

به کارگیری مدل PHABSIM در تبیین رژیم اکولوژیکی رودخانه به منظور برآورد جریان زیست محیطی و مقایسه با روش های هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: رودخانه قره سو)

محمدحسن نادری^۱، مهدی ذاکری نیا^{۲*}، میثم سالاری جزی^۳

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۲. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۸/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۲/۰۴)

چکیده

اختصاص آب به محیط زیست که با عنوان حق آبه زیست محیطی مطرح می شود، برای حفظ اکوسیستم رودخانه و پایین دست آن بسیار حیاتی و مهم می باشد. عدم تخصیص مناسب جریان زیست محیطی، موجب اختلال در فعالیت های حیاتی موجودات آبزی، کاهش ارتباطات بین اکوسیستم ها و دسترسی به مناطق مناسب جهت تخم ریزی و مهاجرت آبزیان گردیده است. در مطالعه حاضر روش های هیدرولوژیکی تنانت، تسمن و آرکانزاس به منظور برآورد حداقل جریان زیست محیطی و مدل شبیه سازی زیستگاه PHABSIM جهت تأمین حداقل شرایط زیستگاه برای گونه شاخص سیاه ماهی *C. capota gracilis* در رودخانه قره سو منتهی به خلیج گرگان، مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفتند. آمار مورد نیاز برای محاسبات هیدرولوژیکی نیز از ایستگاه هیدرومتری سیاه آب در طول دوره آماری ۴۴ ساله (۱۳۹۴-۱۳۵۰) استفاده شد. اندازه گیری و ثبت متغیرهای محیطی، داده های مربوط به مقاطع عرضی رودخانه شامل فاصله هر مقطع از مقطع پایین دست در اواخر خرداد ماه ۱۳۹۶، در ۴ ناحیه اصلی و مقاطع کنترل در هر ناحیه از پایین دست (مصوب رودخانه) به سمت بالادست و در طول رودخانه قره سو انجام شد. بر اساس ارزیابی اکولوژیکی، روش تنانت نیاز آب زیست محیطی رودخانه قره سو 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 ۰/۵۷ و ۰/۱۹ متر مکعب بر ثانیه و روش های تسمن ۴۴ درصد، آرکانزاس ۶۴ درصد و تکنیک شبیه سازی زیستگاه ۸۵ درصد میانگین جریان سالانه در رودخانه قره سو، به ترتیب مقادیر ۰/۸۵۶، ۱/۲۲ و ۱/۶۳ متر مکعب بر ثانیه، جریان زیست محیطی را برآورد می نمایند. با بررسی الزامات برآورد جریان زیست محیطی در رودخانه مطالعه شده، با توجه به شرایط دینامیک اکولوژیکی و زیستگاهی رودخانه، مدل شبیه سازی زیستگاه بسیار کاراتر از روش های هیدرولوژیکی ظاهر شده و پاسخ آن ها به مسئله تخصیص رژیم اکولوژیکی جریان می تواند منطقی و حافظ بقای محیط اکولوژیکی باشد.

کلیدواژگان: جریان زیست محیطی، رودخانه قره سو، روش های هیدرولوژیکی، شبیه سازی زیستگاه، مطلوبیت زیستگاه.

مقدمه

با توجه به جهانی بودن بحران آب، لزوم برنامه‌ریزی در حفظ و بقای آب کشور و استفاده بهینه از این منابع جزء مهم‌ترین برنامه‌های توسعه هر کشور است [۱]. همچنین، رودخانه‌ها و زیستگاه‌های آبی کشور، که به عنوان مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های آبی هستند، باید در برنامه‌های توسعه و بهره‌برداری منابع آب، جایگاه و برنامه خاصی برای آنها در نظر گرفته شود. به علاوه، رودخانه‌ها بدنه‌های آبی مهمی هستند که کارکردهای بوم‌شناختی درخور توجه دارند و در بیشتر موارد زیستگاه‌های باارزشی برای گروه‌های بزرگ موجودات آبی تشکیل می‌دهند [۲]. تنوع در زیستگاه‌های رودخانه‌ای کارکرد مهمی در حفظ حیات جانوری ایفا می‌کند [۳]. آریاس [۴] اعلام کرد که زیستگاه‌های رودخانه‌ای، نواحی‌ای در رودخانه هستند که با شاخص‌های فیزیکی مشخص می‌شوند و آبزیان با فعالیت‌های زیستی ویژه‌ای با آنها در ارتباط اند. هر گونه دست‌کاری و ایجاد تغییر در اکوسیستم رودخانه‌ها، موجب تغییر در رژیم جریان و بار رسوبی می‌شود [۳]. از حدود ۵۰ سال پیش مفهومی با عنوان «جریان زیست‌محیطی در رودخانه‌ها» تعریف شده است که در بیشتر کشورها به عنوان کمترین جریان زیست‌محیطی استفاده می‌شود. درخور یادآوری است که در سال‌های اخیر در تعدادی از کشورها نیاز به تعیین این جریان به صورت دینامیک، پایه‌گذاری علم جدیدی با عنوان «اکوهیدرولیک» را موجب شده است [۵-۷]. جریان زیست‌محیطی عبارت است از کمیت و کیفیتی از آب که برای حفظ یک ویژگی اکولوژیکی مشخص منابع آب برای تأمین پایداری کارکردها و خدمات یک اکوسیستم آبی مشخص مورد نیاز است [۸].

تارمه [۹] روش‌های تعیین جریان زیست‌محیطی را در چهار دسته رویکردهای هیدرولوژیکی، میزان هیدرولیکی، شبیه‌سازی زیستگاه و روش‌های جامع‌نگر قرار می‌دهد. یک وجه مشترک روش‌ها آن است که در مواجهه با برداشت از رودخانه‌ها می‌کوشند درجه‌ای از تغییر را برآورد کنند که می‌توان بر یک رودخانه اعمال کرد تا به محیط زنده و غیرزنده آسیبی وارد نشود [۱۰ و ۱۱]. در آخرین طبقه‌بندی صورت‌گرفته، آکرمین و همکارانش [۱۲] روش‌ها را به دو دسته کلی رویکرد رژیم طبیعی جریان و طراحی رژیم جریان تقسیم کردند. اکوسیستم یک رودخانه خود را با جریان درازمدت آن وفق می‌دهد و جریان طبیعی رودخانه، بهترین

جریانی است که می‌تواند در اختیار اکوسیستم رود قرار گیرد [۱۳]. روش‌های شبیه‌سازی زیستگاه به بررسی روند تغییر شرایط فیزیکی زیستگاه‌ها در دبی‌های مختلف جریان رودخانه می‌پردازند و از طریق مدل‌سازی‌های مختلف و ترکیب اطلاعات هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، بیولوژیکی، شکل کانال، ویژگی‌های بستر رودخانه در چندین سطح مقطع در رودخانه، منحنی‌هایی به دست می‌آید که ارتباط بین دبی رودخانه و دستیابی به زیستگاه را برای گونه‌های مد نظر نشان می‌دهد و در نتیجه محدوده مناسب جریان زیست‌محیطی مورد نیاز تعیین می‌شود [۱۴ و ۱۵]. کیفیت زیستگاه‌های مختلف در آب‌های جاری به وسیله موجودات آنها تعریف شده است و هیچ جریانی بیشترین زیستگاه را برای همه موجودات آبی حفظ نخواهد کرد، زیرا موجودات مختلف در نیازمندی‌های زیستگاه آب جاری با یکدیگر متفاوت‌اند [۱۶]. ماهیان به تغییرات انسانی مانند ورود ریزمغذی‌ها، آلاینده‌ها، تغییرات جریان و تغییرات زیستگاهی پاسخ معنادار و قابل پیش‌بینی می‌دهند [۱۷]. مطالعه صدیق‌کیا و همکارانش [۱۸] نشان داد در صورت استفاده از روش‌هایی مانند تنانت برای تخمین کمترین جریان زیست‌محیطی طبق سری زمانی زیستگاهی، تنش‌های جبران‌ناپذیری برای اکوسیستم رودخانه دلچای به‌خصوص در ماه‌های تخم‌ریزی گونه مد نظر (اسفند و فروردین) ایجاد می‌شود. در بررسی نیاز زیست‌محیطی، حفاظت و احیای زیستگاه تخم‌ریزی گونه قزل‌آلای رنگین‌کمان *Rainbow Trout* در حوضه سیمین‌دشت استان 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 [۱۹]. در پروژه‌های بازنده‌سازی زیستگاه رودخانه با مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه آبزیان و ارزیابی شاخص مطلوبیت زیستگاه با توجه به پارامترهای هیدرولوژیکی و ویژگی‌های زیست‌محیطی گونه شاخص، با استفاده از مدل یک‌بعدی شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه (PHABSIM) به منظور تعیین جریان زیست‌محیطی، می‌توان اقدامات لازم برای تنظیم جریان و رهاسازی از مخزن سد را به عمل آورد [۲۰ و ۲۱].

نتایج پژوهش هاشمی و همکارانش [۲۲] در بررسی تأثیر دبی بر پراکنش و فراوانی آبزیان در پاسخ به تغییرات

سیاه‌آب)، بر اساس کاربرد داده‌های دبی رودخانه به بحث گذاشته می‌شود.

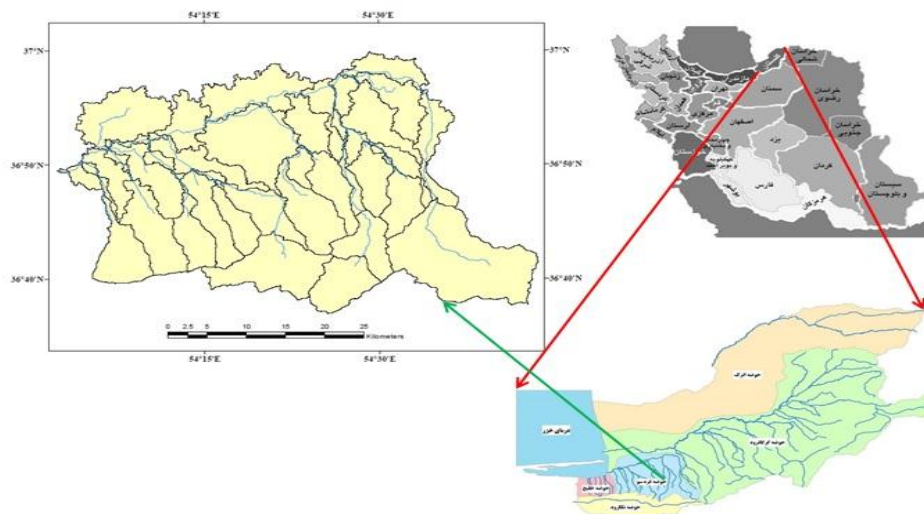
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه‌شده

حوضه آبخیز قره‌سو یکی از سه زیرحوضه آبخیز اصلی جاری در دامنه شمالی البرز و پهنه گسترده جلگه گرگان در جنوب غربی استان گلستان است که با مساحتی حدود ۱۶۳۸ کیلومتر مربع، بین مختصات جغرافیایی 37° و 54° تا 4° و 42° طول شرقی و 24° و 36° تا 48° و 59° عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). رودخانه اصلی حوضه قره‌سو از ارتفاعات کوه‌های اسب‌چر، سوس و قزیمان سرچشمه می‌گیرد و بعد از پیمودن چند دهستان بین بندر ترکمن و بندر گز در کنار روستای قره‌سو به خلیج گرگان می‌ریزد. کمینه ارتفاع حوضه ۲۶- متر در مصب خلیج گرگان و بیشینه آن ۳۲۰۰ متر در ارتفاعات گرمابدشت است. شیب رودخانه‌های حوضه قره‌سو به طور متوسط ۱/۲ درصد است. شکل عمومی حوضه پهن است و امتداد شرقی - غربی دارد و میانگین ارتفاعی حوضه ۶۲۴ متر است. متوسط بارندگی سالیانه حوضه ۵۸۱ میلی‌متر در سال است که بیشترین میزان آن، ۷۵۰ میلی‌متر مربوط به منطقه مرکزی و کمترین آن حدود ۴۰۰ میلی‌متر در دشت‌های شمالی و ارتفاعات جنوبی است. بیشترین دمای سالانه حوضه متعلق به مناطق دشت و ۱۸ سانتی‌گراد و کمترین آن مربوط به مناطق کوهستانی و دو درجه سانتی‌گراد است.

مورفولوژیک رودخانه لار، نشان داد دبی جریان، هندسه مقطع عرضی و اندازه مواد بستر، می‌تواند بر فعالیت‌ها و عملکرد زیستی زیستگاه‌های قزل‌آلای خال‌قرمز *Salmo trutta* مؤثر باشد. برای تعیین جریان محیط زیستی رودخانه باید به جنبه‌های مختلف هیدرولوژیکی و زیستگاهی تحت تأثیر دبی رودخانه توجه کرد [۲۳]. بررسی منابع علمی نشان می‌دهد به مطالعه تأثیرات هیدرولیک جریان رودخانه بر اکولوژی آن کمتر توجه شده است [۳، ۱۸، ۲۲ و ۲۴]. همچنین، حفظ پایداری اکوسیستم‌های آبی در سال‌های اخیر در میان جوامع بین‌المللی اهمیت ویژه‌ای یافته و رابطه‌ای تنگاتنگ با مدیریت رودخانه و طرح‌های احیای آن مورد توجه قرار گرفته است [۸، ۱۲، ۲۴ و ۲۵]. با توجه به اینکه رودخانه‌های کشور به دلیل مدیریت غلط حوضه آبریز و آبراهه زیستگاه آبریزان دچار تغییرات غیرطبیعی شده‌اند، لازم است تحقیقی در زمینه ارزیابی نیاز آبی اکولوژیکی اکوسیستم رودخانه قره‌سو به‌عنوان یکی از رودخانه‌های استان گلستان که کارکرد مهمی در محیط زیست منطقه دارد، به صورت علمی انجام گیرد.

در پژوهش حاضر شرایط اکولوژیکی رودخانه بررسی شده و ارزیابی زیستگاه صورت گرفته است. همچنین، به‌کارگیری مدل PHABSIM در چگونگی تولید رژیم اکولوژیکی رودخانه در مقابل تخصیص کمترین جریان زیست‌محیطی با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی تنانت، تسمن و آرکانزاس در رودخانه قره‌سو (ایستگاه هیدرومتری



شکل ۱. نقشه حوزه آبریز قره‌سو (نگارنده، یافته‌های پژوهش)

جدول ۱. توزیع آماری دبی سالانه و ماهانه رودخانه قره‌سو در ایستگاه هیدرومتری سیاه‌آب (m³/s)

سالانه	شهریور	مرداد	مهر	مهراد	اردیبهشت	فروردین	اسفند	بهمن	مهر	آذر	دی	مهر	مهر
میانگین دبی جریان ماهانه	۰/۵۷	۰/۹۶	۱/۸۸	۲/۹۴	۳/۷۹	۳/۱۴	۲/۳۴	۲/۳۴	۱/۸۵	۱/۱۳	۱/۰۳۶	۱/۳۴	۱/۳۴
حداکثر بده	۴/۷۶	۴/۸۸	۶/۴۵	۷/۴۷	۱۰/۷۶	۱۵/۹۷	۱۵/۵۸	۹/۵۲	۸/۱۲	۱۶/۲۳	۷/۱۱	۳/۲۸	۳/۳۶
حداقل بده	۰/۲۱	۰	۰	۰	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۴۲	۰/۲۶	۰/۳۵	۰/۱۶	۰/۰۱	۰	۰

اطلاعات هیدرولوژیکی

در جریان‌های بیش از ۶۰ درصد متوسط سالانه احراز می‌شوند [۲۶].

روش تسمن (Tessman)

تسمن [۲۸] با اقتباس از پیشنهادهای فصلی روش تنانت از ترکیب متوسط جریان ماهانه^۱ (MMF) و متوسط جریان سالانه^۲ (MAF) برای تعیین کمترین جریان ماهانه مورد نیاز استفاده کرد، که دارای مراحل زیر است: اگر $MAF > MMF$ باشد، $MAF > MMF$ به عنوان کمترین جریان ماهانه؛ اگر $MAF < MMF$ باشد، $MAF < MMF$ به عنوان کمترین جریان ماهانه و اگر $MAF < MMF$ باشد، MMF به عنوان کمترین جریان ماهانه در نظر گرفته می‌شود.

روش آرکانزاس (Arkansas)

فیلیپک و همکارانش [۲۹] با ایجاد تغییراتی در روش تنانت، روشی برای ارزیابی کمترین آب محیط زیستی مورد نیاز در رودخانه‌های ایالت آرکانزاس پیشنهاد کردند. در این روش از میانگین جریان ماهانه به جای سالانه استفاده شده است تا نسبت به روش تنانت به تغییرپذیری جریان‌های طی سال بیشتر استفاده شود. همچنین، در روش پیشنهادی با بررسی روابط بین دبی آب و اکوسیستم‌های رودخانه‌ای طی سال و با آگاهی از چگونگی تغییرات فصلی رودخانه‌های آرکانزاس و بر اساس فرایندهای بیولوژیکی و فیزیکی رودخانه‌ها، هر سال به سه دوره تقسیم شده و برای هر دوره، درصدی از میانگین جریان ماهانه به عنوان کمترین جریان آب مورد نیاز برای حفظ فرایندهای بیولوژیکی و فیزیکی رودخانه تعیین می‌شود (جدول ۲).

سیاه‌آب ایستگاه هیدرومتری استفاده‌شده برای محاسبات هیدرولوژیکی است که در ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی واقع شده است. در جدول ۱ نیز نتیجه محاسبات آماری دبی‌های ماهانه ایستگاه هیدرومتری سیاه‌آب طی دوره آماری ۴۴ ساله (۱۳۵۰-۱۳۹۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین میانگین دبی جریان ماهانه رودخانه قره‌سو در ایستگاه سیاه‌آب در ماه اردیبهشت و برابر ۳/۷۹ مترمکعب بر ثانیه و کمترین میانگین دبی جریان ماهانه در ماه شهریور و برابر ۰/۵۷ مترمکعب بر ثانیه و میانگین دبی سالانه ۱/۹۲ مترمکعب بر ثانیه است.

روش‌های استفاده‌شده در تعیین جریان زیست‌محیطی

تنانت (Tennant)

روش تنانت یا مونتانا [۲۶] برای برآورد کمترین نیاز زیست‌محیطی رودخانه‌ها، بر پایه مطالعات صحرایی در ایالات مرکزی-غربی آمریکا برای برقراری رابطه بین جریان رودخانه و حفظ طبیعت اطراف رودخانه توسعه داده شده است. هدف اصلی روش تنانت حفظ شرایط زیستی ماهیان بوده است. تنانت [۲۶] گفت که جریان‌های مشخصی می‌توانند به بقای وضع خاصی از زیستگاه منجر شوند و جریان‌های یادشده را زیستگاه بقای کوتاه‌مدت، 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 [۱۰، ۲۵ و ۲۷]. زیستگاه حیاتی کوتاه‌مدت، با حفظ ۱۰ درصد جریان متوسط سالانه باقی می‌ماند. زیستگاه حیاتی در ۳۰ درصد جریان متوسط سالانه و زیستگاه عالی برای حیات

1. Mean Monthly Flow
2. Mean Annual Flow

جدول ۲. تعیین جریان آب محیط زیستی رودخانه بر اساس روش آرکانزاس [۳۰]

دوره	آبان- اسفند	فروردین- تیر	مرداد- مهر
جریان آب توصیه شده	۶۰ درصد میانگین جریان ماهانه	۷۰ درصد میانگین جریان ماهانه	۵۰ درصد میانگین جریان ماهانه
فرایندهای فیزیکی و بیولوژیکی	تغذیه آب زیرزمینی و پاک سازی کانال رودخانه	تولید مثل و تخم ریزی	پرورش ماهیان
شرایط نرمال	دمای آب کم	دمای آب (ترجیحاً) در حال افزایش	دمای زیاد آب
	DO مقدار بالای	به خصوص داخل سنگریزه DO مقدار زیاد	DO مقدار کم
	میانگین جریان ماهانه زیاد	میانگین جریان ماهانه زیاد	میانگین جریان ماهانه کم

روش شبیه سازی زیستگاه

مدل شبیه سازی فیزیکی زیستگاه^۱ (PHABSIM) یک مدل اکوهیدرولیکی- هیدرواکولوژیکی است که مجموعه ای ابزار را برای مدل سازی هیدرولیکی مطلوبیت زیستگاه های ماهی و گونه های بی مهرگان فراهم می کند. این مدل به وسیله سازمان نقشه برداری و سرویس حیات وحش ایالات متحده آمریکا در دهه ۱۹۷۰ ارائه شد که مهم ترین و پرکاربردترین مدل شبیه سازی زیستگاه هاست. در این مدل ارتباط بین هیدرولیک و اکولوژی رودخانه با استفاده از منحنی های مطلوبیت زیستگاه^۲ (HSC) انجام می شود. منحنی های مطلوبیت زیستگاه نشان دهنده میزان مناسب بودن زیستگاه موجود زنده به ازای یک پارامتر خاص (عمق، سرعت، پوشش کف، دما، و...) هستند. شاخص مطلوبیت زیستگاه (HSI) از جمله معمول ترین شاخص ها به منظور بررسی شرایط زیستگاهی آبزیان در محیط های آبی است که به صورت تابعی از متغیرهای تأثیرگذار بر حیات آبزیان (مانند پوشش، عمق، اندازه بستر، سرعت) برآورد می شود. برای به دست آوردن این شاخص نیاز به نمونه برداری و مشاهده مستقیم تعداد ماهی در هر قسمت از رودخانه است [۳۱]. با هدف شناخت شاخص های مطلوبیت ویژگی های زیستگاهی و شاخص مطلوبیت زیستگاه و برای بررسی نیازهای زیستگاهی گونه متغیرهایی مانند ارتفاع، عمق، عرض رودخانه، شیب، سرعت جریان، قطر متوسط سنگ بستر، شاخص سنگ بستر، درصد پوشش گیاهی ساحل و درصد پوشش جلبکی بستر سنجیده می شوند [۳۲]. برای هر یک از فاکتورهای زیستگاهی مقادیر شاخص مطلوبیت^۳ (SI) که

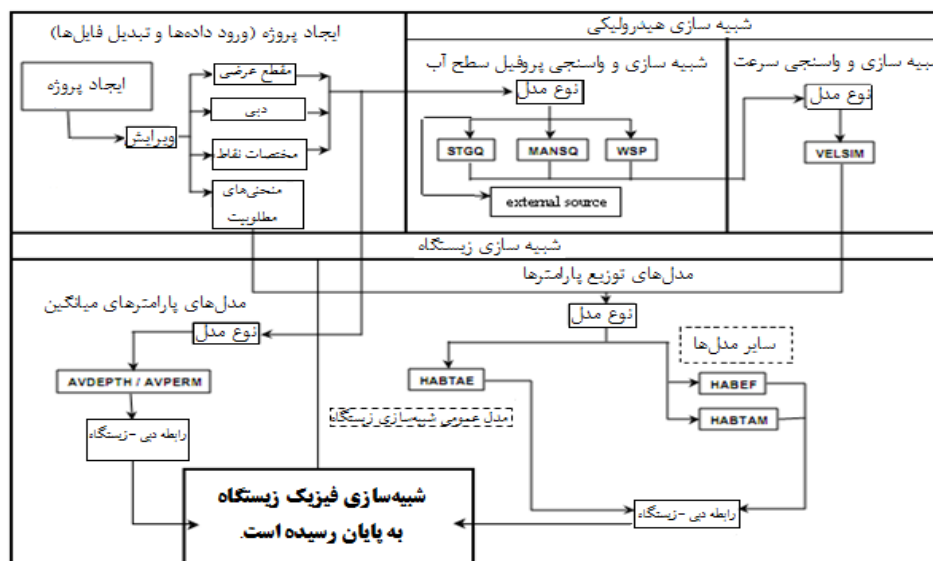
فراوانی گونه ها در ایستگاه های نمونه برداری را تحت تأثیر قرار می دهند و نیز طبقات هر یک از فاکتورهای زیستگاهی با در نظر گرفتن زیستگاه انتخاب شده به کمک نرم افزار HABSEL محاسبه می شوند [۳۳]. برای محاسبه شاخص مطلوبیت زیستگاه (HSI) کل برای گونه مطالعه شده در رودخانه، میانگین هندسی $HSI = (SI_1 \times SI_2 \times \dots \times SI_n)^{1/n}$ استفاده می شود [۳۴]. به منظور توسعه منحنی های مطلوبیت زیستگاه با استفاده از تکنیک دلفی، یک پرسش نامه علمی تهیه و در اختیار چند کارشناس باتجربه در زمینه اکولوژی آبزیان گذاشته شد تا بازه های مد نظر برای متغیرهای عمق، سرعت و جنس کف برای گونه شاخص تولید شده و سپس از روی این اطلاعات منحنی های مطلوبیت زیستگاه رسم شوند. خروجی مدل PHABSIM، منحنی های مساحت قابل استفاده وزنی (WUA) است. با استفاده از تابع WUA در مقابل دبی جریان می توان حقایق زیست محیطی را به ازای ماه ها و دوره های مختلف زندگی گونه شاخص رژیم اکولوژیکی جریان استخراج کرد.

فرایند مدل سازی زیستگاه در PHABSIM

همان طور که در شکل ۲ مشاهده می شود ساختار مدل PHABSIM از دو بخش هیدرولیکی و زیستگاهی تشکیل شده است.

ابتدا با تعریف یک پروژه جدید در مدل، داده های مربوط به مقاطع عرضی رودخانه شامل فاصله هر مقطع از مقطع پایین دست، تراز دبی صفر، شیب خط انرژی، تراز سطح آب مشاهده شده در مقطع، دبی اندازه گیری شده در مقطع و مختصات نقاط برداشت شده در هر مقطع شامل فاصله از ابتدای مقطع، ارتفاع کف آبراهه و سرعت به عنوان ورودی برای کالیبراسیون مدل وارد می شود.

1. Physical HABitat SIMulation Methodology
2. Habitat Suitability Criteria
3. Suitability Index



شکل ۲. فلوچارت مدل [PHABSIM] ۵

مدل MANSQ، از معادله مانینگ برای شبیه سازی رقوم سطح آب در هر مقطع عرضی استفاده می کند و بنابراین هر مقطع عرضی را به طور مستقل مورد بحث قرار می دهد. کالیبراسیون مدل از طریق سعی و خطا برای انتخاب مقدار ضریب B برای حداقل کردن اختلاف بین ارتفاع سطح آب مشاهده شده و شبیه سازی شده در تمامی دبی های اندازه گیری شده، انجام می شود. ضریب B برای هر مقطع عرضی طی بازه مطالعه شده، متفاوت است. محدوده B بین صفر تا $0/6$ است. معادله استفاده شده در این مدل به صورت رابطه ۲ است:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad Q = KAR^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

در رابطه یادشده، ضریب k از طریق یک مجموعه از داده های دبی و تراز سطح آب و داده های مربوط به هندسه کانال تعیین می شود. سپس، برنامه از داده های کالیبراسیون (دبی و تراز سطح آب) برای حل معادله ۳ استفاده می کند.

$$K = K_0 \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^B \quad (3)$$

مدل WSP، از روش گام به گام رو به عقب برای شبیه سازی رقوم سطح آب استفاده می کند. این مدل در واقع برنامه پروفیل سطح آب است که برای پیش بینی چگونگی تغییرات پروفیل طولی تراز سطح آب در محدوده دبی های شبیه سازی به کار می رود. کالیبراسیون مدل ابتدا از طریق

در قسمت هیدرولیکی، با استفاده از داده های رقوم سطح آب و سرعت، پارامترهای هیدرولیکی برای کل قسمت بررسی شده از رودخانه، شبیه سازی می شود. سپس، با استفاده از منحنی های HSC، هیدرولیک رودخانه به زیستگاه گونه های مد نظر ارتباط داده می شود. برای شبیه سازی رقوم سطح آب از سه رویکرد روابط دبی- عمق، رابطه مانینگ و روش گام به گام رو به عقب استفاده می شود. در PHABSIM، سه مدل شبیه سازی تراز سطح آب (WSL)، سرعت (VELSIM) و زیستگاه برای هر بازه رودخانه اجرا می شود. اولین گام در شبیه سازی هیدرولیکی در PHABSIM، کالیبراسیون و شبیه سازی تراز سطح آب براساس داده های میدانی اندازه گیری شده (مشخصات هیدرولیکی مقطع عرضی)، برنامه های STGQ، MANSQ، WSP صورت می گیرد. مدل STGQ از یک منحنی دبی - اشل برای محاسبه ارتفاع سطح آب در هر مقطع عرض استفاده می کند. در این رویکرد هر یک از مقاطع به صورت جدا از مقاطع دیگر در نظر گرفته شده و رابطه آن به صورت مجزا استخراج می شود. در این مدل رابطه دبی - اشل به صورت رابطه ۱ است:

$$WSL - SZF = aQ^b \quad (1)$$

که در آن، WSL تراز سطح آب، SZF تراز دبی صفر، Q دبی، a, b مقادیر ثابتی هستند که با داشتن مقادیر اندازه گیری شده دبی و تراز سطح آب و برقراری یک رگرسیون $\log - \log$ میان تراز مشاهده شده و دبی در هر مقطع عرضی محاسبه خواهند شد.

برای انجام محاسبات WUA، گونه سیاه‌ماهی *C. capota gracilis* به عنوان گونه هدف در رودخانه قره‌سو در نظر گرفته می‌شود. ماهی (Keyserling ۱۸۶۱) *C. capota gracilis* از رده ماهیان استخوانی حقیقی *Teleostei* و از خانواده کپورماهیان (Cyprinidae) [۳۵] و یکی از گونه‌های غالب و بومی حوضه آبریز جنوب دریای خزر است. عمق، سرعت جریان آب و بستر مهم‌ترین متغیرهای فیزیکی و هیدرولیکی برای انتخاب زیستگاه گونه سیاه‌ماهی‌اند. این ماهیان تمایل دارند در آب‌های کم‌عمق با سرعت آب متوسط و پوشش بستر سنگلاخی زندگی کنند. به هر حال، ترجیح زیستگاهی *C. capota gracilis* اعماق میانه با سرعت نسبتاً آرام و بسترهای سنگی با اندازه کوچک تا متوسط است [۳۶]. تخم‌ریزی این ماهی بیشتر در اواخر اسفند تا تیرماه و در فصل بهار و در بسترهای سنگی صورت می‌گیرد، اوج تخم‌ریزی ماده‌ها در اردیبهشت و نرها در فروردین است [۳۷]. نیازهای اکولوژیکی گونه سیاه‌ماهی شامل عمق و سرعت جریان لازم برای زیست و تولید مثل در جدول ۳ ارائه شده است. ماه‌های حضور گونه سیاه‌ماهی در رودخانه قره‌سو شامل (اسفند، فروردین و اردیبهشت) به عنوان ماه‌های بحرانی در نظر گرفته شد و عمق مناسب برای تولید مثل آنها مبنای محاسبه نیاز زیست‌محیطی قرار گرفت.

سنجش متغیرهای محیطی

نمونه‌برداری در اواخر خردادماه ۱۳۹۶، در چهار ناحیه اصلی و مقاطع کنترل در هر ناحیه از پایین‌دست (مصوب رودخانه) به سمت بالادست و در طول رودخانه قره‌سو انجام شد. ایستگاه‌ها بر اساس فاکتورهایی شامل عدم هم‌پوشانی با یکدیگر، فاصله از محل ورود به رودخانه اصلی، تنوع در ریخت‌شناسی رودخانه و کیفیت حاشیه رودخانه انتخاب شدند. مختصات جغرافیایی هر ایستگاه توسط دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت شد. در ایستگاه‌های انتخابی متغیرهای محیطی، داده‌های مربوط به مقاطع عرضی رودخانه شامل فاصله هر مقطع از مقطع پایین‌دست اندازه‌گیری و ثبت شد. برای بررسی نیازهای زیستگاهی سیاه‌ماهی در مجموع متغیرهای عمق (سانتی‌متر)، عرض رودخانه (متر)، سرعت جریان (متر بر ثانیه)، قطر متوسط سنگ بستر (سانتی‌متر)، شیب و... ارزیابی شدند.

تنظیم کردن ضریب مانینگ برای کل رودخانه و سپس تنظیم آن برای هر یک از مقاطع انجام می‌شود. معادلات استفاده شده، معادلات پیوستگی، برنولی و مانینگ هستند. مرحله بعدی کالیبراسیون و شبیه‌سازی توزیع سرعت در مقاطع عرضی با استفاده از مدل VELSIM است. تکنیک شبیه‌سازی در برنامه، به داده‌های برداشت‌شده سرعت بستگی دارد، ولی در همه تکنیک‌ها، اساس کار معادله مانینگ و اصلاح ضریب مانینگ است. مقطع کانال به سلول‌هایی تقسیم می‌شود و سرعت این سلول‌ها با سرعت شبیه‌سازی شده مقایسه می‌شود. با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی زیستگاه شامل HABEF، HABTAE یا HABTAM و تنظیم گزینه‌های لازم یا مطلوب مدل‌سازی، فرایند شبیه‌سازی زیستگاه انجام می‌شود که مشخصات هیدرولیکی هر مقطع (عرض خیس‌شده، مساحت سطح خیس‌شده، مساحت مقطع عرضی، سرعت متوسط و متوسط عمق) را محاسبه می‌کند. سپس، از برنامه HABTAE بین ویژگی‌های هیدرولیکی محاسبه‌شده برای کانال و زیستگاه ماهی، توسط منحنی‌های HSC ارتباط برقرار شده و سطح قابل استفاده وزنی (WUA) برای هر سلول در مقطع عرضی و در همه دبی‌های شبیه‌سازی شده محاسبه می‌شود. سپس، از مقدار مجموع WUA یک رابطه بین دبی و زیستگاه وزنی به دست می‌آید و در نهایت خروجی برنامه (WUA) برای هر گونه در هر مرحله زندگی محاسبه می‌شود. مساحت قابل استفاده وزنی در یک دبی خاص در بازه رودخانه از روابط ۴ و ۵ محاسبه می‌شود:

$$WUA = \left[\frac{\sum_{i=1}^n A_i \times CSI_i}{L} \right] * \dots \quad (4)$$

$$CSI = SI_d \times SI_v \times SI_b \quad (5)$$

که در آن، A_i سطح هر سلول، CSI_i شاخص مطلوبیت ترکیبی^۱ هر سلول و L طول بازه است. همان‌طور که در رابطه ۴ مشاهده می‌شود، به منظور فراهم‌شدن امکان مقایسه مقدار مساحت قابل استفاده وزنی در بازه‌ها و رودخانه‌های مختلف، مقدار WUA محاسبه‌شده توسط مدل به وسیله طول بازه استاندارد شده و محاسبه WUA در مدل برحسب مترمربع در هر ۱۰۰۰ متر از طول رودخانه ($m^2/1000 m$) و یا ($ft^2/1000 ft$) است.

جدول ۳. گونه شاخص ماهیان رودخانه قره‌سو و اطلاعات هیدرولیکی-زیستی و حفاظتی

گونه	نوع گونه	زمان تخم‌ریزی	عمق در ماه‌های بحرانی (m)	عمق در ماه‌های غیربحرانی (m)	سرعت جریان (m/s)
سیاه‌ماهی	بومی	اواخر اسفند تا اوایل اردیبهشت	۱/۲	۰/۶	۰/۸ تا ۱

یافته‌ها

ابتدا صحت‌سنجی، بررسی و همگن‌سازی داده‌های اولیه به طور دقیق بررسی شد. در ادامه، جریان زیست‌محیطی رودخانه قره‌سو از روش‌های هیدرولوژیکی تنانت، آرکانزاس و روش تسمن در ماه‌های مختلف برآورد شد. محاسبات نشان داد با کاربرد روش تنانت برای شرایط قابل قبول زیست‌بومی، ۳۰ درصد متوسط جریان سالیانه برای فروردین تا شهریور (معادل ۰/۵۷ مترمکعب بر ثانیه) و ۱۰ درصد آن برای مهر تا اسفند (معادل ۰/۱۹ مترمکعب بر ثانیه) برآورد شده است. در روش تسمن و آرکانزاس متوسط جریان زیست‌محیطی محاسباتی به ترتیب معادل ۰/۸۵۶ و ۱/۲۲ مترمکعب بر ثانیه است. سپس، با استفاده از روش شبیه‌سازی زیستگاه و مدل یک‌بعدی هیدرولیکی-زیستگاهی شرایط اکولوژیکی رودخانه ارزیابی شد. در ادامه، پس از انجام شبیه‌سازی زیستگاهی به منظور ارزیابی وضعیت زیستگاهی گونه هدف، نمودار سری زمانی زیستگاه رودخانه برای سه گروه سنی بچه‌ماهی، جوان و بالغ سیاه‌ماهی استخراج شد.

محاسبات شاخص مطلوبیت زیستگاه

به‌منظور تعیین اندیکس شایستگی زیستگاه، پارامترهای محیطی شامل سرعت جریان، عمق آب، عرض رودخانه، نوع

پوشش بستر در هر ایستگاه نمونه‌برداری، اندازه گرفته شد (جدول ۴). دامنه ارزش بهینه هر یک از پارامترهای زیستگاهی (شاخص مطلوبیت، SI) که فراوانی نمونه‌ها در ایستگاه‌های نمونه‌برداری را تحت تأثیر قرار می‌دهند و نیز طبقات هر یک از فاکتورهای زیستگاهی با در نظر گرفتن زیستگاه انتخاب‌شده به کمک نرم‌افزار (Consulting, 2014; Version 1/0) (Habitat Selection) HABSEL محاسبه و تحلیل شد.

محاسبه شاخص مطلوبیت زیستگاه نشان داد میزان HSI رودخانه قره‌سو برای گونه سیاه‌ماهی برابر ۰/۴۸ است (جدول ۵). درخور یادآوری است در این بخش به‌منظور اطمینان از نتایج و محاسبات، از نظرات کارشناسان و متخصصان اکولوژی آبیان استفاده شده است.

محاسبه جریان زیست‌محیطی با روش شبیه‌سازی زیستگاه برای استخراج رژیم اکولوژیک رودخانه برای گونه هدف، نیاز است که اطلاعات مقاطع در چند بازه دبی وارد شود. با توجه به جدول ۱، متوسط دبی سالانه رودخانه قره‌سو برابر ۱/۹۲ مترمکعب بر ثانیه، میانگین بیشترین دبی سالانه برابر ۳/۷۹ مترمکعب بر ثانیه و میانگین کمترین دبی سالانه برابر ۰/۵۷ مترمکعب بر ثانیه است. با توجه به این اطلاعات، از دبی ۰/۵ تا ۵ مترمکعب بر ثانیه، دبی‌هایی برای شبیه‌سازی در

جدول ۴. دامنه متغیرهای زیست‌محیطی اندازه‌گیری شده در رودخانه قره‌سو

متغیر	کمترین	بیشترین
عمق (سانتی‌متر)	۴۲	۹۵
عرض رودخانه (متر)	۶/۵۳	۲۱/۴۶
سرعت آب (متر بر ثانیه)	۰/۲۶۴	۱/۰۱
قطر سنگ بستر (سانتی‌متر)	۰/۰۸	۰/۷۷
شاخص بستر	۶/۷	۱۳/۲

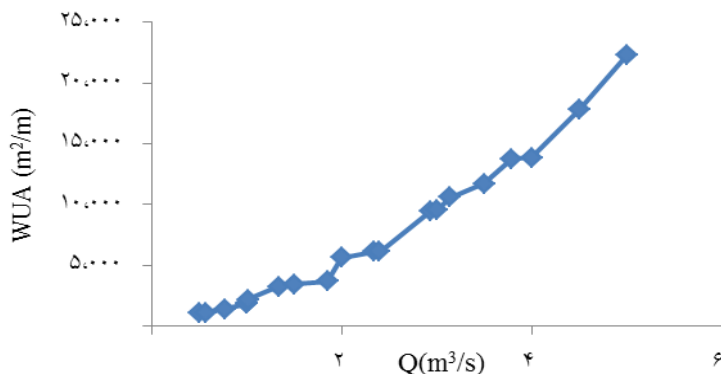
جدول ۵. مقادیر شاخص مطلوبیت کل برای هر متغیر و شاخص مطلوبیت زیستگاه (HSI) رودخانه قره‌سو برای گونه سیاه‌ماهی

پارامتر	عمق	عرض	سرعت جریان	قطر سنگ بستر	شاخص بستر	HSI
SI	۰/۵۶	۰/۷۱	۰/۶۲	۰/۴	۰/۲۸	۰/۴۸

کاهش جریان تا حدی که ۱۰-۱۵ درصد از فضای در اختیار موجودات زنده از دست برود، معادل حد نهایی قابل تحمل برای اکوسیستم است [۳۸-۴۰]. WUA برای دبی متوسط سالانه هر رودخانه، معادل WUA اپتیمم آن است. با توجه به دبی جریان برای ماه‌های سال در جدول ۱ و شکل ۳، دبی معادل ۱۵ درصد کاهش زیستگاه (WUA) برای ماه‌های سال محاسبه می‌شود. سپس، ۱۵ درصد از این مقدار WUA کم کرده و دوباره از روی نمودار مقدار دبی معادل این WUA قرائت می‌شود که این نتایج نشان‌دهنده دبی جریان زیست‌محیطی است، که این نتایج در جدول ۶ ارائه شده است. جدول ۶ بیان‌کننده رژیم مناسب جریان اکولوژیکی رودخانه قره‌سو است.

نظر گرفته شد، با هدف اینکه در بازه در نظر گرفته شده تمامی دبی‌های مهم رودخانه را پوشش دهد. دبی‌های در نظر گرفته شده عبارت‌اند از: ۰/۵، ۰/۷۷، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۴، ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵. برای شبیه‌سازی زیستگاه، منحنی‌های مطلوبیت سیاه‌ماهی وارد PHABSIM شد.

در شکل ۳ رابطه WUA در مقابل دبی ترسیم شده است. در این شکل دیده می‌شود که از دبی‌های زیاد به کم، کاهش مقدار WUA ابتدا با شیب تند شروع شده و سپس ملایم می‌شود. یکی از رویکردهای تعیین جریان زیست‌محیطی، تعیین دبی در نقطه شکست نمودار دبی در مقابل زیستگاه فیزیکی است. برای به دست آوردن بیشترین دبی قابل برداشت از رودخانه برای حفظ اکوسیستم در همان حالت اولیه و به گونه‌ای که آسیبی متوجه آن نشود،



شکل ۳. رابطه WUA در مقابل دبی برای سیاه‌ماهی در رودخانه قره‌سو

جدول ۶. جریان زیست‌محیطی رودخانه قره‌سو با روش شبیه‌سازی زیستگاه PHABSIM

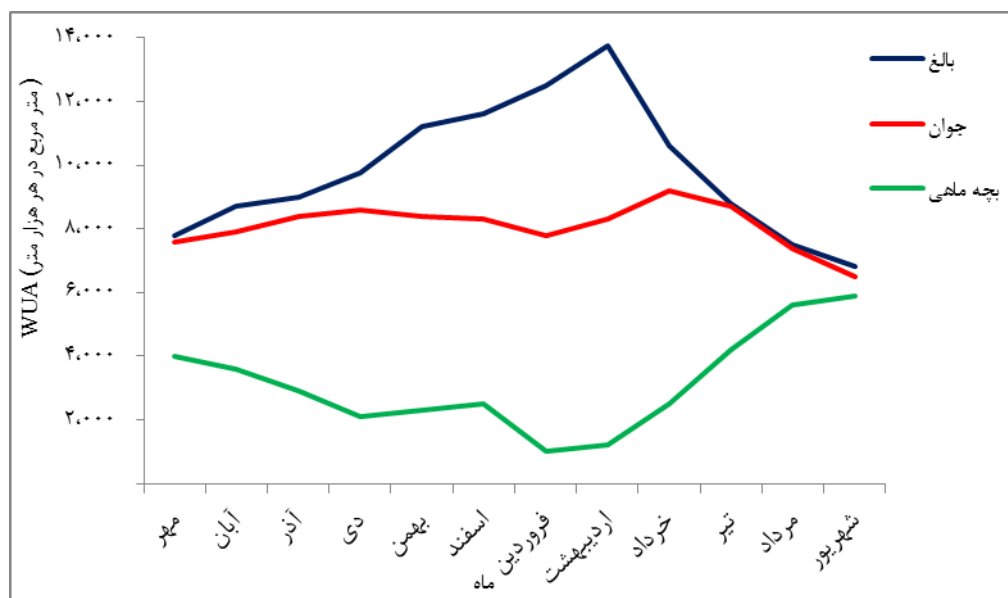
ماه	MMF (m³/s)	WUA (m²/m)	دبی معادل ۱۵ درصد کاهش WUA (m²/m)
مهر	۱/۳۴	۳۲۵۰	۱/۱۳
آبان	۱/۰۳۶	۱۸۶۰	۰/۸۸
آذر	۱/۱۳۴	۲۱۹۰	۰/۹۶
دی	۱/۸۵	۳۶۸۰	۱/۵۷
بهمن	۲/۳۴	۶۱۰۰	۱/۹۸
اسفند	۲/۳۴	۶۱۰۰	۱/۹۸
فروردین	۳/۱۴	۱۰۶۰۰	۲/۶۶
اردیبهشت	۳/۷۹	۱۳۷۵۰	۳/۲۲
خرداد	۲/۹۴	۹۴۵۰	۲/۴۹
تیر	۱/۸۸	۳۶۵۰	۱/۵۹
مرداد	۰/۹۶	۱۸۴۰	۰/۸۱
شهریور	۰/۵۷	۱۱۲۰	۰/۴۸
میانگین	۱/۹۲	۵۳۰۰	۱/۶۳

منحنی سری زمانی زیستگاه رودخانه

نمودار سری زمانی مطلوبیت زیستگاه رودخانه قره‌سو برای سه گروه سنی گونه سیاه‌ماهی استخراج و در شکل ۴ نشان شده است. بر اساس شکل ۴ مشاهده می‌شود اولاً برای سه گروه سنی مختلف سیاه‌ماهی شرایط مطلوبیت زیستگاهی بسیار متفاوت است. دوم اینکه میزان زیستگاه‌های مطلوب در دسترس در ماه‌های مختلف سال بسیار متغیر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین زیستگاه در دسترس (WUA) برای سیاه‌ماهی بالغ در فصل پرآبی رودخانه یعنی در اردیبهشت با حداکثر میانگین دبی جریان ماهانه معادل $3/79$ مترمکعب بر ثانیه است. برای سیاه‌ماهی جوان نیز WUA تا دبی $2/94$ متر مکعب بر ثانیه در خرداد افزایش یافته است. برای بچه‌ماهی نیز حداکثر WUA در فصل کم‌آبی رودخانه و در کمترین میانگین دبی جریان ماهانه برابر $0/57$ مترمکعب بر ثانیه در ماه شهریور است. همچنین، مشاهده می‌شود طی ماه‌های تیر تا شهریور که رودخانه با کاهش نسبتاً زیاد دبی مواجه است، مطلوبیت فیزیکی زیستگاه رودخانه‌ای در گروه سنی بچه‌ماهی بهبود می‌یابد در حالی که در گروه سنی بالغ با تنش شدید مواجه خواهد شد. به بیان دیگر،

میزان مساحت قابل استفاده وزنی (WUA) در فصل کم‌آبی رودخانه یعنی در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور برای گروه‌های سنی بالغ و جوان کاهش می‌یابد، ولی برای بچه‌ماهی افزایش یافته است.

با یک ارزیابی کلی از وضعیت زیستگاهی سیاه‌ماهی در رودخانه قره‌سو می‌توان شرایط زیستگاهی را تحلیل کرد. با توجه به اینکه لاروها در فصل تابستان از شن‌های بستر رودخانه به داخل آب رودخانه مهاجرت می‌کنند، قطعاً تابستان به لحاظ زیستگاهی برای گروه سنی بچه‌ماهی برهه حساس زمانی خواهد بود و همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در این محدوده زمانی مساحت قابل استفاده وزنی برای این گروه سنی حداکثر بوده و بیان‌کننده شرایط مناسب زیستگاهی است. دوره تخم‌ریزی سیاه‌ماهی در اسفند و اواسط بهار است و دوره بالغ وارد مرحله تخم‌ریزی می‌شود و همان‌طور که مشاهده می‌شود در این ماه‌ها شرایط زیستگاهی برای ماهی بالغ به لحاظ مساحت زیستگاه‌های مناسب در دسترس در بهترین وضعیت ممکن قرار دارد، بنابراین از نظر تخم‌ریزی نیز شرایط زیستی مناسبی در این فصول برای این گروه سنی فراهم است.



شکل ۴. نمودار سری زمانی مطلوبیت زیستگاه رودخانه برای سه گروه سنی سیاه‌ماهی

ارزیابی مقادیر مختلف جریان زیست‌محیطی از روش‌های مختلف

حفظ اکوسیستم سامانه رودخانه قره‌سو به‌عنوان مهم‌ترین تأمین‌کننده حقایق خلیج گرگان اهمیت زیادی دارد، چرا که بر اساس بازدیدهای میدانی، حدود ۲۰ کیلومتر پایین‌دست رودخانه در محل ورود به خلیج گرگان شرایط مورفولوژیکی خود را از دست داده است و رودخانه عملاً قادر به تأمین حقایق خلیج گرگان نیست. خلاصه برآورد جریان زیست‌محیطی رودخانه قره‌سو حاصل از روش‌های مختلف در جدول ۷ و شکل ۵ نشان داده شده است. با استفاده از روش تنانت، مقدار جریان زیست‌محیطی برای فروردین تا شهریور ۳۰ درصد متوسط جریان سالانه (معادل ۱/۹۲ مترمکعب بر ثانیه) و برای مهرماه تا اسفند ۱۰ درصد متوسط جریان سالانه (معادل ۰/۵۷ مترمکعب بر ثانیه) برآورد شد. با در نظر گرفتن آنکه مقدار متوسط جریان سالانه به میزان ۱/۹۲ مترمکعب بر ثانیه است، مقدار جریان زیست‌محیطی در بازه زمانی مهر-اسفند برابر با ۰/۱۹ مترمکعب بر ثانیه و در بازه زمانی فروردین-شهریور برابر با ۰/۵۷ مترمکعب بر ثانیه برآورد شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از کاربرد روش تسمن مقدار جریان زیست‌محیطی در دامنه ۰/۵۷ تا ۱/۵۱۶ مترمکعب بر ثانیه در ماه‌های مختلف قرار دارد. مقدار متوسط جریان زیست‌محیطی برآوردشده با استفاده از روش تسمن برابر با ۰/۸۵۶ مترمکعب بر ثانیه است. مقایسه نتایج جریان برآوردشده زیست‌محیطی از روش تسمن با نتایج روش تنانت به‌روشنی نشان می‌دهد روش تسمن در همه ماه‌های سال به استثنای شهریور مقدار جریان زیست‌محیطی را بیشتر از روش تنانت برآورد کرده است و نیز دامنه و بزرگی مقادیر برآوردشده جریان زیست‌محیطی در این روش به‌مراتب بزرگ‌تر از روش تنانت است. همچنین، بر اساس نتایج روش تسمن دوره سه‌ماهه فروردین-خرداد بیشترین و شهریورماه کمترین مقادیر برآوردشده جریان زیست‌محیطی را دارد.

بررسی مقدار جریان زیست‌محیطی در روش آرکانزاس نشان می‌دهد مقدار برآوردشده در ماه‌های مختلف در محدوده ۰/۲۸۵ تا ۲/۶۵۳ مترمکعب بر ثانیه با متوسط ۱/۲۲ مترمکعب بر ثانیه است که در مقایسه با روش تنانت مقادیر دامنه و متوسط جریان زیست‌محیطی برآوردشده بیشتری را ارائه می‌کند. نیز مقدار جریان زیست‌محیطی برآوردشده با کاربرد روش آرکانزاس در ماه‌های مرداد و

شهریور از مقادیر برآوردشده با کاربرد روش تنانت کمتر است، اما در سایر ماه‌های سال روش آرکانزاس به برآورد بیشتری برای جریان زیست‌محیطی نسبت به روش تنانت منجر شده است. بررسی مقدار جریان زیست‌محیطی در روش شبیه‌سازی زیستگاه نشان می‌دهد مقدار برآوردشده در ماه‌های مختلف در محدوده ۰/۴۸ تا ۳/۲۲ مترمکعب بر ثانیه با متوسط ۱/۶۳ مترمکعب بر ثانیه است که در مقایسه با روش‌های هیدرولوژیکی مقادیر دامنه و متوسط جریان زیست‌محیطی برآوردشده بیشتری را ارائه می‌کند. در شکل ۵ دبی متوسط ماهانه به همراه جریان‌های حداقل محاسبه‌شده زیست‌محیطی به روش‌های مختلف ارائه شده است. شکل ۵ نشان می‌دهد در بازه زمانی آبان-خرداد مقدار جریان زیست‌محیطی برآوردشده توسط همه روش‌ها کمتر از جریان متوسط ماهانه و در بازه تیر-مهر کوچک‌تر و مساوی جریان متوسط ماهانه بوده است و در روش تنانت در ماه شهریور برابر جریان متوسط ماهانه است. همچنین، با بررسی شکل ۵ مشخص است که در بازه زمانی آذر-خرداد تفاوت بین متوسط جریان ماهانه رودخانه و برآوردهای جریان زیست‌محیطی در بالاترین سطح است. اگر بازه زمانی آبان-فروردین در نظر گرفته شود، مشخص می‌شود در این بازه زمانی الگوی مشخصی بین نتایج برآوردهای جریان زیست‌محیطی در روش‌های مختلف برقرار است که طبق این الگو ترتیب بزرگی مقادیر برآوردشده دبی زیست‌محیطی به ترتیب مدل شبیه‌سازی زیستگاه، آرکانزاس، تسمن و تنانت است، در حالی که از اربیهشت تا مهر یک الگوی ثابت بین نتایج برآوردهای مختلف جریان زیست‌محیطی مشاهده نمی‌شود.

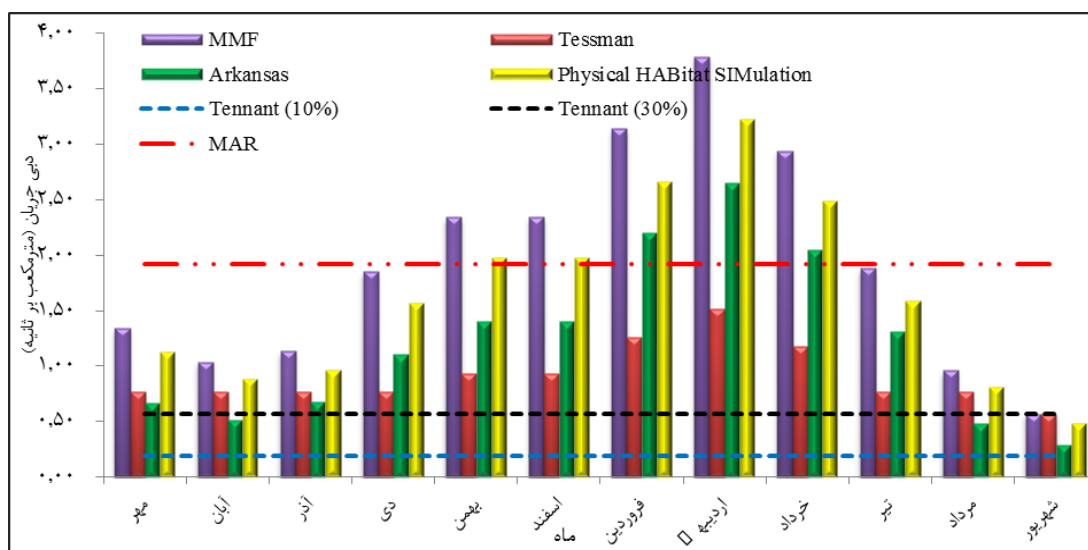
دلیل اینکه روش‌های هیدرولوژیکی با روش شبیه‌سازی زیستگاه مقایسه شدند این است که در روش‌های هیدرولوژیکی گونه آبی تأثیری نداشته و فقط جریان‌های تاریخی معیار مقایسه هستند، ولی در روش شبیه‌سازی زیستگاه اولویت با موجود زنده یا گونه شاخص است، بنابراین در صورت مقایسه، نتایج به‌دست‌آمده از روش شبیه‌سازی زیستگاه اعتبار بیشتری خواهد داشت. به طور کلی، رژیم طبیعی جریان رودخانه، شرایط زیستی را برای هر گروه سنی در فواصل مربوط به آن ایجاد می‌کند و هر گونه تغییر در شرایط جریان باید متناسب با نمودارهایی مانند نمودار سری زمانی زیستگاه رودخانه

مترمکعب بر ثانیه)، تسمن (۰/۸۵۶ مترمکعب بر ثانیه)، و تنانت (۰/۳۸ مترمکعب بر ثانیه) است. به بیان دیگر، روش‌های شبیه‌سازی زیستگاه و تنانت با تفاوت محسوس نسبت به تسمن و آرکانزاس به ترتیب به برآوردهای بیشتر و کمتر منجر شده‌اند.

طوری صورت گیرد که شرایط زیستگاهی در دوره‌های حساس زیستی دچار تنش‌های شدید نشود [۲۱ و ۱۹]. با در نظر گرفتن مقدار جریان متوسط زیست‌محیطی برآورده در ماه‌های مختلف سال مشخص می‌شود که بر اساس بزرگی مقدار ترتیب نتایج به صورت شبیه‌سازی زیستگاه (۱/۶۳ مترمکعب بر ثانیه)، آرکانزاس (۱/۲۲)

جدول ۷. توزیع ماهانه جریان زیست‌محیطی با روش‌های مختلف (m³/s)

ماه	MMF	تنانت		تسمن		آرکانزاس		شبیه‌سازی زیستگاه	
		%	Q	%	Q	%	Q	%	Q
مهر	۱/۳۴	۱۴	۰/۱۹	۵۷	۰/۷۶۸	۵۰	۰/۶۷	۸۵	۱/۱۳
آبان	۱/۰۳۶	۱۸	۰/۱۹	۷۴	۰/۷۶۸	۵۰	۰/۵۱۸	۸۵	۰/۸۸
آذر	۱/۱۳۴	۱۴	۰/۱۹	۵۷	۰/۷۶۸	۵۰	۰/۶۷۸	۸۵	۰/۹۶
دی	۱/۸۵	۱۰	۰/۱۹	۴۱	۰/۷۶۸	۶۰	۱/۱۱	۸۵	۱/۵۷
بهمن	۲/۳۴	۸	۰/۱۹	۴۰	۰/۹۳۶	۶۰	۱/۴۰۴	۸۵	۱/۹۸
اسفند	۲/۳۴	۸	۰/۱۹	۴۰	۰/۹۳۶	۶۰	۱/۴۰۴	۸۵	۱/۹۸
فروردین	۳/۱۴	۱۸	۰/۵۷	۴۰	۱/۲۵۶	۷۰	۲/۱۹۸	۸۵	۲/۶۶
اردیبهشت	۳/۷۹	۱۵	۰/۵۷	۴۰	۱/۵۱۶	۷۰	۲/۶۵۳	۸۵	۳/۲۲
خرداد	۲/۹۴	۱۹	۰/۵۷	۴۰	۱/۱۷۶	۷۰	۲/۰۵	۸۵	۲/۴۹
تیر	۱/۸۸	۳۰	۰/۵۷	۴۱	۰/۷۶۸	۷۰	۱/۳۱۶	۸۵	۱/۵۹
مرداد	۰/۹۶	۵۹	۰/۵۷	۸۰	۰/۷۶۸	۵۰	۰/۴۸	۸۵	۰/۸۱
شهریور	۰/۵۷	۱۰۰	۰/۵۷	۱۰۰	۰/۵۷	۵۰	۰/۲۸۵	۸۵	۰/۴۸
میانگین	۱/۹۲	۱۹	۰/۳۸	۴۴	۰/۸۵۶	۶۵	۱/۲۲	۸۵	۱/۶۳



شکل ۵. توزیع ماهانه جریان زیست‌محیطی با روش‌های بررسی شده

روش‌های هیدرولوژیک است، ولی برای حفظ محیط زیست و بقای گونه‌های آبی امری حیاتی است، می‌توان از این مقادیر صرف‌نظر کرد و از روش‌های هیدرولوژیکی استفاده کرد، ولی عواقب جبران‌ناپذیر این کار گریبان‌گیر ذی‌نفعان از رودخانه‌ها می‌شود. اختلاف بزرگ بین مقادیر پیشنهادی روش‌هایی مانند تنانت و روش شبیه‌سازی زیستگاه نشان می‌دهد چنانچه اولویت برنامه‌ریزی منابع آب با حفظ زیستگاه و توسعه پایدار باشد و برنامه‌ریزی رهاسازی آب در رودخانه با روش تنانت در نظر گرفته شود، شرایط مناسب برای سیاه‌ماهی در رودخانه قره‌سو مهیا نیست و در پی آن تخم‌ریزی ماهی در رودخانه انجام نمی‌شود. اختلاف زیاد مقدار محاسبه‌شده جریان زیست‌محیطی از روش‌های هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی زیستگاه نشان می‌دهد برای جلوگیری از وارد شدن خسارت‌های جبران‌ناپذیر به اکوسیستم‌های آبی، باید نگرش مدیران به سمت روش‌های زیستگاه‌محور تغییر یابد. در برآورد کمترین جریان زیست‌محیطی و در مواردی که در رودخانه گونه حساس و مهمی موجود است، شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه کاملاً ضروری است. در مجموع، می‌توان گفت که با توجه به اینکه شرایط اکولوژیکی رودخانه یک شرایط کاملاً دینامیک است و با تغییر فصول تغییر می‌کند، استفاده از روش‌های تخمین کمترین جریان زیست‌محیطی غیراکولوژیکی هیچ‌گونه توجیهی ندارد و استفاده از روش شبیه‌سازی زیستگاه الزام‌آور است تا از میزان خسارت‌های واردشده بر زیست‌بوم‌های رودخانه‌ای بکاهد. با استفاده از نتایج تحقیق حاضر و تحقیقات مشابه آن می‌توان عوامل هیدرولیکی و اکولوژیکی مؤثر بر زیستگاه طبیعی ماهیان رودخانه را کمی کرده و تحلیل کرد. بر اساس شناخت و ریشه‌یابی عوامل محدودکننده مطلوبیت زیستگاه می‌توان روش‌های اصلاح رودخانه به منظور برگشت به وضعیت مطلوب و طبیعی را ارائه و اجرا کرد.

تقدیر و تشکر

مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب با عنوان "ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی زیستگاه" سال ۱۳۹۶ در دانشگاه علوم کشاورزی گرگان می‌باشد. نویسندگان مقاله از راهنمایی‌ها و همفکری‌های ارزنده جناب آقای دکتر اصغر عبدلی (پژوهشکده علوم محیطی دانشگاه شهید بهشتی)، دکتر مهدی صدیق‌کیا، خانم مهندس محبوبه

بر اساس مطالعات صدیق‌کیا و همکارانش [۱۹] در رودخانه دلپچای، امینی و شکوهی [۴۱] در رودخانه کاظم‌رود در غرب مازندران و زرعی‌کانی و همکارانش [۴۲] در رودخانه آزارود زیرحوضه چالوس ثابت شد استفاده از روش تنانت با توجه به آنکه بدون توجه به محیط اکولوژیکی به تخصیص جریان اقدام می‌کند، می‌تواند به برآوردی نامناسب از جریان زیست‌محیطی، در درازمدت به تخریب محیط زیست و مرگ اکولوژیکی رودخانه منجر شود. نتایج کار محققان یادشده در مطالعه موردی حاضر نیز تأیید می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه حاضر، در رودخانه قره‌سو مدل شبیه‌سازی زیستگاه بسیار کارتر از روش‌های هیدرولوژیکی ظاهر می‌شود و پاسخ آنها به مسئله تخصیص کمترین جریان زیست‌محیطی می‌تواند منطقی و حافظ بقای محیط اکولوژیکی باشد. که با نتایج تحقیق نیک‌قلب و همکارانش [۲۱] و صدیق‌کیا و همکارانش [۱۹] هم راستاست. در پژوهش‌های ژانگ و همکارانش [۲۳] و وای و همکارانش [۲۰] نیز ثابت شد که در بررسی رژیم‌های مختلف جریان رودخانه، برای تعیین جریان زیست‌محیطی، باید به پارامترهای هیدرولوژیکی و ویژگی‌های زیست‌محیطی گونه شاخص، تحت تأثیر دبی رودخانه توجه کرد. در برآورد نیاز زیست‌محیطی، با توجه به اینکه دبی جریان در هر فصل تغییر می‌کند و نیاز گونه آبری نیز در فصول مختلف متفاوت است، باید دبی زیست‌محیطی برای هر دوره به طور جداگانه در نظر گرفته شود [۱۶]. شاعری‌کریمی و همکارانش [۴۳] و صدیق‌کیا و همکارانش [۲۴] نیز در پژوهش‌هایشان، نتیجه گرفته‌اند که در نظر گرفتن پارامترهای اکولوژیکی تأثیر به‌سزایی در برآورد صحیح و واقع‌بینانه نیاز زیست‌محیطی دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر الزامات برآورد جریان زیست‌محیطی با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی زیستگاه در رودخانه قره‌سو بررسی شد. روش‌های هیدرولوژیکی استفاده‌شده در تحقیق حاضر، در تحلیل‌های خود نیاز به داده‌های ماهانه دارند که به‌راحتی در ایران در دسترس اند. ترتیب میانگین نسبت جریان زیست‌محیطی به جریان متوسط ماهانه (بر حسب درصد) بر اساس مقادیر بزرگ‌تر به‌صورت مدل شبیه‌سازی زیستگاه (۸۵)، آرکانزاس (۶۵)، تسمن (۴۴) و تنانت (۱۹) بوده است. مقادیر به‌دست‌آمده از روش شبیه‌سازی زیستگاه بسیار بیشتر از مقادیر روش‌های تنانت، تسمن و سایر

- [12]. Acreman M, Arthington A. H, Colloff M. J, Couch C., Crossman N. D, Dyer F, et al. Environmental flows for natural, hybrid, and novel riverine ecosystems in a changing world. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2014; 12(8), 466-473.
- [13]. Nia ES, Asadollahfardi G, Heidarzadeh N. Study of the environmental flow of rivers, a case study, Kashkan River, Iran. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2016; 65(2):181-94.
- [14]. Booker DJ, Dunbar MJ. Application of physical habitat simulation (PHABSIM) modelling to modified urban river channels. *River Research and Applications*. 2004; 20(2):167-83.
- [15]. Islam Md.S. Nature and limitations of environmental flow methodologies and its global trends. *Journal of Civil Engineering*. 2010; 38(2): 141-152.
- [16]. Jowett IG, Hayes JW, Duncan MJ. A guide to instream habitat survey methods and analysis. Wellington: NIWA; 2008.
- [17]. Oberdorff T, Pont D, Hugueny B, Porcher JP. Development and validation of a fish-based index for the assessment of 'river health' in France. *Freshwater Biology*. 2002; 47(9):1720-34.
- [18]. 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.
- [19]. 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.
- [20]. Yi Y, Cheng X, Yang Z, Wieprecht S, Zhang S, Wu Y. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 68:748-62.
- [21]. Nikghalb S, Shokoohi A, Singh VP, Yu R. Ecological regime versus minimum environmental flow: comparison of results for a river in a semi Mediterranean region. *Water resources management*. 2016; 30(13):4969-84.
- [22]. Hashemi S, Majdzadeh M, Mosavi R. Range of biological currents of red tuna based on morphological and habitat parameters in the lar river basins. *Journal of Natural Environment, Natural Resources of Iran*. 2017; 69(3):865-880. [Persian]

حاجی اسماعیلی و مهندس سعید نیک‌قلب، کمال امتنان و قدردانی را دارند.

منابع

- [1]. Yan Y, Yang Z, Liu Q, Sun T. Assessing effects of dam operation on flow regimes in the lower Yellow River. *Procedia Environmental Sciences*. 2010; 2:507-16.
- [2]. Lotfi, A. Guideline on rapid assessment of environmental features of rivers. Environment Protection Department of Iran Publication. 2012.[Persian]
- [3]. 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.
- [4]. Arias M. I. E. Evaluating streamflow to characterize ecological functions of physical habitat in rivers. University of California, Davis; 2007.
- [5]. Waddle T. PHABSIM for Windows user's manual and exercises. 2012.
- [6]. Maddock I, Harby A, Kemp P, Wood PJ. *Ecohydraulics: an integrated approach*. John Wiley & Sons; 2013.
- [7]. Blanckaert K, Garcia XF, Steiger J, Uijttewaal W. *Ecohydraulics: linkages between hydraulics, morphodynamics and ecological processes in rivers*. *Ecohydrology*. 2013; 6(4):507-510.
- [8]. Poff NL, Richter BD, Arthington AH, Bunn SE, Naiman RJ, Kendy E, et al. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*. 2010; 55(1):147-70.
- [9]. Tharme RE. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River research and applications*. 2003;19(56):397-441.
- [10]. Shokoohi A, Hong Y. Using hydrologic and hydraulically derived geometric parameters of perennial rivers to determine minimum water requirements of ecological habitats (case study: Mazandaran Sea Basin—Iran). *Hydrological Processes*. 2011; 25(22):3490-3498.
- [11]. 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.

- [23]. Zhang Q, Xiao M, Liu CL, Singh VP. Reservoir-induced hydrological alterations and environmental flow variation in the East River, the Pearl River basin, China. *Stochastic environmental research and risk assessment*. 2014;28(8):2119-31.
- [24]. 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]
- [25]. 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.
- [26]. Tennant DL. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries*. 1976;1(4):6-10.
- [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]. Tessmann SA. Environmental Assessment. Technical Appendix E. Environmental use sector reconnaissance elements of the western Dakotas region of South Dakota study. Brookings, SD: South Dakota State University, Water Resources Research Institute. 1980.
- [29]. Filipek SP, Keith WE, Giese J. Status of the Instream Flow Issue in Arkansas, 1987. *Journal of the Arkansas Academy of Science*. 1987;41(1):43-8.
- [30]. Davis MM. Instream flow guidelines and protection of Georgia's aquatic habitats. Georgia Institute of Technology; 2005.
- [31]. Ahmadi-nadushan B, ST-Hilaire A, Berube M, Robichaud E, Thiemonge N, Bobee B. A review of statistical methods for the evaluation of aquatic habitat suitability for instream flow assessment. *River Research and Applications*. 2006; 22:503-523.
- [32]. Zamani M, Eagdari S, Zarei N. Study of the *C. capota gracilis* Habitat Suitability Index in the Kordan River. *Fisheries Journal, Iranian Journal of Natural Resources*. 2015; 68(3):409-419. [Persian]
- [33]. Tabatabaei N, Hashemzadeh I, Eagdari S, Zamani M. Determinative factors in habitat preference of *Paracobitis iranica* (Nalbant & Bianco 1998) in Kordan River, Namak lake watershed. *Journal of Aquatic Ecology*. 2014; 3(4):1-9. [Persian]
- [34]. Gan K, McMahon T. Variability of results from the use of PHABSIM in estimating habitat area. *River Research and Applications*. 1990;5(3):233-9.
- [35]. Vosoghi G, Mostajir B. *Freshwater fish*. Tehran University Press. 2015. [Persian]
- [36]. Asadi H, Sattari M, Eagdari S. Investigation of the determinants of selectivity and preferential habitat *Capoeta capoeta gracilis* (Keyserling 1891) in the Siahrood River. *Iranian Journal of Fisheries Science*. 2014; 23(3):1-9. [Persian]
- [37]. Abdoli A. *Iranian interior water fish*. Museum of Nature and Wildlife of Iran. 1999. [Persian]
- [38]. Thompson M. Minimum flow recommendations for the Wellington region. 2015.
- [39]. Keenan L, Thompson M and Mzila D. Freshwater allocation and availability in the Wellington region: state and trends. Wellington: NIWA; 2012.
- [40]. Hay J. Instream flow assessment for the lower Ruamahanga River. Prep. Gt. Wellingt. Reg. Counc. Cawthron Rep. 2008;1403.
- [41]. Amini M, Shookohi A. Analytical solution Determination of the fracture point of the wetted environment graph - Discharge in a hydraulic method Determining the minimum environmental flow. *Journal of Hydraulic*. 2014; 9(1):27-43. [Persian]
- [42]. Zarakani M, Shookohi A, Pising V. Introducing a comprehensive ecological diet in the absence of data to determine the true environmental status of rivers. *Iranian Water Resources Research Journal*. 2017; 13(2):140-153. [Persian]
- [43]. Karimi SS, Yasi M, Eslamian S. Use of hydrological methods for assessment of environmental flow in a river reach. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2012; 9(3):549-58.