

ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود لرستان با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی

حسین یوسفی^۱، بابک شاهی‌نژاد^{۲*}، علی کاکاوند^۲، مریم میر بیگ سبزواری^۲، سیده حدیث شاهرخی^۲

۱. دانشیار گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

۳. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۱۱/۰۳، تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۰۲/۲۳)

چکیده

با توجه بحران جهانی آب، لزوم برنامه‌ریزی در حفظ و بقای آب از مهم‌ترین برنامه‌های توسعه هر کشور است. به‌منظور حفظ اکوسیستم‌های موجود در حوضه‌های آبریز و همچنین، به دلیل کمبود منابع آب و توزیع نامناسب زمانی و مکانی بارش در کشور، باید نیازهای زیست‌محیطی رودخانه‌ها مورد توجه قرار گیرد. در پژوهش حاضر، نیاز زیست‌محیطی حوضه آبریز رودخانه هررود واقع در استان لرستان در دو ایستگاه هیدرومتری کاکارضا و دهنو طی دوره آماری بلندمدت ۴۰ ساله با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی تنانت، تسمن، جریان پایه آبیان، تحلیل منحنی تداوم جریان، تغییر منحنی تداوم جریان که از نرم‌افزار GEFC استفاده شد و اسمختین بررسی شد. آنالیز روند تغییرات آبدی حوضه کاکارضا و دهنو با استفاده از آزمون گرافیکی من‌کندال بررسی شد و نتایج نشان داد نمی‌توان روندی را برای رودخانه هررود در محل ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو متصور شد. بین روش‌های هیدرولوژیکی یادشده، روش تغییر منحنی تداوم جریان به علت در نظر گرفتن کلاس‌های مدیریتی اکولوژیکی، توجه به نوسان‌های طبیعی جریان رودخانه و تلاش برای حفظ این نوسان‌ها در جریان زیست‌محیطی پیشنهادی خود در مقایسه با سایر روش‌های مطرح‌شده کارایی بیشتری دارد. نتایج نشان داد برای حفظ نیاز زیست‌محیطی رودخانه هررود در کلاس C (کمترین وضعیت اکولوژیکی قابل قبول) در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو به ترتیب ۴۹/۴۷ و ۵۶/۳۴ درصد متوسط جریان سالانه (به ترتیب ۵/۶۳ و ۱/۴۲ مترمکعب بر ثانیه) مورد نیاز است. توجه به این نکته ضروری است که روش‌های ارائه‌شده در پژوهش حاضر، راه‌حل قطعی برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی نیستند، اما به‌کارگیری این روش‌ها در نبود اطلاعات اکولوژیکی لازم و به‌منظور برنامه‌ریزی اولیه برای مدیران، مفید خواهد بود.

کلیدواژگان: جریان سالانه، رودخانه هررود، کلاس‌های مدیریتی، منحنی تداوم جریان، نیاز زیست‌محیطی.

مقدمه

تقریباً از ۵۰ سال پیش، علمی به نام «جریان زیست‌محیطی رودخانه‌ها» تعریف شده است که در بیشتر کشورها به‌عنوان کمترین جریان زیست‌محیطی استفاده می‌شود. [۱] برای تعیین میزان آب قابل برداشت از رودخانه باید به جریان زیست‌محیطی توجه ویژه‌ای کرد. جریان زیست‌محیطی عبارت است از: کمیت و کیفیتی از آب که برای حفظ یک ویژگی اکولوژیکی مشخص منابع آب به منظور تأمین پایداری کارکردها و خدمات یک اکوسیستم آبی، مورد نیاز است. [۲] مداخلات بشر در رودخانه‌ها از جمله احداث سدهای مخزنی و انحرافی، برداشت آب برای کشاورزی و تأمین آب برای شرب و صنعت، کارکردهای زیستی رودخانه‌ها را دگرگون می‌کند. بنابراین، برای تأمین نیازهای انسانی، باید نیازهای زیست‌محیطی اکوسیستم منطقه را نیز در نظر گرفت [۳] تنوع در زیستگاه رودخانه‌ای کارکرد زیادی در حفظ حیات جانوری دارد. هر گونه دست‌کاری و ایجاد تغییر و ایجاد تغییر در اکوسیستم رودخانه‌ها موجب تغییر در رژیم جریان و بار رسوبی می‌شود [۴] برگکمپ و همکاران [۵] با مطالعه ۲۲۵ حوضه در سراسر جهان، به این نتیجه رسیدند که در ۸۳ مورد (۳۷ درصد) از رودخانه‌ها بسیار زیاد و در ۵۴ مورد (۲۴ درصد) دیگر به‌طور متوسط، جریان زیست‌محیطی نادیده گرفته شده است.

علم محیط زیست، ارزیابی جریان زیست‌محیطی را در چهار طبقه ۱- هیدرولوژیکی ۲- میزان هیدرولوژیکی ۳- شبیه‌سازی زیستگاه ۴- روش‌های جامع‌نگر قرار می‌دهد. یک وجه مشترک در میان همه این روش‌ها آن است که در مواجهه با برداشت از رودخانه‌ها تلاش دارند تا درجه‌ای از تغییر را که می‌توان بر یک رودخانه‌ای اعمال کرد تا به محیط و موجودات زنده و غیرزنده آسیبی وارد نشود، تعیین کنند [۶].

از میان روش‌های یادشده، گرایش زیادی به استفاده از روش‌های ساده هیدرولوژیکی وجود دارد [۷ و ۸] روش تنانت یا مونتانا درصدی از میانگین جریان سالانه را به‌عنوان جریان زیست‌محیطی مورد نیاز برای حفظ شرایط اکولوژیکی رودخانه در نظر می‌گیرد [۹].

روش‌های هیدرولوژیکی از دبی جریان در یک مقیاس زمانی ماهانه یا روزانه به‌منظور تعیین جریان

زیست‌محیطی استفاده می‌کنند. روش‌های پیچیده زیستگاهی، جامع و ترکیبی مانند روش جریان افزایشی درون رودخانه هرچند از دقت بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها برخوردارند، ولی نیاز به اطلاعات دقیق زیست‌محیطی و برنامه‌های کاربردی دارد که در عمل استفاده از این روش‌ها را بسیار محدود می‌کند. در این میان، روش محیط خیس‌شده به دلیل رویکرد دقیق و تعریف روشن ریاضی از طریق تعیین نقطه بحرانی در رابطه بین محیط خیس‌شده (طول تماس مرطوب بین جریان و کانال، عمود بر مسیر جریان (و دبی جریان، همچنین استفاده از داده‌های هیدرولیک رودخانه از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است. [۱۰ و ۱۱]

لیس و یانگ [۱۲] مطالعه‌ای را با هدف ارزیابی ارتباط بین جریان زیست‌محیطی و مصارف اجتماعی - اقتصادی منابع آب شهر پکن با استفاده از آنالیز ساختاری شبکه برای دو دوره آماری از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ و ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ انجام دادند. انتظار می‌رود که این روش در آینده‌ای نزدیک، توسعه یابد و به ابزاری مفید برای بررسی رابطه بین جریان زیست‌محیطی با سایر مصرف‌کنندگان منابع آب تبدیل شود.

شکوهری و بهروزنیا [۱۳] در مطالعه‌ای برای تعیین حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه‌ها دو روش هیدرولوژیکی را با یک روش هیدرولوژیکی متداول به نام روش تنانت مقایسه کرده‌اند. در این مطالعه نشان داده شد که استفاده از روش مونتانا می‌تواند انتخاب نامناسب برای تعیین جریان حداقل برای حفظ محیط اکولوژیکی رودخانه باشد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش یادشده از میان دو روش هیدرولوژیکی شیب منحنی و حداکثر انحنای منحنی، روش دوم نتایج بهتری را به دست می‌دهد. روش شیب منحنی برای حداقل دبی زیست‌محیطی مقادیری را توصیه می‌کند که بسیار بزرگ‌تر از دبی متوسط رودخانه است که می‌تواند در مناطق دارای بحران آب سؤال‌برانگیز باشد.

آلفردسن و همکاران [۱۴] یک رژیم جریان زیست‌محیطی را روی رودخانه دلیلو در غرب کشور نروژ توسعه داده و نشان دادند که چگونه رژیم جریان زیست‌محیطی متغیر می‌تواند در عمل به‌گونه‌ای اجرا شود که متناسب با قوانین فعلی نروژ باشد. کایسی و همکاران [۱۵] شش روش اندازه‌گیری جریان زیست‌محیطی را با استفاده از

میانگین جریان سالانه در رودخانه قره‌سو به ترتیب، ۰/۸۵۶، ۰/۱۲۲، ۱/۶۳ مترمکعب بر ثانیه، جریان زیست‌محیطی را برآورد می‌کنند. مدل شبیه‌سازی زیستگاه، کارا تر از روش‌های هیدرولوژیکی عمل کرد. ولچک و همکاران [۲۲] جریان زیست‌محیطی رودخانه یاسلدا در کشور بلاروس را با استفاده از ۴ روش مختلف شامل روش دبی کمتر، مطالعات میدانی، افزایش احتمال تخطی و دبی‌های متناسب بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان داد روش‌های یادشده، جواب‌های مشابهی را ارائه می‌دهند که این موضوع، به علت در نظر گرفتن شرایط یکسان اجتماعی و اقتصادی در ارائه این روش‌ها است. حسین‌پور و همکاران [۲۳] نیاز زیست‌محیطی رودخانه دوآب صمصامی (واقع در کوهرنگ، چهارمحال و بختیاری) را بر اساس روش هیدرولوژیکی تنانت و دو روش هیدرولیکی شیب منحنی و حداکثر انحنا محاسبه کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد جریان پیشنهادی از روش تنانت در نیمه کم‌آب سال نمی‌تواند پاسخ‌گوی نیاز رودخانه باشد، همچنین روش حداکثر انحنا برآورد بهتری نسبت به روش شیب منحنی دارد.

محمود و همکاران [۲۴] طی پژوهشی به ارزیابی الزامات جریان زیست‌محیطی برای سه رودخانه لانسنگ، یانگ تسه و زرد در کشور چین پرداختند که در توسعه پایدار منطقه نقش مهمی ایفا می‌کنند. برای این کار، از چهار روش تغییر منحنی تداوم جریان، تنانت، آنالیز منحنی تداوم جریان و روش شاخص جریان کم استفاده شد. آنها نشان دادند هر سه رودخانه از اکوسیستم ساحلی پایداری برخوردار هستند و پیشنهاد دادند که مطالعه جامعی با در نظر گرفتن داده‌های اکولوژیکی انجام شود. حفظ پایداری اکوسیستم‌های آبی با توجه به رابطه تنگاتنگ با مدیریت رودخانه و طرح‌های احیای آن در سال‌های اخیر در بین جوامع بین‌المللی، مورد توجه قرار گرفته و اهمیت زیادی یافته است. [۲۵ و ۲۶] در این پژوهش به ارزیابی روش‌های هیدرولوژیکی تنانت، تسمن، جریان پایه آبیان (ABF)^۱، تحلیل منحنی تداوم جریان، تغییر منحنی تداوم جریان و اسمختین^۲ برای تعیین حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود واقع در استان لرستان که

داده‌های ۵۲ ایستگاه هیدرومتری در استان مایتیم در کشور کانادا انجام دادند. این مطالعه، اهمیت رژیم جریان هیدرولوژیکی به‌ویژه با مؤلفه جریان پایه را به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده مهم در سطح حفاظت جریان داخل رودخانه نشان داد. مصطفوی [۱۶] با ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه باراندوزچای به این نتیجه رسید که جریان پیشنهادی توسط روش منحنی تداوم جریان در کلاس C با در نظر گرفتن شرایط اکولوژیکی و هیدرولوژیکی به‌عنوان حداقل جریان زیست‌محیطی برای رودخانه باراندوزچای در نظر گرفته شود. صدیق کیا و همکاران [۱۷] بیان داشتند که در صورت استفاده از روش‌هایی مانند تنانت برای تخمین کمترین جریان زیست‌محیطی طبق سری زمانی زیستگاهی، تنش‌های جبران‌ناپذیری برای اکوسیستم رودخانه دلپچای ایجاد می‌شود.

در بررسی نیاز زیست‌محیطی، محافظت و احیای زیستگاه تخم‌ریزی گونه قزل‌آلا در حوضه سیمین‌دشت تهران با استفاده از روش تنانت برای ماه آوریل تا سپتامبر ۶۰ درصد و برای ماه اکتبر تا مارس ۱۲۰ درصد میانگین جریان سالیانه و بر اساس تکنیک شبیه‌سازی زیستگاه ۶۳ درصد میانگین جریان سالیانه برآورد شد [۱۸].

شکوهی [۱۹] طی پژوهشی روش‌های هیدرولوژیکی را بررسی کرد و نشان داد هندسه مقاطع رودخانه (به‌ویژه عمق کانال)، عامل مهم مؤثر بر جریان‌های زیست‌محیطی در رودخانه‌ها است. کریمی و همکاران [۲۰] با استفاده از روش تنانت برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه زهره گفتند که روش تنانت به تخصیص ۱۰۰ درصد جریان رودخانه به نیازهای زیست‌محیطی در ماه‌های مرداد و شهریور منجر می‌شود که این تخصیص مشکلات متعددی را برای دیگر بخش‌ها منتفع از جریان رودخانه فراهم می‌کند. نادری و همکاران [۲۱] در مطالعه‌ای به تبیین رژیم اکولوژیکی رودخانه قره‌سو به‌منظور برآورد جریان زیست‌محیطی و مقایسه با روش‌های هیدرولوژیکی پرداختند. بر اساس ارزیابی اکولوژیکی، روش تنانت نیاز آبی زیست‌محیطی رودخانه قره‌سو را ۳۰ درصد متوسط دبی سالانه برای فصول بهار و تابستان و ۱۰ درصد متوسط دبی سالانه برای فصول پاییز و زمستان به ترتیب مقادیر ۷۵/۰ و ۱۹/۰ مترمکعب بر ثانیه و روش تسمن ۴۴ درصد، آرکانزاس ۶۴ درصد و تکنیک شبیه‌سازی زیستگاه، ۸۵ درصد

1. Aquatic Base Flow (ABF)
2. Smakhtin

سطح دریا و متوسط بارندگی سالانه آن ۵۹۱/۳ میلی‌متر محاسبه شده است.

سیستم رودخانه‌ای هررود

رودخانه هررود از ارتفاعات ۲۸۰۰ تا ۳۰۰۰ متری کوه‌های ازکن، باباخر و تخت کوه سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه در مسیر شرقی- غربی جریان می‌یابد و تقریباً از جنوب و به موازات جاده بروگرد - دورود حرکت می‌کند. طول رودخانه هررود از سرچشمه تا محل ایستگاه هیدرومتری کاکارضا، معادل ۸۳ کیلومتر بوده و آورد سالانه این رودخانه نیز حدود ۳۵۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است. در جدول ۱ نیز مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی واقع در محدوده مطالعه شده آورده شده است. شکل ۱ ارتباط هیدرولیکی رودخانه هررود و سرشاخه‌های آن با سیستم رودخانه‌ای کشکان و کرخه را نشان می‌دهد.

شکل ۲ محدوده مطالعه شده و موقعیت رودخانه هررود را نشان می‌دهد.

کارکرد مهمی در محیط زیست منطقه دارد، پرداخته می‌شود و به مقایسه این روش‌ها و انتخاب مناسب‌ترین روش برای تعیین حداقل جریان زیست‌محیطی این رودخانه که تا به حال انجام نشده است، پرداخته می‌شود.

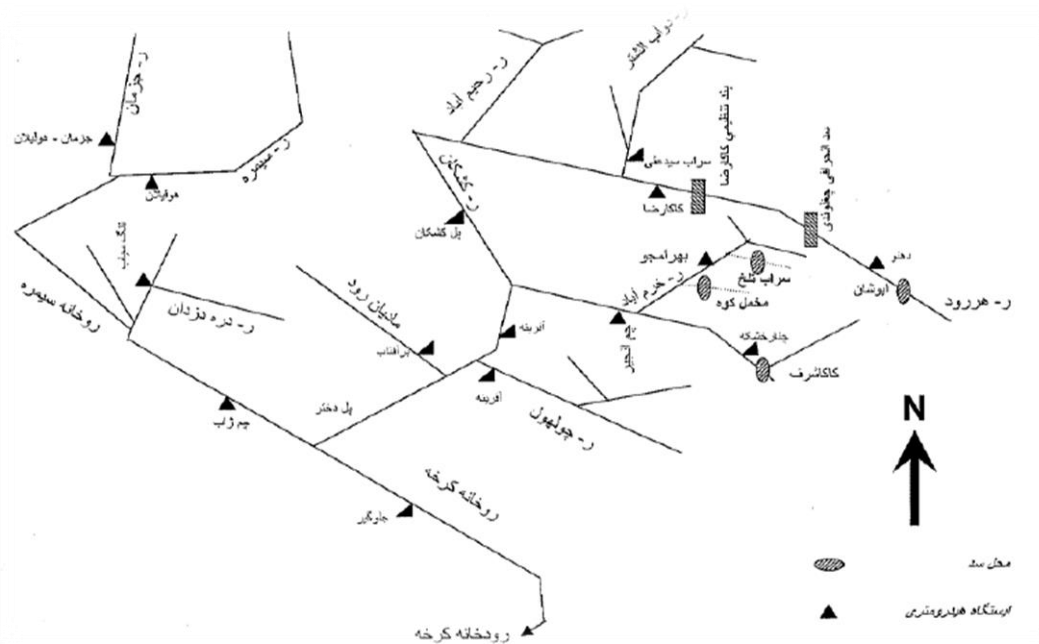
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

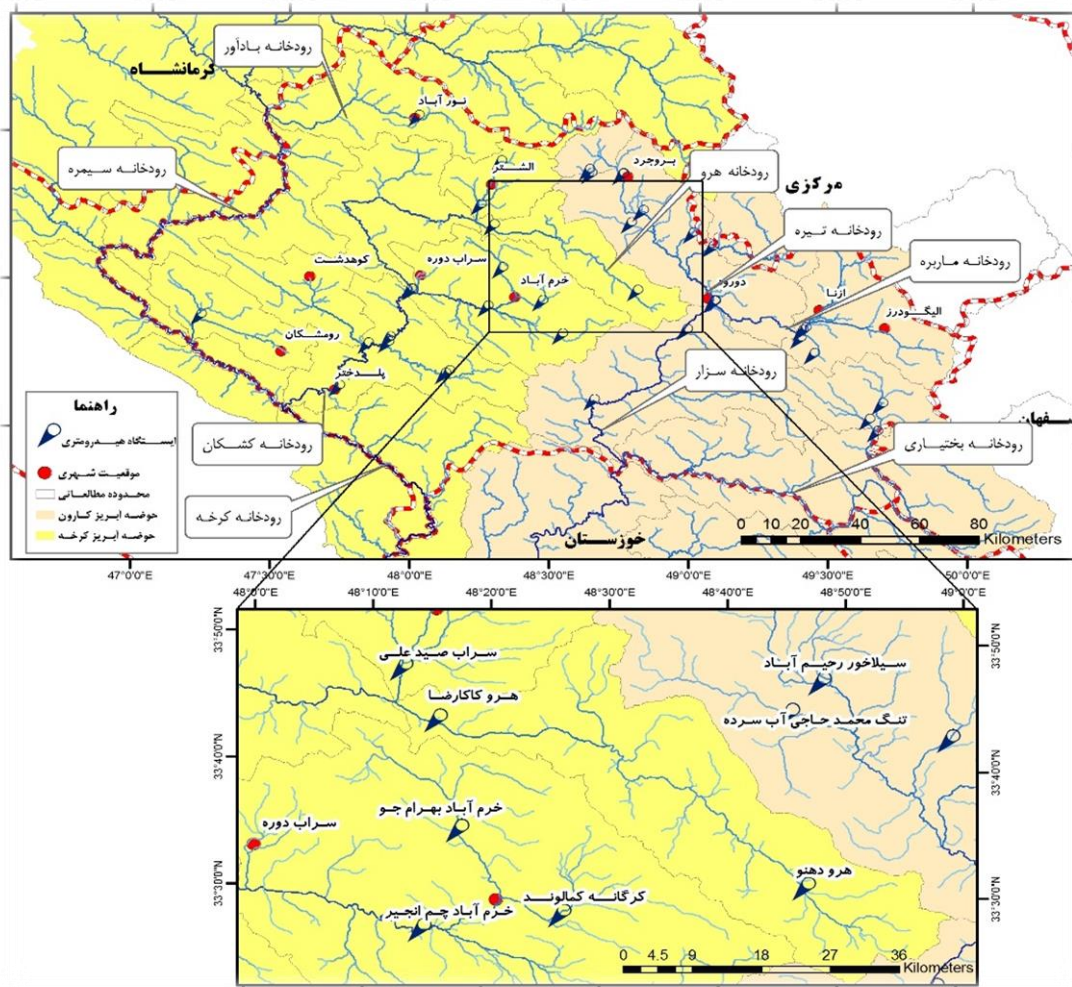
حوضه آبریز رودخانه هررود از شمال به حوضه‌های آبریز رودخانه‌های تیره و سیلاخور، از جنوب به حوضه آبریز رودخانه خرم‌آباد، از شرق به زیرحوضه‌های رودخانه بختیاری شامل رودخانه‌های تیره و ماربره و از غرب، به حوضه آبریز الشتر و رودخانه کشکان منتهی می‌شود. این حوضه به شکلی تقریباً مستطیلی از شرق به غرب گسترش یافته است. حداکثر ارتفاع در حوضه آبریز رودخانه هررود، معادل ۳۶۰۰ متر و ارتفاع نقطه خروجی آن (نقطه تمرکز حوضه) معادل ۱۵۳۰ متر از سطح آزاد دریا است. ارتفاع متوسط حوضه آبریز رودخانه هررود معادل ۲۰۳۲ متر از

جدول ۱. وضعیت شبکه آب‌سنجی ایستگاه‌های مطالعه شده

نام رودخانه - نام ایستگاه	مساحت حوضه (کیلومتر مربع)	سال تأسیس	ارتفاع ایستگاه (متر از سطح دریا)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
هررود - دهنو	۲۵۹	۱۳۴۸	۱۷۵۰	۴۸°-۴۶'-۵۳"	۳۳°-۳۰'-۳۲"
هررود - کاکارضا	۱۱۲۳	۱۳۳۳	۱۵۳۰	۴۸°-۱۵'-۰۶"	۳۳°-۴۳'-۰۶"



شکل ۱. ارتباط هیدرولیکی رودخانه هررود و سرشاخه‌های آن با سیستم رودخانه‌ای کشکان و کرخه



شکل ۲. موقعیت منطقه مطالعه‌شده

روش‌های هیدرولوژیکی مطالعه‌شده

روش‌های هیدرولوژیکی به‌عنوان ساده‌ترین روش‌های ارزیابی حقایق زیست‌محیطی، فقط درصدی از جریان متوسط سالانه رودخانه را به نیازهای زیست‌محیطی تخصیص می‌دهند. روش‌هایی که در این پژوهش استفاده شده‌اند، عبارت‌اند از:

روش تنانت (Tennant)

دونالت تنانت [۹] روشی را برای تعیین جریان زیست‌محیطی مورد نیاز ماهی‌ها ارائه کرد. این روش درصدی از متوسط جریان سالیانه را برای تعیین کیفیت زیستگاه ماهیان به کار می‌برد. تنانت نتیجه گرفت که ۱۰ درصد متوسط جریان سالیانه^۱، حداقل جریان لازم برای

روش کار

در طول رودخانه هررود، سه مقطع کنترل وجود دارد که به ترتیب دهنو، کاسیان و کاکارضا نام دارند. درخور یادآوری است که در محل ایستگاه‌های هیدرومتری دهنو و کاکارضا، اطلاعات هیدرولوژیکی فراوانی ثبت شده است، اما از محل سد انحرافی چغلوندی (کاسیان)، آمار و اطلاعات مدونی در دسترس نیست. بنابراین در این پژوهش، برای تعیین دبی زیست‌محیطی رودخانه هررود از آمار آبدهی این رودخانه به ترتیب برای یک دوره آماری ۴۰ ساله ۱۳۵۸-۱۳۵۹ تا ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در محل ایستگاه هیدرومتری کاکارضا و برای یک دوره آماری ۳۱ ساله از ۱۳۶۷-۱۳۶۸ تا ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در محل ایستگاه هیدرومتری دهنو استفاده شد.

1. Average Annual Flow (AAF)

که در آن m : مرتبه دبی در سری زمانی مرتب شده، n : کل تعداد فراوانی داده‌هاست. در این روش Q_{90} معرف جریان است که در ۹۰ درصد مواقع جریان دارد و در بیشتر موارد به عنوان حداقل جریان زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود.

روش انتقال منحنی تداوم جریان (FDC- shifting)

اسمخترین و آنپوتاس [۳۲] به منظور ارزیابی جریان محیط زیستی رودخانه‌ها نوعی رژیم هیدرولوژیکی برای حفاظت رودخانه در وضعیت اکولوژی مطلوب ارائه دادند که به اصطلاح انتقال منحنی تداوم جریان نامیده می‌شود. برای اجرای روش یادشده، در گام اول با استفاده از داده‌های جریان ماهیانه منحنی تداوم جریان^۴ (FDC) رسم می‌شود، با این تفاوت که محور احتمالاتی منحنی تداوم جریان، ۱۷ درصد احتمال وقوع معین را در بر می‌گیرد. محور عمودی این منحنی مقادیر ماهیانه جریان در مقیاس لگاریتمی است. کلاس‌های مدیریتی از جابه‌جایی^۵ عرضی به سمت چپ منحنی، در هر درصد احتمالاتی به وجود می‌آید. یک شیفت در منحنی تداوم جریان طبیعی به این معنا است که جریانی که ۹۹/۹۹ درصد مواقع رخ می‌داد، اکنون ۹۹/۹ درصد مواقع رخ می‌دهد و جریانی که ۹۹/۹ درصد مواقع رخ می‌داد، اکنون ۹۹ درصد مواقع رخ می‌دهد. در این روش معمولاً برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی، از داده‌های جریان ماهیانه رودخانه استفاده می‌شود. شش کلاس مدیریتی مطابق جدول ۲ از حالت طبیعی (A) تا کلاس بحرانی تغییر یافته (F) در این روش تعریف شده است.

جدول ۲. کلاس‌های مدیریت محیط زیستی [۳۲]

Natural	A طبیعی
Slightly modified	B اندک تغییر یافته
Moderately modified	C نسبتاً تغییر یافته
Largely modified	D تا حد زیادی تغییر یافته
Seriously modified	E به شدت تغییر یافته
Critically modified	F به طرز بحرانی تغییر یافته

بقای کوتاه مدت ماهی‌ها است، ۳۰ درصد متوسط جریان سالیانه در نظر گرفته شده قادر به حفظ وضعیت بقای نسبتاً خوب بوده و ۶۰ درصد متوسط جریان سالیانه برای زیستگاه مطلوب است. تنانت اظهار داشت که جریان‌های مشخصی می‌توانند به بقای وضع خاصی از زیستگاه منجر شوند و جریان‌های یادشده را زیستگاه بقای کوتاه مدت، زیستگاه حیاتی و زیستگاه عالی برای بقا نامید. در این روش، کمترین میزان رهاسازی به صورت درصد مشخصی از میانگین سالانه دبی رودخانه محاسبه می‌شود [۲۷].

روش تسمن (Tessman)

تسمن با اقتباس از پیشنهاد های فصلی روش تنانت از ترکیب متوسط جریان ماهیانه (MMF)^۱ و متوسط جریان سالیانه (MAF)^۲ برای تعیین حداقل جریان ماهانه مورد نیاز استفاده کرد که به این صورت است: اگر $0.4 MAF > MMF$ باشد، MMF به عنوان کمترین جریان ماهانه و اگر $0.4 MAF < MMF$ باشد، $0.4 MAF$ به عنوان کمترین جریان ماهانه و اگر $MAF < MMF$ باشد، $0.4 MMF$ به عنوان کمترین جریان ماهانه محسوب می‌شود. [۲۸]

روش جریان پایه آبزبان^۳

در این روش جریان میانه هر ماه از سال که کمترین جریان در بین ماه‌های سال را دارد، به عنوان کمترین جریان زیست‌محیطی برای حفظ حیات آبزبان و شیلات در نظر گرفته می‌شود، مگر اینکه در مواردی خاص جریان بیشتری برای تأمین نیازهای تخم‌ریزی و پرورش ماهیان مورد نیاز باشد. [۲۹]

روش منحنی تداوم جریان

منحنی تداوم جریان نشان‌دهنده ارتباط بین جریان رودخانه و درصدی از احتمال وقوع آن است. این ارتباط بر اساس قضاوت‌های کارشناسی مشخص می‌شود. [۳۰] منحنی تداوم جریان با مرتب کردن داده‌های آماری جریان به صورت نزولی در مقابل مقدار احتمال (P) ترسیم می‌شود. احتمال وقوع هر دبی از رابطه ۱ به دست می‌آید. [۳۱]

$$P = \frac{m}{n+1} \quad (1)$$

1. Mean Monthly Flow (MMF)
2. Mean Annial Flow (MAF)
3. Aquatic Base Flow (ABF)

جدول ۳. محاسبه جریان زیست‌محیطی بر اساس روش اسمختین [۳۱]

توضیحات	نیاز جریان حداکثر (HFR)	نیاز جریان حداقل (Q ₉₀)
در حوضه‌های با رژیم متغیر که جریان بیشتر بر اثر سیلاب در فصل تر به وجود می‌آید.	HFR= 20% MAR	10% MAR > Q ₉₀
	HFR= 15% MAR	20% MAR > Q ₉₀ > 10% MAR
	HFR= 7% MAR	30% MAR > Q ₉₀ > 20% MAR
		30% MAR < Q ₉₀
در حوضه‌های با رژیم ثابت، جایی که جریان طی سال ثابت است و نیاز جریان حداقل به‌عنوان جزء اصلی در نظر گرفته می‌شود.	HFR= 0	

روش‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند، اشاره کرد. آزمون MK یکی از آزمون‌های پرکاربرد غیر پارامتریک برای تحلیل روند داده‌ها است. فرض صفر H₀ مستقل بودن و یکنواختی توزیع داده‌های نمونه و فرض مقابل H₁ وجود یک روند یکنواخت در داده‌هاست. برای انجام این آزمون ابتدا باید آماره S را با رابطه ۲ محاسبه کرد که در آن مقدار داده زام، تعداد داده‌ها و $\text{sgn}(\theta)$ تابع علامت بوده و با رابطه ۳ قابل محاسبه است.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (3)$$

برای $n \geq 8$ آماره S دارای توزیع نرمال بوده و میانگین و واریانس آن نیز محاسبه می‌شود. آماره آزمون MK یا Z با رابطه ۴ محاسبه می‌شود. احتمال آماره Z آزمون MK را می‌توان با استفاده از توزیع تجمعی نرمال محاسبه کرد. [۳۳]

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

در این پژوهش برای بررسی وجود روند در سری زمانی آبدی ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو، از آزمون گرافیکی یا نموداری من - کندال استفاده شد.

آزمون گرافیکی من - کندال

در این روش، برای شناسایی روندهای جزئی و کوتاه‌مدت،

روش اسمختین

اسمختین و همکاران [۳۱] از این روش برای بررسی ۱۲۸ حوضه آبریز در نقاط مختلف جهان به‌منظور ارزیابی وضعیت بهره‌برداری از رودخانه‌های جهان با در نظر گرفتن نیاز جریان زیست‌محیطی استفاده کردند. اسمختین نوعی 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 (EWR)^۱ به‌صورت ترکیبی از نیاز کمترین جریان زیست‌محیطی^۲ (LFR) و نیاز بیشترین جریان زیست‌محیطی^۳ (HFR) در نظر گرفته شده است. LFR کمترین آب مورد نیاز برای ماهیان و سایر موجودات آبی در سال است و HFR نیز، در موارد سیلاب و تأثیر آن در شکل رودخانه و گیاهان اطراف رودخانه پیدا می‌کند. در این روش برای آنکه شرایط رودخانه به‌صورت «نسبتاً خوب» باشد، باید LFR در آن رودخانه مساوی Q₉₀ در نظر گرفته شود. جریان Q₉₀ 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. اسمختین و همکاران حوضه‌های آبریز را در چهار کلاس طبقه‌بندی کرده و بر این اساس، مقدار HFR را به‌صورت درصدی از میانگین آورد سالانه^۴ (MAR) ارائه کرده‌اند (جدول ۳).

آزمون ناپارامتریک من - کندال

این روش به‌طور متداول و گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به کار گرفته می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای

1. Environmental Water Requirement
2. Environmental low- flow Requirement
3. Environmental high- flow Requirement
4. Mean Annual Runoff

در پایان مرحله ششم، $U(t)$ به دست می‌آید. حال برای محاسبه $U'(t)$ ، ابتدا داده‌های موجود را برعکس کرده و سپس، مراحل یادشده را تکرار می‌کنیم. در نهایت، پس از محاسبه $U(t)$ و $U'(t)$ ، آنها را در قالب یک نمودار نمایش می‌دهیم. در این حالت:

۱- اگر دو دنباله U و U' همدیگر را در خارج از محدوده $\pm 1/96$ قطع کرده و در خلاف جهت یکدیگر حرکت کنند، روند معنادار بین آنها وجود خواهد داشت. در این وضعیت، به نقطه برخورد U و U' ، نقطه جهش گفته می‌شود.

۲- اگر دو دنباله U و U' تقریباً به صورت موازی به هم حرکت کرده یا چند بار یکدیگر را بدون تغییر جهت قطع کنند، روند وجود نخواهد داشت.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمون تشخیص روند

نتایج حاصل از آنالیز روند تغییرات آبدی حوضه کاکارضا و دهنو با استفاده از آزمون گرافیکی من-کندال بر حسب مقادیر $U(t)$ و $U'(t)$ ارائه شده است. نمودار U نسبت به سال (محور x) ترسیم شده و برای ارزیابی معناداری روند، دنباله U' نیز ترسیم می‌شود. نتایج حذف روند مربوط به داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. با توجه به اینکه در هر دو شکل، دو دنباله U و U' در خارج از محدوده $\pm 1/96$ یکدیگر را قطع نمی‌کنند، بنابراین نمی‌توان روندی را برای رودخانه هررود در محل ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو متصور شد.

نقاط جهش و نقاط شروع روند، از نمودار سری زمانی بر حسب مقادیر $U(t)$ و $U'(t)$ استفاده می‌شود. به طور کلی، برای محاسبه این آزمون، ۱۲ مرحله محاسباتی وجود دارد که از این تعداد، ۶ مرحله برای محاسبه $U(t)$ و ۶ مرحله برای محاسبه $U'(t)$ استفاده می‌شوند.

مراحل انجام آزمون گرافیکی من - کندال به شرح زیر است:

مرحله اول: تعیین رتبه‌بندی برای داده‌ها (rank)
مرحله دوم: تعداد اعداد بزرگ‌تر از هر رتبه به طرف ردیف‌های بالاتر از خود محاسبه می‌شود. این مرحله، t_i نامیده می‌شود.

مرحله سوم: در این مرحله، E_i از رابطه ۵ به دست می‌آید و تابع توزیع آن در شرایطی که فرض صفر حاکم باشد، از لحاظ مجانبی با میانگین و واریانس برابر است:

$$E_i = \frac{Row \times (Row - 1)}{4} \quad (5)$$

Row: شماره ردیف.

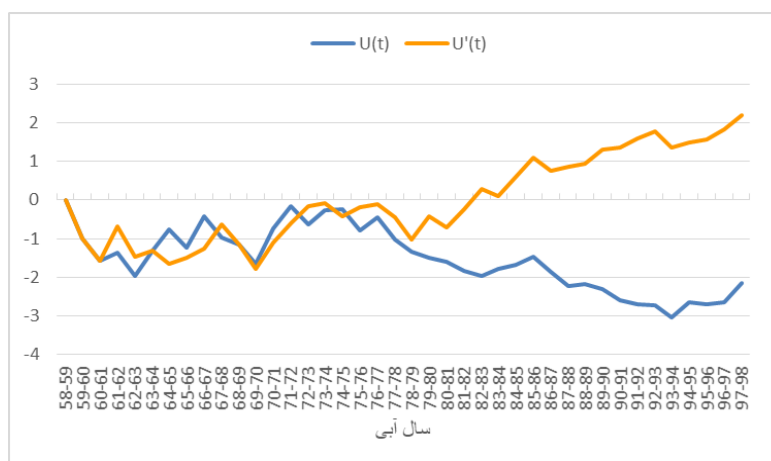
مرحله چهارم: در این مرحله، واریانس داده‌ها از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$V_i = \frac{Row(Row - 1)(2Row + 5)}{72} \quad (6)$$

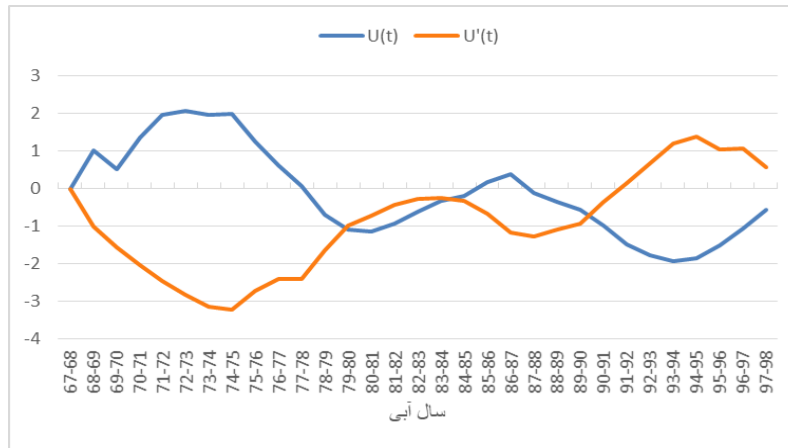
مرحله پنجم: در این مرحله، تراکم تجمعی هر مرحله (Zt_i) محاسبه می‌شود.

مرحله ششم: در مرحله ششم، از رابطه ۷ برای محاسبه $U(t)$ استفاده می‌شود.

$$U(t) = \frac{(Zt_i - E_i)}{V_i^{0.5}} \quad (7)$$



شکل ۳. نتایج حاصل از آزمون من - کندال برای آمار آبدی رودخانه هررود در محل ایستگاه هیدرومتری کاکارضا



شکل ۴. نتایج حاصل از آزمون من - کندال برای آمار آبدهی رودخانه هررود در محل ایستگاه هیدرومتری دهنو

خشکسالی و ترسالی است. همان‌طور که جدول ۵ مشاهده می‌شود. با لحاظ کردن حد متوسط، این دو دوره کم‌آبی (فروردین تا شهریور) و پرآبی (مهر تا اسفند) با شرایط هیدرولوژیکی رودخانه هررود سازگار نبوده و متفاوت است. بنابراین، در این پژوهش، ماه‌های آذر تا اردیبهشت به‌عنوان دوره پرآبی و خرداد تا آبان به‌عنوان دوره کم‌آبی مد نظر قرار داده شد. در ادامه، ۱۰ درصد از متوسط جریان سالانه برای دوره کم‌آبی و ۳۰ درصد متوسط جریان سالانه برای دوره پرآبی مد نظر قرار گرفت.

الف- نتایج روش تنانت

با توجه به متوسط سالانه آبدهی رودخانه هررود در محل ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو، جریان زیست‌محیطی این رودخانه با روش تنانت، محاسبه و نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است.

سطح مورد نظر در روش تنانت با توجه به دستورالعمل وزارت نیرو، معادل ۳۰ درصد از متوسط جریان سالانه برای ماه‌های فروردین تا شهریور و ۱۰ درصد از متوسط جریان سالانه برای ماه‌های مهر تا اسفند است. منطق به‌کاررفته در انتخاب بازه زمانی شش‌ماهه، دوره‌های کم‌آبی و پرآبی یا

جدول ۴. جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود در محل ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو با روش تنانت

ایستگاه		ایستگاه هیدرومتری کاکارضا		ایستگاه هیدرومتری دهنو	
ماه	آبدهی ماهانه (مترمکعب بر ثانیه)	دبی پیشنهادی (مترمکعب بر ثانیه)	روش تنانت اصلاح‌شده (مترمکعب بر ثانیه)	آبدهی ماهانه (مترمکعب بر ثانیه)	دبی پیشنهادی روش تنانت (مترمکعب بر ثانیه)
مهر	۲/۳	۱/۱۳۷	۱/۱۳۷	۰/۶۴	۰/۲۵۲
آبان	۴/۶	۱/۱۳۷	۱/۱۳۷	۱/۲۴	۰/۲۵۲
آذر	۷/۸۸	۱/۱۳۷	۳/۴۱۱	۲/۱۱۷	۰/۷۵۶
دی	۹/۲۹	۱/۱۳۷	۳/۴۱۱	۱/۷۶	۰/۷۵۶
بهمن	۱۳/۱	۱/۱۳۷	۳/۴۱۱	۲/۵۷	۰/۷۵۶
اسفند	۲۵/۵۴	۱/۱۳۷	۳/۴۱۱	۴/۹۱	۰/۷۵۶
فروردین	۳۷/۰۸	۳/۴۱۱	۳/۴۱۱	۷/۸۴	۰/۷۵۶
اردیبهشت	۲۳/۲۳	۳/۴۱۱	۳/۴۱۱	۴/۷۲	۰/۷۵۶
خرداد	۶/۰۲	۳/۴۱۱	۳/۴۱۱	۱/۳۴	۰/۲۵۲
تیر	۳/۱۱	۳/۴۱۱	۳/۴۱۱	۱/۰۷	۰/۲۵۲
مرداد	۲/۳۶	۳/۴۱۱	۳/۴۱۱	۱/۰۹	۰/۲۵۲
شهریور	۱/۹۸	۳/۴۱۱	۳/۴۱۱	۰/۹۴	۰/۲۵۲
میانگین	۱۱/۳۷	۲/۲۷	۲/۲۷	۲/۵۲	۰/۵۰

ب- نتایج روش تسمن

در ایستگاه دهنو نیز شرایط نسبتاً مشابهی وجود دارد. متوسط جریان زیست‌محیطی پیشنهادی رودخانه هررود در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو با استفاده از روش تسمن به ترتیب، ۵/۶۳ و ۱/۳۰ مترمکعب بر ثانیه است.

پ- نتایج روش جریان پایه آبیان (ABF)

با توجه به آبدهی ماهانه رودخانه هررود در محل ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو، نیاز زیست‌محیطی این رودخانه در ایستگاه‌های یادشده با استفاده از روش جریان پایه آبیان (ABF)، به ترتیب ۱/۹۸ و ۰/۶۴ مترمکعب بر ثانیه است (جدول ۶).

در جدول ۵ نتایج محاسبه جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل از این روش، مشاهده می‌شود که دبی زیست‌محیطی به دست آمده در ماه‌های کم‌آبی، سازگاری مناسبی با وضعیت هیدرولوژیکی رودخانه یادشده ندارد. در ایستگاه کاکارضا در ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر، جریان زیست‌محیطی، تمام جریان رودخانه را در بر می‌گیرد. همچنین، در ماه آبان نیز جریان زیست‌محیطی معادل ۹۹ درصد کل جریان رودخانه است که نشان‌دهنده برآورد زیاد جریان زیست‌محیطی در ماه‌های کم‌آبی است.

جدول ۵. جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود در محل ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو با روش تسمن

ایستگاه	ایستگاه هیدرومتری کاکارضا	ایستگاه هیدرومتری دهنو
ماه	آبدهی ماهانه (مترمکعب بر ثانیه)	جریان زیست‌محیطی پیشنهادی (مترمکعب بر ثانیه)
مهر	۲/۳	۰/۶۴
آبان	۴/۶	۱/۲۴
آذر	۷/۸۸	۲/۱۷
دی	۹/۲۹	۱/۷۶
بهمن	۱۳/۱	۲/۵۷
اسفند	۲۵/۵۴	۴/۹۱
فروردین	۳۷/۰۸	۷/۸۴
اردیبهشت	۲۳/۲۳	۴/۷۲
خرداد	۶/۰۲	۱/۳۴
تیر	۳/۱۱	۱/۰۷
مرداد	۲/۳۶	۱/۰۹
شهریور	۱/۹۸	۰/۹۴
میانگین	۱۱/۳۷	۵/۵۲

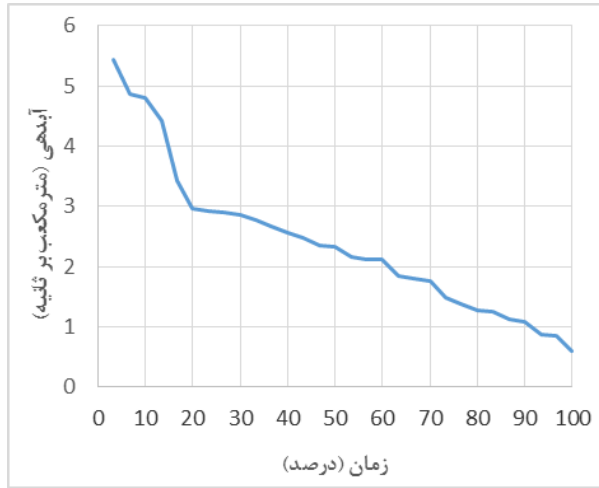
جدول ۶. جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود در محل ایستگاه‌ها با روش جریان پایه آبیان

ایستگاه	ایستگاه کاکارضا	ایستگاه دهنو
ماه	آبدهی ماهانه (مترمکعب بر ثانیه)	جریان زیست‌محیطی پیشنهادی (مترمکعب بر ثانیه)
مهر	۲/۳	۰/۶۴
آبان	۴/۶	۱/۲۴
آذر	۷/۸۸	۲/۱۷
دی	۹/۲۹	۱/۷۶
بهمن	۱۳/۱	۲/۵۷
اسفند	۲۵/۵۴	۴/۹۱
فروردین	۳۷/۰۸	۷/۸۴
اردیبهشت	۲۳/۲۳	۴/۷۲
خرداد	۶/۰۲	۱/۳۴
تیر	۳/۱۱	۱/۰۷
مرداد	۲/۳۶	۱/۰۹
شهریور	۱/۹۸	۰/۹۴
میانگین	۱۱/۳۷	۲/۵۲

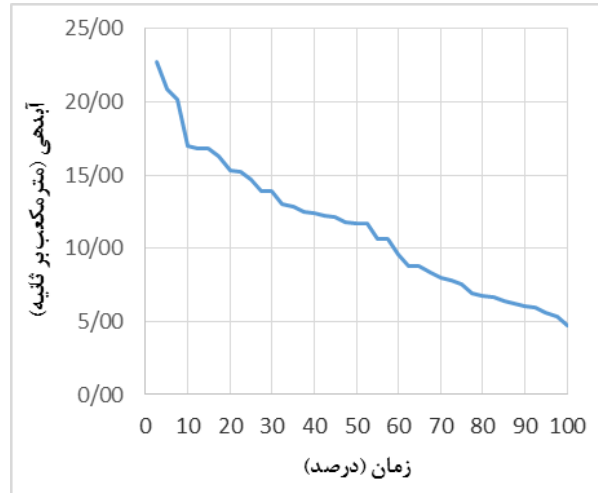
همچنین، شاخص‌های سالانه و ماهانه تداوم جریان در جدول‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.

ت- نتایج روش منحنی تداوم جریان

منحنی تداوم جریان رودخانه هررود در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده است.



شکل ۶. منحنی تداوم جریان ایستگاه دهنو



شکل ۵. منحنی تداوم جریان ایستگاه کاکارضا

جدول ۷. شاخص‌های سالانه تداوم جریان رودخانه هررود در ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو

شاخص‌های سالانه منحنی تداوم جریان (مترمکعب بر ثانیه)						
ایستگاه	Q ₇₀	Q ₇₅	Q ₈₀	Q ₈₅	Q ₉₀	Q ₉₅
کاکارضا	۸/۰۳	۷/۵۶	۶/۷۴	۶/۳۶	۶/۰۹	۵/۵۷
دهنو	۱/۷۶	۱/۴۳	۱/۲۷	۱/۲	۱/۰۹	۰/۸۵

جدول ۸. شاخص‌های ماهانه تداوم جریان رودخانه هررود در ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو

ماه	ایستگاه کاکارضا				ایستگاه دهنو			
	MMF(m ³ /s)	Q ₅₀	Q ₉₀	Q ₉₅	MMF(m ³ /s)	Q ₅₀	Q ₉₀	Q ₉₅
مهر	۲/۳	۲/۰۸	۱/۰۷	۰/۹۵	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۱۱	۰/۰۶۸
آبان	۴/۶	۳/۵	۲/۱۲	۱/۵۴	۱/۲۴	۰/۴۵	۰/۲۱	۰/۱۸۵
آذر	۷/۸۸	۵/۸۹	۳/۰۹	۳/۰۴	۲/۱۷	۱/۴۲	۰/۳۷	۰/۳۳
دی	۹/۲۹	۷/۳۵	۳/۵۹	۳/۲۶	۱/۷۶	۱/۲۷	۰/۳۵	۰/۲۳
بهمن	۱۳/۱	۱۰/۳۵	۶/۰۵	۵/۸۸	۲/۵۷	۲/۰۶	۰/۶۸	۰/۶۴
اسفند	۲۵/۵۴	۲۰/۸	۹/۴۴	۶/۸۲	۴/۹۱	۴/۷۳	۱/۲۷	۱
فروردین	۳۷/۰۸	۳۲/۲	۱۲/۱	۱۱/۳۴	۷/۸۴	۶/۳	۲/۲۶	۱/۴۴
اردیبهشت	۲۳/۲۳	۲۰/۴۸	۶/۵۶	۵/۲۳	۴/۷۲	۳/۲۵	۱/۱۸	۰/۸۵
خرداد	۶/۰۲	۵/۲۷	۲/۴۸	۲/۲	۱/۳۴	۰/۹۷	۰/۳۶	۰/۳۳
تیر	۳/۱۱	۳/۰۱	۱/۴	۱/۳	۱/۰۷	۰/۵۴	۰/۲۱	۰/۱۳
مرداد	۲/۳۶	۲/۴۲	۰/۹۲	۰/۸۶	۱/۰۹	۰/۴۳	۰/۱	۰/۰۸
شهریور	۱/۹۸	۲/۰۸	۰/۸۹	۰/۸۱	۰/۹۴	۰/۳	۰/۰۷	۰/۰۴
میانگین	۱۱/۳۷	۹/۶۲	۴/۱۴	۳/۶۰	۲/۵۲	۱/۸۳	۰/۶۰	۰/۴۴

ارائه شده است. توجه به این نکته ضروری است که در این روش، در هر کلاس مدیریتی، باید استفاده مناسبی از شیفت عرضی به عمل آید. تعیین تعداد شیفت‌های عرضی منحنی تداوم جریان در هر کلاس، بدون آگاهی از ارتباط بین خصوصیات اکولوژیکی و تغییرات جریان در رودخانه‌ها با رژیم‌های هیدرولوژیکی مختلف، دشوار خواهد بود. بنابراین، با توجه به نبود اطلاعات یادشده، در پژوهش حاضر، از حداقل شیفت عرضی ممکن در هر کلاس مدیریتی (یک شیفت عرضی) استفاده شد.

در روش منحنی تداوم جریان، Q_{90} معرف جریانی است که در ۹۰ درصد مواقع وجود دارد و بنابراین، به‌عنوان حداقل جریان زیست‌محیطی مورد نیاز در نظر گرفته می‌شود.

ث - نتایج روش تغییر منحنی تداوم جریان

در این روش برای محاسبه نیاز زیست‌محیطی رودخانه هررود از نرم‌افزار GEFC استفاده شد. داده‌های مورد نیاز ورودی به این نرم‌افزار، داده‌های بلندمدت (حداقل ۲۰ ساله) ماهانه است. نتایج حاصل از این روش در جدول ۹

جدول ۹. نتایج محاسبه نیاز زیست‌محیطی رودخانه هررود در ایستگاه‌ها با روش تغییر منحنی تداوم جریان

ایستگاه	متوسط آب‌دهی سالانه (مترمکعب بر ثانیه)	نیاز زیست‌محیطی بلندمدت (درصدی از متوسط جریان سالانه)				
		کلاس A	کلاس B	کلاس C	کلاس D	کلاس E
کاکارضا	۱۱/۳۷	۷۹/۴۵	۶۴/۹۵	۴۹/۴۷	۴۱/۲۶	۳۵/۴۸
دهنو	۲/۵۲	۸۰/۹۵	۶۹/۴۴	۵۶/۳۴	۵۰/۷۹	۴۵/۶۳

محل ایستگاه‌های هیدرومتری یادشده مناسب باشد. در پژوهش پیش رو بر اساس اطلاعات موجود در جدول ۲، کلاس C به‌عنوان کلاس مدیریتی مناسب انتخاب شد. با توجه به کلاس زیست‌محیطی C، دبی جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود در محل ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو به ترتیب ۵/۶۳ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۴۹/۴۷ درصد متوسط بلندمدت جریان سالانه) و ۱/۴۲ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۴۶/۳۴ درصد متوسط بلندمدت جریان سالانه) برآورد شده است.

ج - نتایج روش اسمختین

نتایج حاصل از محاسبه جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود با استفاده از روش اسمختین، در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

در جدول ۱۱ خلاصه نتایج محاسبه جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود در محل ایستگاه‌های هیدرومتری کاکارضا و دهنو با استفاده از روش‌های مختلف ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول یادشده مشاهده می‌شود، برای حفظ رودخانه هررود در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو، در کلاس A، به ترتیب ۷۹/۴۵ و ۸۰/۹۵ درصد متوسط جریان سالانه؛ در کلاس B، به ترتیب ۶۴/۹۵ و ۶۹/۴۴ درصد متوسط جریان سالانه؛ در کلاس C، ۴۹/۴۷ و ۵۶/۳۴ درصد متوسط جریان سالانه؛ در کلاس D، ۴۱/۲۶ و ۵۰/۷۹ درصد متوسط جریان سالانه؛ در کلاس E، ۳۵/۴۸ و ۴۵/۶۳ درصد متوسط جریان سالانه و در نهایت در کلاس F، ۲۹/۸۵ و ۴۱/۶۷ درصد متوسط جریان سالانه مورد نیاز است. از طرفی، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر، در روش تنانت، پیشنهاد شده است که کمترین میزان نیاز زیست‌محیطی، مطابق با شرایط بسیار ضعیف یک اکوسیستم رودخانه‌ای، معادل ۱۰ درصد متوسط آورد سالانه رودخانه است. در پژوهش حاضر، برای هر دو ایستگاه هیدرومتری کاکارضا و دهنو، درصد یادشده در کلاس آخر؛ یعنی کلاس F؛ قرار گرفته است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ۱۰ درصد پیشنهادی در روش تنانت، به‌هیچ‌وجه نمی‌تواند برای رودخانه هررود در

جدول ۱۰. نتایج محاسبه جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو با روش اسمختین

روش اسمختین		ایستگاه هیدرومتری
دهنو	کاکارضا	متوسط جریان سالانه (مترمکعب بر ثانیه)
۲/۵۲	۱۱/۳۷	نیاز جریان حداقل ($LFR = Q_{90}$) (مترمکعب بر ثانیه)
۰/۹۶۶	۲/۳۱	نیاز جریان حداکثر (HFR) (مترمکعب بر ثانیه)
۰	۰/۸	دبی زیست‌محیطی پیشنهادی مترمکعب بر ثانیه
۰/۹۶۶	۳/۱۱	

جدول ۱۱. مقادیر پیشنهادی جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود در محل ایستگاه‌ها با روش‌های مختلف

ایستگاه هیدرومتری				روش
دهنو		کاکارضا		
m ³ /s	MAR (%)	m ³ /s	MAR (%)	
۰/۲۵۲	۱۰	۱/۱۳۷	۱۰	خرداد تا آبان
۰/۷۵۶	۳۰	۳/۴۱۱	۳۰	آذر تا اردیبهشت
۱/۳	۵۱/۶	۵/۶۳	۴۹/۵	تسمن
۰/۹۶۶	۳۸/۳	۳/۱۱	۲۷/۴	اسمختین
۰/۹۴	۳۷/۳	۱/۹۸	۱۷/۴	جریان پایه آبزیان
۱/۷۶	۶۹/۸	۸/۰۳	۷۰/۶	Q ₇₀
۱/۴۲	۵۶/۷	۷/۵۶	۶۶/۵	Q ₇₅
۱/۲۷	۵۰/۴	۶/۷۴	۵۹/۳	Q ₈₀
۱/۲	۴۷/۶	۶/۳۶	۵۵/۹	Q ₈₅
۱/۰۹	۴۳/۳	۶/۰۹	۵۳/۶	Q ₉₀
۰/۸۵	۳۳/۷	۵/۵۷	۴۹	Q ₉₅
۲/۰۴	۸۰/۹۵	۹/۰۴	۷۹/۴۵	کلاس A
۱/۷۵	۶۹/۴۴	۷/۳۹	۶۴/۹۵	کلاس B
۱/۴۲	۵۶/۳۵	۵/۶۳	۴۹/۴۷	کلاس C
۱/۲۸	۵۰/۷۹	۴/۶۹	۴۱/۲۶	کلاس D
۱/۱۵	۴۵/۶۳	۴/۰۴	۳۵/۴۸	کلاس E
۱/۰۵	۴۱/۶۷	۳/۴	۲۹/۸۵	کلاس F
۱/۴۲	۵۶/۳۵	۵/۶۳	۴۹/۴۷	جریان زیست‌محیطی توصیه‌شده

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از چند روش هیدرولوژیکی برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه هررود لرستان استفاده شد. استفاده از روش تنانت در رودخانه‌های ایران که اغلب با نوسان‌های شدید آبدی مواجه هستند، باعث بروز مشکلات جدی شده، زیرا این روش در رودخانه‌های بزرگ و دائمی آمریکا به کار گرفته شده است. این روش در ماه‌های کم‌آبی، کاهش شدید آبدی رودخانه را در نظر نمی‌گیرد؛ بنابراین، توصیه می‌شود که از این روش، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک؛ تا جای ممکن استفاده نشود و در صورت دسترسی به اطلاعات مورد نیاز این روش برای هر منطقه، مورد بازبینی و اصلاح قرار گیرد. با این حال، این روش نسبت به روش‌هایی نظیر تغییر منحنی تداوم جریان؛ به هزینه اقتصادی کمتری نیاز دارد.

در پژوهش حاضر نیز روش تنانت با شرایط رودخانه هررود سازگار نیست. نتایج مطالعه شکوهی و بهروزنیا [۱۳] نیز نشان داد استفاده از روش تنانت یا مونتانا، انتخاب نامناسبی برای تعیین جریان حداقل برای حفظ محیط اکولوژیکی رودخانه است. همچنین، مطالعه صدیق کیا و همکاران [۱۷] نیز همین نتیجه را مانند پژوهش حاضر اعلام

داشتند که بهتر است از روش تنانت استفاده نشود و بیان داشتند که در صورت استفاده از روش تنانت برای تخمین کمترین جریان زیست‌محیطی طبق سری زمانی زیستگاهی، تنش‌های جبران‌ناپذیری برای اکوسیستم رودخانه دلچای ایجاد می‌شود. کریمی و همکاران [۲۰] نیز استفاده از روش تنانت برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه زهره را باعث مشکلات متعددی برای دیگر بخش‌های منتفع از جریان رودخانه دانستند. نادری و همکاران [۲۱] و حسین‌پور و همکاران [۲۳] نیز روش تنانت را برای رودخانه‌های ایران نامناسب دانستند.

روش تسمن، برگرفته از روش تنانت است و با مقایسه جریان ماهانه موجود با متوسط جریان سالانه، حداقل نیاز زیست‌محیطی مورد نیاز را در هر ماه محاسبه می‌کند. روش جریان پایه آبزیان با تعیین میزان حداقل جریان ماهانه رودخانه و معرفی آن به‌عنوان جریان زیست‌محیطی در کل ماه‌های سال، تغییرپذیری را که برای تأمین سلامت اکوسیستم منطقه، امری اجتناب‌ناپذیر است، در نظر نمی‌گیرد. در پژوهش حاضر مقدار جریان زیست‌محیطی به‌دست‌آمده از روش یادشده برای ایستگاه کاکارضا، حدود ۱۷ درصد متوسط بلندمدت آبدی این ایستگاه است، در

- framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*. 2010; 55(1):147-70.
- [3]. Brown, C., King, J. Environmental flows concept and methods. Water resource and environment technical note C-1, World Bank. 2003; 28p.
- [4]. Tabatabai MM, Nadushan RM, Hashemi S. Impact of hydrogeomorphic processes on ecological functions of brown trout habits. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2017; 14(8):1757-70.
- [5]. Bergkamp, G., McCartney, M., Dugan, P., McNeely, J. and Acreman, M. "Dams, ecosystem functions and environmental restoration", WCD Thematic Review Environmental Issues II.1, Final Report to the World Commission on Dams. Secretariat of the World Commission on Dams: Cape Town, South Africa, p. 2000; 199.
- [6]. Bahukandi KD, Ahuja NJ. Building block methodology assisted knowledge-based system for environmental-flow assessment of Suswa River of Dehradun Dist., India: A reminiscent framework, *International Research Journal of Environment Sciences*. 2013; 2(12):74-80.
- [7]. Shokoohi AL, Amini MA. Introducing a new method to determine rivers' ecological water requirement in comparison with hydrological and hydraulic methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2014; 11(3):747-56.
- [8]. Zhang H, Singh VP, Zhang Q, Gui L, Sun W. Variation in ecological flow regimes and their response to dams in the upper Yellow River basin. *Environmental Earth Science*. 2016; 75:938:1-16, doi: 10.1007/s 12665-016-5751-x.
- [9]. Tennant, D.L. In stream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1976; 1(4): 6-10.
- [10]. Liu, S. X., Mo, X. G. and J. Xia. Uncertainty analysis in estimating the minimum ecological instream flow requirements via wetted perimeter method: Curvature technique or slope technique. *Acta Geographica Sinica*, 2006; 61 (3): 273-281.
- [11]. Shang, S. H. A multiple criteria decision-making approach to estimate minimum environmental flows based on wetted perimeter. *River Research and Application*, 2008; 24: 54-67.
- [12]. Li. Yuan and Zhifeng. Yang, "Network structure analysis for environmental flow toward sustainable water use" *International Society for Environmental Information Sciences 2010 Annual Conference (ISEIS)*, 2010; p 1737-1744.
- حالی که مقدار متناظر برای ایستگاه دهنو، حدود ۳۷ درصد متوسط بلندمدت آبدهی این ایستگاه است.
- روش تحلیل منحنی تداوم جریان، معمولاً شرایط زیست‌محیطی را در نظر نمی‌گیرد که این موضوع، دقت نتایج حاصله را به شدت کاهش می‌دهد؛ اما روش تغییر منحنی تداوم جریان که در این پژوهش از نرم‌افزار GEFC استفاده شد به علت در نظر گرفتن کلاس‌های مدیریتی اکولوژیکی، توجه به نوسان‌های طبیعی جریان رودخانه و تلاش برای حفظ این نوسان‌ها در جریان زیست‌محیطی پیشنهادی خود، نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد و از کارایی بیشتری برخوردار است. در مطالعه حاضر، می‌توان گفت که روش تغییر منحنی تداوم جریان در مقایسه با سایر روش‌های مطرح‌شده، کارایی بیشتری دارد. نتایج نشان داد برای حفظ نیاز زیست‌محیطی رودخانه هررود در کلاس C (کمترین وضعیت اکولوژیکی قابل قبول) در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو به ترتیب ۴۹/۴۷ و ۵۶/۳۴ درصد متوسط جریان سالانه (به ترتیب ۵/۶۳ و ۱/۴۲ مترمکعب بر ثانیه) مورد نیاز است. مصطفوی [۱۶] نیز به این نتیجه رسید که جریان پیشنهادی توسط روش منحنی تداوم جریان در کلاس C با در نظر گرفتن شرایط اکولوژیکی و هیدرولوژیکی به‌عنوان حداقل جریان زیست‌محیطی برای رودخانه باراندوزچای در نظر گرفته شود.
- انتخاب نوعی روش مناسب برای تعیین نیاز زیست‌محیطی در بین روش‌های موجود، ساده نیست. آزمایش‌های صحرایی و انجام اندازه‌گیری‌های فراوان، موجب تسهیل در انتخاب روش بهینه می‌شود.
- در پایان، توجه به این نکته ضروری است که روش‌های ارائه‌شده در مطالعه حاضر، راه‌حل قطعی برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی نیستند. با این وجود، به‌کارگیری این روش‌ها در نبود اطلاعات اکولوژیکی لازم و به‌منظور برنامه‌ریزی اولیه برای مدیران، مفید واقع خواهد شد.

منابع

- [1]. Blanckaert K, Garcia XF, Steiger J, Uijtewaal W. Ecohydraulics: linkages between hydraulics, morphodynamics and ecological processes in rivers. *Ecohydrology*. 2013; 6(4):507-510.
- [2]. Poff NL, Richter BD, Arthington AH, Bunn SE, Naiman RJ, Kendy E, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new

- [13]. Shokoohi A., and Behrooznia M. Evaluation of environmental flows in rivers using hydrological and hydraulic methods. 9th Iranian hydraulic conference, Tarbiat Modares University, 2010; Tehran. [Persian].
- [14]. Alfredsen. K, Harby. A, Linnansaari. T, Ugedal.O. "Development of an inflow-cotrolled environmental flow regime for a Norwegian river", *River Research and Application*, Applic. 2011; 19: p 1-9.
- [15]. Caissie. J, Caissie. D, El. Jabi. N. "Hydrologically environmental flow method applied to river in the Maritime Provinces (Canada)", *River Research and Application*, Applic. 2015; 31: p 651-662.
- [16]. Mostafavi, S. Evaluation of environmental flow of Baranduz-chai River, Master of Science thesis, faculty of agriculture, Urmia University, 2013; Urmia [Persian].
- [17]. Sedighkia M, Ayyoubzadeh S.A, Hajiesmaeli M. Investigation of Requirements for Estimation of the Environmental Flow in Rivers by Hydroacoustic Methods (Case Study: Delichay River located in Tehran Province). *Journal of Ecohydrology*. 2015; 2(3):289-300.
- [18]. Sedighkia M, Ayyoubzadeh SA, Hajiesmaeli M. Modification of Tennant and Wetted Perimeter Methods in Simindasht Basin, Tehran Province. *Civil Engineering Infrastructures Journal*. 2017; 50(2):221-31.
- [19]. Shokoohi, A. Sensitivity analysis of Hydraulic models regarding hydro morphologic data derivation methods to determine environmental water requirement. *J Water Waste Water*. 2015; 26(3), 104- 115. [Persian].
- [20]. Karimi, S., Salarijazi, M., Ghorbani, Kh. River Environmental Flow Assessment Using Tennant, Tessman, FDC Shifting and DRM Hydrological Methods, *Ecohydrology*, 2018; 4(1) 177- 189. [Persian].
- [21]. Naderi, M. H., Zakerinia, M., Salari M. Using the model... in explaining the ecological regime of the river in order to estimate the environmental flow and compare it with hydrological methods (Qarasu River). *Journal of Echo Hydrology*. 2018; 5 (3): 941-955.
- [22]. Volchek. Alexander, Kirvel. Ivan, Sheshko Nikolay. "Environmental flow assessment for the Yaselda River in its Selets reservoir section", *Ecohydrology & Hydrobiology* 19, 2019; p 109–118. [Persian].
- [23]. Hosseinpour, D., Zare Bidaki, R. And Karimian Kaki, R. Use of hydraulic method in estimating the minimum environmental flow of a part of Do Samsam river in Chaharmahal and Bakhtiari province. *Journal of Natural Environment, Natural Resources of Iran*, 2019; 72 (1): 59-72.
- [24]. Mahmood. Rashid, JIA. Shaofeng, Lv. Aifeng, Zhu. Wenbin. "A preliminary assessment of environmental flow in the three rivers' source region, Qinghai Tibetan Plateau, China and suggestions", *Ecological Engineering*. 2020; 144, 105709.
- [25]. Sedighkia M, Abdoli A, Ayyoubzadeh S.A, Ahmadi A.A, Gholizadeh M. Development of the native method of environmental flow in the rivers of the southern basin of Kaspian-Lar National Park. *Journal of Ecology*. 2018; 43(3):543-560. [Persian]
- [26]. Shokoohi AL, Amini MA. Introducing a new method to determine rivers' ecological water requirement in comparison with hydrological and hydraulic methods. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2014; 11(3):747-56.
- [27]. Abdi R, Yasi M. Evaluation of environmental flow requirements using eco-hydrologic–hydraulic methods in perennial rivers. *Water Science and Technology*. 2015; 72(3):354-63.
- [28]. Tessman, SA. 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, 1980; Brookings, SD.
- [29]. Office of Standard and Technical Criteria, Planning and Budget Organization of Iran. *Drinking Water Standards*. 1992; (Publication No. 116-3), Tehran. [Persian].
- [30]. King, JM. Tharme, RE and Villers, MS. Environmental flow assessments for rivers: manual for the Building Block Methodology. *Water Research Commission Technology Transfer Report*. 2003; NO. TT131/00. Pretoria, South Africa.
- [31]. Smakhtin, VU. Revenga, C. and Doll, P. A pilot Global Assessment of Environment Water Requirement and Scarcity; *International water Resources Association*, 2004; pp 307-317.
- [32]. Smakhtin VU, Anputhas M. An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins. *IWMI Research Report107*. International Water Management Institute, 2006; Colombo.
- [33]. Torabi P H, Emamgholizadeh S. Investigation of changes in river discharge in Lorestan Province Using TFPW-MK. *Scientific Journals Management System*. 2015; 35:73-93. [Persian].