

مقاله علمی-پژوهشی

طراحی و تحلیل رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی رودخانه زرین گل با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی و مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی زیستگاه

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۴

چکیده

در مطالعات برنامه‌ریزی توسعه پایدار منابع آب در حوضه‌های آبخیز، درک، توصیف و طراحی رژیم جریان، نقش مهمی در برقراری تعادل فرآیندهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی و تداوم حیات اکوسیستم‌های رودخانه‌ای دارد. جریان اکولوژیکی پایه و اساس حفاظت از زیستگاه ماهیان رودخانه‌ای و از ارکان مدیریت اکوسیستم رودخانه است که بایستی به رسمیت شناخته شود، اما بدان اهمیت خاصی داده نمی‌شود. پایش جریان زیست‌محیطی در طول رودخانه، برای اطمینان از انتقال و توزیع جریان مطلوب اکولوژیکی مورد نیاز به اکوسیستم‌های آبی پایین‌دست، ضروری است. از این رو در پژوهش حاضر به منظور ایجاد شرایط پایدار اکولوژیکی در رودخانه زرین گل استان گلستان، طی محاسبات گام به گام تحلیل اکوهیدرولیکی زیستگاه گونه سیاه‌ماهی (*Capoeta gracilis* (Keyserling, 1861) و تحلیل جریان اکولوژیکی با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی تنانت و انتقال منحنی تداوم جریان و مدل شبیه‌سازی زیستگاه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد با انجام شبیه‌سازی هیدرولیکی و آنالیز سری زمانی دبی - فیزیک زیستگاه با استفاده از منحنی‌های شاخص مطلوبیت، محدوده رژیم جریان مورد نیاز برای تأمین پتانسیل اکولوژیکی زیستگاه گونه شاخص، بین ۲/۴۹ و ۰/۵۸ مترمکعب بر ثانیه به ترتیب در ماه‌های فروردین و آبان، با میانگین دبی سالانه ۱/۲۵ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۵۹ درصد جریان طبیعی رودخانه) می‌باشد. همچنین مقایسه میزان تخصیص آب برای تأمین جریان زیست‌محیطی با روش تنانت در رودخانه مورد مطالعه نشان داد، کمبود جریان در فصول تابستان و زمستان (جریان رودخانه کمتر از جریان زیست‌محیطی است) مشاهده می‌شود. در نهایت این نتیجه به عمل آمد که روش‌های دیگر تأمین جریان زیست‌محیطی (انتقال منحنی تداوم جریان و شبیه‌سازی زیستگاه)، مقادیر بالاتر از ۳۰ درصد میانگین جریان سالانه را فراهم می‌کند، که محافظت بهتر جریان را برای زیستگاه رودخانه فراهم می‌کنند. بر اساس نتایج این مطالعه، توزیع مطلوبیت زیستگاهی در طول رودخانه زرین گل، تحت تأثیر پارامترهای هندسی، هیدرولیکی و میزان دبی جریان، بیانگر شرایط مطلوب زیستگاهی گونه سیاه‌ماهی در محدوده پایین‌دست و شرایط ضعیف در محدوده بالادست رودخانه می‌باشد. در نهایت، رویکرد مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی زیستگاه، نسبت به روش‌های هیدرولوژیکی بسیار انعطاف‌پذیرتر بوده و می‌تواند برای تجزیه و تحلیل‌های میزان مطلوبیت زیستگاه ماهیان در مدیریت اکوسیستم رودخانه، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: جریان زیست‌محیطی، رودخانه زرین گل، سیاه‌ماهی، مساحت قابل استفاده وزنی، مطلوبیت زیستگاه

مقدمه

بخش‌های محیط‌زیستی آبی است. رژیم هیدرولوژیکی جریان، یک عامل کنترل‌کننده پارامترهای کلیدی زیستگاه رودخانه مانند عمق و سرعت آب بوده و همچنین نقش کلیدی در شکل‌گیری تنوع‌زیستی و حفظ سلامت و پایداری اکوسیستم رودخانه دارد (۵، ۸ و ۲۹). جریان‌های زیست‌محیطی رودخانه به عنوان مهم‌ترین اجزای رژیم اکولوژیکی می‌باشند. جریان زیست‌محیطی را می‌توان ابزاری به منظور اعمال مدیریت صحیح زیست‌محیطی، کنترل آلودگی منابع آب و حفظ اکوسیستم رودخانه در چهارچوب مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز در نظر گرفت (۴، ۱۵ و ۲۵). برای تخمین حق‌آبه زیست‌محیطی رودخانه‌ها در مدیریت پایدار منابع آب و حفظ

از مهم‌ترین اصول در یکپارچه‌سازی موضوعات مربوط به مدیریت اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و رژیم جریان آب، برقراری تعادل پایدار در شرایط اکولوژیکی رودخانه‌ها و در حداقل نگه‌داشتن آسیب وارده به

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
(*) نویسنده مسئول: (Email: mzakerinia@gau.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.v34i3.79294

است. وانگ و همکاران (۲۷) از مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه با استفاده از حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی برای تعیین جریان زیست‌محیطی در پایین‌دست رودخانه یانگ‌تسه چین برای ده گونه شاخص ماهی بومی استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داد، رژیم اکولوژیکی مورد نیاز بدست آمده از این روش معادل ۲۳۹۵ مترمکعب بر ثانیه برای تأمین و حفاظت از زیستگاه رودخانه می‌باشد.

در ایران نیز مطالعات اندکی در مورد کاربرد روش‌های مختلف هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و نیز مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی زیستگاه رودخانه‌ای در تحلیل رژیم جریان زیست‌محیطی رودخانه انجام شده است: از جمله، نیک‌قلب و همکاران (۲۰) برآورد رژیم اکولوژیکی جریان رودخانه کاظم‌رود واقع در جنوب‌غربی دریای خزر برای ماهی زرده‌پر *Luciobarbus capito* با روش شبیه‌سازی زیستگاه، صدیق‌کیا و همکاران (۲۳) شبیه‌سازی اکولوژیکی-هیدرولیکی زیستگاه ماهی قزل‌آلای خال قرمز *Salmo trutta* در رودخانه‌های الرم، آب سفید و دلچای واقع در پارک ملی لار در حوضه جنوبی دریای خزر با مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه، نادری و همکاران (۱۵) بکارگیری مدل شبیه‌سازی زیستگاه PHABSIM جهت تأمین حداقل شرایط زیستگاه گونه سیاه‌ماهی *Capoeta gracilis* (Keyserling, 1861) در رودخانه قره‌سو استان گلستان، مصطفوی و یاسی (۱۴) تعیین حداقل جریان زیست‌محیطی با استفاده از روش‌های اکوهیدرولوژیکی به منظور حفاظت از اکوسیستم رودخانه باراندوزچای، زرکانی و شکوهی (۲۹) معرفی رژیم جامع اکولوژیکی رودخانه آزارود در حوضه چالوس با روش اجزای سازنده، صدیق‌کیا و همکاران (۲۲) برآورد جریان زیست‌محیطی حوضه آبخیز سیمین‌دشت استان تهران با اصلاح روش تنانت و محیط خیس شده، و اسماعیلی و همکاران (۱۰) برآورد حقایق محیط زیستی رودخانه گرگانرود با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی، می‌توان اشاره کرد.

با توجه به جدید بودن علم مدل‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای در جهان، مطالعات اندکی در زمینه تعیین رژیم جریان زیست‌محیطی با مدل‌های اکوهیدرولیکی و شبیه‌سازی زیستگاه رودخانه‌ای (PHABSIM) در کشور ایران صورت گرفته است. بر این اساس در پژوهش حاضر جهت برنامه‌ریزی و مدیریت اکوسیستمی رودخانه زرین‌گل استان گلستان، سعی می‌شود ضمن پیاده‌سازی و ارزیابی رژیم جریان زیست‌محیطی با روش‌های مختلف هیدرولوژیکی (تنانت و انتقال منحنی تداوم جریان) و مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی زیستگاه، راهی نو را بر اساس نتایج این تحقیق دقیق‌تر و سازگارتر با شرایط جریان رودخانه‌ای، معرفی نماید.

اکوسیستم‌های موجود در حوضه‌های آبخیز، روش‌های مختلف با در نظر گرفتن شرایط هیدرولوژیکی، اکولوژیکی و هیدرولیکی و انعطاف‌پذیری و سازگاری با منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد (۴، ۲۵ و ۲۶). با توجه به اثرات زیان‌بار تغییرات رژیم‌های طبیعی جریان رودخانه‌ها توسط سدها و دیگر سازه‌های آبی و تهدید اکوسیستم‌های آبی وابسته به رژیم جریان رودخانه، نیاز به یک راه‌حل جامع برای مدیریت اکوسیستمی رودخانه می‌باشد. نیاز دینامیک اکوسیستم رودخانه، پایه گذار علم جدیدی تحت عنوان اکوهیدرولیک شده است. تحقیقات حوزه اکوهیدرولیک در زمینه تحلیل ارتباطات پیچیده میان عوامل مختلف تأثیرگذار بر اکوسیستم آبی، درک و مدل‌سازی عملکرد شبکه رودخانه‌ای به عنوان راهروهای زیست‌محیطی برای مهاجرت گونه‌های ماهیان، عملیات آزمایشگاهی و میدانی برای ایجاد یک چارچوب یکپارچه اکوهیدرولوژیکی برای حفاظت از تنوع زیستی در حوضه رودخانه، تاکنون پیشرفت داشته است (۶، ۱۶، ۱۷ و ۲۳).

محققین بسیاری به تحلیل مباحث مربوط به شبیه‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای و برآورد جریان زیست‌محیطی در جهان پرداخته‌اند. در ادامه به نمونه‌هایی از مطالعات انجام شده پرداخته می‌شود. در پژوهشی بورگیس و همکاران (۸) رابطه بین پراکنش و مساحت قابل استفاده وزنی^۱ ماهی قزل‌آلا در رودخانه کاتاماران بروک کانادا را با مدل شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه^۲ مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد، با اجرای سناریوهای مختلف جریان، حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی در زیستگاه‌های مختلف در ۸۵ درصد متوسط جریان سالانه^۳ می‌باشد. در تحقیقی دیگر، وای و همکاران (۲۸) با مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه آبیان با استفاده از مدل یک بعدی شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه (PHABSIM)، نشان دادند در پروژه‌های احیا و باززنده‌سازی زیستگاه^۴ رودخانه، با ارزیابی شاخص مطلوبیت زیستگاه در مراحل مختلف زندگی گونه شاخص، بایستی اقدامات لازم جهت تنظیم جریان اکولوژیکی را به‌عمل آورد. ناکاواچارا و همکاران (۱۹) در مطالعه ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه ناخون نایوک تابلند با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و مدل شبیه‌سازی زیستگاه بیان کردند، برای حفاظت از زیستگاه رودخانه، رویکردهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی، رژیم جریان زیست‌محیطی را خیلی زیاد و یا خیلی کم برآورد کرده در حالی که مدل شبیه‌سازی زیستگاه، نیازهای اکولوژیکی را با توجه به شرایط بیولوژیکی و تعاملات موجودات آبی در رودخانه پیشنهاد داده

1- Weighted Usable Area: WUA

2- Physical HABitat SIMulation: PHABSIM

3- Mean Annually Flow: MAF

4- Habitat Restoration Projections

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

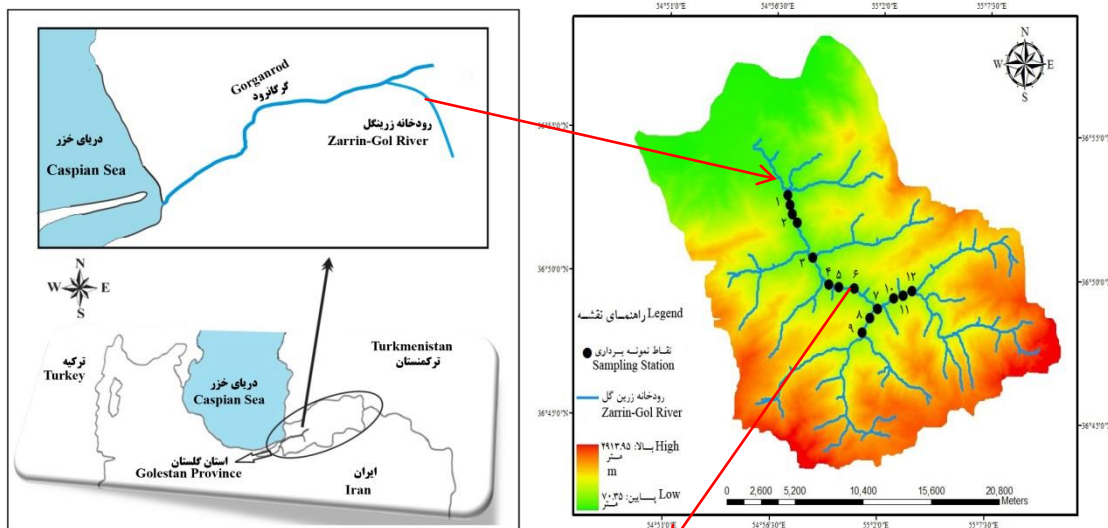
ماهیان بومی منطقه می باشد (۱۱، ۱۲ و ۲۴). بر اساس آمار و اطلاعات دوره ۴۲ ساله (۱۳۹۵-۱۳۵۳) ایستگاه هیدرومتری زرین گل از شرکت آب منطقه ای استان گلستان که در ۳۶ درجه و ۵۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی واقع شده است، متوسط آبدهی سالانه، حداکثر و حداقل دبی به ترتیب معادل ۲/۱۱، ۵/۹۳ و ۱/۰۵ متر مکعب بر ثانیه می باشد.

روش های استفاده شده در تعیین جریان زیست محیطی روش های هیدرولوژیکی

تنانت (۲۶) جریان های مشخصی که هر یک معرف کیفیت زندگی ماهیان بودند را در غالب سه پارامتر عمق، سرعت و درصد محیط خیس شده همراه با ملاحظات بیولوژیکی و تفرج برای زندگی ماهیان به صورت زیستگاه بقای کوتاه مدت، زیستگاه حیاتی و زیستگاه عالی برای بقاء تعریف کرد.

حوضه آبخیز زرین گل به عنوان حوضه ای مرطوب در جنوب شرقی شهرستان علی آبادکول استان گلستان، در مختصات جغرافیایی ۳۰' ۳۶" تا ۳۶' ۴۳" عرض شمالی و ۱۰' ۵۳" ۵۴" تا ۳۶' ۱۱" طول شرقی گسترده شده است (شکل ۱). این حوضه با حداکثر و حداقل ارتفاع ۲۹۹۷ و ۲۸۰ متر با میانگین ارتفاعی ۱۵۳۵ متر از سطح دریا، دارای شیب متوسط ۱۲ درصدی می باشد. رودخانه زرین گل به عنوان یکی از سرشاخه های گرگانود، به طول ۲۲ کیلومتر و با بستر سنگی-سنی، از ارتفاعات سرخان، میلان، آقند و کمر، سرچشمه گرفته و در حوالی روستای باغه یلمه سالیان به رودخانه گرگانود می پیوندد.

رودخانه زرین گل از جمله رودخانه های دائمی استان گلستان است که از آبدهی مناسب و سیلاب بالایی برخوردار است و در اواخر فصل زمستان و اوایل بهار فصل به علت بارش های فصلی باران و همچنین ذوب برف ها در ماه های اسفند و فرودین، قابلیت سیلابی شدن را دارد (۱۶ و ۱۷). رودخانه زرین گل با توجه به دانه بندی ذرات بستر از جمله رودخانه های با بستر درشت دانه است و دارای پراکنش گونه ای مختلف



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه های نمونه برداری در رودخانه زرین گل
Figure 1- Location of the study area and sampling stations in Zarrin-Gol river

مختلف مدیریت جریان قابل اجرا بوده و تأثیر رژیم‌های مختلف جریان بر میزان زیستگاه در دسترس، مورد بررسی قرار می‌گیرد. خروجی مدل PHABSIM، منحنی‌های مساحت قابل استفاده وزنی است. با داشتن دبی، میزان مساحت قابل استفاده وزنی برای تمامی دوره‌های هیدرولوژیکی قابل استخراج خواهد بود (رابطه ۱).

$$WUA = \left[\frac{\sum_{i=1}^n A_i \times CSI_i}{L} \right] * 1000 \quad (1)$$

$$CSI = SI_d \times SI_v \times SI_b \quad (2)$$

که در روابط فوق: A_i : سطح هر سلول زیستگاهی، CSI_i شاخص مطلوبیت ترکیبی^۳ هر سلول، L طول بازه، WUA (مساحت قابل استفاده وزنی) تابعی از Q (دبی جریان) و SI_i شاخص مطلوبیت^۴ هر متغیر می‌باشند.

پارامترهای هیدرولیکی و ژئومورفیکی زیستگاه رودخانه

شکل بستر رودخانه، تأثیر مشخصی بر روی زبری بستر و در نتیجه مقاومت جریان دارد. در واقع شکل بستر، تابعی از دبی عبوری، ژئومورفولوژی منطقه و نیروی هیدرودینامیک رودخانه است (۷ و ۱۳). اشکال مختلف بستر رودخانه به صورت خیزاب^۵ و گوداب^۶ می‌باشد (شکل ۲). بسترهای شامل توپوگرافی گوداب - خیزاب محل پرورش و تخم‌ریزی آبزیان از جمله ماهی‌ها می‌باشد (۲، ۵ و ۱۷). ماهیان رودخانه‌ای بر اساس سازگاری‌های رفتاری، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی، زیستگاه خاصی را ترجیح می‌دهند که برای بقا و پایداری افراد و جمعیت‌ها، حائز اهمیت می‌باشند (۱۳ و ۳۰). شرایط هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی رودخانه‌ها پیوسته در حال تغییر بوده و زیستگاه‌های متنوعی را برای ماهیان و دیگر آبزیان فراهم می‌سازد. شکل بستر گوداب، شکل طبیعی بستر رودخانه است و با عمق زیاد و سرعت کم شناسایی می‌شوند و یک زیستگاه حیاتی برای موجودات آبی و ماهیان به‌شمار می‌روند (۵، ۶ و ۹). این نوع بسترها نامتقارن بوده و در مجاورت تپه‌های شنی قرار دارند. همچنین گوداب‌ها در دبی‌های پایین، سرعت کمی دارند. زیستگاه خیزاب مناطق کم عمق رودخانه هستند و در رودخانه‌های با شیب تند تا ملایم و در دشت‌های سیلابی کاملاً توسعه یافته بین خمیدگی‌ها ایجاد می‌شوند و یکی از خصوصیات رودخانه‌های شنی محسوب می‌شوند (۱۸). در محل پیچ رودخانه، عموماً به دلیل فرسایش در مقطع رودخانه، زیستگاه گوداب تشکیل خواهد شد، در حالی که در مقاطع قبل پیچ

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 در جریان‌های بیش از ۶۰ درصد متوسط سالانه احراز می‌شوند (۲۰، ۲۶ و ۲۹).

روش انتقال منحنی تداوم جریان^۱ برای اولین بار توسط اسمختین و آنپوتاس (۲۵) به منظور ارزیابی جریان زیست‌محیطی در سامانه رودخانه معرفی شده است. در برآورد جریان زیست‌محیطی در روش انتقال منحنی تداوم جریان، از داده‌های دبی جریان ماهیانه رودخانه استفاده شده و بر مبنای منحنی تداوم جریان طبیعی و موجود رودخانه، منحنی تداوم جریان زیست‌محیطی برای هر کلاس موردنظر از مدیریت زیست‌محیطی تعیین می‌گردد (۱۴). برای محاسبه جریان زیست‌محیطی از روش تغییر منحنی تداوم جریان از اولین نسخه نرم‌افزار GEFC^۲ استفاده می‌شود. در این روش چهار مرحله اصلی وجود دارد که عبارت‌اند از: (۱) شبیه‌سازی وضعیت‌های هیدرولوژیکی موجود، (۲) تعریف کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی، (۳) تولید منحنی‌های تداوم جریان زیست‌محیطی و (۴) تولید سری زمانی جریان زیست‌محیطی ماهیانه (۱۴ و ۲۵).

روش شبیه‌سازی زیستگاه

شبیه‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای، یکی از جنبه‌های مهم در علم هیدرولیک زیستی محسوب می‌گردد. اولین مدل تجاری مهم در زمینه شبیه‌سازی زیستگاه، مدل هیدرولیکی-زیستگاهی PHABSIM می‌باشد. PHABSIM یک مدل اکوهیدرولیکی است که مجموعه‌ای از ابزار را برای مدل‌سازی هیدرولیکی مطلوبیت زیستگاه‌های ماهیان فراهم می‌نماید که توسط مرکز مطالعات ژئوفیزیک آمریکا در دهه ۱۹۷۰ ارائه شد (۶، ۱۵ و ۲۳). عملکرد مدل به این صورت است که در ابتدا اطلاعات هیدرولیکی مربوط به رودخانه، شامل دبی، عمق و سرعت جریان و همچنین هندسه مقطع معرف رودخانه وارد نرم‌افزار می‌شوند (۳، ۲۰ و ۲۷). زیرمدل هیدرولیکی نرم‌افزار به کمک این اطلاعات قادر است شرایط جریان را برای دبی‌های دلخواه شبیه‌سازی نماید. در منابعی مانند (۶، ۱۵) و (۱۷) شرح تفصیلی این مدل آمده است. با انجام شبیه‌سازی هیدرولیکی و زیستگاهی، منحنی‌های دبی-فیزیک زیستگاه برای گونه هدف در بازه مورد مطالعه و در دوره زیستی مورد بررسی، استخراج می‌شود و با داده‌های سری زمانی دبی جریان رودخانه ترکیب و در نهایت منحنی تداوم فیزیک زیستگاه ایجاد می‌شود. با توجه به منحنی تداوم فیزیک زیستگاه، سناریوهای

3- Combined Suitability Index

4- Suitability Index

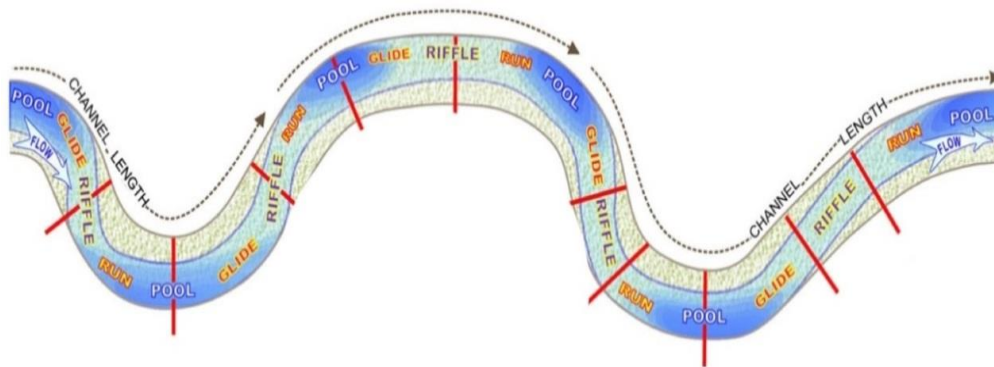
5- Riffle

6- Pool

1- Flow Duration Curve Shifting: FDC Shifting

2- Global Environmental Flow Calculator

رودخانه که دارای پوشش اغلب قلوه سنگی هستند، زیستگاه خیزآب تشکیل می شود (۶).



شکل ۲- نمایش توالی های گوداب و خیزاب (۱۶)

Figure 2- Shows pool -riffle sequence (16)

مطلوبیت زیستگاه^۱ است (۱۶، ۱۷، ۲۸ و ۳۰). به دلیل نیاز به منحنی های مطلوبیت، با بازدهی های میدانی و بهره مندی از نظرات متخصصان اکولوژی آبریزان، داده های مورد نیاز جهت برآزش منحنی های مطلوبیت زیستگاه مهیا شد. سنجش و اندازه گیری پارامترهای محیطی و هیدرولیکی (مقاطع عرضی رودخانه شامل فاصله هر مقطع از مقطع پایین دست، موقعیت جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا، عمق، عرض و سرعت آب، ساختار بستر) و نمونه برداری از ماهیان (جهت تخمین سن و مرحله زندگی آن) از طریق صید الکتریکی^۲، جهت تولید منحنی های شاخص مطلوبیت در فصول مختلف سال ۱۳۹۶ از ۱۲ ایستگاه نمونه برداری (جدول ۱ و شکل ۱) با حضور تیم عملیاتی (متشکل از پژوهشگران اکولوژی آبریزان و مهندسی آب)، از پایین دست رودخانه زرین گل به سمت بالادست انجام شد. در انتخاب ایستگاه مطالعاتی و نمونه برداری میکروزیستگاه، فاکتورهایی شامل قرار داشتن مرزهای محدوده مطالعاتی تحت تأثیر رژیم جریان (با بررسی نقشه توپوگرافی و نیز سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS و الحاقیه HEC-GeoRAS)، دارا بودن هیدروگراف یکسان در نواحی دارای شرایط مشابه هیدرولوژیکی، تنوع در ریخت شناسی رودخانه (عرض کم رودخانه، گودال های مسیر رودخانه، زیستگاه های سنگلاخی و ایستگاه های گیاهی حاشیه رودخانه) و قطعه بندی نواحی هیدرولوژیکی به زیر نواحی ژئومورفولوژیکی که دارای هیدروگراف یکسان ولی شیب متفاوت باشند، مدنظر قرار گرفتند. در مجموع از ۱۲ ایستگاه نمونه برداری رودخانه زرین گل، گونه های سیاه ماهی، خیاطه، سگ ماهی جویباری و گاوماهی شنی

ضریب زبری برای بررسی جنبه های اکولوژیکی یک رودخانه در شبیه سازی شرایط جریان مرتبط با زیستگاه مناسب، نیز مهم می باشد (۱۳). ضریب زبری عمدتاً منعکس کننده مقاومت رودخانه در برابر جریان است که به جهت موثر بودن بر روی شرایط جریان رودخانه (تراز سطح آب و سرعت) مهم می باشد. مقدار ضریب زبری مانینگ با توجه به دانه بندی مصالح بستر رودخانه زرین گل از طریق بازدید میدانی و روابط تجربی در روش چاو (که به قطر ذرات تشکیل دهنده جدار و بستر آبراهه بستگی دارد)، در طول رودخانه مورد مطالعه و در ایستگاه های انتخابی، بین ۰/۰۲۹ تا ۰/۰۵ متفاوت می باشد و با توجه به اینکه عواملی همچون نامنظمی کناره ها و همچنین وجود پوشش گیاهی، زبری کناره ها را افزایش می دهد و دیگر شرایط حاکم بر رودخانه در مقاطع مختلف همچون درجه ناهمواری، وجود موانع و شکل مسیر، با استفاده از جداول تعیین ضریب زبری ونتی چاو و تطبیق آن با مشاهدات میدانی به عمل آمده در بازه پایین دست مطالعاتی، مقدار این پارامتر در قسمت های انتهایی ایستگاه های مورد مطالعه به دلیل وجود پوشش گیاهی در بستر رودخانه ۰/۰۳۵ منظور و به مدل معرفی گردیده است.

مطالعات میدانی اندازه گیری پارامترهای هیدرولیکی و

اکولوژیکی

به طور کلی شاخص های اکوهیدرولیکی رودخانه عبارتند از شاخص هایی از هیدرولیک رودخانه که بر حیات آبریزان رودخانه مخصوصاً ماهیان و شرایط اکولوژیکی رودخانه مؤثر هستند. برای برقراری رابطه میان فرآیندهای هیدرولوژیکی، مورفولوژیکی و اکولوژیکی در اکوسیستم های رودخانه ای، نیاز به منحنی های شاخص

1- Habitat Suitability Curves: HSC

2- Electrofishing

خزری صید گردید (جدول ۲). جدول ۳، فراوانی ماهیان (قطعه در هر متر مربع) در ایستگاه‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و مشخصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رودخانه زرین‌گل

Table 1- Geographic location and characteristics of sampling stations in Zarrin-Gol river

| ایستگاه Station | موقعیت جغرافیایی Geographical Location | | پارامترهای محیطی Environmental Parameters | | | | |
|--------------------|---|---------------------------|--|---------------------------|---------------------|---------------------|--|
| | طول جغرافیایی Longitude | عرض جغرافیایی Latitude | ارتفاع از سطح دریا Above Sea Level (m) | سرعت Velocity (m/s) | عمق Depth (m) | عرض Width (m) | فرم مورفولوژی بستر Form morphology substrate |
| 1 | 54° 93' 07" | 36° 90' 41" | 261.9 | 0.82 | 0.48 | 3.93 | Pool |
| 2 | 54° 93' 47" | 36° 89' 98" | 296.3 | 0.71 | 0.41 | 3.81 | Pool |
| 3 | 54° 94' 65" | 36° 88' 68" | 352.7 | 0.63 | 0.61 | 3.93 | Pool |
| 4 | 54° 95' 13" | 36° 88' 18" | 496.2 | 0.44 | 0.51 | 5.25 | Pool |
| 5 | 54° 95' 43" | 36° 87' 46" | 567.1 | 0.54 | 0.45 | 4.85 | Riffle |
| 6 | 54° 95' 55" | 36° 87' 14" | 639.8 | 0.66 | 0.48 | 4.64 | Riffle |
| 7 | 54° 96' 67" | 36° 85' 91" | 667.1 | 0.54 | 0.57 | 4.28 | Pool |
| 8 | 54° 96' 93" | 36° 85' 29" | 721.9 | 0.53 | 0.41 | 4.81 | Riffle |
| 9 | 54° 97' 02" | 36° 84' 75" | 848.5 | 0.72 | 0.38 | 5.93 | Pool |
| 10 | 55° 02' 28" | 36° 81' 67" | 916.7 | 0.92 | 0.53 | 5.81 | Riffle |
| 11 | 55° 03' 15" | 36° 81' 45" | 985.2 | 1.14 | 0.58 | 5.65 | Riffle |
| 12 | 55° 03' 49" | 36° 81' 78" | 1067.2 | 1.13 | 0.51 | 5.18 | Riffle |

جدول ۲- فراوانی (قطعه در متر مربع) ماهیان در فصول مختلف نمونه‌برداری رودخانه زرین‌گل

Table 2- Frequency (Piece /m²) of fishes in sampling different stations Zarrin-Gol river

| فصل/گونه Species/Season | گاوماهی شنی خزری <i>Neogobius fluviatilis pallasii</i> | سگماهی جویباری <i>Paracobitis malapterura</i> | ماهی خیاطه <i>Albernoidea eichwaldii</i> | سیاهماهی <i>Capoeta gracilis (Keyserling, 1861)</i> | کل Total |
|----------------------------|---|--|---|--|-------------|
| بهار (Spring) | 0.07 | 0.15 | 0.7 | 0.7 | 1.62 |
| تابستان (Summer) | 0.09 | 0.45 | 0.98 | 1.11 | 2.63 |
| پاییز (Autumn) | 0.03 | 0.36 | 0.54 | 1.67 | 2.6 |
| زمستان (Winter) | 0.05 | 0.36 | 0.36 | 0.48 | 1.25 |

جدول ۳- فراوانی (قطعه در متر مربع) ماهیان در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌برداری رودخانه زرین‌گل

Table 3- Frequency (Piece /m²) of fishes in sampling different seasons Zarrin-Gol river

| ایستگاه/گونه Species /Station | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| سیاهماهی <i>Capoeta gracilis (Keyserling, 1861)</i> | 0.074 | 0.215 | 0.234 | 0.227 | 0.099 | 0.01 | 0.01 | 0.047 | 0.001 | 0 | 0 | 0 |
| ماهی خیاطه <i>Albernoidea eichwaldii</i> | 0.05 | 0.097 | 0.888 | 0.229 | 0.04 | 0.056 | 0.004 | 0.003 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| سگماهی جویباری <i>Paracobitis malapterura</i> | 0.015 | 0.072 | 0.057 | 0.028 | 0.044 | 0.185 | 0.017 | 0.063 | 0.002 | 0.017 | 0.099 | 0 |
| گاوماهی شنی خزری <i>Neogobius fluviatilis pallasii</i> | 0 | 0 | 0.131 | 0.001 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| کل Total | 0.139 | 0.384 | 1.309 | 0.564 | 0.184 | 0.251 | 0.031 | 0.113 | 0.003 | 0.017 | 0.099 | 0 |

انتخاب مدل بیولوژیک

مشاهده است که خود گواهی بر قدرت تحمل وسیع سیاهماهی و قابلیت شنای بالای این ماهی برای مهاجرت‌های درون رودخانه‌ای است. گونه سیاهماهی (*Capoeta gracilis* (Keyserling, 1861) از

مطالعه فراوانی سیاهماهی در فصول و ایستگاه‌های مختلف به خوبی نشان می‌دهد این گونه در اکثر ایستگاه‌های مطالعاتی قابل

هیدرومتری زرین گل محاسبه گردید که خلاصه نتایج آن در جدول ۴ و ۵ و مقادیر توزیع جریان زیست محیطی ماهانه این روش ها در جدول ۶ ارائه شده است. در روش تنانت پیشنهاد شده است که پایین ترین حد ممکن برای نیاز آب زیست محیطی مطابق با شرایط بسیار ضعیف یک اکوسیستم رودخانه‌ای، ۱۰ درصد متوسط جریان سالانه برای ماه‌های مهر تا اسفند و ۳۰ درصد متوسط جریان سالانه برای ماه‌های فروردین تا شهریور در نظر گرفته شده قادر به حفظ وضعیت‌های بقای نسبتاً قابل قبول است. نتایج پیشنهادی حاصل از روش تنانت در درصد‌های مختلفی از متوسط جریان سالانه به عنوان جریان زیست محیطی رودخانه زرین گل، در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق جدول ۴، برای آنکه وضعیت عادلانه‌ای (قابل قبول) در رودخانه زرین گل برقرار باشد، در شش ماه اول سال (برای فروردین تا شهریور)، باید جریانی معادل ۰/۶۳ متر مکعب بر ثانیه و در شش ماه دوم سال (برای مهرماه تا اسفند)، دبی برابر ۰/۲۱ متر مکعب بر ثانیه با میانگین ۰/۴۸ متر مکعب بر ثانیه در رودخانه زرین گل برقرار باشد. روش انتقال منحنی تداوم جریان به عنوان یک روش ترکیبی هیدرولوژیکی- اکولوژیکی به منظور حفظ الگوی کلی تغییرپذیری جریان، جریان زیست محیطی را بر اساس دید اکولوژیکی در کلاس‌های مدیریت زیست محیطی مختلف با توجه به شرایط زیستی رودخانه و با استفاده از آمار دبی‌های ماهیانه ایستگاه هیدرومتری موجود بر روی رودخانه ارائه می‌کند.

خانواده کپورماهیان و یکی از گونه‌های غالب و بومی حوضه آبخیز جنوبی دریای خزر و از لحاظ حفظ ذخایر ژنتیکی، صید ورزشی و مطالعه جغرافیای جانوری حائز اهمیت است (۱ و ۲۴). حداکثر طول کل سیاه‌ماهی ۳۵ سانتی‌متر و بیشینه وزن آن ۲۲۵ گرم و میانگین طول کل ۲۲ سانتی‌متر و میانگین وزن آن ۷۵ گرم است. تولیدمثل سیاه‌ماهی عمدتاً در فصل بهار از اسفندماه تا تیرماه صورت می‌گیرد. تخم‌ریزی در ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متری آب در شن و ماسه و بر روی تخته سنگ‌ها رخ می‌دهد. تخم‌ریزی در حال حرکت در داخل آب اتفاق افتاده و تخم‌ها توسط شن و ماسه و یاسنگ‌های کوچک پوشانده می‌شوند (۱ و ۲). بالغین این ماهی هر ساله جهت تخم‌ریزی در داخل رودخانه محل زیست خود مهاجرت‌های تولیدمثلی دارند و از قسمت پایین دست به بالادست مهاجرت می‌کنند و پس از تخم‌ریزی دوباره به سمت پایین دست مراجعت می‌کنند (۱۵). همچنین از موجودات کفزی، لار، حشرات و گیاهان آبزی تغذیه می‌کنند. ترجیح زیستگاهی سیاه‌ماهی اعماق میانه با سرعت نسبتاً آرام و بسترهای سنگی با اندازه کوچک تا متوسط می‌باشد (۵). در این مطالعه، گونه سیاه‌ماهی بنا به دلایل ذکر شده و همچنین پراکنش وسیع در رودخانه زرین گل، به عنوان گونه هدف انتخاب گردید.

نتایج و بحث

با کاربرد دو روش هیدرولوژیکی تنانت و انتقال منحنی تداوم جریان، جریان زیست محیطی رودخانه زرین گل، در ایستگاه

جدول ۴- جریان زیست محیطی رودخانه زرین گل در ایستگاه هیدرومتری زرین گل با استفاده از روش تنانت
Table 4- Environmental Flow of Zarrin-Gol river hydrometry station using tennant method

| شرح جریان Description of flows | روش تنانت | | جریان پیشنهادی | |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| | Tennant method (% MAF) | | Proposed flow (m ³ /s) | |
| | مهر - اسفند October- March | فروردین - شهریور April- September | مهر - اسفند October- March | فروردین - شهریور April- September |
| شستشوی سریع Flushing | 200 | | 4.22 | |
| محدوده بهینه Optimum range | 60-100 | | 1.26-2.11 | |
| بسیار عالی Outstanding | 40 | 60 | 0.84 | 1.26 |
| عالی Excellent | 30 | 50 | 0.63 | 1.05 |
| خوب Good | 20 | 40 | 0.42 | 0.84 |
| قابل قبول Fair or degrading | 10 | 30 | 0.21 | 0.63 |
| ضعیف Poor or minimum | 10 | 10 | 0.21 | 0.21 |
| بسیار ضعیف Severe degradation | <10 | <10 | <0.21 | <0.21 |

جدول ۵- کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی در روش انتقال منحنی تداوم جریان
Table 5- Environmental Management Classes in FDC Shifting method

| کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی Environmental Management Classes | شرایط اکولوژیکی Ecological Condition | نیاز آبی زیست محیطی Environmental Water Requirement (% MAF) |
|--|---|---|
| A | طبیعی Natural | 75.4 |
| B | اندک تغییر یافته Slightly Modified | 53.9 |
| C | نسبتاً تغییر یافته Moderatly Modified | 40.2 |
| D | تا حد زیادی تغییر یافته Largely Modified | 35.5 |
| E | آسیب‌دیدگی زیاد زیستگاه طبیعی Seriously Modified | 31.1 |
| F | تغییرات در سطح بحرانی Critically Modified | 24.6 |

بدون در نظر گرفتن تغییرات طبیعی جریان و نوع و وضعیت موجودات زنده رودخانه و نیازهای اکولوژیکی در مراحل مختلف زندگی گونه هدف می‌باشد (۲۹).

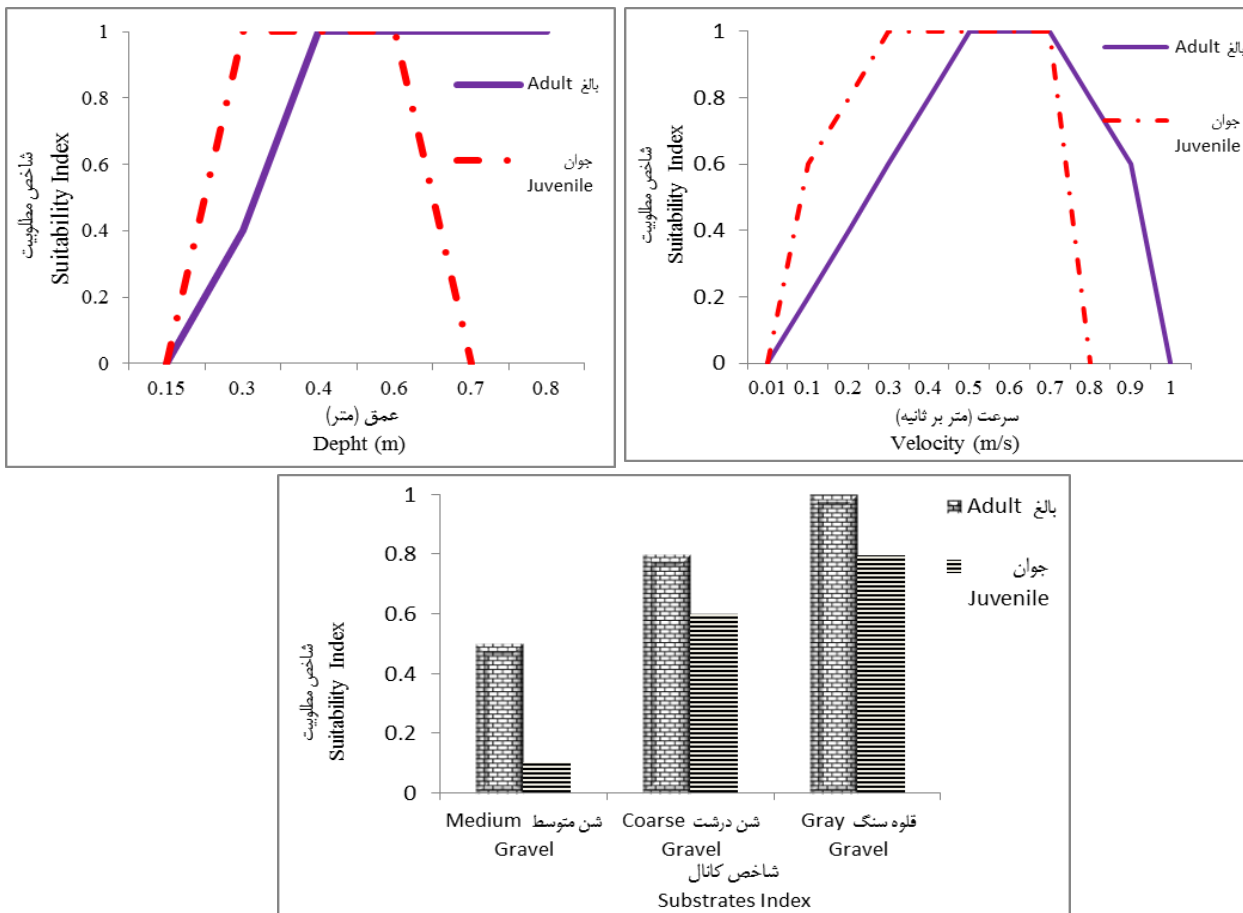
در ادامه به منظور بررسی شرایط اکولوژیکی رودخانه زرين گل، با توجه به مشاهدات میدانی، برای گروه سنی بالغ و جوان سیاه‌ماهی، منحنی‌های مطلوبیت فیزیکی زیستگاه بر طبق روش ژاکوب توسعه داده شد (۲۱). در شکل ۳ منحنی‌های مطلوبیت زیستگاهی در مراحل مختلف زندگی گونه هدف، برای هر ۳ پارامتر اصلی عمق، سرعت و اندازه ذرات بستر نشان داده شده است. در تقسیم‌بندی ساختار بستر، با توجه به قطر سنگ‌های غالب اندازه‌گیری شده رودخانه در مطالعه میدانی، در محدودهٔ شن متوسط (۱۶-۸ میلی‌متر)، شن درشت (۱۲۸-۱۶ میلی‌متر) و شن بسیار درشت و شبیه قله‌سنگ (۲۵۶-۱۲۸ میلی‌متر) بودند.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، با افزایش سن ماهی و در دوره بالغ گونه هدف اعماق و سرعت‌های بیشتری را نسبت به گروه سنی جوان ترجیح می‌دهد. یکی از دلایل این امر نیاز به پوشش برای این گروه سنی به عنوان پناهگاه استراحتگاه و ایستگاه‌های تغذیه می‌باشد که با افزایش عمق، توربولانس سطحی و زیرلایه‌ای که شامل مواد درشت‌تر می‌باشد، فراهم می‌شود و وضعیت مطلوبیت زیستگاه بهتر شده است. با افزایش عمق و سرعت جریان، مطلوبیت زیستگاه گروه سنی جوان کاهش می‌یابد و این گروه سنی اعماق و سرعت‌های کم‌تر را ترجیح می‌دهند، زیرا سرعت بالای جریان آب، سبب صرف انرژی ماهیان برای مقابله با شدت جریان و حفظ تعادل و شناوری در آب می‌شود. در حالت کلی مناسب‌ترین محدوده که احتمال ایجاد کم‌ترین آسیب را به میزان مطلوبیت

نتایج این روش در شش کلاس مدیریت زیست‌محیطی محاسبه شده در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۵، برای حفظ رودخانه زرين گل در کلاس A (طبیعی)، ۷۵/۴ درصد متوسط جریان سالیانه، در کلاس B (اندکی تغییر یافته)، ۵۳/۹ درصد، در کلاس C (نسبتاً تغییر یافته)، ۴۰/۲ درصد و در کلاس D (تا حد زیادی تغییر یافته)، که حداقل کلاس قابل قبول است، ۳۵/۵ درصد متوسط جریان سالیانه موردنیاز است. با بررسی منابع مطالعاتی مختلف، با توجه به طبقه‌بندی رودخانه به کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی مختلف، چون کلاس C از نظر اکولوژیکی دارای شرایط متوسط و مطلوبی بوده و در این کلاس دینامیک زیستگاه‌ها و اجزای جوامع زنده آبی، نسبتاً تغییر یافته ولی عملکردهای اساسی اکوسیستم هنوز دست نخورده‌اند (۱۴ و ۲۵)، در این تحقیق به عنوان کلاس مدیریت مطلوب زیستی انتخاب شده است. در روش انتقال منحنی تداوم جریان هر چه کلاس مدیریت زیست‌محیطی بهتر باشد، میزان جریان زیست‌محیطی نیز بیشتر خواهد بود.

مصطفوی و یاسی (۱۴) و اسماعیلی و همکاران (۱۰) نیز در برآورد جریان زیست‌محیطی رودخانه‌های مورد مطالعه‌شان، کلاس C در روش انتقال منحنی تداوم جریان را به عنوان حداقل وضعیت اکولوژیکی قابل قبول، گزارش کردند. از جمله مزایای روش‌های هیدرولوژیکی در برآورد رژیم جریان زیست‌محیطی اکوسیستم‌های آبی، کم هزینه و سریع بوده و بهترین و شاید تنها انتخاب کارشناسان در ارزیابی جریان زیست‌محیطی تحت شرایط کمبود داده می‌باشند. در حقیقت، تنها نیاز تمام روش‌های هیدرولوژیکی، داده‌های دبی رودخانه می‌باشد (۱۰، ۱۴، ۱۷ و ۲۶). معایب این روش‌ها، دقت کم، تعیین مقداری ثابت برای جریان مورد نیاز زیست‌محیطی در فصول آبی

زیستگاه در دسترس خواهد داشت محدوده عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتی متر و سرعت ۰/۵ تا ۰/۷ متر بر ثانیه است.



شکل ۳- منحنی های مطلوبیت زیستگاهی (عمق، سرعت و شاخص کانال) سیاه ماهی در رودخانه زرین گل

Figure 3- Habitat Suitability Curves (Depth, Velocity and Substrates Index) of *C. capoeta gracilis* in Zarrin-Gol river

بالتر بودن مطلوبیت بسترهایی که قطعات سنگی بزرگ دارند به دلیل این است که قطعات بزرگ سنگی می توانند به منزله پناهگاهی در برابر دبی زیاد جریان استفاده شوند و به علت ایجاد سطح بزرگتر و فضای مرده بیشتر در پشت سنگ، تراکم بیشتری از مواد غذایی آبی دارند که در زیر سنگ های بستر رشد می کنند.

با تولید و توسعه منحنی های شاخص مطلوبیت زیستگاه و ورود آن به مدل PHABSIM، مساحت قابل استفاده وزنی برای گروه های سنی سیاه ماهی استخراج گردید و برای دبی های مختلف در مدل PHABSIM، منحنی دبی فیزیک زیستگاه در زیستگاه های خیزاب و گوداب استخراج گردید. تفاوت بین حداقل و حداکثر مقادیر مساحت قابل استفاده وزنی با توجه به دبی جریان در زیستگاه های مختلف و مراحل زندگی سیاه ماهی نشان می دهد که نیاز به تجزیه و تحلیل های دقیق مبتنی بر مطلوبیت زیستگاه در تمامی مراحل زندگی این گونه داریم. با یک ارزیابی کلی از وضعیت زیستگاهی سیاه ماهی در رودخانه

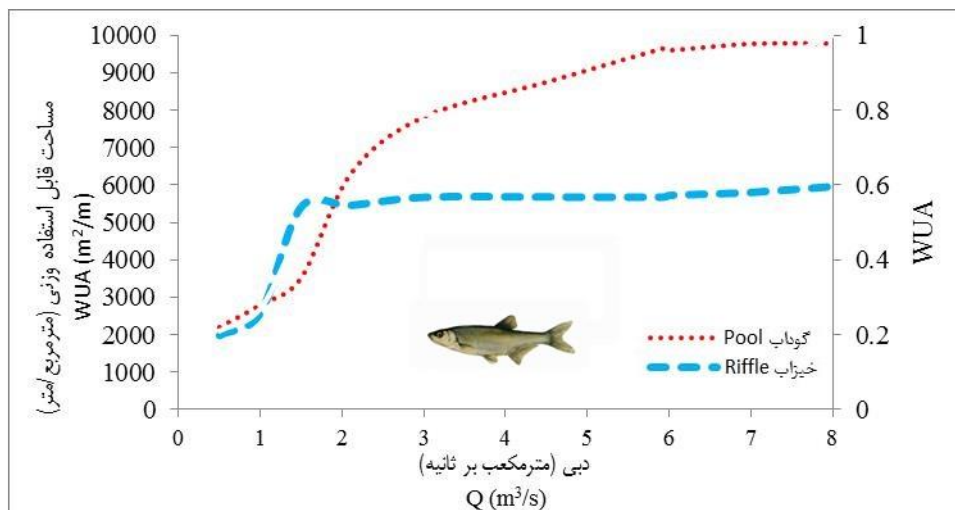
نتایج مطالعات دیگر نشان می دهد که فاکتور سرعت و عمق دو فاکتور غالب و موثر در پراکنش و فراوانی افراد گونه های ماهیان در زیستگاه است. این در حالی است که تأثیرات متغیر سرعت در ترجیح زیستگاهی ماهیان بیشتر از عمق است (۲، ۵، ۱۱ و ۱۷). همچنین ارتباط مثبت شاخص بین شاخص مطلوبیت زیستگاه با قطر متوسط سنگ بستر نشان دهنده نقش مثبت قطعات سنگی بزرگ در افزایش تعداد گونه سیاه ماهی در رودخانه زرین گل است. مطالعات نشان داده اند که نوع و اندازه مواد تشکیل دهنده بستر و سرعت جریان، فاکتورهای مهمی در انتخاب زیستگاه بوده و اجتماعات بزرگی از آبزبان به شدت با ترکیب بستر و در نتیجه سرعت جریان مرتبط هستند (۱۲، ۲۳ و ۳۰). ذرات شن متوسط به دلیل اینکه برای تخم ریزی سیاه ماهی ایده آل است، دارای مطلوبیت کمی برای ماهیان بالغ است. در همین حال، شن متوسط با توجه به تخم ریزی نکردن ماهیان جوان، هیچ مطلوبیتی برای این گروه سنی سیاه ماهی ندارد.

زیستگاه برای گروه سنی جوان خواهد شد. همچنین حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی برای سیاه‌ماهی جوان در محدوده جریان میانگین دبی سالانه (معادل ۲/۱۱ متر مکعب بر ثانیه) در زیستگاه خیزاب می‌باشد. شایان توضیح است که در شکل‌های ۴ و ۵، مقادیر مساحت قابل استفاده وزنی با تقسیم بر بیشترین میزان زیستگاه در دسترس در هر گروه سنی و در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب بی‌بعد شده و در محور عمود سمت راست منحنی‌ها نشان داده شده است.

برای محاسبه رژیم جریان اکولوژیکی از روش شبیه‌سازی زیستگاه، با توجه به توضیحات ارائه شده درباره مساحت قابل استفاده وزنی و میزان زیستگاه در دسترس برای گونه هدف در رودخانه زرین‌گل، همچنین ملاحظات اکولوژیکی و میزان درصد کاهش زیستگاه تا مقداری که حداقل زیستگاه برای گونه شاخص حفظ شود، معادل ۵۰ درصد حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی و به تبع آن ۷۵ درصد حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی به عنوان سطح حفاظتی متوسط در تحلیل اکولوژیک در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شرح روش تحقیق داده شده، نتایج تحلیل رژیم اکولوژیکی ماهانه پیشنهادی مدل اکوهیدرولیکی PHABSIM در مقابل میانگین جریان ماهانه در جدول ۶ استخراج شده است. مطابق با جدول ۶ محدوده جریان زیست‌محیطی برآورد شده برای گونه سیاه‌ماهی با استفاده از روش شبیه‌سازی زیستگاه بین ۰/۵۸ تا ۲/۴۹ متر مکعب بر ثانیه (به ترتیب در ماه‌های آبان و فروردین)، با میانگین ۱/۲۵ متر مکعب بر ثانیه (معادل ۵۹ درصد جریان طبیعی رودخانه) که بایستی در داخل رودخانه زرین‌گل برای حفظ حیات اکوسیستم و حفاظت اکولوژیکی گونه سیاه‌ماهی (معادل سطح حفاظتی متوسط) برقرار باشد.

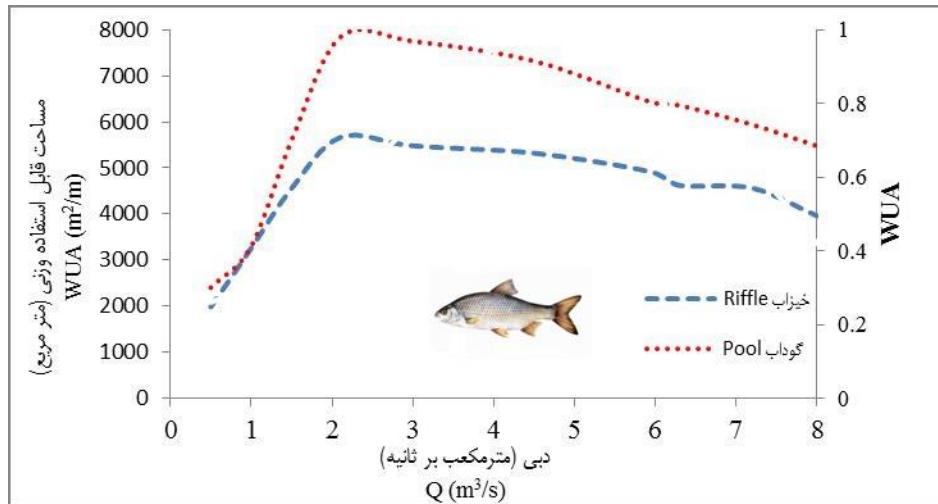
زرین‌گل می‌توان شرایط زیستگاهی را تحلیل کرد. طبق منحنی دبی-فیزیک زیستگاه (شکل ۴) کاهش جریان در هر دو زیستگاه خیزاب و گوداب به میزان کم‌تر از حداقل میانگین دبی جریان رودخانه که برابر با ۱/۰۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد، نیز باعث کاهش میزان مساحت قابل استفاده وزنی برای گروه سنی بالغ شده است. در گروه سنی بالغ، با افزایش دبی، شرایط فیزیک زیستگاه در حالت بهینه قرار خواهد گرفت. از منحنی دبی-فیزیک زیستگاه گروه سنی بالغ (شکل ۴) می‌توان نشان داد که در دبی معادل ۸ مترمکعب بر ثانیه و حدود ۳۸۰ درصد میانگین دبی سالانه، حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی در زیستگاه گوداب برای سیاه‌ماهی بالغ است. همچنین مشاهده گردید که برای سیاه‌ماهی بالغ در زیستگاه گوداب، مطلوبیت زیستگاه بیشتر از خیزاب می‌باشد.

در شکل ۴ عکس‌العمل گروه سنی جوان سیاه‌ماهی در زیستگاه‌های مختلف، نسبت به تغییرات دبی متفاوت می‌باشد. طبق منحنی دبی-فیزیک زیستگاه (شکل ۴) در دبی‌های بالا و شرایط سیلابی میزان مساحت قابل استفاده برای گروه سنی جوان گونه هدف کاهش می‌یابد، زیرا سیلاب‌ها، مورفولوژی و شرایط زیستگاهی رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که سیلاب‌های بزرگ و متوالی فرصت بازسازی زیستگاه‌ها را از رودخانه گرفته و زندگی ماهی‌ها را دچار مخاطره می‌کند. عکس‌العمل گروه سنی جوان نیز نسبت به تغییرات دبی در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب، ابتدا کم بوده و سپس با افزایش دبی، شرایط زیستگاهی برای این گروه سنی بهبود می‌یابد. افزایش جریان به میزان بیش از حداکثر میانگین دبی ماهانه رودخانه (معادل ۵/۹۳ مترمکعب بر ثانیه)، باعث کاهش میزان



شکل ۴- منحنی دبی- فیزیک زیستگاه در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب گروه سنی بالغ سیاه‌ماهی

Figure 4- Flow-Habitat Physics Curve in Pool and Riffle Habitats age stage Adult of *C. capota gracilis*



شکل ۵- منحنی دبی- فیزیک زیستگاه در زیستگاه های گوداب و خیزاب گروه سنی جوان سیاه ماهی

Figure 5- Flow-Habitat Physics Curve in Pool and Riffle Habitats age stage Juvenile of *C. capoeta gracilis*

جدول ۶- توزیع ماهانه جریان زیست محیطی رودخانه زرین گل

Figure 6- Monthly distribution environmental flow of Zarrin-Gol river with different methods

| ماه Month | MMF (m ³ /s) | Q _{Tennant} (m ³ /s) | Q _{FDC-Shifting} (m ³ /s) | Q _{PHABSIM} (m ³ /s) |
|--------------------------|----------------------------|---|--|---|
| October- September مهر | 1.16 | 0.21 | 0.56 | 0.64 |
| November- October آبان | 1.05 | 0.21 | 0.52 | 0.58 |
| December- November آذر | 1.06 | 0.21 | 0.55 | 0.61 |
| January- December دی | 1.17 | 0.21 | 0.57 | 0.72 |
| February- January بهمن | 1.52 | 0.21 | 0.73 | 1.23 |
| March- February اسفند | 2.69 | 0.21 | 1.22 | 1.88 |
| April- March فروردین | 5.93 | 0.63 | 1.79 | 2.49 |
| May- April اردیبهشت | 4.47 | 0.63 | 1.43 | 2.2 |
| June- May خرداد | 2.34 | 0.63 | 0.96 | 1.81 |
| July- June تیر | 1.57 | 0.63 | 0.74 | 1.34 |
| August- July مرداد | 1.24 | 0.63 | 0.57 | 0.77 |
| September- August شهریور | 1.19 | 0.63 | 0.56 | 0.74 |
| Average میانگین | 2.11 | 0.42 | 0.85 | 1.25 |

برای چندین ماه خشک است) بکار برد (۱۵، ۲۰ و ۲۲). اصلاح و منطقه ای کردن روش تنانت در ایران، مستلزم عملیات صحرایی گسترده و نیازمند جمع آوری داده های بیولوژیکی و هیدرولوژیکی حوضه های مورد مطالعه، برای فراهم کردن روابط بین دبی و مطلوبیت و قابلیت زیستگاه فیزیکی می باشد (۲۲ و ۲۳). با توجه به جدول ۶، تحلیل اساسی بر جریان زیست محیطی در رودخانه زرین گل می توان ارائه داد. در رودخانه زرین گل با توجه به اختلاف میان مساحت مطلوب زیستگاهی در دوره های کم آبی (مهر، آبان و آذر) تا پرآبی (فروردین)، می توان این گونه نتیجه گیری کرد که برداشت کمتری از آب رودخانه زرین گل امکان پذیر است و در دوره های کم آبی، شرایط بحرانی در میزان مساحت مطلوب زیستگاهی وجود

همان طور که در جدول ۶ ملاحظه می شود، مدل شبیه سازی زیستگاه، رژیم جریان اکولوژیکی را در همه ماه ها، بیشتر از روش های هیدرولوژیکی تنانت و انتقال منحنی تداوم جریان و بر اساس میزان مطلوبیت زیستگاه و مرحله زندگی گونه شاخص پیشنهاد داده است. مقایسه نتایج جریان برآورد شده زیست محیطی (جدول ۶) از روش انتقال منحنی تداوم جریان با نتایج روش تنانت به روشنی نشان می دهد که روش انتقال منحنی تداوم جریان در همه ماه های سال به استثنای ماه های مرداد و شهریور مقدار جریان زیست محیطی را بیشتر از روش تنانت برآورد کرده است. روش تنانت را می توان به عنوان مدلی جهت توسعه سطوح جریان حداقل در سطح برآورد اولیه حوضه آبریز در ایران (به جز نواحی خشک و نیمه خشک و آبراهه هایی که

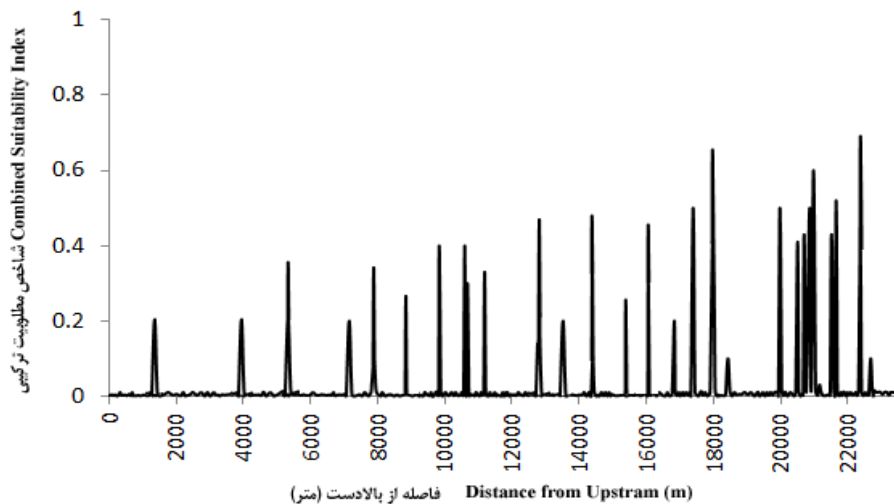
مطلوبیت زیستگاهی در دبی‌های مختلف نشان داد که به طور کلی محدوده بالادست رودخانه به لحاظ مطلوبیت پارامترهای فیزیکی زیستگاه در دبی‌های مختلف دارای ضعیف‌ترین شرایط بوده و در محدوده پایین‌دست رودخانه شرایط مطلوب‌تری مشاهده می‌شود. دلیل آن نیز کاهش شیب رودخانه و در نتیجه کاهش سرعت جریان رودخانه و افزایش عمق به سمت پایین‌دست رودخانه می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های مربوط به بررسی توزیع مطلوبیت در طول رودخانه دیده می‌شود، نوسانات مشاهده شده در پراکنش سیاه‌ماهی در ایستگاه‌های مختلف نیز به دلیل تغییر در شرایط هندسی و هیدرولیکی در طول رودخانه می‌باشد که داده‌های میدانی موجود در رابطه با تعداد و پراکنش سیاه‌ماهی در ایستگاه‌های مختلف رودخانه زرین‌گل نیز صحت این مطلب را تأیید می‌کند. همچنین مطابق با تحقیقات اسدی و همکاران (۵)، قلی‌زاده و همکاران (۱۱)، نادری و همکاران (۱۶) و ژائو و همکاران (۳۰) فراوانی گونه‌های مختلف ماهی وابسته به توزیع زیستگاه‌های مطلوب در طول رودخانه می‌باشد و با افزایش مطلوبیت زیستگاه، تعداد ماهی نیز افزایش خواهد یافت.

خصوصیات رودخانه‌ها، از اهمیت زیادی در تعیین شرایط کیفی آب، نوع گونه ماهی و پراکنش ماهی دارد. اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و هیدرولیکی در رودخانه زرین‌گل نشان‌دهنده تنوع در ایستگاه‌های نمونه‌برداری می‌باشد. بر این اساس در طول سال در اکثر ایستگاه‌ها، سگ‌ماهی جویباری و سیاه‌ماهی وجود داشتند و بیش‌ترین فراوانی و پراکنش مربوط به این دو گونه بود که می‌توان علت آنرا به اشتراک در میدان اکولوژی^۱ دانست (۹). میدان اکولوژی، نمایانگر عمل یک موجود زنده در اکوسیستم می‌باشد. قرار گرفتن دو گونه در یک زیستگاه را اصل طرد رقابتی می‌نامند، بدین مفهوم که دو گونه از موجود زنده، می‌توانند هم‌آشیا باشند (۲۸). برون و همکاران (۹) به این موضوع که در اکثر گرادیان‌های اکولوژیکی، بیشتر گونه‌ها به‌نظر می‌آید که از یک سو نسبت به شرایط فیزیکی واکنش نشان می‌دهند و از سوی دیگر تحت تأثیر شرایط بیولوژیکی باشند، اشاره کردند. تنوع زیستگاه‌های رودخانه‌ای می‌تواند اثرات مطلوب مختلفی روی ترکیب گونه‌های ماهیان داشته باشد (۱۷ و ۲۸). در ایستگاه‌های پایین‌دست رودخانه زرین‌گل، پوشش گیاهی آن و سایه ناشی از آن، کمتر از ایستگاه‌های بالادست می‌باشد. کم بودن پوشش گیاهی و سایه ناشی از آن، عمق کم و پایین بودن شدت جریان، منجر به رسیدن نور کافی به بستر رودخانه شده (انرژی خورشیدی بیشتری را دریافت می‌کند) و نسبت بالایی از گونه‌های ماهیان را در این بازه مشاهده می‌نمایم.

دارد و برداشت بیش از حد آب رودخانه در مصارف مختلف مانند کشاورزی، عملاً رودخانه را در بحران اکولوژیکی فرو خواهد برد و در مدیریت رودخانه باید تمهیدات و برنامه‌ریزی‌هایی را لحاظ کرد. با توجه به جدول ۶، این نتیجه‌گیری به عمل می‌آید که مدل PHABSIM قادر به ارائه رژیم اکولوژیکی رودخانه از دو نقطه‌نظر علمی و عملی می‌باشد که با نتایج تحقیق وانگ و همکاران (۲۷) و وای و همکاران (۲۸) مطابقت دارد. آرماس وارگاس و همکاران (۳) در مطالعه رژیم جریان زیست‌محیطی در پایین‌دست رودخانه دورو مکزیک با استفاده از مدل PHABSIM و منحنی‌های دبی - مساحت قابل استفاده وزنی برای ۵ گونه ماهی، میانگین جریان زیست محیطی ایده‌آل و مطلوب را برای ماه‌های آوریل تا ژوئن به ترتیب بین ۵ تا ۱۱/۵ مترمکعب بر ثانیه و برای ماه‌های جولای تا اکتبر به ترتیب بین ۷/۵ تا ۲۰ مترمکعب بر ثانیه برآورد کردند. نتایج ایشان نشان داد، رژیم جریان زیست‌محیطی اختصاص یافته، قادر به حفاظت از ۸۰ درصد رژیم جریان طبیعی برای نگهداری از ارزش‌های اکولوژیکی رودخانه و استقرار شرایط مطلوب برای زیستن گونه‌های آبری می‌باشد. نیک‌قلب و همکاران (۲۰)، نادری و همکاران (۱۵) و نادری و همکاران (۱۷) در تعیین دبی موردنیاز برای ادامه چرخه طبیعی زندگی ماهیان رودخانه‌های مورد مطالعه‌شان با استفاده از مدل میکروزیستگاهی PHABSIM، این مدل را به عنوان ابزاری برای معرفی یک رژیم جریان مطلوب، قابل اعتماد دانستند.

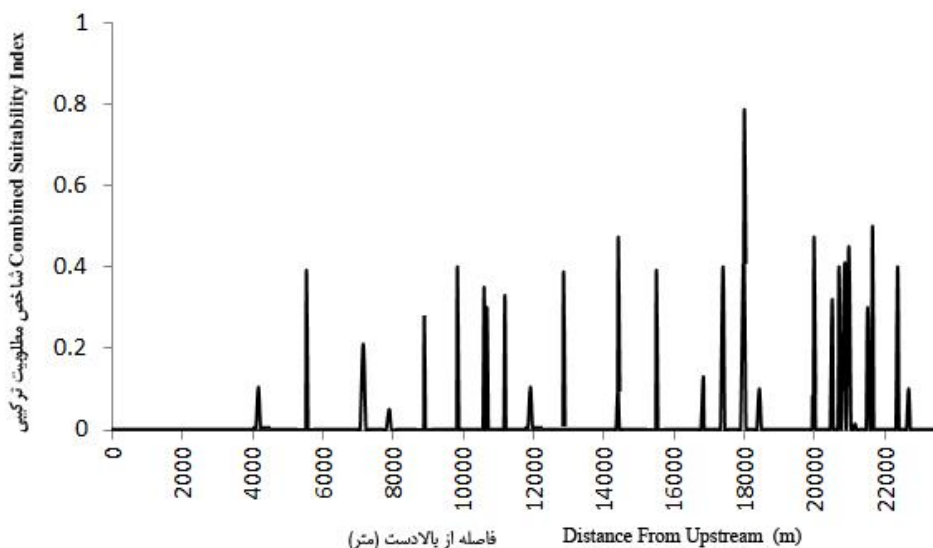
در ادامه، اعتبار مدل PHABSIM مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور تراز سطح آب و سرعت شبیه‌سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده در مقاطع کنترل (ایستگاه‌های نمونه‌برداری) مورد واسنجی و سپس اعتبارسنجی صورت گرفت. بر این اساس صحت و دقت نتایج مقادیر مشاهده و پیش‌بینی شده در سطح ۵ درصد اطمینان مورد تأیید می‌باشد که این نشان‌دهنده توانایی مدل PHABSIM برای واسنجی داده‌های ورودی و قابلیت اعتماد مازول‌های هیدرولیکی STGQ، MANSQ یا WSP برای شبیه‌سازی است. همچنین تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده فیزیک زیستگاه بین ۳ تا ۲۱ درصد بوده و در دبی‌های کم تفاوت بین نتایج مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده کم می‌باشد. اختلاف کم خطا بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، پیش‌بینی عملکرد خوب مدل PHABSIM، توانایی آن را در شبیه‌سازی پارامترهای فیزیکی زیستگاه تأیید می‌نماید.

در شکل ۶ و ۷ توزیع مکانی مطلوبیت زیستگاهی در طول رودخانه زرین‌گل برای دبی متوسط سالانه (۲/۱۱ متر مکعب بر ثانیه) برای دو گروه سنی سیاه‌ماهی نشان داده شده است. محور عمودی در این شکل‌ها، شاخص مطلوبیت ترکیبی است که در رابطه ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، میزان مطلوبیت زیستگاهی در طول رودخانه شرایط کاملاً متفاوتی دارد. توزیع



شکل ۶- توزیع مطلوبیت زیستگاهی برای گروه سنی بالغ سیاه ماهی در رودخانه زرین گل

Figure 6- Habitat suitability distribution for age stage Adult of *C. capoeta gracilis* in Zarrin-Gol river



شکل ۷- توزیع مطلوبیت زیستگاهی برای گروه سنی جوان سیاه ماهی در رودخانه زرین گل

Figure 7- Habitat suitability distribution for age stage Juvenile of *C. capoeta gracilis* in Zarrin-Gol river

شرایط طبیعی را به رودخانه برگرداند. به همین دلیل برای آماده سازی محیط رودخانه نیاز است که زمان و شدت جریانات در مطالعات زیست محیطی منطقه مشخص گردد. به طور خاص، چنین تغییرات مورفولوژیکی، اکوسیستم های آبی را تغییر می دهد و در نتیجه مطلوبیت زیستگاه و زیستگاه های تخم ریزی گونه های آبی را افزایش می دهد (۱۷ و ۳۰). نتایج پژوهش های متعدد دیگری نیز در مورد اهمیت رژیم جریان های قوی (سیلاب های بزرگ) در ساختار زیستگاه های رودخانه ای نشان می دهد بر اساس تغییر پذیری عمق و

رژیم جریان رودخانه، نقش مهمی در زیستگاه های پایین دست دارد و باعث ایجاد تغییر در مورفولوژی و کیفیت آب در قسمت پایین دست می شود. ماهیان برای تولیدمثل از فضای بین ذرات درشت دانه استفاده کرده و در محیط شنی فضای مناسبی برای تخم گذاری فراهم می گردد. به علت فرآیند رسوب گذاری در اثر کاهش سرعت جریان، ذرات ریزدانه در فضای بین ذرات درشت دانه ته نشین شده و در دوره تخم گذاری ماهیان مخاطره آمیز خواهد بود (۱۹ و ۲۹). لذا بایستی جریانی در نظر گرفته شود که این ذرات ریزدانه را شستشو داده و

حداقل و حداکثر جریان زیست‌محیطی رودخانه زرین‌گل با استفاده از مدل PHABSIM به ترتیب برای ماه آبان و فروردین معادل ۰/۵۸ و ۲/۴۹ متر مکعب بر ثانیه با میانگین دبی سالانه ۱/۲۵ متر مکعب بر ثانیه بایستی در طول رودخانه زرین‌گل برای حفظ شرایط مطلوب و محافظت از اجزای اکوسیستم رودخانه برقرار باشد. نتایج بررسی‌های این پژوهش نشان داد ترجیح زیستگاهی گونه سیاه‌ماهی در رودخانه زرین‌گل، مناطق گوداب و جریان‌دار می‌باشد و بر این اساس حداکثر میزان زیستگاه در دسترس برای سیاه‌ماهی بالغ در دوره پرآبی رودخانه معادل ۹۷۸۷ متر مربع بر متر و برای سیاه‌ماهی جوان در متوسط جریان سالانه برابر ۵۷۸۲ متر مربع بر متر می‌باشد. تحقیق حاضر جزو اولین پژوهش‌های انجام شده در زمینه توسعه شاخص‌های اکوهیدرولیکی - اکوهیدروموفولوژیکی در رودخانه‌های حوضه جنوب شرقی دریای خزر است. در این راستا، استفاده از مدل PHABSIM برای شبیه‌سازی زیستگاه رودخانه و همچنین تجزیه و تحلیل‌های دقیق مبتنی بر مطلوبیت زیستگاه گونه هدف، می‌تواند به پیش‌بینی دینامیک زیستگاه برای محافظت از زیستگاه مناسب ماهی در اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، مدیریت اکوسیستم رودخانه و برنامه‌ریزی منابع آب در برخی از حوضه‌های آبخیز کمک کند. همچنین بررسی رویکرد رهاسازی سیلاب مدیریت شده برای حفظ شرایط هیدرولیکی زیستگاه و حفظ تعادل فرآیندهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی و نیز مدل‌سازی پیشرفته اکوهیدرولیکی برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی و حفاظت زیستگاه ماهیان در رودخانه‌های تنظیم شده، به عنوان مطالعات آینده، پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از راهنمایی‌های ارزنده اعضای هیئت علمی گروه شیلات دانشگاه‌های علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و گنبدکاووس، همچنین از همفکری‌های سرکارخانم دکتر محبوبه حاجی اسماعیلی و جناب آقای مهندس سعید نیک‌قلب، همراهی و همکاری تیم مطالعات میدانی و نیز از نقطه‌نظرات و پیشنهادات داوران گرامی که باعث ارتقای پژوهش حاضر گردید، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

سرعت جریان و شاخص اکوهیدروموفولوژیکی، با وقوع سیل طبیعی در امتداد رودخانه، فرصتی را برای تأمین و بهبود شرایط مناسب زیستگاه رودخانه بوجود می‌آورد (۱۷، ۱۹، ۲۷ و ۲۹). یکی از مهم‌ترین مزیت‌های رویکرد شبیه‌سازی زیستگاه این است که می‌تواند تغییرات رژیم جریان مانند تغییرات فصلی و یا سیلاب را در نظر بگیرد و از جریانات سیلابی در تأمین نیازهای بیولوژیکی استفاده کند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد، روش‌های شبیه‌سازی زیستگاه از اعتبار بالایی در سطح جهان برخوردار می‌باشند (۳، ۱۶، ۱۷، ۲۰ و ۲۷). علیرغم تحقیقات طولانی مدت در مورد استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی زیستگاه برای پیش‌بینی پاسخ اکولوژیکی ماهیان به تغییرات فیزیکی زیستگاه، کاربرد عملی آنها در ارزیابی جریان‌های زیست‌محیطی به دلایلی عمدتاً مرتبط با هزینه-اثربخشی، بهره‌وری در زمان، تخصص مورد نیاز و در دسترس بودن اطلاعات، محدود شده است. بارزترین نکته موجود در پژوهش حاضر این است که انتخاب و اجرای مقادیر دبی زیست‌محیطی در اختیار مدیر حوضه آبخیز رودخانه است که کدام یک از مقادیر گزارش شده توسط روش‌های مورد مطالعه را برگزیند. در نهایت دستاورد پژوهش حاضر، ایجاد شرایط مطلوب و مناسب برای تأمین سلامت اکوسیستم رودخانه زرین‌گل از نظر فراهم نمودن زیستگاه موجودات زنده، با اعمال میزان جریان اکولوژیکی که بیشترین تشابه را با الگوی طبیعی جریان رودخانه دارد، می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، تخصیص جریان زیست‌محیطی، تنظیم، مقدار و زمان‌بندی آن با توجه به نقش مؤثری که در ادامه فعالیت‌های موجود در زیست‌بوم، بوجود آوردن شرایط مناسب برای تخم‌ریزی آبیان و احیا اکوسیستم رودخانه دارد، مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، مدل شبیه‌سازی زیستگاه PHABSIM را به عنوان رویکردی نو در مدیریت جامع زیستگاهی رودخانه زرین‌گل مطرح می‌کند. با استفاده از این مدل می‌توان، مناطق بهینه برای زیست‌ماهی را با توجه به تأثیر عوامل غیرزیستی (فیزیک زیستگاه) در رودخانه تعیین کرد و از آن برای مدیریت اکوسیستم رودخانه و تخمین جریانات اکولوژیکی بهره گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق،

منابع

- 1- Abdoli A., and Naderi M. 2009. Biodiversity of Fishes of the Southern Basin of the Caspian Sea. Abzian Scientific Publication. (In Persian)
- 2- Ahmadzadeh M., Poorbagher H., and Eagderi S. 2018. Calculating the habitat suitability index of Siahmahi (*Capoeta buhsei*, Kessler 1877) using the kernel smoothing in the Jajrood River, Namak basin of Iran. Journal of Aquaculture Sciences 6(9): 99-108. (In Persian with English abstract)
- 3- Armas-Vargas F., Escolero O., Garcia de Jalon D., Zambrano L., Gonzalez del Tanago M., and Kralisch S. 2017. Proponiendo el caudal ambiental basado en simulacion del habitat fisico para cinco especies de peces en la Cuenca baja del Rio Duero, Mexico. Hidrobiologica 27(2): 185-200.

- 4- Arthington A.H., Kennen J.G., Stein E.D., and Webb J.A. 2018. Recent advances in environmental flows science and water management—Innovation in the Anthropocene. *Freshwater Biology* 1-13.
- 5- Asadi H., Sattari M., and Eagdari S. 2014. Investigation of the determinants of selectivity and preferential habitat *Capoeta capoeta gracilis* (Keyserling 1891) in the Siahrood River. *Iranian Journal of Fisheries Science* 23(3): 1-9. (In Persian)
- 6- Ayyoubzadeh S.A., Sedighkia M., and Hajiesmaeli M. 2018. Ecohydraulics and Simulation of River Habitats. *Water Engineering Research Institute Tarbiat Modares University*. (In Persian)
- 7- Azarang F., Telvari A.R., Sedghi H., and Shafaei Bajestan M. 2017. Large Dam Effects on Flow Regime and Hydraulic Parameters of river (Case study: Karkheh River, Downstream of Reservoir Dam). *Journal of Water and Soil* 31(1): 11-27 (In Persian with English abstract)
- 8- Bourgeois G., Cunjak R.A., Caissie D., and El-Jabi N. 1996. A spatial and temporal evaluation of PHABSIM in relation to measured density of juvenile Atlantic salmon in a small stream. *North American Journal of Fisheries Management* 16(1): 154-166.
- 9- Brown J.H., Stevens G.C., and Kaufman D.M. 1996. The geographic range: size, shape, boundaries, and internal structure. *Annual Review of Ecology and Systematics* 27(1): 597-623.
- 10- Esmaili K., Sadeghe Z., Kaboli A., and Shafaei H. 2018. Application Hydrological methods for estimating River Environmental water rights (Case Study of Gorganroud River). *Journal of Natural Environmenatal (Iranian Journal of Natural Recorces)* 71(4): 437-451. (In Persian with English abstract)
- 11- Gholizadeh M., Toomaj A., and Hossindost S. 2017. Modeling habitat requirements of riverine stone loach, *Paracobitis hircanica* (Teleostei: Nemacheilidae) in the Zarin-Gol River, Caspian Sea basin, Iran. *Iranian Journal of Ichthyology* 4(4): 340-351.
- 12- Gholizadeh M., Patimar R., and Harsij M. 2018. Investigation of Selected Habitat Range of the *Paracobitis hicanica* in the Zarin-Gol River, Golestan Province. *Journal of Applied Ichthyological Research* 6(2): 1-12. (In Persian)
- 13- Kim J.S., Lee C.J., Kim W., and Kim Y.J. 2010. Roughness coefficient and its uncertainty in gravel-bed river. *Water Science and Engineering* 3(2): 217-232.
- 14- Mostafavi S., and Yasi M. 2015. Evaluation of Environmental Flows in Rivers Using Hydrological Methods (Case study: The Barandozchi River- Urmia Lake Basin). *Journal of Water and Soil* 29(5): 1219-1231. (In Persian with English abstract)
- 15- Naderi M.H., Zakerinia M., and Salarizji M. 2018. Application of the PHABSIM model in Explaining the Ecological Regime of the River in order to Estimate the Environmental Flow and Compare with Hydrological Methods (Case Study: Gharasoo River). *Ecohydrology* 5(3): 941-955. (In Persian)
- 16- Naderi M.H, Zakerinia M., and Salarijazi M. 2019. Investigation of Ecohydraulic Indices in Environmental Flow Regime and Habitat Suitability Simulation Analysis using River2D Model with Relying on the Restoration Ecological in Zarrin-Gol River. *Journal of Ecohydrology* 6(1): 205-222. (In Persian)
- 17- Naderi M.H, Pourgholam-Amiji M., Ahmadaali K., Amiri Z., Ghoghji A., and Ghorbani Minaei L. 2020. Determining the Range of Optimal Environmental Flow in Zarin-Gol River through Hydromorphological Characteristics, Hydrological Regime and Habitat Suitability Simulation Ecohydraulic Model. *Journal of Fisheries (Iranian Journal of Natural Resources)* 71(3): 317-328. (In Persian with English abstract)
- 18- Najafabadi E.F., Afzalimehr H., and Rowinski P.M. 2018. Flow structure through a fluvial pool-riffle sequence—Case study. *Journal of Hydro-environment Research* 19:1-15.
- 19- Nakvachara P., Rittima A., and Talaluxmana Y. 2018. Quantification of Environmental Flow Requirement of Khun Dan Prakan Chon Dam Using Hydrological-hydraulic-ecological Methods. *Applied Environmental Research* 40(2): 76-90.
- 20- Nikghalb S., Shokoohi A., Singh V.P, and Yu R. 2016. Ecological regime versus minimum environmental flow: comparison of results for a river in a semi Mediterranean region. *Water Resources Management* 30(13): 4969-84.
- 21- Olsen N. 2012. Numerical Modelling & Hydraulics, 3rd Edition, Department of Environmental Engineering: The Norwegian University of Science & Technology.
- 22- Sedighkia M., Ayyoubzadeh S.A., and Hajiesmaeli M. 2017. Modification of Tennant and Wetted Perimeter Methods in Simindasht Basin, Tehran Province. *Civil Engineering Infrastructures Journal* 50(2): 221-31.
- 23- Sedighkia M., Abdoli A., Ayyoubzadeh S.A., Ahmadi A.A., and Gholizadeh M. 2017. Development of the native method of environmental flow in the rivers of the southern basin of Kaspian-Lar National Park. *Journal of Ecology* 43(3): 543-560. (In Persian)
- 24- Shamekhi K., Patimar R., Ghorbani R., and Kordjazi Z. 2012. Comparison relative of abundance of *Capoeta capoeta gracilis* in five streams of Gorganroud River Basin, Golestan Province, Northern Iran. *Journal of Research in Biology* 1: 19-22.
- 25- Smakhtin V.U., and Anpurhas M. 2006. An assessment of environmental flow requirements of Indian river basins. IWMI Research Report 107. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

- 26- Tennant D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1(4): 6-10.
- 27- Wang H., Wang H., Hao Z., Wang X., Liu M., and Wang Y. 2018. Multi-Objective Assessment of the Ecological Flow Requirement in the Upper Yangtze National Nature Reserve in China Using PHABSIM. *Water* 10(3): 1-16.
- 28- Yi Y., Cheng X., Yang Z., Wieprecht S., Zhang S., and Wu Y. 2017. Evaluating the ecological influence of hydraulic projects: A review of aquatic habitat suitability models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68: 748-762.
- 29- Zarakani M., Shookohi A., and Pising V. 2017. Introducing a comprehensive ecological diet in the absence of data to determine the true environmental status of rivers. *Iranian Water Resources Research Journal* 13(2): 140-153. (In Persian with English abstract)
- 30- Zhao C.S., Yang S.T., Zhang H.T., Liu C.M., Sun Y., Yang Z.Y., Zhang Y., Dong B.E., and Lim R.P. 2017. Coupling habitat suitability and ecosystem health with AEHRA to estimate E-flows under intensive human activities. *Journal of Hydrology* 551: 470-483.

Design and Analysis of Optimal Ecological Flow Regime Zarrin-Gol River Using Hydrological Methods and Ecohydraulic Habitat Simulation Model

M.H. Naderi¹ - M. Zakerinia^{2*} - M. Salarijazi³

Received: 06-03-2019

Accepted: 12-04-2020

Introduction: The field of ecohydraulics is rapidly growing as the society requires a better understanding of the interrelations amongst the dynamics of the physical processes pertaining to aquatic ecosystems and the modifications observed in their habitat as well as the biological responses of the organisms. Environmental flow science is a common tool for assessing the consequences of changing the flow regime of aquatic ecosystems and providing a minimum flow of aquatic species protection. Environmental Flows assessment is a global challenge involving a number of tangible and intangible segments of hydrology, hydraulics, biology, ecology, environment, socio-economics, and several other branches of engineering including water resources management. River impoundment (dams, weirs), water diversions and consequent modifications to flow regimes have highly destructive effects on aquatic species and ecosystems.

Materials and Methods: In this research, two most common hydrologic methods Tennant and FDC Shifting were compared with a habitat simulation method i.e. PHABSIM. Tennant method is the most popular hydrological method in rivers and is based on the historic flow data. Investigation of the relationship between hydrologic approaches and physical habitat simulation approach and presentation of new recommendations based on the ecological and hydrological data can be very useful for estimating environmental flow in planning phase of river projects. We used river habitat simulation program to model the depth and velocities around boulder clusters to evaluate the habitat for Capoeta habitat in Zarrin-Gol River. The Zarrin-Gol River is one of the rivers in Golestan province in northern Iran. The statistics required for hydrologic calculations were also collected from Zarrin-Gol hydrometry station during the 42-year statistical period (1353-1395). In this regard, after the field studies and the development of the habitat suitability model for the target species, the Habitat simulation of the flow was carried out and eventually the ecological flow regime was extracted. In order to identify the important habitat variables and assess their impact, the life pattern of fish species was divided into juvenile and adult life stages.

Results and Discussion: Based on ecological assessment, the environmental water requirement of Gharahsoo river is 30% of mean annual flow for spring and summer and 10% of mean annual flow for autumn and winter seasons. It was found that application of Tennant and FDC Shifting methods led to dramatically low discharges as fixed minimum environmental flows, while habitat simulation method gave an acceptable estimation of ecological regime. However, habitat simulation technique assesses the allowable value of extraction from river flow dynamically, considering the ecological condition and average intermediate values. River conditions including flow velocity, water depth and river bed substrate are combined to form unique habitats facilitating the survival and growth of fish species populations. Habitat forms are observed in a wide range of rivers depending on the diet and the river type such as Pool, Riffle and Run. The destruction of the Riffle substrate causes disruption and impacts the biological integrity of the current. According to the Q-WUA curve of the Riffle habitat in high waters and flood conditions, the area available for juveniles of the target species decreases because of the flood, morphology and habitat of the river, so large and continuous floods inhibit the opportunity to rebuild habitats from the river and endanger the lives of fish. One of the factors limiting the desirability of the habitat and thus reducing the available habitat in low river flows is the low flow velocity, as well as high stream flow flows. The maximum and minimum flow regime, required to maintain the Zarrin-Gol river ecosystem according to ecological needs, was 2.49 and 0.58 m³/s in April and November, respectively, with an average value of 1.25 m³/s (59 % of natural stream of the river). In the next step, habitat suitability distribution along the stream was investigated. This was performed for the full range of discharges. Habitat suitability distribution along the stream at different discharges indicated that the upstream part of the stream had the poorest habitat condition and moving towards the downstream parts, the habitat suitability

1, 2 and 3- Graduate M.Sc. of Water Resources Engineering, Associate Professor and Assistant Professor of Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, respectively.

(* - Corresponding Author Email: mzakerinia@gau.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i3.79294

condition was improved.

Conclusion: Application of the Tennant method based on a hydrological system can be an inappropriate choice for determining the minimum flow to maintain the ecological environment of the river. According to the results, the PHABSIM model can simulate flow, habitat suitability of target species and the habitats dynamics accurately, which is highly required to protect the proper habitat of fish in river ecosystems.

Keywords: Environmental flow, Habitat simulation, Hydrological methods, Zarrin-Gol river