

جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سی و چهارم، تابستان ۱۳۹۹

صص ۲۰۷-۲۲۴

DOI: <https://dx.doi.org/10.22067/geo.v9i2.85447>

مقاله پژوهشی

ارزیابی نیاز جریانی زیست محیطی بستر رودخانه مرزی هریرود بعد از احداث و آبگیری سد سلما افغانستان (با روش های هیدرولوژیکی)

حجت شاکری زارع^۱ - دانشجوی دکتری مخاطرات ژئومورفولوژی - دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران

امیر کرم - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران

امیر صفاری - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران

سارا کیانی - استادیار ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران

تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۶/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۷

چکیده

در عصر حاضر با توجه به افزایش جمعیت و متناسب با آن نیاز فزاینده ساکنین کره زمین به آب، فشار بر منابع آبی تبدیل به یک چالش زیست محیطی تبدیل شده است به طوری که این مسئله به شکل جدی تری در کشورهای خشک و نیمه خشکی مانند ایران قابل رؤیت می باشد؛ به همین دلیل است که مدیریت منابع آبی به ویژه آب های سطحی تحت عنوان رژیم طبیعی جریانی به عنوان یک الگو به جهت نگهداری و حفاظت رودخانه ها به ویژه جریانات فصلی مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا مسئله تغییرپذیری رژیم جریانی به عنوان نیروی محرکه اصلی در پایداری اکوسیستم رودخانه دارای اهمیت می باشد چراکه با دست کاری فضای طبیعی بستر رودخانه ای توسط انسان ها مانند احداث سدها اثرات منفی زیست محیطی و همچنین مخاطرات زمین محیطی به ویژه برای حوضه پایین دست خود بجا خواهد گذاشت، بنابراین در پژوهش حاضر متناسب با احداث سد سلما افغانستان بر سر راه رودخانه هریرود ایران سعی گردیده تا نیاز زیست محیطی پایین دست رودخانه یعنی جایی که مرز طبیعی ایران-افغانستان و ایران-ترکمنستان محسوب می شود با بهره گیری از روش های مختلف اکو هیدرولوژی با چهار روش Tessman.Tennant، مدل ذخیره رومیزی (DRM) و انتقال منحنی تداوم جریان (FDC Shifting) برآوردهای لازم صورت پذیرد، به طوری که بر اساس نتایج حاصله، نیاز زیست محیطی رودخانه هریرود ایران در طبقه مدیریت زیستی C (حفظ حداقل شرایط زیستی رودخانه) به طور متوسط ۳۰ درصد دبی متوسط سالانه برآورد شده است. به گونه ای که مردادماه تا مهرماه دوره بحرانی رودخانه مرزی هریرود ایران تعیین شده است و این دوره باکم

آب شدن رودخانه مذکور بعد از احداث و آبیگری سد سلما در افغانستان (سال ۱۳۹۲ شمسی) در حال افزایش می‌باشد که قطعاً اثرات سوء طبیعی و زیست‌محیطی برای منطقه هریرود و همچنین چالش‌های بر زندگی مرزنشینان ایجاد خواهد نمود.

کلیدواژه‌ها: نیاز زیست‌محیطی، DRM، Tennant، FDC Shifting، رودخانه هریرود

۱- مقدمه

در طبیعت رودخانه‌ها به‌عنوان یک سیستم باز در برخی موارد به دلیل دست‌کاری‌های انسانی، رژیم هیدرولوژیکی آن بر هم می‌خورد، یکی از این عوامل انسانی اثرگذار احداث بند یا همان سد بر سر راه جریان رودخانه‌ای می‌باشد در کنار افزایش بهره‌برداری منابع آب سطحی رودخانه‌ها توسط انسان، کاهش بارندگی و همچنین تغییرات اقلیمی کاهش جریان را در پی خواهد داشت که به لحاظ ارزیابی سلامت رودخانه در مناطق مختلف کشور حائز اهمیت است (خروشی، ۱۳۹۶).

همواره هدف از ساخت سد برای بشر مدیریت منابع آب بوده است، از آنجایی که تأثیر سد بر مورفولوژی رود در مناطق نیمه‌خشک به‌مراتب شدیدتر از سایر مناطق است (پتس^۱ و همکاران ۲۰۰۵) قطعاً با ساخت سد تغییراتی حتی در مدت‌زمان کم در پایین‌دست رودخانه‌ها ایجاد می‌شود که یکی از این واکنش‌ها به هم خوردن نیاز آبی رودخانه‌ها به‌ویژه در قسمت پایین‌دست سدها و به‌تبع برای محیط‌زیست و سازه‌های انسانی محیط پیرامونی خود معضلاتی را در پی خواهد داشت؛ بنابراین یکی از چالش‌های کاهش جریان زیست‌محیطی رودخانه‌ها در نتیجه سدسازی بحث بیابان‌زایی و تشدید فرسایش بادی و تغییر در اشکال ژئومورفولوژیکی بستر رودخانه، تغییرات کیفی آب‌و‌خاک می‌باشد (کریم کشته، ۱۳۸۰) که در این موضوع و مسئله سدهای زیادی در داخل ایران و سایر کشورها می‌تواند مثال زد که نمونه بارز داخلی سدهای کوچک و بزرگی است که در مسیرهای آبی منتهی به دریاچه ارومیه احداث گردیده که امروزه اثرات منفی طبیعی و محیط‌زیستی آن را شاهد هستیم (مکنونی، ۱۳۶۷)؛ بنابراین آنچه مدنظر ماست اثرات سوء سد سلمای افغانستان بر روی نیاز آبی رودخانه هریرود ایران می‌باشد جایی که مرز طبیعی بین ایران-افغانستان و ایران-ترکمنستان می‌باشد، سدی که در ۱۶۰ کیلومتری غرب هرات یعنی در نزدیکی مرز (۶۰ کیلومتری مرز ایران - افغانستان) احداث شده و مردادماه سال ۱۳۹۴ آبیگری آن صورت پذیرفته است، با بررسی تصویر ماهواره‌ای مشخص می‌گردد که حوضه آبخیز اصلی رودخانه هریرود در خاک افغانستان بوده به‌گونه‌ای که ۷۰ درصد آب این رودخانه طویل را تأمین می‌کند. سد سلما مسائلی را در حوضه پایین‌دست خود (هریرود ایران) ایجاد کرده مانند الف - گسترش بیابان و تشدید فرسایش بادی در منطقه مرزی هریرود. ب - افت منابع آب زیرزمینی و به‌تبع کاهش رطوبت خاک و درنهایت تشدید شوری خاک (کاهش کیفیت آب سطحی و زیرسطحی) ج - مترک

شدن اراضی کشاورزی و در برخی موارد خالی از سکنه شدن روستاها د- کاهش یافتن شدید آب دریاچه سد دوستی در نتیجه کاهش منابع آب سطحی است، همه این موارد در نتیجه کاهش توان زیست‌محیطی مطابق با جریان زیست‌محیطی جریانی رخ داده است و نکته حائز اهمیت در این میان تنوع زیستی در رودخانه‌ها است که بیشتر تحت تأثیر دو عامل طبیعی و انسانی قرار دارد (امینی، ۱۳۸۷) در این بین نکته جالب و حائز اهمیت بالا آمدن بستر رودخانه هریرود ایران در برخی از نقاط بستر است، به این صورت که آن دسته از جریانات فرعی منتهی به رودخانه هریرود که نشأت گرفته از حوضه‌های آبریز داخلی است با خود رسوباتی را حمل می‌کند و این رسوبات وقتی به بستر پایه خود یعنی کف رودخانه اصلی یعنی هریرود می‌رسند ته‌نشین و رسوب‌گذاری می‌شود و دیگر جریانات گردابی شدید گذشته هریرود در کار نیست که بتواند آن‌ها را حمل و جابجا کند آن‌هم در بستر رودخانه‌ای که از نظر ژئوپلیتیکی حائز اهمیت بوده و از نظر رژیم حقوقی و معاهده‌های گذشته میان کشورها وسط آب مرز تعیین شده که از این نظر نیز چالش‌های ژئوپلیتیکی را در پی داشته است. اهمیت مسئله مورد پژوهش ما آنجا نمود پیدا می‌کند که با کم آب شدن هریرود به وسیله سد سلما، اماکن روستایی و شهری مرزی شرق ایران حذافصل تایباد تا تربت جام و بعد سرخس به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و با ادامه همین روند که خشک‌سالی‌ها سال‌های اخیر نیز به‌عنوان عاملی ثانوی است شاهد نابودی و تبدیل شدن به یک ناحیه بیابانی خواهیم بود و از همه مهم‌تر خشک شدن کامل دریاچه سد دوستی، پروژه‌ای که باهدف و سیاست تأمین آب شرب کلان‌شهر مشهد احداث شده است؛ بنابراین در این پژوهش سعی شده است با بهره‌گیری از مدل‌های اکوهیدرولوژی نیاز جریانی و اثرات کم آب شدن رودخانه هریرود ایران مورد سنجش و ارزیابی قرار گیرد، در این رابطه کارهای علمی متعددی صورت گرفته من جمله کاوندیش^۱ و دانکن^۲ (۱۹۸۶) با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی جریان زیست‌محیطی را در منطقه میسوری به دست آورده و به این نتیجه رسیدند که اغلب اوقات با مدت افت جریان متناسب می‌باشند (لطفی، ۱۳۸۰). آن‌ها با استفاده از اطلاعات هیدرولوژیکی نحوه تعیین ویژگی‌های جریان زیست‌محیطی را توصیه کردند؛ همچنین، یکی از اهداف مهم جریان زیست‌محیطی را در حفظ آبریزان آب شیرین دانستند Hu و همکاران، ۲۰۰۸ در بررسی تأثیر سدها بر وضعیت‌های اکولوژیکی در حوزه آبخیز رودخانه هان^۳ در چین از روش RVA^۴ استفاده کردند. این مطالعه نشان داد که سدها اثرات منفی شدیدی بر وضعیت اکولوژیکی حوزه آبخیز هان مخصوصاً در فصول خشک دارند. آن‌ها با استفاده از ضوابط روش Tennant و با توجه به بار آلودگی زیاد از فصول خشک از ۲۰ درصد متوسط چندساله جریان به‌عنوان نیاز زیست‌محیطی و اکولوژیکی استفاده کردند که این جریان ۲۰ درصدی پیشنهادی در محدوده

1 Cavendish

2 Duncan

3 H uaih

4 Range of Variation Approach

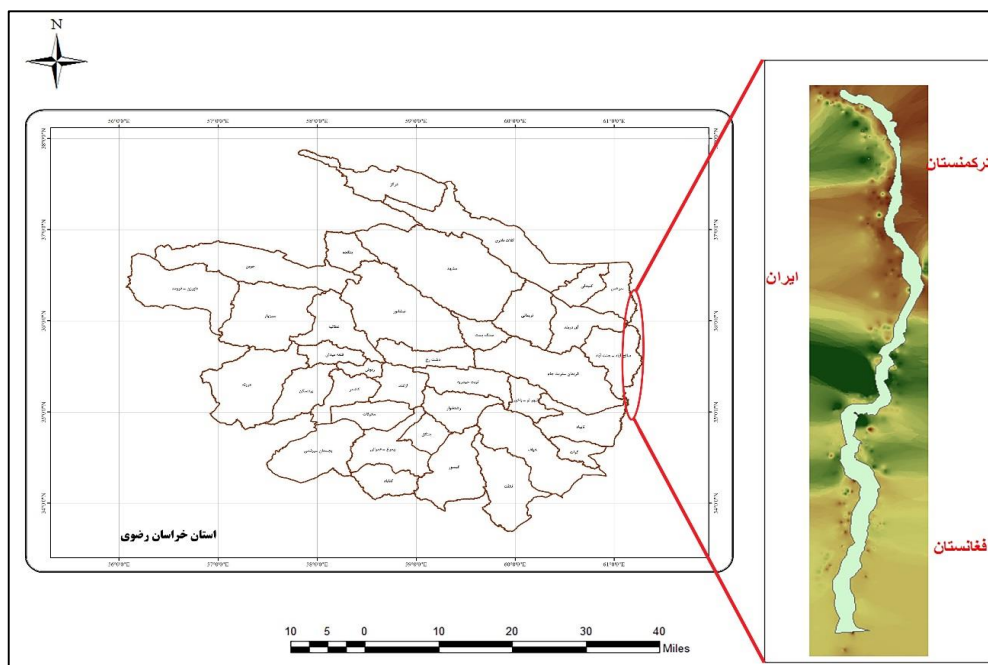
RVA متوسط جریان‌های ماهیانه در ماه‌های خشک قرار داشت (پوف^۱ و همکاران ۲۰۱۰) و متناسب با آن روشی جدید و جامع برای ارزیابی نیازهای جریان زیست‌محیطی مطابق با استانداردهای جریان زیست‌محیطی تعریف کردند. این روش که محدودیت‌های اکولوژیکی ناشی از تغییرات هیدرولوژیکی (ELOHA^۲) نام دارد، بر اساس فن‌های هیدرولوژیکی موجود پایه‌ریزی شده است. این روش قابل‌انعطاف برای مناطق مختلف بوده و برای مدیران آبی این امکان را فراهم می‌کند که بر پایه اهداف اجتماعی و اطلاعات اکولوژیکی و استانداردهای موجود، مدیریت صحیحی از جریان زیست‌محیطی داشته باشند. در رابطه با واکنش خشکسالی هیدرولوژیک در جریان تنظیمی رودخانه تحت تأثیر احداث سد در استان اردبیل امینی، اسمعیلی عوری و مصطفی‌زاده با بهره‌گیری از حد آستانه فصلی مشخصات خشکسالی ایستگاه‌های بالادست و پایین دست هر یک از سدها مورد ارزیابی قرار داده‌اند که در نهایت شدت‌های خشکسالی در تداوم‌های مختلف در نرم‌افزار Esay Fit با دوره‌های بازگشت متفاوت محاسبه شده است بطوریکه در نتایج مشخص گردید احداث سد یامچی باعث کاهش رژیم جریان در پایین دست و به تبع افزایش وقوع رخداد‌های خشکسالی هیدرولوژیک را سبب شده است. در حالی که سد سبلان باعث تعدیل و تنظیم در پایین دست شده و از شدت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی کاسته است. در رابطه با تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک جریان رودخانه‌ای کار پژوهشی خیاوی، مصطفی‌زاده و اسمعیلی عوری در رابطه با احداث سد یامچی بر سر راه رودخانه بالخلوچای با استفاده از رویکرد (RVA) تأثیر ترکیبی تغییر مؤلفه‌های اقلیمی با بهره‌گیری از نرم‌افزار IHA Software مورد بررسی و ارزیابی قرار داده‌اند که مشخص گردیده مقدار متوسط دبی جریان رودخانه در دوره بعد از احداث سد نسبت به گذشته ۵۲ درصد کاهش داشته است و در نهایت تغییر در شاخص‌های هیدرولوژیک جریان عمدتاً تحت تأثیر احداث سد بوده است؛ بنابراین متناسب با آنچه ذکر شد باید اذعان داشت با توجه به بررسی‌های کتابخانه‌ای صورت گرفته در پژوهش حاضر برای نخستین بار تلاش شده است تا با بهره‌گیری از مدل‌های اکوهیدرولوژی نیاز جریانی رودخانه هریرود مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد تا اثرات کم آب شدن رودخانه توسط سد سلما افغانستان به عنوان یکی از دخالت‌های انسانی مشخص گردد چراکه با تأیید کاهش نیاز جریانی اثرات سوء زیست محیط ناشی از کم آب شدن رودخانه در ابعاد مختلف مشخص و به جهت مدیریت منابع آبی در میان مدت و بلندمدت، مطالعات مرتبط در این حوزه برای کارشناسان سازمان‌های ذیربط مانند شرکت آب منطقه‌ای مفید واقع گردد.

1 Poff

2 Ecological limits of hydrologic alteration

۲- مواد و روش‌ها

رودخانه هریرود در نوار شرقی ایران به‌عنوان مرز طبیعی بین ایران - افغانستان و ایران - ترکمنستان تعیین شده است. آن قسمت از هریرود که از محلی به نام پیش رباط واقع در شرق شهرستان تایباد وارد ایران شده و از شرق شهرستان تربت‌جام می‌گذرد تا محل دریاچه سد دوستی واقع در جنوب شرق شهرستان سرخس می‌باشد به‌عنوان محدوده مورد مطالعه ما در نظر گرفته شده است. طول کلی حوضه مدنظر ما تقریباً ۱۹۰ کیلومتر و عرض ۵ کیلومتری را برای آن در نظر گرفتیم. محدوده مطالعاتی بین ۶۱ درجه ۰۲ و دقیقه تا ۶۱ درجه و ۱۵ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است (شکل شماره ۱) در پژوهش حاضر برای بررسی هیدرولوژیکی منطقه از آمارهای ایستگاه هیدرومتری هریرود - پل خاتون (تأسیس سال ۱۳۴۶) داده‌های سال‌های ۱۳۵۶ تا ۱۳۹۵ استفاده شده است. به‌طوری‌که جریان متوسط رودخانه هریرود ایران تا قبل از احداث سد سلما افغانستان به‌طور تقریبی ۵۰ مترمکعب بر ثانیه بوده و همچنین بارش متوسط سالانه حوزه شرق ایران محدوده رودخانه هریرود ۱۸۸/۷ میلی‌متر می‌باشد (<https://www.irimo.ir>) برابر تحقیقات کتابخانه‌ای احداث سد سلما در مدت زمان ۱۵ سال به‌عنوان بزرگ‌ترین پروژه عمرانی تاریخ افغانستان به طول انجامیده و درنهایت در مردادماه ۱۳۹۲ شمسی آبگیری دریاچه سد توسط دولت افغانستان صورت پذیرفته که همین امر موجب مسدود و کم آب شدن بستر رودخانه هریرود گردیده است (شهبازکیان، ۱۳۹۵).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی رودخانه مرزی هریرود در شرق ایران

برای مطالعه موردی رودخانه هریرود به طول تقریبی ۱۹۰ کیلومتر تا محل تأیید به دریاچه سد دوستی انتخاب شد، با توجه به نبود سوابق مطالعاتی قابل اتکا و خلأ مطالعاتی در این زمینه، این پژوهش به دنبال آن است که مقادیر مورد نظر به عنوان دبی زیست محیطی را برای منطقه مورد مطالعه ارائه نماید. در نظر گرفتن شرایط اکولوژیکی سیستم رودخانه هریرود جهت برآورد نیاز زیست محیطی از اهمیت بسیاری برخوردار است؛ چراکه اکثر روش های ارائه شده عمدتاً بدون در نظر گرفتن شرایط زیست محیطی ایران به کار برده می شوند که این امر دقت نتایج حاصله را کاهش داده و گاه حتی نتایج معکوسی را حاصل می کند. در نظر گرفتن دبی زیست محیطی رودخانه هریرود به خاطر شرایط اکوسیستم بحرانی رودخانه مخصوصاً در محدوده شهر سرخس اهمیت این رودخانه برای تأمین حق آبه قابل توجه دریاچه سد دوستی و رودخانه هریرود که اکنون از مرز هشدار گذشته است، اهمیت بسیار زیادی دارد. به همین منظور از روش های اکوهیدرولوژی شامل: تنانت^۱، تسمن^۲، ذخیره رومیزی (DRM) انتقال منحنی تداوم جریان (FDC Shifting) بهره برده ایم که هر یک را به اختصار در ادامه به آن می پردازیم.

۲-۱- روش هیدرولوژیکی Tennant

این روش درصدی متوسط جریان سالانه را برای تعیین کیفیت زیستگاه ماهیان به کار می برد. برای اولین بار از این روش برای ۵۸ مقطع عرضی ۱۱ رودخانه در مونتانا، نبراسکا بکار برده شده است که وایومینگ نتیجه گرفت که ۱۰ درصد متوسط جریان سالانه (AAF^۳) حداقل جریان برای بقای کوتاه مدت ماهی ها می باشد. ۳۰ درصد AAF در نظر گرفته شده قادر به حفظ وضعیت های بقای نسبتاً خوب بوده و ۶۰ درصد AAF برای زیستگاه مطلوب مناسب می باشد؛ که شرایط توصیف جریان ها در این روش به صورت جز به جز در جدول ۲ ارائه شده است تنانت (۱۹۷۶) سطح قابل قبول از این روش با توجه به دستورالعمل ابلاغ شده وزارت نیرو معادل ۳۰ درصد دبی متوسط سالانه برای فروردین تا شهریور (به عنوان دوره پرآبی) و ۱۰ درصد دبی متوسط سالانه برای مهر تا اسفند به عنوان دوره کم آبی می باشد (VSPSP^۴، ۲۰۱۱)

جدول ۱- نام و موقعیت ایستگاه هیدرومتری پل خاتون در بازه منتخب رودخانه هریرود

رودخانه	ایستگاه هیدرومتری	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	دوره آماری	متوسط آورد سالانه (میلیون مترمکعب)	جریان متوسط (مترمکعب بر ثانیه)
هریرود	پل خاتون	۶۱-۰۸	۳۵-۵۸	۳۷۰	۹۰-۱۳۴۶	۰/۱۵۳۳	۸/۴۹

مأخذ: مطالعات کاربردی رودخانه ها، آب منطقه ای خراسان رضوی

- 1 Tennant
- 2 tessman
- 3 Average Annually Flow
- 4 VSPSP

جدول ۲- جریان زیست‌محیطی برای حیات ماهیان و مقاصد تفریحی در روش Tennant

پارامترهای وزنی زمان	شست و شوی سریع یا حداکثر	محدوده بهینه	بسیار عالی	خوب	قابل قبول	ضعیف	بسیار ضعیف
مهر- اسفند	۲۰۰	۱۰۰-۶۰	۴۰	۲۰	۱۰	۱۰	۱۰»
فروردین- شهریور	۲۰۰	۱۰۰-۶۰	۵۰	۴۰	۳۰	۱۰	۱۰»

۲-۲- روش هیدرولوژیکی Tessman

در سال ۱۹۸۰ Tessman با اقتباس از پیشنهادهای فصلی روش Tennant ترکیبی از متوسط جریان ماهیانه^۱ و MMF^۲ و متوسط جریان سالیانه MAF^۲ برای تعیین حداقل جریان ماهیانه مورد نیاز استفاده کرد (شکل ۳)

۲-۳- روش اکو-هیدرولوژیکی مدل ذخیره رومیزی (DRM)^۳

این مدل یکی از روش‌هایی است که قادر است نیاز جریانی اکولوژیکی را در شرایطی که یک ارزیابی سریع مورد نیاز بوده و داده‌های موجود محدود است، محاسبه نماید. این مدل برای وضعیت‌های مشاهده شده در آفریقای جنوبی توسعه یافته است (دوآف^۴، ۱۹۹۷) این سیستم طبقه‌بندی نشان می‌دهد که برخی رودخانه‌ها از نظر زیست‌محیطی پراهمیت هستند، اما به دلیل نیازهای توسعه اجتماعی-اقتصادی همه رودخانه‌ها نمی‌توانند در وضعیت‌های نزدیک به شرایط طبیعی باقی بمانند؛ بنابراین چهار طبقه مدیریت زیست‌محیطی ممکن A تا D تعریف می‌شود.

طبقه A شامل رودخانه‌های طبیعی و تغییر نیافته می‌شود، طبقه B رودخانه‌های تغییر یافته ولی تا حد زیادی طبیعی، طبقه C رودخانه‌های نسبتاً تغییر یافته و طبقه D رودخانه‌های تا حد زیادی تغییر یافته با خسارات زیاد به زیستگاه طبیعی بیوتا^۵ و عملکرد اساسی اکوسیستم می‌باشد. در این دسته‌بندی‌ها، طبقه‌بندی‌های انتقالی (مثلاً B/A و C/B) نیز برای افزایش محدوده جریان‌های زیست‌محیطی ممکن است مورد استفاده قرار گیرند.

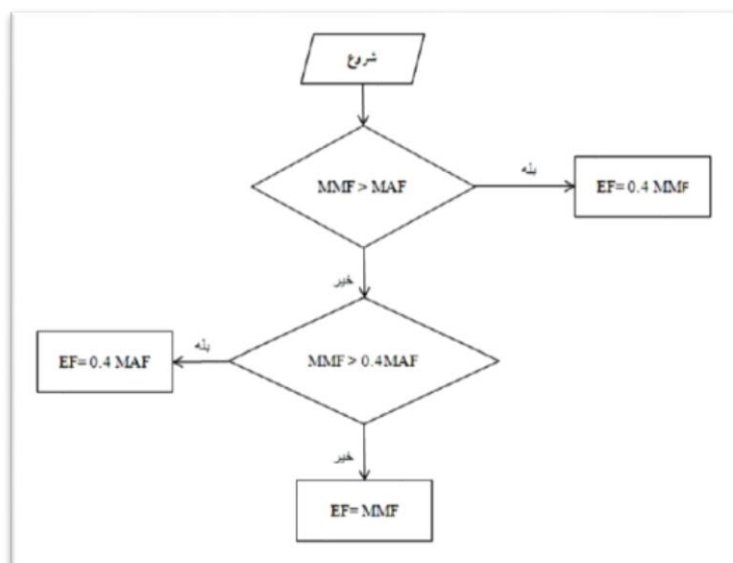
1 Mean Monthly Flow

2 Mean Annually Flow

3 Desktop Reserve Model

4 Dwaf

5 Biota .



شکل ۲- فلوجارت تعیین جریان زیست محیطی به روش Tessman

۲-۴-روش اکو-هیدرولوژیکی انتقال منحنی تداوم جریان (FDC Shifting)

این روش توسط اسمختین^۱ و آنپوتاس^۲ (۲۰۰۶) به منظور ارزیابی جریان زیست محیطی در سامانه رودخانه‌ای معرفی شده است. این روش که اصطلاحاً «انتقال منحنی تداوم جریان» نامیده می‌شود، به‌عنوان یک رژیم هیدرولوژیکی برای حفاظت رودخانه در وضعیت اکولوژیکی مطلوب ارائه شده است و شامل چهار مرحله اصلی (۱) شبیه‌سازی وضعیت‌های هیدرولوژیکی موجود، (۲) تعریف طبقه‌های مدیریت زیست محیطی، (۳) تولید منحنی‌های تداوم جریان زیست محیطی (۴) تولید سری زمانی جریان زیست محیطی ماهانه که توضیحات هر مرحله به شرح زیر می‌باشد:

الف) شبیه‌سازی وضعیت‌های هیدرولوژیکی موجود

اولین مرحله، تهیه منحنی تداوم جریان طبیعی^۳ (FDC) در بازه رودخانه‌ای مورد نظر با استفاده از داده‌های ماهیانه جریان می‌باشد. در این روش محور احتمالات منحنی تداوم جریان با نمایش ۱۷ درصد احتمال وقوع (۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱، ۰/۱) تهیه می‌شود. این نقاط تضمین می‌کنند که تمام محدوده جریان‌ها به‌قدر کافی پوشش داده شده و همین‌طور ادامه کار را در مراحل بعدی آسان می‌سازند (آنپوتاس^۴ و همکاران، ۲۰۰۶) بطوریکه در گروه تداوم جریان مقادیر ۱۰Q بر اساس FDC بایستی بر اساس مترمکعب بر ثانیه در

1 Smakhtin

2 Anputas

3 flow duration curve

4 Anputas

دوره‌های قبل و بعد از احداث سد مورد بررسی قرار گیرد و سایر مقادیر بالاتر نیز در رابطه با جریان در دوره‌های بعد از احداث سد مورد توجه می‌باشد (اسفندیاری، ۱۳۹۸).

ب) تعریف طبقه‌های مدیریت زیست‌محیطی

در ارزیابی جریان زیست‌محیطی از روش انتقال منحنی تداوم جریان، از داده‌های ماهیانه رودخانه استفاده شده و بر مبنای منحنی تداوم جریان طبیعی و موجود رودخانه، منحنی تداوم جریان زیست‌محیطی برای هر طبقه موردنظر از مدیریت زیست‌محیطی تعیین می‌شود. هدف تأمین جریان‌های زیست‌محیطی، حفظ اکوسیستم در (ارتقا آن) به وضعیت‌های موردنظر می‌باشد که به‌عنوان حالت آینده مطلوب^۱، طبقه مدیریت زیست‌محیطی^۲، رده مدیریت اکولوژیکی^۳ و یا سطح حفاظت زیست‌محیطی^۴ شناخته می‌شود. طبقه بالاتر مدیریت زیست‌محیطی به آب بیشتری جهت حفظ و نگهداری اکوسیستم نیاز خواهد داشت. در این روش شش طبقه مدیریت زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گرفت که به تفصیل در جدول شماره ۳ توضیح داده شده است (آنپوتاس و همکاران، ۲۰۰۶).

ج) تولید منحنی‌های تداوم جریان زیست‌محیطی

پس از ترسیم منحنی تداوم جریان طبیعی، در مرحله بعد با استفاده از تغییرات (شیفت) عرضی به سمت چپ در طول محور احتمال، منحنی تداوم جریان زیست‌محیطی برای هر طبقه مدیریتی محاسبه می‌شود. ۱۷ درصد احتمالاتی اشاره شده به‌عنوان گام‌های مختلف این شیفت استفاده می‌شوند. یک شیفت در منحنی تداوم جریان طبیعی به این معنی است که جریانی که ۹۹/۹۹ درصد مواقع رخ می‌داد، اکنون در ۹۹/۹ درصد مواقع رخ می‌دهد و جریانی که در ۹۹/۹ مواقع رخ می‌داد، اکنون در ۹۹ درصد مواقع رخ می‌دهد و به همین ترتیب تا ۰/۰۱ درصد. یک برون‌یابی خطی برای تعریف جریان‌های کم‌آبی جدید در پایین‌ترین دنباله از یک منحنی تغییر یافته مورد استفاده قرار می‌گیرد. (آنپوتاس و همکاران، ۲۰۰۶)

د) تولید سری زمانی جریان زیست‌محیطی ماهیانه

با استفاده از سری‌های زمانی جریان ماهیانه طبیعی رودخانه، متوسط جریان سالیانه (MAR) محاسبه می‌شود، متوسط جریان زیست‌محیطی سالیانه (MAER)^۵ نیز با استفاده از سری‌های زمانی جریان ماهیانه زیست‌محیطی تولید شده، محاسبه می‌شود. سپس با تقسیم متوسط جریان زیست‌محیطی سالیانه بر متوسط جریان سالیانه (MAER/MAR) می‌توان درصدی از MAR را که باید برای هر طبقه مدیریتی به‌عنوان جریان زیست‌محیطی در نظر

1 Desired future state

2 Environmental Management class

3 Ecological Management category

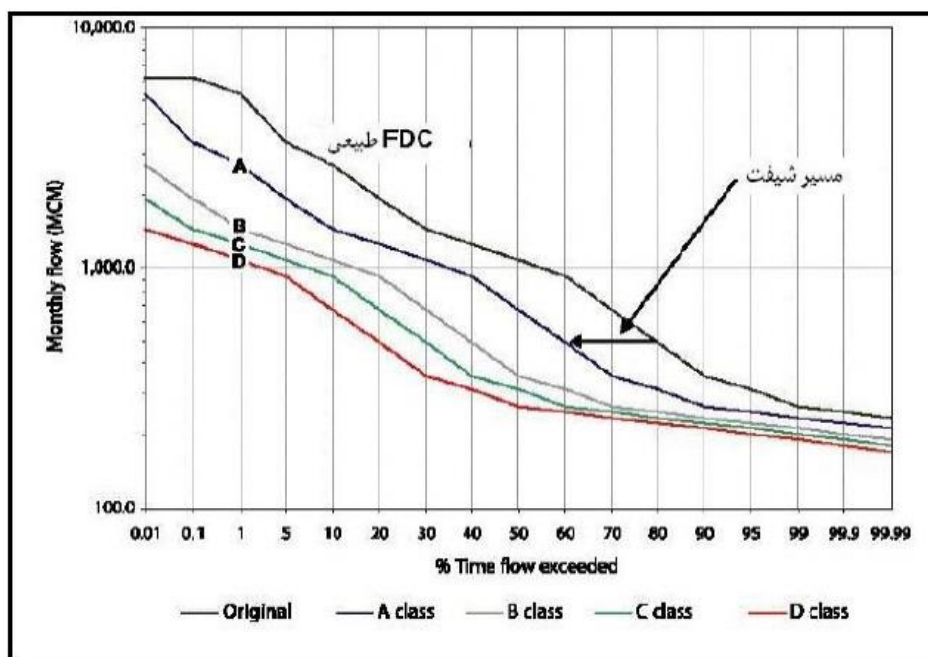
4 Level of Environmental protection

5 Mean Annual Environmental Runoff

گرفته شده را محاسبه کرد (اسمختین و همکاران، ۱۹۹۶). در روش انتقال منحنی تداوم جریان از نرم افزار GEFC استفاده می شود. داده های ورودی مورد نیاز نرم افزار، داده های بلندمدت (حداقل ۲۰ سال) جریان ماهیانه می باشد (آنیوتاس و همکاران، ۲۰۰۶) روند کار در شکل شماره ۳ نشان داده است.

جدول ۳- طبقه های مدیریت زیست محیطی در روش انتقال منحنی تداوم جریان

طبقه های مدیریت زیست محیطی (EMC)	تعریف اکولوژیکی	دیدگاه مدیریتی
A: طبیعی	وضعیت دست نخورده یا حداقل تغییرات زیستگاه ساحلی و رودخانه ای	رودخانه ها و حوضه های حفاظت شده مناطق حفاظت شده و پارک های ملی اجازه هیچ پروژه آبی (سدها، انحراف آب و ...) داده نمی شود.
B: اندک تغییر یافته	تنوع زیستی و زیستگاه های دست نخورده بیشتر با وجود توسعه منابع آبی و / یا تغییرات حوضه ای	طرح های تأمین آب یا توسعه آبیاری موجود و یا مجاز
C: نسبتاً تغییر یافته	زیستگاه ها و دینامیک بیوتا مختل شده ولی عملکردهای اساسی اکوسیستم هنوز دست نخورده اند. برخی گونه های حساس از بین رفته و یا تا حدی کاهش یافته اند. گونه های ناشناخته موجود می باشند.	موانع و مشکلات زیاد در ارتباط با نیاز برای توسعه اقتصادی- اجتماعی از قبیل سدها، پروژه- های انحراف آب، تغییرات زیستگاه و کیفیت کاهش یافته آب.
D: تا حد زیادی تغییر یافته	تغییرات وسیعی در زیستگاه طبیعی، بیوتا و عملکرد اساسی اکوسیستم رخ داده است. فراوانی گونه ها به طرز قابل وضوحی کمتر از حد انتظار است. کاهش چشمگیر گونه های غیر مقاوم (حساس) افزایش و شیوع گونه های ناشناخته	موانع کاملاً مشهود و مهم در ارتباط با توسعه منابع آبی و حوضه های شامل سدها، انحراف آب، انتقالات، تغییرات زیستگاه ها و کاهش کیفیت آب
E: به شدت تغییر یافته	تعداد و تنوع زیستگاه ها کاهش یافته است. فراوانی گونه ها به طرز شگفت آوری کمتر از حد انتظار است. فقط گونه های مقاوم باقی می ماند. گونه های بومی، نمی توانند تولید شوند. گونه های ناشناخته اکوسیستم را مورد تهاجم قرار داده اند.	تراکم جمعیت انسانی بالا و بهره برداری زیاد از منابع آبی. عموماً این حالت نباید به عنوان یک هدف مدیریتی پذیرفته شود. مداخلات مدیریتی جهت بازیابی الگوی جریان و انتقال رودخانه به یک طبقه مدیریت بالا لازم است.
F: به طرز بحرانی تغییر یافته	تغییرات به یک سطح بحرانی رسیده اند و اکوسیستم کاملاً دچار تغییرات شده و می توان گفت زیستگاه های طبیعی و بیوتا دچار تخریب کامل شده اند. در بدترین حالت عملکردهای اساسی اکوسیستم از بین رفته اند و تغییرات جبران ناپذیری هستند.	این حالت از دیدگاه مدیریت قابل قبول نیست. دخالت های مدیریتی برای بازگرداندن الگوهای جریان، زیستگاه های رودخانه ای و ... (اگر هنوز ممکن و شدنی باشد) برای جابجا کردن یک رودخانه به طبقه مدیریت بالاتر ضروری می باشد



شکل ۳- برآورد منحنی تداوم جریان زیست‌محیطی با شیفت عرضی (Anputas et al, ۲۰۰۶)

۳- نتایج و بحث

حفظ اکوسیستم سامانه رودخانه هریرود به‌عنوان مهم‌ترین تأمین‌کننده حق آبه دریاچه سد دوستی و هریرود ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چراکه بر اساس بازدیدهای میدانی حداقل ۸۰ کیلومتر از مسیر رودخانه هریرود از مقاطع مختلف پایین‌دست سد سلما یعنی هریرود ایران نشان‌دهنده این است که رودخانه مذکور شرایط مورفولوژیکی خود را از دست داده است و رودخانه عملاً قادر به تأمین حق آبه دریاچه سد دوستی و شرایط زیستی گذشته پیرامون بستر را ندارد. در این مطالعه نیاز آب زیست‌محیطی رودخانه هریرود از روش‌های مختلف هیدرولوژیکی محاسبه شد. در ادامه مقادیر به‌دست آمده دبی زیست‌محیطی حاصل از روش انتقال منحنی تداوم جریان با سه روش Tennant, DRM و Tessman مقایسه شده است.

در روش Tennant با توجه به دستورالعمل ابلاغ‌شده وزارت نیرو سطح موردنظر قابل قبول از این روش معادل MAR درصد ۳۰ برای فروردین تا شهریور و MAR درصد ۱۰ برای مهر تا اسفند می‌باشد. منطق به‌کاررفته در انتخاب بازه زمانی شش ماه، دو دوره کم‌آبی و پرآبی می‌باشد. ولی با در نظر گرفتن حد متوسط، دوره کم‌آبی (فروردین تا شهریور) و دوره پرآبی (مهرماه تا فروردین) با وضعیت هیدرولوژیکی رودخانه مورد مطالعه مطابقت ندارد و شرایط آن متفاوت است؛ بنابراین بر اساس داده‌های آب‌سنجی منطقه مورد مطالعه، ماه‌های بهمن تا اردیبهشت‌ماه را به‌عنوان ماه‌های پرآبی و ماه‌های مرداد تا دی به‌عنوان ماه‌های کم‌آبی در نظر گرفته شد. بر این اساس

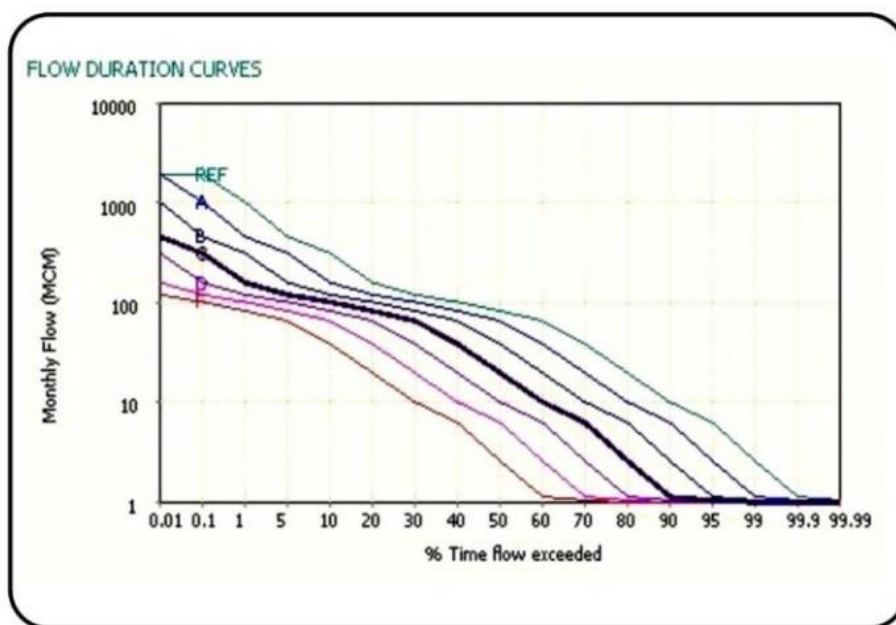
نیاز آب زیست محیطی از روش Tennant به عنوان Tennant اصلاح شده، برای ماه‌های بهمن تا تیر ۱۴/۹ مترمکعب بر ثانیه و برای ماه‌های مرداد تا دی پنج متر مکعب بر ثانیه محاسبه شد. نیاز زیست محیطی با روش تسمن در محدوده مورد مطالعه برآورد شد. با توجه به موارد مطرح شده در روش Tessman برای رودخانه هریرود به طور متوسط جریان ۲۶/۵ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۵۳ درصد دبی متوسط سالانه) به عنوان دبی زیست محیطی مورد نیاز است. توزیع ماهانه نیاز زیست محیطی از این روش در ادامه ارائه شده است. از آنجایی که دبی زیست محیطی برآوردی در برخی ماه‌ها (به عنوان مثال ماه‌های شهریور تا بهمن) تمام یا بخش عمده‌ای از جریان رودخانه را شامل می‌شود، این نتایج از نظر مدیریتی در ایران غیرقابل قبول است. با توجه به پیمایش‌های صورت گرفته رودخانه هریرود در محدوده مورد مطالعه در پایین دست سد سلما (هریرود ایران) و ارزیابی اکولوژیکی رودخانه بر اساس تعاریف موجود در روش DRM، طبقه C (حالت تغییر یافته رودخانه) به عنوان وضعیت اکولوژیکی مورد نظر برای رودخانه مورد مطالعه انتخاب شد. یکی از محدودیت‌های مدل DRM این است که این مدل در محاسبه شاخص ضریب تغییرات، ماه‌های دی تا اسفند را به عنوان ماه‌های پرآبی و ماه‌های خرداد تا مرداد را به عنوان ماه‌های کم‌آبی در نظر می‌گیرد (با توجه به شرایط آفریقای جنوبی) که این گزینه در مدل قابل تغییر نیست. این در حالی است که برای رودخانه مورد مطالعه ماه‌های اسفند تا اردیبهشت ماه‌های پر آب و ماه‌های مرداد تا مهر ماه‌های کم آب می‌باشد. برای برطرف کردن این مشکل و اطمینان از این که مدل شاخص تغییرپذیری جریان را بسیار نزدیک به واقعیت محاسبه می‌کند و از آنجایی که ماه‌های پر آب بر ماه‌های کم آب غلبه دارند، سری زمانی داده‌های جریان ماهیانه ورودی به مدل، دو ماه شیفت داده شدند (اسفند به دی تبدیل شد و به همین ترتیب تا انتها). نتایج حاصل از مدل نشان می‌دهد که به طور متوسط برای حفظ حیات رودخانه در طبقه مدیریتی C، جریان ۱۰/۶ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۲۱ درصد متوسط دبی سالانه) مورد نیاز می‌باشد. نتایج حاصل از برآورد دبی زیست محیطی از روش DRM به صورت درصدی از متوسط جریان سالانه (MAR) برای طبقه‌های زیستی A تا D در (جدول ۴) آمده است. توزیع ماهانه مقادیر به دست آمده از این روش نیز در ادامه آمده است.

جدول ۴- نیاز آب زیست محیطی رودخانه هریرود رود برحسب درصدی از MAR از روش DRM

متوسط آورد سالانه (MAR) (m^3s^{-1})	نیاز آب زیست محیطی بلند مدت (EWR) (درصدی از MAR)						
	D	C.D	C	B.C	B	A.B	A
8/45	17	19	21	24	28	34	40

همان‌طور که اشاره شد برای استفاده از روش FDC Shifting از نرم افزار GEFC استفاده شد. منحنی‌های تداوم جریان و منحنی‌های مورد نظر هر کدام از طبقه‌های زیست محیطی، در رودخانه مورد مطالعه تعیین شد که در

(شکل ۴) آمده است. همچنین، نتایج مربوط به دبی‌های زیست‌محیطی حاصل از روش انتقال منحنی تداوم جریان به صورت درصدی از متوسط جریان سالانه (MAR) در (جدول ۵) ارائه شده است. در رودخانه هریرود با توجه به پیمایش‌ها و برداشت‌های میدانی از منطقه همچنین شواهد اکولوژیکی محدود مورد مطالعه و اهمیت زیست‌محیطی رودخانه، طبقه زیستی C (حفظ حداقل شرایط زیستی رودخانه) به عنوان طبقه مدیریتی مورد نظر انتخاب شد.



شکل ۴ - منحنی تداوم جریان زیست‌محیطی در رودخانه هریرود

جدول ۵ - نیاز آب زیست‌محیطی بازه‌های مورد مطالعه از روش انتقال منحنی تداوم جریان بر حسب درصدی

MAR

متوسط آورد سالیانه (MAR) (m^3s^{-1})	نیاز آب زیست‌محیطی بلند مدت (EWR) (درصدی از MAR)					
	F	E	D	C	B	A
8/45	10	15	23	33	46	68

در روش Tennant پیشنهاد شده است که پایین‌ترین حد ممکن برای نیاز آب زیست‌محیطی مطابق با شرایط بسیار ضعیف یک اکوسیستم رودخانه‌ای، ۱۰ درصد MAR در نظر گرفته شود. با توجه به جدول ۵، در رودخانه هریرود این مقدار (MAR درصد ۱۰) در شش شیفت عرضی و به عبارت دیگر در طبقه F به دست می‌آید؛ بنابراین می‌توان گفت که حداقل جریان معادل ۱۰ درصد پیشنهادی Tennant نمی‌تواند برای شرایط رودخانه هریرود با

توجه به طبقه مدیریتی زیستی انتخاب شده مناسب باشد. با توجه به طبقه زیستی C در روش انتقال منحنی تداوم جریان، دبی زیست محیطی به طور متوسط $16/4$ مترمکعب بر ثانیه محاسبه شده است. در (جدول ۶) مقادیر متوسط سالانه شدت جریان زیست محیطی در رودخانه هریرود از روش های مختلف به کار رفته در این مطالعه ارائه شده است. همچنین در (جدول شماره ۷) توزیع ماهانه مقادیر به دست آمده برای روش های به کار رفته به نمایش گذاشته شده است.

روش انتقال منحنی تداوم جریان به عنوان یک روش ترکیبی هیدرولوژیکی - اکولوژیکی نیاز زیست محیطی را بر اساس دید اکولوژیکی در طبقه های مدیریت زیستی مختلف با توجه به شرایط زیستی رودخانه و با استفاده از آمار دبی های ماهیانه ایستگاه هیدرومتری موجود بر روی رودخانه ارائه می کند. توزیع ماهیانه شدت جریان زیست محیطی به دست آمده از روش منتخب **FDC Shifting** و دبی متوسط ماهانه در ایستگاه هیدرومتری پل خاتون (بر روی رودخانه هریرود) داده شده است (جدول شماره ۷).

مدل **DRM** تحت وضعیت های طبیعی قسمت های مختلف رژیم جریان و شرایط اکولوژیکی رودخانه مورد مطالعه نیاز آب زیست محیطی را محاسبه می کند. این مسائل در روش اکو- هیدرولوژیکی **DRM** نقش مهمی در تعیین عملکرد زیست محیطی رودخانه بازی می کند. با این حال، این مدل بر اساس شرایط اکولوژیکی کشور آفریقای جنوبی طراحی شده است؛ بنابراین، پارامترهای به کار رفته در آن با شرایط منطقه مورد مطالعه متفاوت است و در صورت استفاده در سایر اکوسیستم ها باید با ضریب اطمینان کمتری در نظر گرفته شود. هرچند با انجام صحت سنجی می توان عملکرد این مدل را بهبود بخشید، محاسبات انجام شده برای برآورد نیاز زیست محیطی از روش های هیدرولوژیکی **Tessman, Tennant** بر پایه اطلاعات هیدرولوژیکی است و نتایج به دست آمده از این روش ها به صورت مستقیم به خصوصیات اکولوژیکی سیستم رودخانه ای مربوط نمی شود. **Watt** در سال ۲۰۰۷، شاعری در سال ۱۳۹۰ و احمدپور در سال ۱۳۹۱ نیز در کارهایشان نتیجه گیری کرده اند که در نظر گرفتن پارامترهای اکولوژیکی تأثیر به سزایی در برآورد صحیح و واقع بینانه نیاز زیست محیطی دارد.

جدول ۶- مقایسه مقادیر پیشنهادی جریان زیست محیطی رودخانه هریرود از روش های مختلف

نیاز آب زیست محیطی (EWR)		روش	
میزان دبی $\%MAR(l^3 s^{-3} m)$			
68	9/33	طبقه A	FDC Shifting
46	9/22	طبقه B	

نیاز آب زیست‌محیطی (EWR)		روش	
میزان دبی (%MAR ^{1-s} m ³)			
33	4/16	طبقه C	
23	4/11	طبقه D	
15	5/7	طبقه E	
10	0/5	طبقه F	
40	9/19	طبقه A	
34	9/16	طبقه A/B	
28	8/13	طبقه B	
24	9/11	طبقه B/C	DRM
21	4/10	طبقه C	
19	4/9	طبقه C/D	
17	5/8	طبقه D	
30	9/14	بهمن - تیر	Tennant اصلاح شده
10	0/5	مرداد - دی	
53	5/26		Tessman

مأخذ: نتایج به دست آمده از مدل اصلاح شده Tennant، Tessman، تسمن، DRM، FDC Shifting.

جدول ۷- مقایسه مقادیر پیشنهادی جریان زیست‌محیطی رودخانه هریرود از روش‌های مختلف

نیاز زیست‌محیطی (CMS)				دبی متوسط ماهانه (مترمکعب بر ثانیه)	ماه
FDC Shifting	DRM	تسمن	Tennant اصلاح شده		
3/6	1/10	0/18	0/5	0/18	مهر
0/6	0/20	9/19	0/5	6/20	آبان
5/7	9/6	9/19	0/5	2/21	آذر
1/9	2/7	9/19	0/5	2/25	دی
9/10	4/5	9/19	0/15	3/28	بهمن
3/22	2/7	5/25	0/15	8/63	اسفند
1/36	8/10	0/54	0/15	9/134	فروردین
3/40	3/14	1/61	0/15	6/152	اردیبهشت

جدول ۸- مقایسه مقادیر پیشنهادی جریان زیست محیطی رودخانه هریرود از روش های مختلف

نیاز زیست محیطی (CMS)				دبی متوسط ماهانه (مترمکعب بر ثانیه)	ماه
FDC Shifting	DRM	تسمن	Tennant اصلاح شده		
8/23	9/9	2/20	0/15	4/50	خرداد
5/13	1/9	9/19	0/15	2/29	تیر
6/12	1/9	9/19	0/5	9/27	مرداد
6/11	5/25	9/19	0/5	6/25	شهریور
4/16	6/10	5/26	0/10	6/49	میانگین

مأخذ: نتایج به دست آمده از مدل اصلاح شده Tennant، تسمن، DRM، FDC Shifting.

۴- نتیجه گیری

از آنجایی که منطقه هریرود ایران به عنوان مرز طبیعی با کشورهای شرقی ایران (افغانستان و ترکمنستان) محسوب می شود گاهی تهیه داده های آماری برای فعالیت های پژوهشی به دلیل مرزی بودن منطقه دشوار می باشد، لذا در پژوهش حاضر تلاش شد تا با اصلاح داده های شرکت آب منطقه ای خراسان رضوی به یک خروجی قابل قبول برسیم، بنابراین در پژوهش حاضر با روش های مختلف اکو هیدرولوژی با چهار روش Tessman.Tennant، مدل ذخیره رومیزی (DRM) و انتقال منحنی تداوم جریان (FDC Shifting) برآوردهای لازم صورت گرفت و تلاش شد تا در زمینه به کارگیری روش های فوق اصلاحاتی انجام شود تا نزدیک به شرایط طبیعی منطقه مورد مطالعه گردد بدین صورت که در طبقه بندی های صورت گرفته حاصل از محاسبات مشخص گردید که منطقه هریرود ایران عمدتاً در طبقه زیستی C (حفظ حداقل شرایط زیستی رودخانه) قرار داشته و متناسب با وسعت بالای حوضه هریرود در خاک افغانستان و ایران مرز هشدار محسوب می شود که قطعاً مسدود شدن رودخانه هریرود بر اثر احداث و آبرگیری سد سلما اثرگذار بوده و لازم است با مطالعات مختلف از سایر جوانب این مهم بررسی مورد بررسی قرار گیرد. لازم به ذکر است روش و مقادیر پیشنهادی در این پژوهش راه حل نهایی برای مشکلات زیست محیطی رودخانه هریرود نیست. چراکه نبود اطلاعات جامع اکولوژیکی مورد نیاز در مطالعات اکوسیستم رودخانه، سبب برآورد اکو هیدرولوژیکی با ضریب اطمینان کمتری می شود.

در نهایت این نکته لازم است که مقادیر به دست آمده فقط نیاز زیست محیطی اراضی پایین دست سد سلما افغانستان یعنی محدوده رودخانه هریرود ایران را در نظر گرفته است و بقای دریاچه سد دوستی نیاز به بررسی جامع بیشتری را دارد؛ اما آنچه مشخص است با کاهش نیاز جریان زیست محیطی در نتیجه کم آب شدن رودخانه هریرود کیفیت آب

سطحی و زیرسطحی بیشتر تغییر خواهد یافت و آثار سوء بر محیط‌زیست منطقه هریرود و همچنین زندگی مرزنیسان شرقی ایران خواهد گذاشت.

کتابنامه

- اسفندیاری درآباد، فریبا؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ ۱۳۹۸. بررسی اثر احداث سد بوکان بر شاخص‌های هیدرولوژیک رودخانه زرینه‌رود بر اساس منحنی تداوم جریان. نشریه دانش آب و خاک. جلد ۲۹. شماره ۴. ص ۱۵۳.
- امینی، حامد؛ اسمعیلی عوری، اباذر؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ ۱۳۹۸. واکنش خشکسالی هیدرولوژیک در جریان تنظیمی رودخانه تحت تأثیر احداث سد در استان اردبیل. فصلنامه فیزیک زمین و فضا. دوره ۴۵. شماره ۲. ص ۴۷۳.
- امینی، سمیه؛ ۱۳۸۷. پهنه‌بندی سیل در رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های هیدرولیک و ArcGIS پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه اهواز. ص ۲۱۹.
- خروش، سعید. مصطفی‌زاده؛ رئوف. اسمعیلی عوری، اباذر؛ ۱۳۹۶. ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی شاخص سلامت هیدرولوژیک رودخانه در حوضه‌های آبخیز استان اردبیل. فصلنامه اکوهیدرولوژی. دوره ۴. شماره ۲. ص ۳۹۱.
- شائری کریمی، سعید؛ ۱۳۹۰. استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی برای ارزیابی جریان محیطی در یک رودخانه. مجله بین‌المللی علوم زیست‌محیطی و فناوری. صص ۵۴۹-۵۵۸.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان؛ ۱۳۸۸. مطالعات تلفیقی هیدروژئولوژی. تغذیه مصنوعی و آب زیرزمینی. مرحله اول. شماره گزارش ۳۰۵۸-۳۰۲۸۲-۴۳۰. مشهد.
- شهبازیکیان، محمدرضا؛ موسوی شفاپی، مسعود؛ ۱۳۹۵. تحلیلی بر احداث سد سلما بر روی رودخانه فرامرزی هریرود در کشور افغانستان. مرکز تحقیقات استراتژیک. معاونت پژوهش‌های سیاست خارجی. شماره ۱۷۸.
- کریم کشته، محمدحسین؛ کوپاهی، مجید؛ کیمیا، امیرجواد؛ ۱۳۸۰. استفاده بهینه از آب رودخانه سیستان. مطالعه موردی بخش شیب آب. مجله اقتصاد کشاورزی و توسعه. شماره ۳۵. صص ۱۹۷-۲۲۱.
- مکنون، م؛ ۱۳۶۷. اثرات زیست‌محیطی سدها مطالعه نظرات و تغییرات آن‌ها. اولین همایش هیدرولوژی. دانشکده مهندسی. تهران. ص ۱۱۸.
- نصیری خیاری، علی؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ اسمعیلی عوری، اباذر؛ ۱۳۹۸. تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک جریان رودخانه بالخلوچای ناشی از تأثیر ترکیبی تغییر مؤلفه‌های اقلیمی و احداث سد یامچی اردبیل با استفاده از رویکرد دامنه تغییرپذیری (RVA). نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز جلد ۱۱ شماره ۴. ص ۸۵۱.

- Cavendish, M.G. and M.I. Duncan., 1986. Use of the in stream flow incremental methodology: a tool for negotiation. *Environmental Impact Assessment Review*, 6: 347- 363.
- DWAF. 1997. White paper on a national water policy for South Africa, Pretoria, South Africa. Department of Water Affairs and Forestry.
- Dyson, M. G. Bergkamp and J. Scanlon., 2003. The essentials of environmental flows. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, Earth System Science, 861-876.

- Hirji, R. and T. Panella., 2003. Evolving policy reforms and experiences for addressing downstream impacts in World Bank water resources projects. *River Research and Applications*, 19: 667-681.
- Hu, W, G. Wang, W. Deng and Sh. Li., 2008. The influence of dams on eco hydrological conditions in the Huaihe River basin, China. *Ecological Engineering*, 33: 233-241.
- Hughes, D.A. and P. Hannart., 2003. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological in stream flow requirements of rivers in South Africa. *Journal of Hydrology*, 270: 167-181.
- Hughes, D.A. and V.U. Smakhtin., 1996. Daily flow time series patching or extension: a spatial interpolation approach based on flow duration curves. *Journal of Hydrological Sciences*, 41(6): 851-871.
- Poff, N.L., J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Kar and K.L. Prestegard., 1997. The natural flow regime: a paradigm for river conservation and restoration. *Bio Science*, 47: 769-784.
- Smakhtin, V.U. and M. Anputhas., 2006. An assessment of environmental flow requirements of Indian River basins. IWMI Research Report 107. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 36 pages.
- SNCE., 2012. Studies of resources and expenditures of Bukan dam and Zarrinehrood irrigation and drainage network. Sadrab Niroo Consulting Engineers, 140 pages (in Persian).
- Tennant, D.L., 1976. In stream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*, 1: 6-10.
- Tessman, S.A., 1980. 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.
- Watt, S.P., 2007. A methodology for environmental protection of Ontario watercourses with respect to the permit to take water program, MSc Thesis, Queen's University Kingston, Ontario, Canada . 126 pages.