جریانات رودخانه‌ای و در نظر گرفتن شش کلاس مختلف اکولوژیکی است [۱۴].

بررسی جریان زیست‌محیطی رودخانه گدارچای (آذربایجان غربی) نشان داد روش‌های هیدرولوژیکی، که جریان زیست‌محیطی را بر پایه جریان‌های متوسط سالانه ارائه می‌دهند، نمی‌توانند نتایج قابل قبولی ارائه دهند. روش انتقال منحنی تداوم جریان (FDCs) در کلاس مدیریت زیستی C را که یک روش منعطف بر جریان‌های ماهیانه است، روش مناسبی برای تعیین جریان زیست‌محیطی رودخانه گدارچای است [۱۵].

ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه زرينه رود در استان آذربایجان غربی با سه روش هیدرولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی نشان داد روش FDC Shifting در کلاس مدیریت زیستی C نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد [۱۶].

مطالعه و مقایسه روش‌های مختلف جریان زیست‌محیطی رودخانه زهره بیان می‌کند که روش انتقال منحنی تداوم جریان (FDCs) به دلایل ارائه مقادیر منطقی جریان زیست‌محیطی در ماه‌های مختلف در مقایسه با دبی جریان متوسط ماهانه و سالانه، تطابق مناسب الگوهای تغییرات درون‌سالی جریان متوسط زیست‌محیطی ماهانه و

برای تعیین کمترین جریان زیست‌محیطی استفاده شد و نتیجه گرفته شد که دو روش Tennant و Tessman با وضعیت رودخانه‌های آنتاریو سازگار نیست و کاربرد این روش‌ها را در صورت استفاده از مطالعات بیشتر و اصلاح آنها برای رودخانه‌های آنتاریو مناسب می‌داند [۶].

در مطالعه‌ای آب زیست‌محیطی منابع سطحی کشور با استفاده از روش Smakhtin، وضعیت بهره‌برداری در برخی از رودخانه‌های شاخص حوضه‌های شمال غرب، مرکز، غرب و جنوب کشور ارزیابی شد و مشخص شد که نیاز آب زیست‌محیطی به‌دست‌آمده از روش Smakhtin تقریباً بر  $Q_{80}$  منطبق است [۷].

در یک بررسی جامع روش‌ها و مدل‌های برآورد جریان زیست‌محیطی عنوان شد که در تعیین حقایق زیست‌محیطی، فرض ثابت بودن جریان در مدل‌ها مناسب نیست و متغیر گرفتن جریان طبیعی رودخانه‌ها باید در نظر گرفته شود [۸].

برای ارزیابی زیست‌محیطی رودخانه‌های شهرچای، نازلوچای، باراندوزچای در استان آذربایجان غربی از مدل‌های GEFC، DRM، IHA استفاده شده است و نتایج به‌دست‌آمده از مدل GEFC (FDCs) را برای این رودخانه پیشنهاد کرد [۹].

برای ارزیابی زیست‌محیطی رودخانه نازلوچای در استان آذربایجان غربی پنج روش هیدرولوژیکی (درصدی از منحنی تداوم جریان، Tenant، DRMA، FDC-shifting) استفاده شد و روش FDC-shifting برای این رودخانه مناسب دانسته شد [۱۰].

در یک مطالعه نیز ضمن استفاده از چندین روش هیدرولوژیکی و اکولوژیکی و هیدرولیکی، روش FDC Shifting در کلاس زیستی B برای محاسبه جریان زیست‌محیطی رودخانه زاب‌بازه در ابکای‌خانه (استان آذربایجان غربی) و روش ترکیبی اکو-هیدرولیکی برای دو بازه گزرال و پل سردشت انتخاب شد [۲].

برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه روضه‌چای در استان آذربایجان غربی از هفت روش هیدرولوژیکی تنانت (Tennant)، تسمن (Tessman)، شاخص تداوم جریان (Flow Duration Indices)، اسماکتین (Smakhtin)، تغییر منحنی تداوم جریان (FDC Shifting)، محدوده تغییرپذیری (RVA)، روش DRM و

هیدرومتری به خروجی حوضه (ایستگاه شاهد) مقایسه شد.

### مواد و روش‌ها

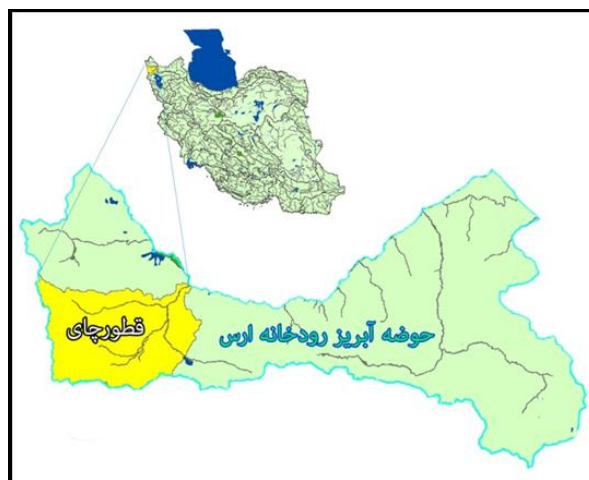
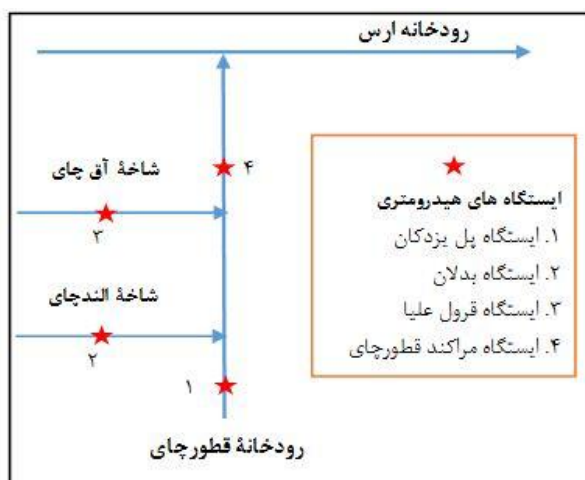
#### منطقه مطالعه شده و داده‌های استفاده شده

حوضه آبریز رودخانه قطورچای در مجاورت حوضه‌های آبریز دریاچه ارومیه و رودخانه‌های زنگمار و اهرچای است و در استان آذربایجان غربی قرار گرفته و به عرض‌های شمالی ۳۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۵۷ دقیقه و طول‌های شرقی ۴۴ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۲۷ دقیقه محدود است. این رودخانه با حدود ۱۹۰ کیلومتر طول، سطح حوضه ۸۵۰۰ کیلومتر مربع و حجم رواناب سالانه ۲۷۰ میلیون مترمکعب در سال، یکی از رودخانه‌های بزرگ استان آذربایجان غربی و حوضه آبریز ارس است. رودخانه قطورچای از کوه‌های مرتفع بایزید آقا واقع در خاک ترکیه سرچشمه گرفته و در ناحیه روستای رازی و قطور وارد ایران شده و در طول مسیر جریان به سمت رودخانه ارس، شاخه پراب رودخانه الوندچای و غازان چای به آن ملحق می‌شود و پس از عبور از شهر خوی و دشت ائواوغلی با شاخه پراب آق چای یکی می‌شود و به رودخانه بزرگ ارس می‌ریزد. آب این رودخانه در فصول بهار و تابستان از طریق ذوب برف‌های زمستانه، که در سطح کوه‌های نسبتاً مرتفع انباشت شده، تأمین می‌شود. موقعیت، سیمای عمومی و شکل شماتیک شبکه هیدروگرافی حوضه قطورچای در شکل ۱ نشان داده شده است.

جریان متوسط ماهانه رودخانه و تخصیص نیافتن همه جریان متوسط ماهانه به جریان مورد نیاز زیست‌محیطی طی سال قابل پذیرش‌ترین روش برآورد جریان زیست‌محیطی در این مطالعه است [۱۷].

در یک جمع‌بندی کلی نتایج مطالعات پیشین در استان آذربایجان غربی نشان می‌دهد نتایج روش FDC Shifting به دلیل در نظر گرفتن وضعیت اکولوژیکی رودخانه و انعطاف‌پذیری آن نسبت به تغییرات جریانات ماهیانه رودخانه نسبت به سایر روش‌های هیدرولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

هدف اصلی در تحقیق حاضر، برآورد حقابه زیست‌محیطی رودخانه قطورچای از زیرحوضه‌های آبریز ارس برای نخستین بار و با استفاده از روش‌های مختلف هیدرولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی و ارزیابی نتایج به دست آمده از هر یک از این روش‌ها با در نظر گرفتن شرایط اکولوژیکی حاکم بر رودخانه و تعیین حقابه جریان زیست‌محیطی رودخانه قطورچای و سهم رودخانه ارس از این رودخانه است. همچنین، در این مطالعه با به کارگیری یک رویکرد جدید به جای محاسبه جریان زیست‌محیطی در سرشاخه اصلی، نتایج محاسباتی جریان زیست‌محیطی در هر سرشاخه محاسبه و تجمیع شد و به عنوان جریان زیست‌محیطی کل رودخانه در نظر گرفته شد. در نهایت، جریان زیست‌محیطی ماهیانه تجمیع شده از سرشاخه‌ها با جریان طبیعی رودخانه در نزدیک‌ترین ایستگاه



شکل ۱. موقعیت زیرحوضه قطورچای (الف) و شکل شماتیک شبکه هیدروگرافی (ب)

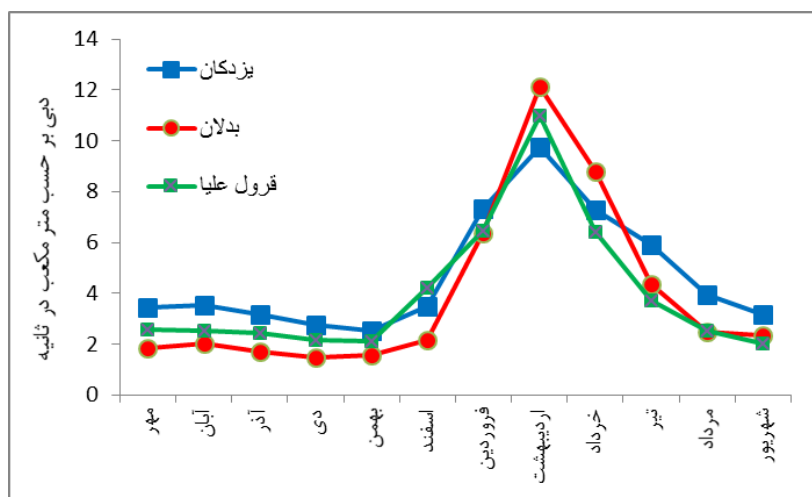
## داده‌های هیدرولوژیکی

رودخانه قطورچای ۱۰ ایستگاه هیدرومتری دارد که مهم‌ترین و فعال‌ترین آنها ایستگاه‌های پل یزدکان (شاخه اصلی قطورچای)، بدلان (شاخه الندیچای)، قرول علیا (شاخه آق‌چای) و مراکند قطورچای هستند. ایستگاه‌های پل یزدکان، بدلان و قرول علیا قبل از ورود به شهرها و مصارف کشاورزی حومه آنها واقع می‌شوند و پتانسیل رودخانه را نشان می‌دهند. بنابراین، برای انجام محاسبات هیدرولوژیکی در رودخانه قطورچای از داده‌های این ایستگاه‌ها بهره گرفته شده است. ایستگاه مراکند قطورچای به دلیل اینکه بعد از آن مصرف چشم‌گیری از آب رودخانه صورت نمی‌گیرد، به‌عنوان ایستگاه شاهد و برای مقایسه

نهایی استفاده شده است. مشخصات ایستگاه‌های رودخانه قطورچای و سرشاخه‌های آن در جدول ۱ ارائه شده است. در شکل ۲ نمودار جریان‌های ماهیانه ایستگاه‌های پل یزدکان، بدلان و قرول علیا رودخانه قطورچای نمایش داده شده است. نکته مهم اینکه جریان دو ایستگاه یزدکان و بدلان قبل از ورود رودخانه قطورچای به شهر خوی با هم ترکیب می‌شوند، ولی چون ایستگاه‌های پایین‌دست اطلاعات کافی برای بررسی را نداشتند، جریان زیستی برای هر یک از ایستگاه‌ها پیشنهاد و درنهایت با هم جمع شدند. درخور یادآوری است مجموع متوسط جریان سالیانه این سه سرشاخه ۱۴/۲۴ مترمکعب در ثانیه برآورد شده است.

جدول ۱. اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری

نام ایستگاه هیدرومتری	فاصله از رودخانه ارس (km)	سابقه آمار هیدرولوژیکی	شاخه رودخانه	ارتفاع از سطح دریا	میانگین درازمدت جریان ( $m^3/s$ )
پل یزدکان	۹۷	از سال ۱۳۵۰	قطورچای	۱۲۹۰ متر	۵/۲۳
بدلان	۱۰۵	از سال ۱۳۵۳	الندیچای	۱۵۰۰ متر	۳/۹۳
قرول علیا	۶۸	از سال ۱۳۵۷	آق‌چای	۱۲۶۲ متر	۵/۰۷
مراکند قطورچای	۲۲	از سال ۱۳۵۳	قطورچای	۸۹۵ متر	۶/۵۰



شکل ۲. نمودار جریان‌های ماهانه رودخانه قطورچای در ایستگاه‌های مختلف آب‌سنجی

## روش‌های استفاده‌شده

شش روش (۱. تنانت؛ ۲. تسمن؛ ۳. شاخص‌های تداوم جریان؛ ۴. اسمختین؛ ۵. تغییر منحنی تداوم جریان و ۶. مدل ذخیره رومیزی) برای برآورد و ارزیابی حقایق زیست‌محیطی رودخانه قطورچای در هر یک از ایستگاه‌های یادشده استفاده شده است.

روش تنانت<sup>۱</sup>

در سال ۱۹۷۶، دونالد تنانت روشی برای تعیین جریان زیست‌محیطی مورد نیاز برای ماهی‌ها معروف به روش «مونتانا» یا به‌طور متداول‌تر، روش «تنانت» معرفی کرد. این روش درصدی از متوسط جریان سالیانه را برای تعیین

1. Tennant

در نظر گرفتن نیاز آب زیست‌محیطی استفاده کردند. اسمختین یک روش هیدرولوژیکی است که برای ارزیابی در سطح اولیه و در مقیاس مکانی بزرگ (بین‌المللی و ملی) به کار می‌رود. در این روش نیاز آب زیست‌محیطی<sup>۱۰</sup> (EWR) به صورت ترکیبی از نیاز کمترین جریان زیست‌محیطی<sup>۱۱</sup> (LFR) و نیاز بیشترین جریان زیست‌محیطی<sup>۱۲</sup> (HFR) در نظر گرفته شده است. LFR، کمترین آب مورد نیاز برای ماهیان و سایر موجودات آبرزی در سال است و HFR نیز، در موارد سیلاب و تأثیر آن در شکل رودخانه و گیاهان اطراف رودخانه نمود پیدا می‌کند [۲۱]. در این روش برای آنکه شرایط رودخانه به صورت «نسبتاً خوب» باشد، باید LFR در آن رودخانه مساوی  $Q_{90}$  در نظر گرفته شود.  $Q_{90}$  جریانی است که ۹۰ درصد مواقع سال، دبی رودخانه از آن مقدار بیشتر است. مقدار HFR نیز به اهداف مدیریت زیست‌محیطی و رژیم جریان رودخانه بستگی دارد [۲۰]. اسمختین و همکارانش حوضه‌های آبریز را در چهار کلاس طبقه‌بندی کرده و بر این اساس مقدار HFR را به صورت درصدی از میانگین آورد سالانه<sup>۱۳</sup> (MAR) ارائه کرده‌اند (جدول ۲).

#### تغییر منحنی تداوم جریان<sup>۱۴</sup>

یکی از خصوصیات مربوط به جریان آب که در ارزیابی نوسانات و تغییرپذیری آب رودخانه از نظر زیست‌محیطی استفاده می‌شود، عبارت است از منحنی تداوم جریان. منحنی تداوم جریان از مفیدترین روش‌های نمایش محدوده کامل دبی‌های رودخانه از رخدادهای کم‌آبی تا سیلابی است. این روش رابطه بین مقدار و فراوانی جریان را نشان می‌دهد [۲۲]. اسمختین و آنپوتاس در سال ۲۰۰۶ به منظور ارزیابی جریان زیست‌محیطی در سامانه رودخانه از این روش استفاده کردند. این روش که یک رژیم هیدرولوژیکی برای حفاظت رودخانه در وضعیت اکولوژی مطلوب ارائه می‌دهد، به اصطلاح «انتقال منحنی تداوم جریان» نامیده می‌شود. در این روش چهار مرحله اصلی وجود دارد: اولین مرحله، تهیه منحنی تداوم جریان طبیعی (FDC) در بازه رودخانه مد نظر با استفاده از

کیفیت زیستگاه ماهیان به کار می‌برد. تنانت از ۵۸ مقطع عرضی از ۱۱ رودخانه در مونتانا<sup>۱</sup>، نبراسکا<sup>۲</sup> و وایومینگ<sup>۳</sup>، نتیجه گرفت که ۱۰ درصد متوسط جریان سالانه<sup>۴</sup> (AAF)، کمترین جریان برای بقای کوتاه‌مدت ماهی‌هاست. ۳۰ درصد AAF در نظر گرفته شده قادر به حفظ وضعیت‌های بقای نسبتاً خوب بوده و ۶۰ درصد AAF برای زیستگاه مطلوب مناسب است [۱۸].

#### روش تسمن<sup>۵</sup>

تسمن در سال ۱۹۸۰ با اقتباس از پیشنهادهای فصلی روش تنانت از ترکیبی از متوسط جریان ماهیانه<sup>۶</sup> (MMF) و متوسط جریان سالانه<sup>۷</sup> (MAF) برای تعیین کمترین جریان ماهیانه مورد نیاز استفاده کرد که مراحل زیر را دارد و در شکل ۳ این مراحل به صورت فلوچارتی ارائه شده است [۱۹].

#### تحلیل منحنی تداوم جریان<sup>۸</sup> (FDC)

یکی از خصوصیات مربوط به جریان آب که در ارزیابی نوسانات و تغییرپذیری آب رودخانه از نظر زیست‌محیطی استفاده می‌شود، عبارت است از منحنی تداوم جریان (FDC). این روش از مفیدترین روش‌های نمایش محدوده کامل بده جریان‌های رودخانه از رخدادهای کم‌آبی تا سیلابی است که رابطه بین مقدار و فراوانی جریان را نشان می‌دهد. شاخص‌های جریان کم‌آبی مختلفی از منحنی‌های تداوم جریان استفاده می‌شوند. جریان‌های بین محدوده ۷۰ تا ۹۹ درصد زمان تجاوز ( $Q_{70}$  تا  $Q_{99}$ ) معمولاً به عنوان جریان‌های کم‌آبی استفاده می‌شوند. جریان‌های  $Q_{90}$  و  $Q_{95}$  شاخص‌هایی هستند که بیشتر مواقع به عنوان شاخص‌های جریان کم‌آبی به کار می‌روند. جریان میان‌ماهانه (Q<sub>50</sub>) نیز در ماه‌های تابستان، شاخص تداوم جریان دیگری است [۲۰].

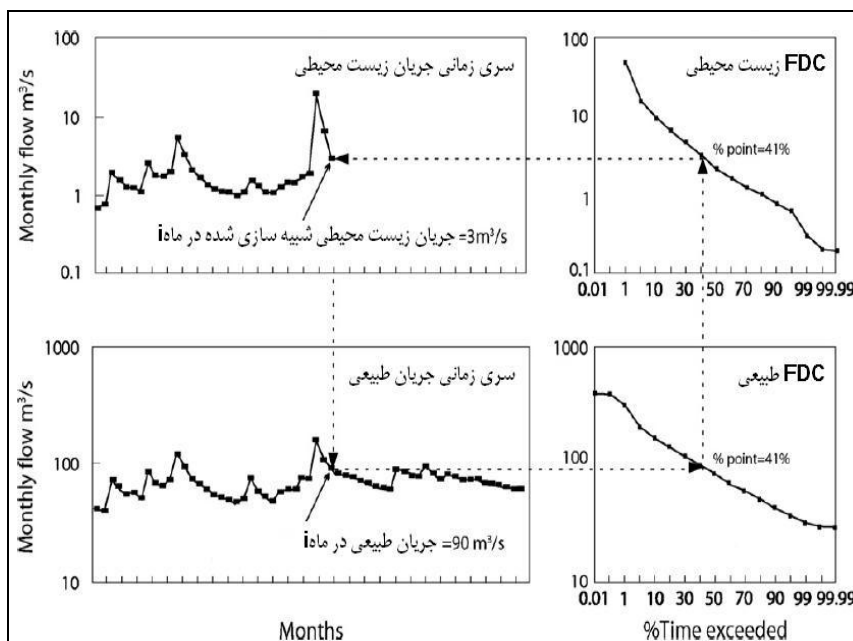
#### روش اسمختین<sup>۹</sup>

در سال ۲۰۰۴، اسمختین و همکارانش از این روش برای بررسی ۱۲۸ حوضه آبریز در نقاط مختلف جهان، به منظور ارزیابی وضعیت بهره‌برداری از رودخانه‌های جهان با

1. Montana
2. Nebraska
3. Wyoming
4. Average Annual Flow
5. Tesson
6. Mean Monthly Flow:
7. Mean Annual Flow
8. Flow Duration Curve
9. Smakhtin

10. Environmental Water Requirement
11. Environmental low-flow Requirement
12. Environmental high-flow Requirement
13. Mean Annual Runoff
14. FDC Shifting





شکل ۴. روند تولید یک سری زمانی کامل جریان زیست محیطی از منحنی تداوم جریان زیست محیطی تولید شده [۲۳]

بین این حدود قرار می گیرند. در این دسته بندی ها، طبقه بندی های انتقالی (مثلاً A/B و B/C) نیز برای افزایش محدوده جریان های زیست محیطی ممکن استفاده می شوند که این سیستم طبقه بندی در مدل DRM استفاده شده و نیازهای جریان بر اساس آن محاسبه می شود. به کلاس بالاتر، آب بیشتری برای حفظ اکوسیستم تخصیص داده و تغییرپذیری جریان بیشتر حفظ می شود [۲۴].

### نتایج

در جدول ۳ خلاصه نتایج روش های مطالعه شده آورده شده است که روش FDC shifting با کلاس زیست محیطی C به عنوان کلاس مدیریت زیستی برای رودخانه قطورچای انتخاب شد. در این کلاس مدیریت زیستی جریان پیشنهادی برای ایستگاه های پل یزدکان، بدلان و قرول علیا به ترتیب ۲/۸۴، ۱/۵۶ و ۲/۵۵ مترمکعب در ثانیه معادل ۵۴/۲۷، ۳۹/۵۷ و ۵۰/۲۴ درصد جریان متوسط سالیانه برآورد شد. شکل های ۵ تا ۷ حبابه های زیستی در این سه سرشاخه را نشان می دهد. مجموع حبابه های زیست محیطی سه سرشاخه قطورچای، الندچای و آق چای ۶/۹۵ مترمکعب در ثانیه برآورد می شود که باید تحویل رودخانه ارس شود.

### مدل ذخیره رومیزی<sup>۱</sup>

این روش برای اولین بار توسط هوگز و هانارت در سال ۲۰۰۳ برای ارزیابی های اولیه نیازهای جریان زیست محیطی رودخانه ها در آفریقای جنوبی توسعه داده شده است. مدل ذخیره رومیزی یکی از روش های یاد شده است که می تواند نیاز جریان اکولوژیکی را در شرایطی محاسبه کند که یک ارزیابی سریع مورد نیاز است و داده های موجود محدودند. این مدل برای وضعیت های مشاهده شده در آفریقای جنوبی توسعه یافته است. در آفریقای جنوبی رودخانه ها نسبت به وضعیت اکولوژیکی مطلوب، تقسیم بندی شده و متعاقب آن نیازهای جریان نیز طبقه بندی می شوند. این سیستم طبقه بندی نشان می دهد در عین حال که برخی رودخانه ها از نظر زیست محیطی اهمیت زیادی دارند، اما به دلیل نیازهای توسعه اجتماعی - اقتصادی همه رودخانه ها نمی توانند در وضعیت های نزدیک به شرایط طبیعی باقی بمانند؛ بنابراین چهار «کلاس مدیریت زیست محیطی» ممکن (A-D) تعریف می شود. کلاس A شامل رودخانه های طبیعی و تغییر نیافته است. کلاس B رودخانه های تغییر یافته ولی تا حد زیادی طبیعی، کلاس C رودخانه های نسبتاً تغییر یافته و کلاس D رودخانه های تا حد زیادی تغییر یافته با خسارت های زیاد به زیستگاه طبیعی، بیوتا و عملکرد اساسی اکوسیستم است. رودخانه های کلاس B و C



جدول ۳. مقایسه مقادیر پیشنهادی جریان زیست‌محیطی رودخانه قطورچای از روش‌های مختلف

ایستگاه - نیاز آب زیست‌محیطی (EWR)						
روش	پل یزدکان		بدلان		قرول علیا	
	(m <sup>3</sup> /s)	(MAR/%)	(m <sup>3</sup> /s)	(MAR/%)	(m <sup>3</sup> /s)	(MAR/%)
FDC shifting	کلاس A	۷۹/۳۹	۴/۱۵	۶۸/۶۸	۲/۷۰	۷۷/۹۰
	کلاس B	۶۵/۲۹	۳/۴۱	۵۰/۱۳	۱/۹۷	۶۱/۸۸
	کلاس C	۵۴/۲۷	۲/۸۴	۳۹/۵۷	۱/۵۶	۵۰/۲۴
	کلاس D	۴۴/۰۹	۲/۳۱	۳۲/۱۵	۱/۲۶	۴۰/۱۶
	کلاس E	۳۵/۸۵	۱/۸۸	۲۶/۲۳	۱/۰۳	۳۰/۱۸
	کلاس F	۲۷/۴۱	۱/۴۳	۲۱/۵۵	۰/۸۵	۲۲/۱۳
DRM	کلاس A	۷۶/۲۴	۳/۹۹	۶۰/۰۷	۲/۳۶	۶۶
	کلاس A/B	۶۰/۴۴	۳/۱۶	۴۸/۸۶	۱/۹۲	۵۳/۰۸
	کلاس B	۴۶/۶۲	۲/۴۴	۳۸/۶۴	۱/۵۲	۴۱/۵۳
	کلاس B/C	۳۷/۴۱	۱/۹۶	۳۱/۷۳	۱/۲۵	۳۳/۷۷
	کلاس C	۲۸/۲	۱/۴۷	۲۴/۵۷	۰/۹۷	۲۵/۸۶
	کلاس C/D	۲۲/۷۹	۱/۱۹	۲۰/۰۹	۰/۷۹	۲۱/۰۵
تنانت	کلاس D	۱۷/۵	۰/۹۲	۱۵/۷	۰/۶۲	۱۶/۳۳
	مهر تا اسفند	۱۰	۰/۵۲	۱۰	۰/۳۹	۱۰
تسمن	فروردین تا شهریور	۳۰	۱/۵۷	۳۰	۱/۱۸	۳۰
	اسمختین	۵۴	۲/۳۲	۵۳/۵	۲/۱	۵۰
شاخص‌های تداوم جریان	Q70	۵۶/۶۰	۲/۹۶	۳۷/۶۶	۱/۴۸	۴۹/۹۰
	Q75	۵۱/۴۳	۲/۶۹	۳۴/۶۱	۱/۳۶	۴۶/۱۵
	Q80	۴۷/۶۱	۲/۴۹	۳۲/۵۷	۱/۲۸	۴۲/۸۰
	Q85	۴۴/۳۶	۲/۳۲	۳۰/۵۳	۱/۲	۳۸/۴۶
	Q90	۳۷/۰۹	۱/۹۴	۲۶/۷۲	۱/۰۵	۳۲/۳۵
	Q95	۳۰/۲۱	۱/۵۸	۲۳/۹۲	۰/۹۴	۱۸/۱۵
جریان زیست‌محیطی توصیه‌شده						
	۵۴/۲۷	۲/۸۴	۳۹/۵۷	۱/۵۶	۵۰/۲۴	۲/۵۵

است. در این کلاس مدیریت زیستی برای سه ایستگاه اشاره‌شده ۲/۸۴، ۱/۵۶ و ۲/۵۵ مترمکعب معادل ۵۴/۲۷، ۳۹/۵۷ و ۵۰/۲۴ درصد از جریان متوسط رودخانه پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه روش DRM برای رودخانه‌های افریقا بهینه شده‌اند و برای رودخانه‌های ایران هنوز بهینه نشده‌اند، نمی‌تواند به‌عنوان شاخص مطمئنی برای تعیین جریان زیست‌محیطی و حقایق زیستی رودخانه باشد ولی مشاهده می‌شود که در کلاس مدیریت زیستی B این روش حقایق‌های زیستی به کلاس مدیریت زیستی C روش FDC Shifting بسیار نزدیک است.

بررسی مطالعات انجام‌شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه [۱۰-۱۶] نشان می‌دهد، روش تنانت که به‌عنوان

جدول ۳ نتایج روش‌های استفاده‌شده در این تحقیق را به‌صورت کامل ارائه داده است. نتایج نشان می‌دهد در روش FDC Shifting هرچه کلاس مدیریت زیستی بهتر باشد و به تعبیری رودخانه در وضعیت بهینه‌ای باشد، میزان جریان زیست‌محیطی نیز بیشتر خواهد بود. در این روش برای سه ایستگاه یزدکان، بدلان و قرول علیا در حالت بهینه (کلاس زیستی A) به ترتیب ۴/۱۵، ۲/۷۰ و ۳/۹۵ مترمکعب در ثانیه پیشنهاد شده است. این در حالی است که در بدترین وضعیت زیستی رودخانه (کلاس زیستی F) برای سه ایستگاه یادشده به ترتیب ۱/۴۳، ۰/۸۵ و ۱/۱۲ پیشنهاد شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق کلاس مدیریت زیستی C با توجه به معیارهای روش یادشده انتخاب شده

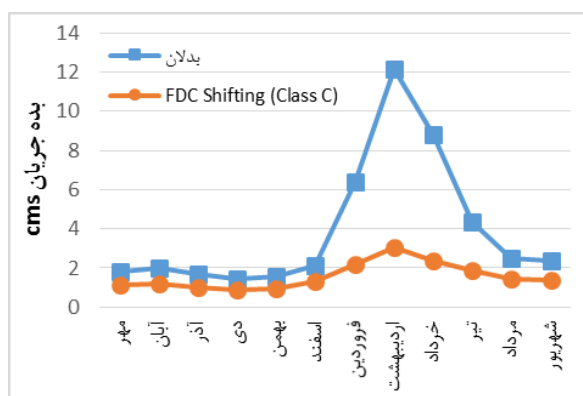
متوسط سالانه برای تعیین حقایق زیستی رودخانه استفاده می‌کند که به‌تنهایی قابل اطمینان نیست و در کنار سایر روش‌ها می‌تواند مفید باشد.

شاخص‌های منحنی تداوم جریان نیز نشان می‌دهند در ۷۰ درصد مواقع برای سه ایستگاه هیدرومتری یزدکان، بدلان و قرول علیا جریان به‌ترتیب از ۲/۹۶، ۱/۴۸ و ۲/۵۳ مترمکعب در ثانیه بیشتر است. این میزان نشان می‌دهد در سه سرشاخه مهم رودخانه قطورچای جریان زیست‌محیطی در ۷۰ درصد مواقع اتفاق می‌افتد.

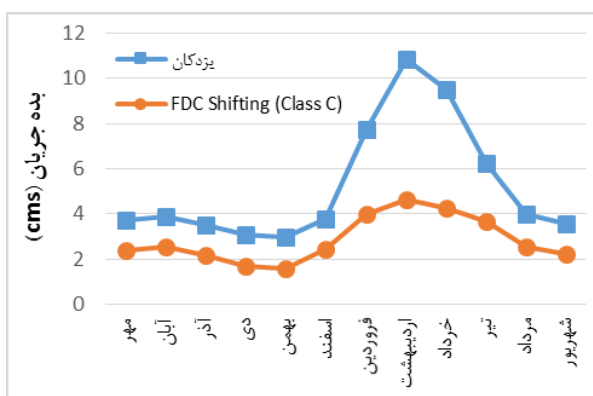
در شکل ۸ نتایج جریان زیست‌محیطی مجموع ایستگاه‌های مطالعه‌شده به‌دست‌آمده از روش FDC Shifting در کلاس زیستی C با ایستگاه مراکند قطورچای، به‌عنوان ایستگاه شاهد، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد در ماه‌های تیر تا آبان جریان زیست‌محیطی در ایستگاه شاهد برقرار نیست.

یکی از روش‌های ساده و پرکاربرد بیشتر استفاده می‌شود، نمی‌تواند به‌تنهایی معرف حقایق زیستی رودخانه باشد. چراکه این روش فقط درصدی از جریان متوسط سالانه را برای هر ماه ارائه می‌دهد و نسبت به تغییرات جریان رودخانه در ماه‌های پرآبی و کم‌آبی بی‌تفاوت است.

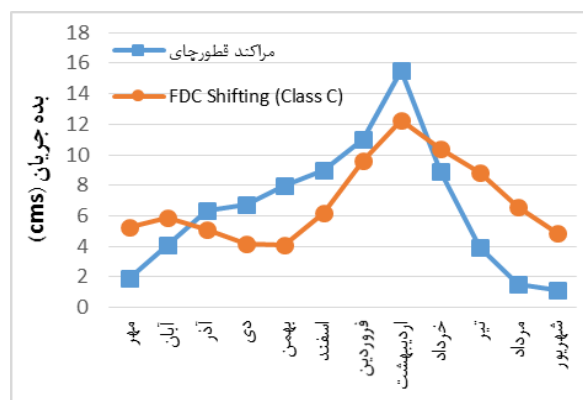
همچنین از جدول ۳ استنباط می‌شود که روش تسمن نیز به دلیل اینکه تابع کلاس‌های مدیریتی نیست و برای همه رودخانه‌ها از یک الگو پیروی می‌کند، نمی‌تواند نتایج دقیقی ارائه دهد. ولی نسبت به روش تنانت ارجحیت دارد، چراکه نسبت به جریان‌های ماهانه رودخانه بی‌تفاوت نیست و در هر ماه میزان جریان متفاوتی را ارائه می‌دهد. مطالعه انجام‌شده در سیمینه‌رود که با هدف تعیین حقایق زیست‌محیطی بر اساس روش‌های هیدرولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی مؤید این مطلب است [۱۳]. روش اسمختین نیز همانند روش تنانت از جریان



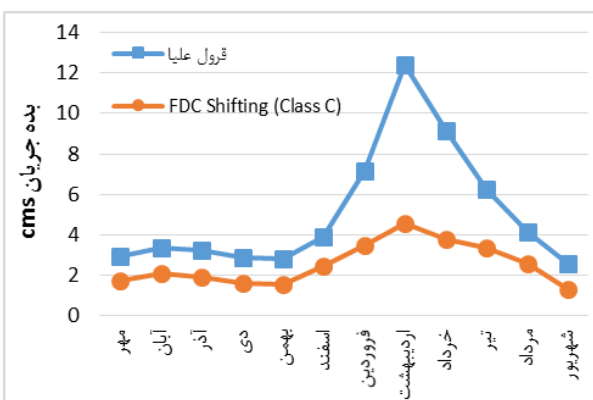
شکل ۶. مقایسه حقایق زیست‌محیطی رودخانه قطورچای در ایستگاه بدلان ال‌ندچای



شکل ۵. مقایسه حقایق زیست‌محیطی رودخانه قطورچای در ایستگاه یزدکان قطورچای



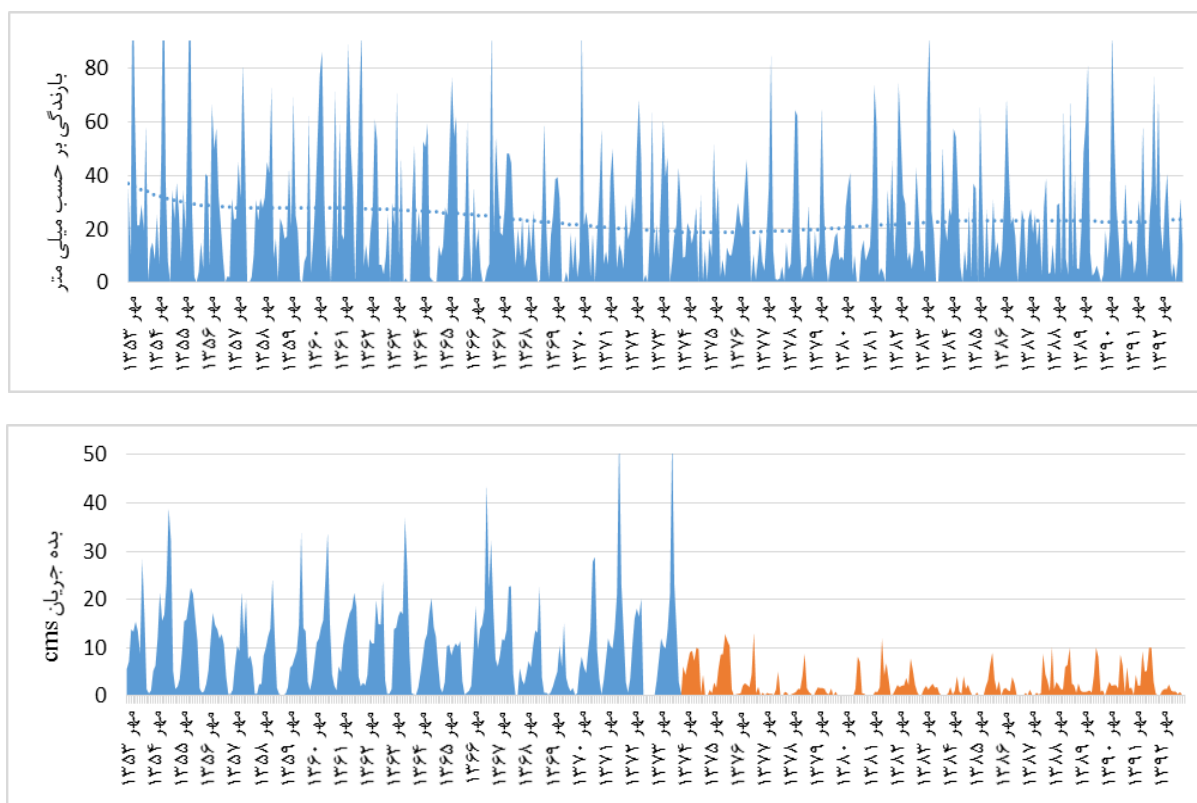
شکل ۸. مقایسه حقایق زیست‌محیطی مجموع ایستگاه‌های مطالعه‌شده و جریان طبیعی ایستگاه مراکند



شکل ۷. مقایسه حقایق زیست‌محیطی رودخانه قطورچای در ایستگاه قورول علیا آق‌چای

کرده است. این روند نزولی در جریان سبب شده در بعضی از دوره‌های زمانی مقدار جریان زیست‌محیطی عملاً بیشتر از جریان طبیعی رودخانه باشد. در دوره زمانی یادشده سری زمانی بارندگی‌های حوضه کاهش محسوس را نشان نمی‌دهد. علت این امر مربوط به توسعه پروژه‌های تأمین منابع آب طی دوره سازندگی پس از جنگ تحمیلی است. در این دوره با ترویج بخش کشاورزی و احداث سازه‌های متعدد در طول رودخانه شرایط برداشت هرچه بیشتر جریان رودخانه توسط کشاورزان را فراهم آورده است.

شکل ۹ سری‌های زمانی بارندگی و متوسط جریان ماهیانه ایستگاه مراکند قطورچای را نمایش می‌دهد. در این شکل به‌رغم عدم کاهش محسوس بارندگی در این حوضه کاهش شدید جریان رودخانه از سال‌های ۱۳۷۴ به بعد آشکار است. با توجه به آمار ۳۸ ساله ایستگاه شاهد (مراکند قطورچای) مشاهده می‌شود که متوسط جریان این ایستگاه در سال‌های ۱۳۵۳ تا ۱۳۷۳ حدود ۱۰/۳ مترمکعب در ثانیه است و در فاصله سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۲ متوسط جریان این ایستگاه با حدود ۷۶ درصد کاهش به ۲/۴ مترمکعب در ثانیه رسیده و روند نزولی طی



شکل ۹. سری زمانی بارندگی ماهانه محدود مطالعاتی و سری زمانی متوسط جریان ماهانه ایستگاه مراکند قطورچای از سال ۱۳۵۳ تا ۱۳۹۲

در نظر گرفته شد. بر این اساس، جریان زیست‌محیطی ماهیانه تجمیع شده از سرشاخه‌ها با جریان طبیعی رودخانه در نزدیک‌ترین ایستگاه هیدرومتری به خروجی حوضه (ایستگاه شاهد) مقایسه شد. در این تحقیق از بین روش‌های استفاده شده برای برآورد حقابه زیست‌محیطی رودخانه قطورچای، روش تغییر منحنی تداوم جریان در کلاس اکولوژیکی C بیشتر به علت سازگاری بیشتر با شرایط هیدرولوژیکی و اکولوژیکی نسبت به سایر روش‌ها و

### نتیجه‌گیری کلی

در تحقیق حاضر، برای اولین بار حقابه زیست‌محیطی رودخانه قطورچای از زیرحوضه‌های آبریز ارس با استفاده از روش‌های مختلف هیدرولوژیکی و اکوهیدرولوژیکی تعیین شد. در این مطالعه با به‌کارگیری یک رویکرد جدید به‌جای محاسبه جریان زیست‌محیطی در سرشاخه اصلی، نتایج محاسباتی جریان زیست‌محیطی در هر سرشاخه محاسبه و تجمیع شد و به‌عنوان جریان زیست‌محیطی کل رودخانه

در حالت کلی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در رودخانه‌های دائمی حوضه‌های آبریز شمال غرب کشور، که اراضی کشاورزی مرغوب در حاشیه رودخانه‌ها دارد و برداشت‌های متعددی از جریان طبیعی رودخانه در فصول زراعی صورت می‌پذیرد، روش تغییر منحنی تداوم جریان به علت در نظر گرفتن شرایط اکولوژیکی رودخانه‌ها نتایج نسبتاً معقولانه‌تری برای محاسبه جریان زیست‌محیطی ارائه می‌دهد و از این رو در شرایط مشابه قابل توصیه است.

#### منابع

- [1].Tharme RE, Smakhtin VU. Environmental flow assessment in Asia: capitalizing on existing momentum. In: Proceedings of the First Southeast Asia Water Forum, 2nd ed. Thailand, Chiang Mai, 2003.
  - [2].Abdi R, Yasi M. Evaluation of environmental flow requirements using eco-hydrologic-hydraulic methods in perennial rivers. International Journal of Water Science and Technology. 2015; 72 (3): 354–363 [Persian].
  - [3].Smakhtin VU, Anputhas M. An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins. IWMI Research Report 107. International water management institute, Colombo, Sri Lanka. 2006: 1–10.
  - [4].Korsgaard, L. Environmental Flows in Integrated Water Resources Management: Linking Flows, Services and Values, PhD Thesis, Technical University of Denmark, Denmark. 2006. 60pp.
  - [5].Mann JL. Instream flow methodologies: An evaluation of the Tennant method for higher gradient streams in the national forest system lands in the western U. S, Master Thesis, Department of Forest, Rangeland and Watershed Stewardship, Colorado State University, Colorado. 2006 143 pp.
  - [6].Watt SP. A methodology for environmental protection of Ontario watercourses with respect to the permit to take water program, Master Thesis, Queen's University, Canada. 2007. 124 pp.
  - [7].Sima S. Using of environmental water right in storage exploitation, Master Thesis, Sharif University of Technology, Tehran. 2007 [Persian].
  - [8].Taleb Bidokhti N, Banihashem B. environmental water right, 2<sup>nd</sup> Conference of Environmental Engineering, environmental faculty, University of Tehran. May 2008 [Persian].
- با توجه به در نظر گرفتن محدودیت‌های اکولوژیکی و انعطاف‌پذیری آن در ماه‌های کم‌آبی و پرآبی به عنوان روش مناسب انتخاب شد. سایر دلایل انتخاب این روش به شرح زیر قابل ارزیابی است: ۱. این روش رژیم هیدرولوژیکی برای حفاظت رودخانه در وضعیت اکولوژی مطلوب را ارائه می‌دهد؛ ۲. هدف تأمین جریان‌های زیست‌محیطی، حفظ اکوسیستم در وضعیت‌های مد نظر است؛ ۳. جایگیری یک رودخانه در یک کلاس مدیریت زیست‌محیطی معین، اغلب به وسیله قضاوت کارشناسان صورت می‌گیرد؛ ۴. کلاس‌های مدیریت زیستی از A – F هستند. برای حالت طبیعی و F برای حالت تغییر یافته بحرانی است. کلاس مدیریت زیست‌محیطی انتخابی در این روش کلاس C است که از نتایج بازدیدهای میدانی حاصل شده است. کلاس C حالت نسبتاً تغییر یافته است که زیستگاه‌ها و دینامیک بیوتا مختل شده‌اند، ولی عملکردهای اساسی اکوسیستم هنوز دست‌نخورده‌اند. برخی گونه‌های حساس از بین رفته‌اند و یا تا حد زیادی کاهش یافته‌اند. گونه‌های ناشناخته موجود هستند؛ ۵. جریان زیست‌محیطی محاسباتی به صورت درصدی از جریان‌های ماهیانه است و ۶. انعطاف‌پذیری این روش در ماه‌های کم‌آبی و پرآبی مناسب است. نتایج شاخص‌های منحنی تداوم جریان در سه سرشاخه رودخانه قطورچای و نتایج روش منتخب نشان می‌دهد در ۷۰ درصد مواقع حبابه زیستی سرشاخه‌های رودخانه قطورچای در آن جریان دارند. نتایج همچنین نشان می‌دهد رودخانه قطورچای مقدار متوسط سالیانه ۶/۵ مترمکعب در ثانیه (۲۰۵ میلیون مترمکعب در سال) را به رودخانه ارس تحویل می‌دهد. این میزان با مقدار حبابه محاسبه شده تقریباً برابر است و سالانه حجم مورد نیاز رودخانه تأمین می‌شود، ولی توزیع‌های ماهیانه حبابه زیست‌محیطی رودخانه قطورچای نشان می‌دهد این رودخانه در ماه‌های خرداد تا آبان با کمبود حبابه زیست‌محیطی مواجه است که احتمالاً به دلیل مصارف کشاورزی آب از این رودخانه در فصل زراعی است. با تحلیل آمار ۳۸ ساله ایستگاه شاهد مشاهده شد که به‌رغم عدم تغییرات محسوس در مقدار بارندگی حوضه آبریز قطورچای، جریان طبیعی رودخانه در ۱۸ ساله دوم (۱۳۷۴–۱۳۹۲) نسبت به جریان رودخانه در ۲۰ ساله نخست (۱۳۵۳–۱۳۷۳) حدود ۷۶ درصد کاهش یافته است.

- [9]. Karimi S. Evaluation of river environmental flow using hydrological methods Tennant, Tesson, FDC Shifting and RVA methods. *Journal of Eco-hydrologic*. 2010; 4 (1): 177-189 [Persian].
- [10]. Ahmadpour Z, Yasi M. Evaluation of eco-hydrology-hydraulics methods for environmental flows rivers (case study: Nazloo River, Urmia Lake Basin). *Journal of Hydraulics*. 2014; 9 (2): 69-82 [Persian].
- [11]. Gholamzadeh F, Yasi M. Evaluation of environmental flow requirements using eco-hydrologic-hydraulic methods (case study: Rozehchay River, Urmia Lake Basin), Master Thesis, Urmia University. 2015 [Persian].
- [12]. Mostafavi S, Yasi M. Evaluation of environmental flow requirements using eco-hydrologic-hydraulic methods in Baranduzchay River, Urmia Lake Basin, *Journal of water and soil investigates*. 2015; 29 (5): 1219-1231 [Persian].
- [13]. Rezayi N, Yasi M. Evaluation of environmental flow requirements using eco-hydrologic methods on Simineh River, Urmia Lake Basin, Master Thesis, Urmia University. 2015 [Persian].
- [14]. Aji S, Yasi M. Assessment of environmental flow requirements using eco-hydrologic methods on Zolachay River, Urmia Lake Basin, Master Thesis, Urmia University. 2015 [Persian].
- [15]. Habibi S, Yasi M. Evaluation of environmental flow requirements using hydrological and eco-hydrological methods on Gadarchay River, Urmia Lake Basin, Master Thesis, Urmia University. 2015 [Persian].
- [16]. Ashuri M, Yasi M. Assessment of environmental flow requirements using eco-hydrologic methods on Zarrineh River, Urmia Lake Basin, Master Thesis, Urmia University. 2015 [Persian].
- [17]. Karimi S, Salari M, Gorbani Kh. Evaluation of river environmental flow using hydrological methods Tennant, Tesson, FDC Shifting and RVA methods. *Journal of Ec-hydrologic*. 2017; 4 (1): 177-189 [Persian].
- [18]. Tennant DL. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*. 1976 Jul 1:1(4):6-10.
- [19]. Tessmann S. Environmental Assessment, Technical Appendix E in Environmental Use Sector Reconnaissance Elements of the western Dakotas Region of South Dakota study. Water Resources Research Institute, South Dakota State University, Brookings, SD. 1980.
- [20]. Hughes DA, Smakhtin VU. Daily flow time series patching or extension: a spatial interpolation approach based on flow duration curves. *Journal of Hydrological Sciences*. 1996; 41(6): 851-871.
- [21]. Smakhtin VU, Revenga C, Doll P. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. *Water International*. 2004; 29: 307-317.
- [22]. Smakhtin VY, Anputhas M. An assessment of environmental flow requirements of Indian River basins. IWMI Research Report 107. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 2006, 36pp.
- [23]. Smakhtin VU, Eriyagama N. Developing a software package for global desktop assessment of environmental flows. *Environmental Modelling & Software*. 2008 Dec 31:23(12):1396-406.
- [24]. Hughes DA, Hannart P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology*. 2003 Jan 31:270(3):167-81.