

مقاله علمی-پژوهشی

## تعیین جریان رهاسازی بهینه و مطلوب زیست‌محیطی از مخزن سد لتیان با در نظر گرفتن مشخصه‌های اکوهیدرولیکی، هیدرولوژیکی و هیدرومورفواکولوژیکی جهت حفاظت زیستگاه رودخانه جاجرود

محمدحسن نادری<sup>۱\*</sup>، سیمین علی‌اوغلی<sup>۲</sup>، امید جهان‌دیده<sup>۳</sup>، یوسف رجبی‌زاده<sup>۴</sup>، میثم سالاری جزی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۲۹

### چکیده

درک خوب از رژیم جریان طبیعی رودخانه در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی نقش مهمی ایفا می‌کند. در چنین مطالعاتی نیز کمیت جریان زیست‌محیطی، پایه و اساس حفاظت از زیستگاه ماهیان رودخانه‌ای و اکوسیستم‌های آبی است و نیازمند به رسمیت شناختن آن در سیاست‌ها و تصمیم‌های طرح‌های توسعه منابع آب و گنجاندن آن در برنامه‌های مدیریت حوضه آبخیز است. در این مطالعه روش‌های هیدرولوژیکی تنانت، جریان پایه آذربان، آرکانزاس و محدوده تغییرپذیری به منظور برآورد حداقل جریان اکولوژیکی و مدل هیدرودینامیکی شبیه‌سازی زیستگاه River2D جهت حفظ پتانسیل اکولوژیکی رودخانه جاجرود مورد محاسبه و ارزیابی قرار گرفتند. در این راستا بر پایه چارچوب تحقیق، پس از تحلیل هیدرولوژیکی، مطالعات و مشاهدات میدانی، مدل مطلوبیت زیستگاهی برای گونه هدف، توسعه داده شد و در نهایت شبیه‌سازی زیستگاهی با تلفیق شاخص‌های اکوهیدرولیکی و هیدرولوژیکی جریان و آنالیز سری زمانی دبی - فیزیک زیستگاه با استفاده از منحنی‌های شاخص مطلوبیت، صورت گرفت. بر پایه نتایج حاصله، برای حفظ شرایط مطلوب و حفاظت از اجزای اکوسیستم و زیستگاه جوامع بیولوژیکی، محدوده رژیم جریان مورد نیاز برای تأمین پتانسیل اکولوژیکی زیستگاه ماهی سفید رودخانه‌ای (*Squalius orientalis*) با استفاده از مدل River2D، بین ۱/۲۴ تا ۱۸/۵۵ مترمکعب بر ثانیه، با میانگین دبی سالانه ۵/۹۱ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۸۶/۷ درصد جریان طبیعی رودخانه) بایستی در داخل رودخانه جاجرود برقرار باشد. قابل ذکر است که روش تنانت باید در تابستان با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد زیرا این روش در محدوده ۹ تا ۹۶ درصد میانگین جریان سالانه را پیشنهاد داده است. در نهایت این نتیجه به عمل آمد که روش‌های دیگر تأمین جریان زیست‌محیطی، مقادیر بالاتر از ۲۵ درصد میانگین جریان سالانه را فراهم می‌کند، که محافظت بهتر جریان را برای زیستگاه‌های آبی فراهم می‌کنند. در مقابل مدل اکوهیدرولیکی - هیدرومورفواکولوژیکی River2D، می‌تواند یک ایده کلی از مطلوبیت زیستگاه را در بازه‌های مختلف رودخانه نسبت به تغییرات رژیم جریان طبیعی و دستیابی به شرایط جریان ایده‌آل و بهینه، فراهم نماید.

**واژه‌های کلیدی:** رژیم اکولوژیکی رودخانه، شاخص هیدرولوژیکی، مطلوبیت زیستگاه، منابع آب

### مقدمه

رودخانه‌ها سیستم‌های اکولوژیکی هیدرودینامیکی، نقشی کلیدی در برقراری تعادل زیست‌بوم دارند. بدون تردید خشکسالی، بحران منابع آبی، تغییر اقلیم و جهان گرمایی، در تشدید زوال کمی و کیفی رودخانه‌ها تأثیرگذار بوده است (Vogel et al., 2007; Gao et al., 2009)، اما ریشه اصلی این نابسامانی بوم‌شناختی را باید در سیاست‌گذاری و مدیریت نامناسب منابع آب و رودخانه‌ها در سطوح مختلف و ضعف‌ها و خلاهای قانونی، جست‌وجو کرد. با توجه به اینکه امروزه یکی از موضوعات مهم در زمینه بهره‌برداری از منابع آب به ویژه مخازن سدها، توجه به مسائل زیست‌محیطی و تعیین حبابه زیست‌محیطی می‌باشد (Arthington et al., 2018; Kim and Choi, 2019؛ سودی و همکاران، ۱۳۹۸؛ داوری و همکاران، ۱۳۹۸)، در مناطقی که از نظر شرایط اکولوژیکی بسیار حساس و شکننده

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب و پژوهشگر اکوهیدرولیک زیستگاه رودخانه، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
  - ۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
  - ۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
  - ۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آب - مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
  - ۵- استادیار گروه سازه و مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
- (\*) نویسنده مسئول: Email: naderigau@gmail.com

رودخانه را حفظ کند، در نظر گرفت. یائو و همکاران (۲۰۱۷)، فلان و همکاران (۲۰۱۷) و مزگر و همکاران (۲۰۱۹) بر این باور بودند که پایش جریان زیست‌محیطی در طول رودخانه‌ها، برای اطمینان از انتقال و توزیع جریان مطلوب اکولوژیکی مورد نیاز به اکوسیستم‌های آبی پایین دست، ضروری است (Phelan et al., et al., 2017 Yao; Mezger et al., 2019; Zhang et al., 2015). برخی مطالعات نشان می‌دهد، فقدان جریان‌های حداکثر در رودخانه‌ها، با از بین رفتن زیستگاه‌های رودخانه‌ای مرتبط است (Zhang et al., 2018). بنابراین باید تلاش بیشتری برای محاسبه متغیرهای جریان اکولوژیکی در حفظ اتصال بین سیلاب‌دشت و بستر رودخانه و تنوع زیستگاه‌های مورفولوژیکی صورت گیرد. بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که روش‌های تعیین جریان زیست‌محیطی در اکوسیستم‌های آبی، در چهار دسته کلی هیدرولوژیکی، هیدرولیکی، شبیه‌سازی زیستگاه و جامع طبقه‌بندی می‌شوند (Yasi and Gao et al., 2009; Ashori, 2017; Arthington et al., 2018; Dauri and Hemkaran, 2017). ادغام داده‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اکولوژیکی برای درک ویژگی‌های ارزیابی جریان‌های زیست‌محیطی رودخانه، ضروری است.

مطالعات متعددی نیز به این واقعیت پی برده‌اند که ارزیابی شرایط اکوهیدرولیکی، هیدرولوژیکی و هیدرومورفولوژیکی رودخانه‌ها، به عنوان یک گام اساسی در ارزیابی شرایط اکولوژیکی رودخانه و درک ارتباط بهتر پیوستگی فرآیندهای رودخانه‌ای و در نهایت مدیریت بهینه رودخانه، بایستی در نظر گرفته شود (Li et al., 2013; Wang et al., 2018; Shahriarinia et al., 2016). شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه، یک گام مهم از روش افزایشی جریان درون رودخانه‌ای<sup>۱</sup> است که برای ایجاد رژیم‌های جریان زیست‌محیطی کاربرد دارد (Macura et al., 2018). از مدل‌های زیستگاهی، استفاده گسترده‌ای برای برآورد جریان اکولوژیکی به دلیل ادغام آنها در رژیم هیدرولوژیکی و اولویت‌های هیدرولیکی گونه‌های ماهی شده است (نادری و همکاران، ۱۳۹۷; Fazelnajafabadi and Afzalimehr, 2019). بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که محققان بسیاری در مطالعات خود به بررسی و تحلیل مباحث مربوط به کاربرد شاخص‌های اکوهیدرولیکی در تحلیل جریان زیست‌محیطی، نقش رژیم هیدرولوژیکی و متغیرهای هیدرولیکی بر میزان مطلوبیت زیستگاه جوامع بیولوژیکی، مدیریت جریانات زیست‌محیطی برای پایداری اکوسیستم‌های رودخانه‌ای، در طی سال‌های اخیر پرداخته‌اند (Hajiesmaeili et al., 2018; Zhang et al., 2015). همکاران، ۱۳۹۷; اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۷). در این زمینه تحقیقاتی انجام شده است که نتایج بعضی از آنها در ادامه بیان

هستند، توجه به موضوع پایش زیست‌محیطی در مرحله بهره‌برداری از سد را بیش از پیش آشکار می‌سازد. از مهم‌ترین اصول در یکپارچه‌سازی موضوعات مربوط به مدیریت اکوسیستم‌های رودخانه‌ای و رژیم جریان آب، حفظ کامل و یا بخشی از رژیم طبیعی جریان رودخانه و یا به حالت اول برگرداندن محدوده تغییرات رژیم‌های طبیعی هیدرولوژیکی در جهت حفاظت از تنوع بیولوژیکی و حفظ پتانسیل بالقوه اکولوژیکی است (Nikghalb et al., 2016; Sojka et al., 2016; Zhang et al., 2015). امروزه عموماً در این باره توافق نظر وجود دارد که پتانسیل جریان رودخانه، به طور مؤثری در تنوع زیستگاه‌های مورفولوژیکی، حفظ تعادل فرآیندهای اکولوژیکی و پراکنش و فراوانی ماهیان، تأثیرگذار است و تنظیم نامناسب جریانات رودخانه‌ای، می‌تواند باعث حذف تدریجی گونه‌های ماهی در زیستگاه‌های آبی گردد (نادری و همکاران، ۱۳۹۸; Mezger et al., 2019; Kuriqi et al., 2019; Li et al., 2020). نادری و همکاران، ۱۳۹۹).

با عنایت به اهمیت رژیم جریان زیست‌محیطی برای حفظ شرایط بهینه مورفولوژیکی و ساختار آبراهه، آماده‌سازی بستر رودخانه برای تخم‌ریزی ماهی‌ها و ایجاد پناهگاه مناسب برای بی‌مهرگان و نیز جریان مورد نیاز برای حفاظت از پوشش گیاهی آبی و کنار رودخانه‌ای و سیلاب‌دشت، علمی به نام اکوهیدرولیک که یکی از رویکردهای نوین مهندسی رودخانه به شمار می‌رود، در سال‌های اخیر در مدیریت جامع حوضه آبخیز، مورد توجه قرار گرفته است (ایوب‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷; نادری و همکاران، ۱۳۹۸; Macura et al., 2018). 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 (Li et al., 2019; Wang et al., 2018; Yao et al., 2017). پیشگاه‌پور و همکاران، ۱۳۹۷; حاجی‌اسماعیلی، ۱۳۹۸). درک خوب از رژیم جریان طبیعی در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی، نقش مهمی ایفا می‌کند. در چنین مطالعاتی نیز کمیت جریان‌های زیست‌محیطی مهم است. جریان زیست‌محیطی، میزان گردش آب مورد نیاز برای حفظ سلامت اکوسیستم رودخانه است. جریان زیست‌محیطی شامل جریان بهینه و حداقل جریان می‌باشد. جریان بهینه، میزان جریانی است که عملکرد کامل یک اکوسیستم آبی را تضمین می‌نماید. حداقل جریان، میزان جریانی است که جریان کمتر از آن، پایداری و سلامت یک اکوسیستم آبی نمی‌تواند حفظ شود (Kim and Choi, 2019). بر این اساس، جریان زیست‌محیطی را می‌توان به عنوان رژیم جریانی که بتواند مشخصه‌های اکولوژیکی و سلامت زیستگاه

می‌گردد.

در تحقیقی موتون و همکاران (۲۰۰۷) مدل‌سازی اکوهیدرولیکی زیستگاه ماهیان را به عنوان ابزاری برای مدیریت جریان رودخانه و ارزیابی اثرات زیست‌محیطی تغییرات پارامترهای فیزیکی در رودخانه‌ها معرفی کردند (Mouton et al., 2007). در مطالعه دشتی و همکاران (۱۳۹۶) در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علویان، در نظر گرفتن تأمین کامل حداقل جریان زیست‌محیطی را بسیار ضروری دانستند. آنها همچنین بیان کردند، عدم لحاظ جریان زیست‌محیطی رودخانه، نقطه ضعفی در برنامه‌ریزی‌های جامع منابع آب است. پنگ و سان (۲۰۱۶) در ارزیابی حداقل جریان زیست‌محیطی مورد نیاز رودخانه زاگوناو چین، با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی زیستگاه و تنانت نشان دادند که به منظور تأمین زیستگاه مناسب (عمق و جریان مناسب) برای نمونه ماهی غالب رودخانه، رژیم اکولوژیکی معادل ۲۷/۷ درصد از متوسط دبی رودخانه مورد نیاز می‌باشد. بر اساس نتایج آنها، مقدار جریان به دست آمده از روش شبیه‌سازی زیستگاه نزدیک به جریان پیشنهادی روش تنانت برای سطوح خوب و خیلی خوب است (Peng and Sun, 2016). در توصیف پاسخ اکولوژیکی جوامع ماهیان و بی‌مهرگان آبی به تغییرات هیدرولوژیکی رودخانه‌های ایالت کارولینای شمالی، فلان و همکاران (۲۰۱۷) بیان داشتند برای یافتن محدوده جریان مناسب برای ادامه فعالیت‌های زیستی آبیان، بایستی حساسیت‌های فصلی جوامع بیولوژیکی به کاهش جریان، آستانه سیلابی و آستانه زیستی در نظر گرفته شود (Phelan et al., 2017). همچنین استامو و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از یک روش یکپارچه مدل‌سازی هیدرولوژیکی - هیدرودینامیکی - زیستگاه، جریان زیست‌محیطی رودخانه اسپرچیوس در یونان را در کلاس‌های مدیریت زیست‌محیطی مورد مطالعه قرار دادند. ایشان مقدار جریان ۱ مترمکعب بر ثانیه که مطابق با الزامات زیستگاهی، سازگاری با شرایط منطقه و از لحاظ هیدرولوژیکی و اکولوژیکی قابل تخصیص باشد را به عنوان رژیم مطلوب پیشنهاد و مقادیر بیشتر و کمتر از این مقدار را غیرقابل قبول دانستند (Stamou et al., 2018). در بررسی تأثیر خصوصیات هیدرولیکی جریان بر مطلوبیت زیستگاه قزل‌آلای رنگین‌کمان (*Rainbow trout*) در رودخانه دلیچای با مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه، حاجی‌اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند میزان فضای مطلوب زیستگاهی در طول رودخانه، به شدت تحت تأثیر میزان دبی جریان بوده و تغییرات مشاهده شده در پراکنش ماهیان در ایستگاه‌های مختلف، نیز به دلیل تغییر در شرایط هندسی و هیدرولیکی در طول رودخانه می‌باشد (Hajiesmaeili et al., 2018). در تعیین جریان زیست‌محیطی رودخانه زرین‌گل با استفاده از شاخص‌های اکوهیدرولیکی و شبیه‌سازی زیستگاه با کاربرد مدل River2D، نادری و همکاران (۱۳۹۸) بیان کردند بایستی به جریان موردنیاز برای دوره‌های تخم‌ریزی سیاه‌ماهی (*C. Capoeta*)

در زیستگاه رودخانه و جریان‌های سیلابی برای زنده‌مانی و حفظ پوشش گیاهی توجه گردد. نتایج مطالعه آنها نشان داد محدوده حداکثر و حداقل جریان زیست‌محیطی برآورد شده در ماه‌های فروردین و آبان به ترتیب معادل ۵/۰۹ و ۰/۷۶ متر مکعب بر ثانیه، با میانگین سالانه ۱/۷۹ متر مکعب بر ثانیه (معادل ۸۴ درصد جریان طبیعی رودخانه) بوده که بایستی در داخل رودخانه زرین‌گل برای حفظ حیات اکوسیستم و حفاظت اکولوژیکی گونه سیاه‌ماهی برقرار باشد. در تحقیقی، حاجی‌اسماعیلی (۱۳۹۸) تأثیر پارامترهای هیدرولیکی جریان را بر مطلوبیت زیستگاه‌های قزل‌آلای خال‌قرمز (*Salmo trutta*) در رودخانه الرم پارک ملی لار و نیز پاسخ اکولوژیکی گونه ماهی به تغییرات شرایط زیستی از طریق بررسی سناریوهای تغییر رژیم جریان رودخانه با توسعه رویکرد بیوانرژی را مورد بررسی قرار داد. بر اساس نتایج وی، برای حفظ پایداری اکوسیستم رودخانه الرم، محدوده دبی ۰/۲۲ تا ۰/۳۱ مترمکعب بر ثانیه به عنوان جریان بهینه زیست‌محیطی با توجه به شاخص‌های اکوهیدرولیکی و مطلوبیت زیستگاه، در نظر گرفته شد. مطالعات موجود نشان می‌دهد که رژیم‌های جریان، محرک مؤثری برای تخم‌ریزی ماهی‌ها هستند (احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ ElJabi and Caissie, 2019; Li et al., 2019). مزگر و همکاران (۲۰۱۹) و نادری و همکاران (۱۳۹۹) برقراری جریان‌های زیست‌محیطی را به عنوان ابزاری کارآمد برای مدیریت آب در کاهش تأثیر تغییرات رژیم جریان هیدرولوژیکی رودخانه و در دستیابی به وضعیت اکولوژیکی قابل قبول، توصیف کردند (Mezger et al., 2019).

رژیم جریان نقش مهمی در فرآیندهای اکوسیستم رودخانه دارد. جریان اکولوژیکی پایه و اساس حفاظت از زیستگاه ماهیان رودخانه‌ای و اکوسیستم‌های آبی است (Macura et al., 2018). نادری و همکاران، (۱۳۹۹). در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی، درک، توصیف و طراحی رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی اهمیت دارد. با این وجود توسعه مفهوم جریان‌های زیست‌محیطی به عنوان محرک اصلی در فرآیندهای رودخانه‌ای، برای دستیابی به رژیم هیدرولوژیکی قابل قبول محسوب می‌شود (Wang et al., 2018؛ ElJabi and Caissie, 2019؛ نادری و همکاران، ۱۳۹۸). نادری و همکاران، (۱۳۹۸؛ Li et al., 2020). با افزایش نیاز به تولید انرژی، و ایجاد رقابت بین مصرف‌کنندگان در استفاده از منابع آب رودخانه‌ها، کاربرد رویکردهایی مبتنی بر واکنش‌های اکولوژیکی به تغییرات جریان درون رودخانه‌ای، که بتوانند تعادل بهتری را بین تأمین نیازهای زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی برقرار نمایند، منجر به کارایی مخزن سد و مدیریت اکوسیستم رودخانه می‌گردد. در عین حال، برای دستیابی به توسعه پایدار منابع آب در چارچوب پروژه‌های مهندسی رودخانه، تأکید سریع بر مدیریت اکوسیستمی رودخانه‌های تنظیم شده و ارزیابی اثربخشی آن باید در نظر گرفته شود.

که نزدیک به هیدروگراف طبیعی رودخانه می‌باشد، ضمن حفظ رژیم طبیعی جریان رودخانه‌ها، نیاز آب زیست‌محیطی دریاچه ارومیه را تأمین می‌کند.

آنچه مسلم است، بروز تغییرات در شرایط طبیعی رودخانه‌ها (آلوده شدن رودخانه‌ها و ساخت سدها) سبب شده است زیستگاه ماهیان دستخوش تغییراتی گردد و در نتیجه آن مطلوبیت زیستگاه رودخانه نیز کاهش یابد. بنابراین بایستی با استفاده از طرح‌های بهبود زیستگاه و از بین بردن عوامل محدود کننده، مطلوبیت زیستگاه رودخانه را به میزان قابل توجهی افزایش داد. از این رو، نگرانی فزاینده‌ای در مورد تغییر جریان رودخانه وجود دارد که می‌تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد اکوسیستم رودخانه تأثیر بگذارد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته کتابخانه‌ای و میدانی، ضرورت تحقیقاتی به منظور حفاظت از سامانه حیاتی رودخانه‌ها و احیا و بازسازی زیستگاه هیدرولیکی ماهیان در مدیریت و برنامه‌ریزی اکوسیستم رودخانه جهت دستیابی به مدیریت صحیح حوزه آبخیز و تضمین پایداری اکوسیستم‌های رودخانه‌های حوضه جنوبی البرز، احساس می‌شود. در همین ارتباط، مطالعه حاضر بر روی جنبه‌های اکوهیدرولیکی و هیدرولوژیکی رژیم جریان تمرکز دارد و یک رویکرد نوین برای برآورد جریان اکولوژیکی برای حفظ پتانسیل اکولوژیکی و تنوع زیستی ماهیان در رودخانه جاجرود، توسعه داده است، که سعی می‌شود به بهترین نحو توصیف رژیم جریان طبیعی و خصوصیات اکولوژیکی زیستگاه رودخانه جاجرود و همچنین کمیت جریان‌های زیست‌محیطی این رودخانه، راهی نو را بر اساس نتایج این تحقیق معتبرتر و سازگارتر با شرایط جریان رودخانه‌ای، معرفی نماید.

## مواد و روش‌ها

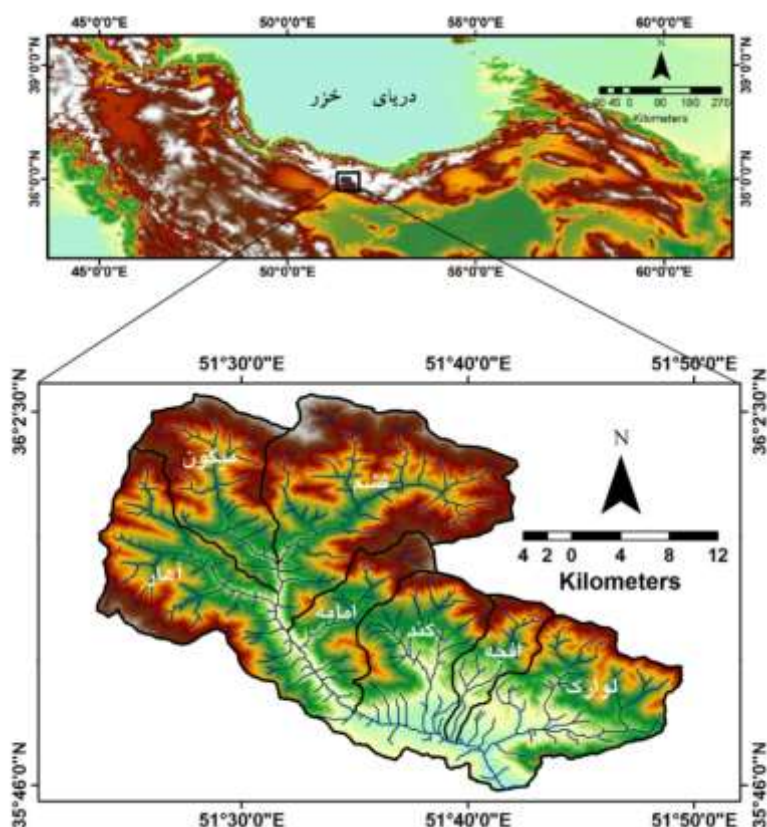
### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه رودخانه جاجرود، یکی از رودخانه‌های با جریان دائمی و از مهم‌ترین بوم‌سازگان‌های آبی که در شمال شرق تهران جریان دارد که بیش از ۳۰ درصد آب شرب تهران را تأمین می‌کند. بازه مورد مطالعه (حدفاصل دو سد لتیان در شمال و سد ماملو در جنوب منطقه) بخشی از حوضه آبریز لواسانات است که از شمال به حوضه آبریز رودخانه لار، از جنوب به دشت ورامین و رودخانه شور و از شرق به حوضه آبریز حبله‌رود و از غرب به حوضه‌های تهران و رودخانه کرج محدود گردیده است (لایقی و کرم، ۱۳۹۳؛ خضری و همکاران، ۱۳۹۸). حوضه آبخیز جاجرود با مساحتی حدود ۱۸۹۰ کیلومتر مربع از مناطق حفاظت شده سازمان حفاظت محیط زیست بوده که بین مختصات جغرافیایی  $51^{\circ}22'$  تا  $54^{\circ}52'$  طول شرقی و  $35^{\circ}45'$  تا  $36^{\circ}50'$  عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱).

مطالعات مختلفی در رابطه با اثرات احداث سدها بر فراوانی و پراکنش آبیان انجام شده است (Yao et al., 2017؛ پروندی و همکاران، ۱۳۹۵). سدها در رودخانه‌ها، به عنوان مهم‌ترین عوامل فیزیکی ساخته انسان وجود دارند (رزاقی و همکاران، ۱۳۹۲، Jia et al., 2013). قطع ارتباط زیستی و ژنتیکی گونه‌های بالادست و پایین دست سد (در صورت عدم وجود سازه‌های راه ماهی)، تغییرات بستر رودخانه و در پی آن تغییر در زیستگاه آبیان، از جمله تغییرات منفی ناشی از سد و نگهداشت آب رودخانه‌ها است (Li et al., 2013؛ Zou and Liang, 2015). در پژوهشی لی و همکاران (۲۰۱۵)، اثرات تغییرات رژیم جریان در اثر بهره‌برداری و تنظیم مخزن سد بر روی زیستگاه‌های ماهی‌های جوان گونه *(Spinibarbus hollandi)* را شبیه‌سازی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد، در ماه‌های اکتبر تا دسامبر، نیاز به رهاسازی دبی بیشتری از مخزن سد چینگشیتان در برآورده کردن رژیم جریان اکولوژیکی بوده و تخلیه جریان فعلی از سد در فصول خشک، ۸۰ درصد پتانسیل زیستگاه مطلوب را تأمین می‌کند (Li et al., 2015). در ارزیابی اثرات احداث سد بر روی تغییرات هیدرولوژیکی رودخانه پووا با استفاده از مدل IHA و رویکرد دامنه تغییر پذیری<sup>۲</sup>، سوچکا و همکاران (۲۰۱۶) بیان داشتند که احداث سد مخزنی، تأثیر متوسطی بر رژیم هیدرولوژیک رودخانه داشته و از طرفی نیز باعث تأثیر چشم‌گیری در تغییر شاخص‌های هیدرولوژیک جریان رودخانه‌ای آن داشته است (Sojka et al., 2015). در پژوهشی دیگر اسفندیاری درآباد و همکاران (۱۳۹۸) دریافتند که احداث سدها در رودخانه‌های زربینه‌رود و ساروق‌چای در استان آذربایجان غربی، باعث بهم خوردن تعادل هیدرولوژیکی و موجب تغییرات قابل توجه در شاخص‌های هیدرولوژیکی جریان (جریان حداقل، جریان حداکثر و تداوم جریان) شده‌اند و همچنین میزان بی‌نظمی در شاخص‌های هیدرولوژیک جریان افزایش یافته است. از طرفی، نتایج دیگر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که احداث سدها، تأثیر مثبت بر تأمین جریان‌های کمینه دارد که برای حفاظت از زیست‌بوم‌های رودخانه‌ای اهمیت دارد (Zhang et al., 2018؛ Kuriqi et al., 2019) و همچنین موجب کنترل سیلاب و تأمین آب موردنیاز بخش‌های صنعت، کشاورزی و شرب می‌شود (رزاقی و همکاران، ۱۳۹۲؛ دشتی و همکاران، ۱۳۹۶). در مطالعه تنظیم منحنی فرمان سدهای مخزنی در رودخانه‌های منتهی به دریاچه ارومیه برای تخمین جریان زیست‌محیطی، سودی و همکاران (۱۳۹۸)، ۳ سناریو ۳۰، ۵۰ و ۸۰ درصد میانگین جریان سالانه را به عنوان حجم آب رهاسازی از سد، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد، سناریو ۸۰ درصد میانگین جریان سالانه، به عنوان یک سناریو مؤثر

1- Indicator of Hydrologic Alteration

2- Range of Variability Approach: RVA



شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه رودخانه جاجرود

زیستگاه مناسبی را برای ماهیان سردآبی بوجود آورده است. ماهیان مهم این رودخانه، شامل خانواده آزاد ماهیان (Salmonidae) و کپورماهیان (Cyprinidae) می‌باشد (پروندی و همکاران، ۱۳۹۵؛ احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۷؛ خضری و همکاران، ۱۳۹۸). در سال ۱۳۴۶ سد لتیان بر روی رودخانه جاجرود احداث شد که باعث شروع تغییرات هیدرولوژیکی و اکولوژیکی گردید. لتیان، ایستگاه هیدرومتری استفاده شده برای محاسبات هیدرولوژیکی است که در ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۱ درجه و ۴۱ دقیقه طول شرقی واقع شده است، که یک ایستگاه درجه یک و تجهیزات موجود در آن شامل اشل، لیمنوگراف و پل تلفریک می‌باشد. بر اساس آمار و اطلاعات دوره ۷۴ ساله (سال ۱۳۲۴ تا ۱۳۹۷) ایستگاه هیدرومتری لتیان، دریافتی از شرکت آب منطقه‌ای استان تهران، حداکثر میانگین دبی جریان ماهانه<sup>۱</sup> رودخانه جاجرود در ماه اردیبهشت و برابر ۱۹/۹۴ مترمکعب بر ثانیه و حداقل میانگین دبی جریان ماهانه در ماه مهر و برابر ۱/۶۲ مترمکعب بر ثانیه و میانگین دبی سالانه<sup>۲</sup>، ۶/۸۲ مترمکعب بر ثانیه است. شایان ذکر است در پایین‌دست سد لتیان، ایستگاه هیدرومتری

رودخانه جاجرود، یکی از اصلی‌ترین رودخانه‌های تغذیه‌کننده سد لتیان که از چشمه‌های متعدد و ارتفاعات خرسنگ، دیزین، آهار، گرمابدر و شکراب سرچشمه می‌گیرد و از به هم پیوستن رودهای فشم، اوشان، افجه، لوراک و کندرود، شاخه اصلی جاجرود را تشکیل می‌دهد که این شاخه اصلی، ۴۰ کیلومتر طول دارد و در جهت جنوب طی مسیر کرده و در شریف‌آباد ورامین به رودخانه کرج ملحق می‌شود و در نهایت به دریاچه نمک می‌ریزد (Maghrebi et al., 2010). این حوضه دارای زمستان‌های سرد، تابستان‌های گرم و براساس اقلیم نمای دومارتن، دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است. متوسط بارندگی سالانه در منطقه حدود ۲۶۵ میلی‌متر است که رژیم مدیترانه‌ای را تداعی می‌کند که دارای رژیم برفی بارانی است. همچنین حداکثر، حداقل و متوسط دما در منطقه به ترتیب ۲۲، ۹ و ۱۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. حداکثر ارتفاع در منطقه شمالی حوزه در حدود ۴۱۰۰ متر و کمترین ارتفاع آن حدود ۱۲۰۰ متری می‌باشد. شیب متوسط آن در ناحیه کوهستانی، دو درصد و در ناحیه دشت، ۰/۴ می‌باشد (Mahjouri and Kerachian, 2011). آینده سالانه رودخانه جاجرود در محل سد لتیان حدود ۲۹۸ میلیون متر مکعب محاسبه شده است. شرایط محیطی و خواص فیزیکی و شیمیایی آب این رودخانه،

1- Mean Monthly Flow: MMF  
2- Mean Annual Flow: MAF

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UQ_x) + \frac{\partial}{\partial y}(VQ_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} H^2 = gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(H_{txx}) \right] + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial y}(H_{txy}) \right] + \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UQ_y) + \frac{\partial}{\partial y}(VQ_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial y} H^2 = gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x}(H_{tyx}) \right] + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial y}(H_{tyy}) \right]$$

که در روابط ۱ و ۲،  $H$  عمق جریان،  $U$  و  $V$  سرعت متوسط در جهت  $x$  و  $y$  می‌باشند.  $Q_x$  و  $Q_y$  شدت‌های جریان می‌باشند که به صورت  $qx=uh$  و  $qy=vh$  به سرعت مرتبط می‌شوند.  $G$  شتاب ثقل و  $\rho$  چگالی آب است.  $S_{0x}$  و  $S_{0y}$  شیب کف در جهت  $x$  و  $y$ ،  $S_{fx}$  و  $S_{fy}$  شیب اصطکاک مربوط می‌باشند.  $\tau_{xy}$ ،  $\tau_{yx}$ ،  $\tau_{yy}$ ،  $\tau_{xx}$  و  $\tau_{xy}$  اجزای بردار تنش افقی آشفتگی جریان می‌باشند (Steffler and Blackburn, 2002). روند به‌کار گرفته شده در مدل River2D، به‌طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

خروجی مدل River2D، منحنی‌های مساحت قابل استفاده وزنی<sup>۲</sup> است که دبی جریان را به یک شاخص زیستگاه ماهیان برای مراحل مختلف زندگی گونه‌های هدف ماهی‌ها، مرتبط می‌کند (نادری و همکاران، ۱۳۹۸) (رابطه ۳). در مدل‌های شبیه‌سازی زیستگاه، فرض اصلی رابطه مستقیم و خطی بین مساحت قابل استفاده وزنی و سطح حفاظت از زیستگاه یا به بیان دیگر پاسخ بیولوژیکی است (Fazelnajafabadi and Afzalimehr, 2019). با استفاده از تابع مساحت قابل استفاده وزنی در مقابل دبی جریان، رژیم اکولوژیکی جریان به ازای ماه‌ها و دوره‌های مختلف زندگی گونه هدف ماهی، قابل محاسبه است.

$$WUA = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times CSI_i}{L} \right] \times 1000 \quad (3)$$

$$CSI = SI_d \times SI_v \times SI_b \quad (4)$$

که در روابط ۳ و ۴،  $A_i$ : سطح هر سلول زیستگاهی،  $CSI_i$  شاخص مطلوبیت ترکیبی<sup>۳</sup> هر سلول،  $L$  طول بازه،  $WUA$  (مساحت قابل استفاده وزنی) تابعی از  $Q$  (دبی جریان) و  $SI_i$  شاخص مطلوبیت<sup>۴</sup> هر متغیر می‌باشند. بر این اساس، مطابق شکل ۳، منحنی رابطه دبی - مساحت قابل استفاده وزنی برای هر دوره زندگی ماهی (تخم‌ریزی، نابالغ و بالغ) برای ماه‌های مختلف را می‌توان نشان داد. در شکل ۳،  $WUA_{max}$  حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی،  $Q_{P1}$  و  $Q_{P2}$  به ترتیب حداقل و حداکثر دبی جریان مربوط به  $WUA_p$  می‌باشد. بدین ترتیب با استفاده از میانگین جریان ماهانه، رژیم جریان اکولوژیکی به صورت میزان درصد کاهش حفاظت زیستگاه در دسترس (مساحت قابل استفاده وزنی یا زیستگاه‌های مطلوب در دسترس) تا مقداری که حداقل زیستگاه گونه هدف حفظ شود، در نظر گرفته می‌شود.

تخته‌چنار که در چند سال اخیر بر روی رودخانه جاجرود راه‌اندازی شده است، از سال ۱۳۹۲ به بعد، آمار و اطلاعات هیدرولوژیکی آن در دسترس است، که برای این پژوهش به آمار دراز مدت مورد نیاز است. در این پژوهش با توجه به هزینه، زمان و اطلاعات موجود، نتایج حاصل از روش‌های پرکاربرد دنیا در گروه روش‌های هیدرولوژیکی شامل تنانت، جریان پایه آبیان، آرکانزاس و محدوده تغییرپذیری و مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی زیستگاه برای تعیین جریان زیست‌محیطی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند.

### مدل شبیه‌سازی زیستگاه

به منظور ارزیابی اکوسیستم رودخانه و شبیه‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای، روش‌های زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی کمیت و کیفیت زیستگاه و کمی‌سازی تاثیرات بیولوژیک تغییرات جریان، یکی از جنبه‌های مهم در روش افزایشی جریان درون رودخانه و به عنوان ابزاری قدرتمند و یک روش جامع‌نگر برای بررسی نیاز درون رودخانه‌ای و مدیریت‌های مختلف جریان، محسوب می‌گردد. یکی از برنامه‌های شناخته شده‌ای که برای شبیه‌سازی دوبعدی استفاده می‌شود، مدل River2D توسعه یافته توسط استفلر و بلکبرن (Steffler and Blackburn, 2002) در دانشگاه آلبرتا کانادا می‌باشد (Steffler and Blackburn, 2002). مدل River2D یک مدل دوبعدی هیدرودینامیک با روش اجزای محدود بوده و اساس آن بر استفاده از متوسط متغیرها در عمق استوار می‌باشد. مدل مزبور توانایی شبیه‌سازی جریان‌های ماندگار و غیرماندگار را داراست. تئوری مورد استفاده در شبیه‌سازی زیستگاه در این مدل بدین صورت است که از معیارهای مطلوبیت زیستگاه به‌عنوان رابط بین هیدرولیک رودخانه و زیستگاه موجودات آبی استفاده می‌کند. پارامتر زیستگاه خروجی آن نیز سطح قابل استفاده وزنی<sup>۱</sup> می‌باشد (Im and Kang, 2011). همچنین مدل می‌تواند، مرزهای ورودی و خروجی چندگانه داشته باشد که باید جریان را در هر مرز ورودی مشخص کرد. اگر رودخانه سرشاخه‌های متعددی داشته باشد، بایستی ورودی را برای هر سرشاخه وارد کرد.

نرم‌افزار River2D مدل شبیه‌ساز دوبعدی عمق متوسط می‌باشد. جزء هیدرودینامیک این مدل بر اساس حل دوبعدی معادلات سنت و نانت است. مدل River2D بر مبنای قانون بقای جرم (پیوستگی) و مومنتوم عمل می‌کند. یک معادله مربوط به بقای جرم آب و دو معادله دیگر مربوط به اجزای بردار مومنتوم هستند (Steffler and Blackburn, 2002). معادلات اصلی که این مدل بر اساس آنها پایه‌گذاری شده است را می‌توان به صورت رابطه (۱) و (۲) ارائه داد:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \quad (1) \text{ معادله پیوستگی:}$$

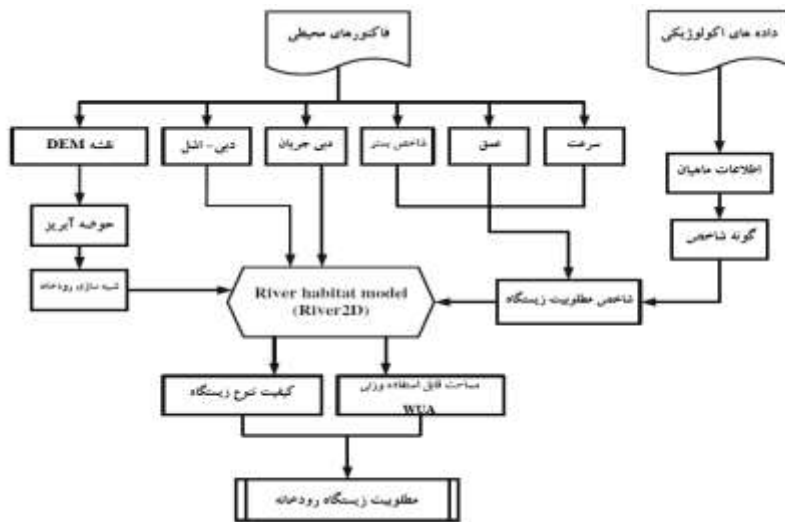
$$(2) \text{ معادله مومنتوم:}$$

2- Weighted Usable Area : WUA

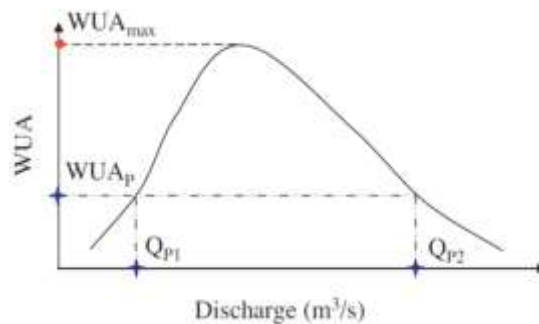
3- Combined Suitability Index

4- Suitability Index

1- Weighted Usable Area: WUA



شکل ۲- فلوجارت مدل River2D (Chou and Chuang, 2011)



شکل ۳- نمایش مفهومی منحنی دبی - فیزیک زیستگاه (Li et al., 2015)

### روش‌های هیدرولوژیکی

هیدرولوژیکی روزانه برای تعیین شرایط جریان طبیعی و تسهیل ارزیابی تغییرات ایجاد شده در دو دوره زمانی قبل و بعد از آثار مداخلات انسانی (احداث سد، تغییر کاربری اراضی و ...) و تغییر اقلیم در رژیم‌های جریان رودخانه، برای محاسبه مقادیر ۳۳ پارامتر هیدرولوژیکی طراحی شده است (Zhang et al., 2018). مزیت مدل IHA در این است که می‌تواند داده‌های هیدرولوژیکی روزانه را به تعدادی مؤلفه هیدرولوژیکی قابل قبول و مرتبط با وضعیت اکولوژیکی مانند مقدار، زمان وقوع، فراوانی، مدت تداوم و میزان تغییرات خلاصه کند. در روش «تنانت» حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه‌ها به صورت درصد مشخصی از میانگین دبی سالانه رودخانه (جدول ۱)، بدون در نظر گرفتن شرایط اکولوژیکی و هیدرولیکی و تنها با استفاده از هیدروگراف رودخانه محاسبه می‌گردد (Yasi and Ashori, 2017)؛ نادری و همکاران، ۱۳۹۷). در این روش زیستگاه حیاتی کوتاه‌مدت، با حفظ ۱۰ درصد جریان متوسط سالانه (مهر تا اسفند) و زیستگاه

روش‌های مبتنی بر شاخص‌های هیدرولوژیکی، ساده‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ارزیابی رژیم هیدرولوژیکی و برآورد جریان زیست‌محیطی در سطح جهان هستند (Arthington et al., 2018)؛ Kuriqi et al., 2019؛ سودی و همکاران، ۱۳۹۸). این روش‌ها بیشتر بر آمارهای تاریخی جریان رودخانه تکیه دارند. روش «محدوده تغییرپذیری» مطلوب‌ترین دسته از شاخص‌های هیدرولوژیکی است. هدف آن تهیه یک سری از ویژگی‌های آماری، جنبه‌های اکولوژیکی رژیم جریان با برجسته کردن نقش مهم تغییرات هیدرولوژیکی در حفاظت از اکوسیستم‌ها است (Zou and Liang, 2015)؛ Zhang et al., 2015). این روش برای استفاده در رودخانه‌های تنظیم شده کاربرد دارد که حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی و بومی و حفظ تنوع زیستی از اهداف اولیه مدیریت است. در پژوهش حاضر برای بررسی شاخص‌های تغییرات هیدرولوژیکی و تغییر مؤلفه‌های جریان زیست‌محیطی ناشی از احداث سد، از نرم‌افزار IHA Software 7.1 استفاده گردید. نرم‌افزار IHA، با هدف پردازش سریع داده‌های

حیاتی در ۳۰ درصد جریان متوسط سالانه (فروردین تا شهریور) و زیستگاه عالی برای حیات در جریان‌های بیش از ۶۰ درصد متوسط (Nikghalb et al., 2016؛ نادری و همکاران، ۱۳۹۹).

### جدول ۱- جریان زیست‌محیطی برای حیات ماهیان در روش تنانت (Tennant, 1976)

سطح حفاظتی یا وضعیت رودخانه	رژیم‌های پیشنهادی جریان پایه (درصدی از متوسط جریان سالانه)	
	فروردین-شهریور	مهر-اسفند
شستشوی سریع	۲۰۰	
جریان رودخانه	۶۰-۱۰۰	
بسیار عالی	۴۰	۶۰
عالی	۳۰	۵۰
خوب	۲۰	۴۰
قابل قبول	۱۰	۳۰
ضعیف	۱۰	۱۰
بسیار تخریب کننده	<۱۰	<۱۰

### اندازه‌گیری و نمونه‌برداری پارامترهای هیدرولیکی و اکولوژیکی رودخانه

به دلیل نیاز به منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه، با بازدیدهای میدانی و حضور تیم عملیاتی متشکل از پژوهشگران اکولوژی آبیان و مهندسی آب و همراهی کارشناسان دفتر تنوع زیستی و حیات وحش اداره کل حفاظت محیط زیست استان تهران، در فصل بهار، تابستان و پاییز سال ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷ (ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مهر و آبان) و بهره‌مندی از نظرات متخصصان اکوهیدرولیک، داده‌برداری جهت سنجش متغیرهای محیطی و اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی و نمونه‌برداری از ماهیان (اندازه‌گیری طول و تعداد ماهی (جهت تخمین سن و مرحله زندگی آن)) به صورت نقطه‌ای و دقیق از طریق صید الکتریکی<sup>۳</sup> و تور ساچوک پشتیبان، از ۸ ایستگاه نمونه‌برداری (جدول ۳) از ایستگاه‌های نمونه‌برداری از پایین دست رودخانه جاجرود به سمت بالادست (محدوده پایین دست سد لتیان)، انجام شد. بازه‌های مشاهداتی و مطالعاتی در نظر گرفته شده، طولی از بازه رودخانه به صورت ضریبی از حداکثر عرض رودخانه (۱۰ تا ۲۰ برابر عرض خیس شده مقطع در بالادست و پایین دست) که در امتداد مسیر نسبتاً مستقیم رودخانه واقع و تأثیرات ژئومورفولوژیکی و بوم‌شناختی رودخانه را به گونه مناسبی پوشش دهد (لطفی، ۱۳۹۱) و با پیمودن مسیر رودخانه و با توجه به عوارضی همچون پیچ‌وخم‌های مقاطع عرضی رودخانه، شیب بستر، ارتفاع، جنس بستر و همچنین وجود منابع آلودگی، انتخاب شدند.

در روش «جریان پایه آبیان»<sup>۱</sup>، حداقل متوسط جریان ماهانه رودخانه مورد مطالعه در یک دوره دراز مدت، جهت حفظ حیات آبیان و ماهیان به عنوان نیاز آبی زیست‌محیطی تعیین شده و لازم است که این مقدار آب به طور دائم در رودخانه جاری باشد (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ Shahriarinia et al., 2016). در روش «آرکانزاس»<sup>۲</sup> با ایجاد تغییراتی در روش تنانت از میانگین جریان ماهانه به جای سالانه استفاده می‌شود تا نسبت به روش تنانت به تغییرپذیری جریان در طی سال بیشتر استفاده گردد (نادری و همکاران، ۱۳۹۷). در روش آرکانزاس، جریان توصیه شده در ماه‌های آبان تا اسفند که ۶۰ درصد متوسط جریان ماهانه است، در فرآیندهای حمل رسوبات ریزدانه و تغذیه سفره‌های زیرزمینی نقش دارد. همچنین ۷۰ درصد میانگین جریان ماهانه در طول ماه‌های فروردین تا تیر برای برآورد نیازهای ماهیان جهت تخم‌ریزی و حداقل جریان پیشنهادی برای فصل تولیدمثل و جبران کاهش میزان اکسیژن محلول در اثر کاهش دبی رودخانه‌ها، ۵۰ درصد از میانگین جریان ماهانه ماه‌های مرداد تا مهر در نظر گرفته می‌شود (Davis, 2005; Shahriarinia et al., 2016). در جدول ۲ حالت‌های تخصیص و عدم تخصیص جریان زیست‌محیطی و تأثیرات آن در دوره‌های مختلف فصلی با روش آرکانزاس نشان داده شده است. شایان ذکر است هیچ‌کدام از روش‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده در این پژوهش مطابق با بررسی در منابع تایید شده (Vogel et al., 2007; Zhang et al., 2015; Arthington et al., 2018; Yasi and Ashori, 2017)، نیاز به صحت‌سنجی ندارند.

1- Aquatic Base Flow  
2- Arkansas



جدول ۲- تعیین جریان زیست‌محیطی رودخانه بر اساس روش آرکانزاس (Davis, 2005)

دوره	آبان - اسفند	فروردین - تیر	مرداد - مهر
جریان زیست‌محیطی پیشنهادی	۶۰ درصد میانگین جریان ماهانه	۷۰ درصد میانگین جریان ماهانه	۵۰ درصد میانگین جریان ماهانه
فرآیندهای فیزیکی و بیولوژیکی	تغذیه آب زیرزمینی و پاک‌سازی کانال رودخانه	تولیدمثل و تخم‌ریزی	پرورش ماهیان
شرایط نرمال	میانگین جریان ماهانه بالا دمای آب کم DO مقدار بالایی	میانگین جریان ماهانه بالا دمای آب در حال افزایش DO به‌خصوص داخل سنگریزه‌ها، مقدار بالایی	میانگین جریان ماهانه پایین دمای زیاد آب DO مقدار کم
عملکرد و یا پاسخ	تمیز شدن و بازسازی محل‌های تخم‌ریزی بوسیله شن‌های بالادست	جریان‌های بالا، افزایش دمای آب اثراتی بر تخم‌ریزی ماهی‌ها می‌گذارد	افزایش دمای آب، تولیدآبی اولیه ثانویه را افزایش می‌دهد.
فاکتورهای محدود کننده	انباشته شدن رسوب در بستر کاهش تغذیه سفره‌های زیرزمینی	کاهش جریان باعث کاهش تخم‌ریزی، نجات تخم‌ها و نوزادان می‌شود.	کاهش جریان آب = افزایش دمای آب مرگ و میر ماهیان، تجمع آلاینده‌ها

جدول ۳- موقعیت جغرافیایی، مشخصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری و میانگین پارامترهای هیدرولیکی و محیطی در رودخانه جاجرود

شماره ایستگاه	بازه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ذرات بستر (میلی‌متر)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	فاصله از پایین دست (متر)	عمق متوسط (متر)	سرعت متوسط (متر بر ثانیه)	مورفولوژی بستر	فرآوانی ماهی سفید (قطعه در متر مربع)
۱	پایین دست	۵۱° ۴۲' ۲"	۳۵° ۴۴' ۲۸"	۶۲	۱۳۶۱	۰	۰/۳۴	۰/۶۴	خیزاب	۰/۰۳۴
۲	پایین دست	۵۱° ۴۱' ۴۰"	۳۵° ۴۴' ۲"	۷۵	۱۳۷۴	۲۳۸۰	۰/۳۶	۰/۷۲	خیزاب	۰/۰۶۹
۳	پایین دست	۵۱° ۳۹' ۸"	۳۵° ۴۶' ۳۰"	۵۷	۱۴۰۹	۴۷۳۰	۰/۴۹	۰/۴۳	گوداب	۰/۰۸۷
۴	میانی	۵۱° ۳۹' ۲۳"	۳۵° ۴۶' ۴۴"	۶۴	۱۴۲۷	۶۸۱۰	۰/۳۵	۰/۶۸	خیزاب	۰/۰۵۴
۵	میانی	۵۱° ۳۹' ۴۳"	۳۵° ۴۷' ۴"	۵۲	۱۴۳۹	۷۵۶۰	۰/۴۷	۰/۵۱	خیزاب	۰/۱۳۴
۶	بالادست	۵۱° ۳۸' ۱۳"	۳۵° ۴۷' ۳۲"	۶۵	۱۴۴۷	۹۲۴۰	۰/۵۸	۰/۵۶	گوداب	۰/۲۵۳
۷	بالادست	۵۱° ۳۸' ۳۶"	۳۵° ۴۸' ۴۵"	۶۷	۱۴۵۳	۱۰۶۸۰	۰/۶۶	۰/۶۳	گوداب	۰/۳۹۴
۸	بالادست	۵۱° ۳۸' ۹"	۳۵° ۴۹' ۸"	۵۷	۱۴۶۲	۱۱۳۵۰	۰/۷۴	۰/۵۸	گوداب	۰/۴۵۶

در نقاط حضور ماهی (شکل ۴)، داده‌های مربوط به مقاطع عرضی رودخانه شامل فاصله هر مقطع از مقطع پایین دست، موقعیت جغرافیایی (با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی)، عمق (با استفاده از خط کش مدرج فلزی)، عرض (با استفاده از مترنوازی)، سرعت در دو نقطه بالادست و پایین دست مقطع (با استفاده از سرعت‌سنج) و ساختار بستر (قطر سنگ‌های غالب بستر رودخانه در پلات تصادفی)، اندازه‌گیری شده و از ساختار بستر، شکل زیستگاه و پوشش گیاهی اطراف آن، عکس برداری به‌عمل آمد.

#### مطلوبیت زیستگاه مدل بیولوژیک

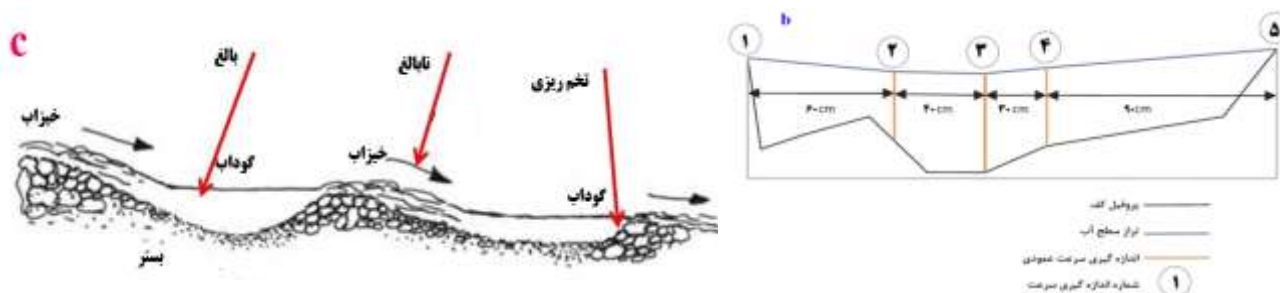
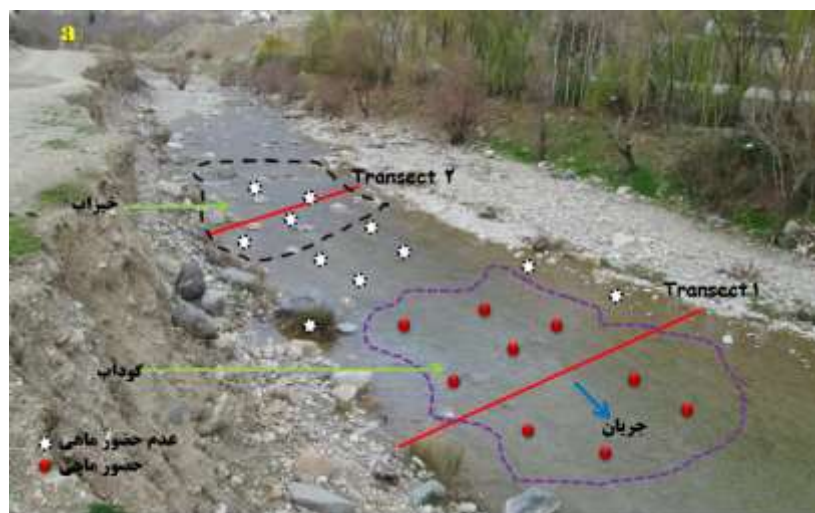
به‌منظور انتخاب یک مدل بیولوژیک دقیق، بایستی پژوهش‌های دقیق برای دوره‌های زیستی، تولیدمثل و سایر موارد بیولوژیک صورت گرفته باشد که در رودخانه‌های حوضه آبریز نمک به‌طور گسترده، کلیه رفتارهای محیطی خانواده کپورماهیان بررسی شده است (Mouludi Saleh et al., 2017; Hoghoghi et al., 2016). در رودخانه جاجرود (پایین دست سد احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۷).

لتیان)، ۴ گونه سیاه‌ماهی مرکزی ( *Capoeta buhsei*, Kessler, 1877)، سگ‌ماهی برگ (*Paracobitis bergianus*)، ماهی سفید رودخانه‌ای (*Squalius orientalis*) و ماهی خیاطه نمکی (*Alburnoides namaki*) مشاهده شد که گونه ماهی سفید رودخانه‌ای، بر اساس اطلاعات بلندمدت اجرای مطالعات بیولوژیکی و بررسی ویژگی‌های زیست‌سنجی و خصوصیات زیست‌شناختی آن و نیز با استفاده از تکنیک دلفی و تهیه پرسشنامه‌های علمی و بهره‌مندی از نظرات کارشناسان با تجربه در زمینه اکولوژی آبزیان به عنوان گونه هدف برای توسعه و تولید منحنی مطلوبیت زیستگاه در رودخانه مورد مطالعه انتخاب گردید. گونه ماهی سفید رودخانه‌ای متعلق به خانواده کپورماهیان بوده که دارای انتشار وسیعی در بخش‌های شمالی، غربی و جنوب غرب ایران است (کیوانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ مولودی صالح و کیوانی، ۱۳۹۷). این گونه به لحاظ ماهی‌گیری در آب‌های داخلی، صید ورزشی، ارزش بومی و مطالعات بیوسستماتیک جانوری نیز حائز اهمیت می‌باشد (Mouludi Saleh et al., 2017؛ مولودی صالح و کیوانی، ۱۳۹۷) و به عنوان گونه‌ای خوراکی مورد مصرف قرار می‌گیرد. این ماهی در آب‌های جاری زندگی کرده و جزو ماهیان آب شیرین محسوب می‌شود. بدن این

- 1- Global Positioning Systems: GPS
- 2- Current Meter

نسبی ماهیان نیز مشخص شد. این ماهیان (ماهی سفید رودخانه‌ای) در دامنه طبقه طولی ۱۹۰-۸۳ میلی‌متر قرار داشتند. بیشترین تعداد ماهیان سفید رودخانه‌ای مورد مطالعه در گروه سنی ۲-۳ سال با فراوانی ۳۷/۸ درصد و کمترین تعداد ماهیان در گروه سنی ۴ سال به بالا، با فراوانی ۱۷/۶ درصد قرار داشتند.

ماهی کشیده و در مقطع عرضی دایره‌ای شکل است و رنگ غالب آن نقره‌ای تا خاکستری و فاقد سیبک می‌باشد (مولودی صالح و همکاران، ۱۳۹۷). زمان تخم‌ریزی ماهی سفید رودخانه‌ای بر حسب دمای آب در ماه‌های فروردین تا خرداد می‌باشد (کیوانی و همکاران، ۱۳۹۵). با توجه به صرف زمان تقریباً برابر در صید نمونه‌ها، فراوانی

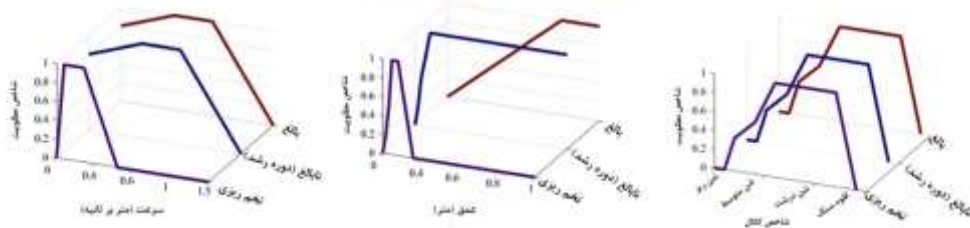


شکل ۴- نمایشی از بازه مطالعاتی و نمایش محل‌های حضور ماهی (c) و اندازه‌گیری پارامترهای هیدرولیکی در مقطع عرضی (b) در رودخانه جاجرود

داده‌های موردنیاز، مطابق با اصول اکولوژیک، برای توسعه منحنی‌های مطلوبیت زیستگاهی، ۳ پارامتر اصلی عمق، سرعت و شاخص کانال و محاسبه شاخص مطلوبیت زیستگاه از روش ژاکوب استفاده شد. در شکل ۵، منحنی‌های مطلوبیت زیستگاهی برای هر ۳ پارامتر اصلی عمق، سرعت و شاخص کانال در دوره‌های مختلف زندگی ماهی نشان داده شده است. همچنین مطابق شکل ۵، تمامی متغیرهای زیستگاهی مورد بررسی، رابطه معنی‌دار و همبستگی بالایی با شاخص‌های مطلوبیت زیستگاه دارند که بیانگر رابطه بالای این فاکتورها با حضور و فراوانی گونه ماهی سفید رودخانه‌ای می‌باشد. مطلوب‌ترین زیستگاه‌ها، محدوده‌ای است که مقدار شاخص مطلوبیت زیستگاه برابر یک باشد و بیشترین ماهی حضور دارد و نیز نشان‌دهنده شرایط مطلوب برای گونه ماهی سفید رودخانه‌ای است.

## نتایج و بحث

حفاظت و احیا رژیم جریان رودخانه‌ها و اکولوژی وابسته به آن با تخصیص جریان‌های زیست‌محیطی از مهم‌ترین راهکارهای مدیریت جامع حوضه آبریز برای جلوگیری از اثرات تنظیم جریان رودخانه‌ها می‌باشد. بنابراین 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. توزیع ماهانه مقادیر جریان اکولوژیکی به‌دست آمده برای روش‌های مختلف، در جدول ۵، ارائه شده است. در مطالعه حاضر با توجه به مشاهدات میدانی و جمع‌آوری



شکل ۵- منحنی‌های شاخص مطلوبیت پارامترهای عمق، سرعت و شاخص کانال در دوره‌های مختلف زندگی ماهی سفید رودخانه‌ای در رودخانه جاجرود

از این رو، این روش برای مناطق نیمه‌خشک کارایی مناسبی ندارد. در صورتی که بحث تخم‌ریزی و پرورش ماهی‌ها وجود داشته باشد، روش جریان پایه آبزیان، جریانی به اندازه میانه میانگین جریان‌های ماهانه را برای دوره تخم‌ریزی و پرورش ماهیان توصیه می‌کند (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۷). از سوی دیگر میزان جریان زیست‌محیطی تخصیص یافته، می‌بایست بیشتر از مقدار جریان اندک باشد. با توجه به آنکه این جریان معادل حالتی است که رودخانه دارای دبی کافی بوده و جریان به صورت مداوم و پایدار است و از اکوسیستم محافظت می‌نماید، در نتیجه جهت برآورد جریان زیست‌محیطی می‌بایست جریان رودخانه از این مقدار بیشتر شود.

**روش آرکانزاس:** روش آرکانزاس که بر پایه مراحل رشد و نمو ماهیان است، در هر مرحله از رشد، درصدی از جریان متوسط ماهانه استفاده می‌شود. بررسی مقدار جریان زیست‌محیطی در روش آرکانزاس نشان می‌دهد که مقدار برآورد شده در ماه‌های مختلف در محدوده ۰/۸۱ تا ۱۳/۹۵ مترمکعب بر ثانیه با متوسط ۴/۱۴ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که در مقایسه با روش تنانت، مقادیر دامنه و متوسط جریان زیست‌محیطی برآورد شده بیشتری را ارائه می‌نماید و در همه ماه‌های سال روش آرکانزاس منجر به برآورد بیشتری برای جریان زیست‌محیطی نسبت به روش تنانت شده است. بررسی نسبت جریان زیست‌محیطی برآورد شده با روش آرکانزاس به مقدار متوسط جریان ماهانه نشان می‌دهد که این نسبت در بازه ۵۰-۷۰ درصد با میانگین ۶۰/۸۳ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، مقدار جریان زیست‌محیطی برآورده شده از این روش، درصد بالایی از جریان متوسط ماهانه است. این مقدار برآورد شده، مقدار بسیار ایده‌آلی از نظر زیست‌محیطی و حفظ اکوسیستم رودخانه است. شهریار نی و همکاران (۲۰۱۶) و نادری و همکاران (۱۳۹۷) گزارش کردند، مقدار

**روش تنانت:** روش تنانت بر اساس درصدهایی از میانگین جریان سالانه و در گروه‌های مختلفی از بسیار ضعیف تا محدوده بهینه، تعریف شده است. نکته‌ای که باید در مورد استفاده از روش تنانت در رودخانه جاجرود مدنظر قرار گیرد این است که درصدها باید برای دوره قبل از انجام فعالیت‌های انسانی (احداث سد) و شروع تغییرات تعریف شود که در این مطالعه از سال ۱۳۲۴ تا ۱۳۴۳ می‌باشد. میانگین جریان سالانه برای این دوره برابر با ۸/۸۵ مترمکعب بر ثانیه است. بر این اساس با استفاده از روش تنانت، مقدار جریان زیست‌محیطی برای شرایط قابل قبول زیستی، ۳۰ درصد متوسط جریان سالانه برای فروردین تا شهریور (معادل ۲/۶۵ مترمکعب بر ثانیه) و ۱۰ درصد متوسط جریان سالانه برای مهرماه تا اسفند (معادل ۰/۸۸ مترمکعب بر ثانیه) برآورد گردید (جدول ۴). بر این اساس ماه‌های فصل زمستان دارای کمترین نسبت تخصیص (در بازه ۹ تا ۳۳ درصد) و ماه‌های فصل تابستان دارای بیشترین نسبت تخصیص (در بازه ۳۵ تا ۹۶ درصد) می‌باشد.

**روش جریان پایه آبزیان:** بررسی نتایج روش جریان پایه آبزیان مشخص می‌سازد که مقدار جریان زیست‌محیطی برآورد شده برای ماه‌های مختلف سال برابر با ۱/۶۲ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۲۳/۷۵ درصد متوسط جریان سالانه) در ایستگاه هیدرومتری لتیان است. همان‌طور که از جدول ۴ استنباط می‌شود، دبی حاصل از روش جریان پایه آبزیان، نمی‌تواند قابل استناد باشد، زیرا بدون آنکه تغییرات فصلی، درصد تداوم و احتمال وقوع را در نظر بگیرد، کمترین دبی ماهیانه‌ای که رخ داده را به عنوان حداقل دبی زیست‌محیطی عنوان می‌کند. با توجه به اینکه رودخانه‌های بسیاری در ایران فصلی هستند و در فصول خشک هیچ جریانی ندارند، بنابراین کاربرد روش جریان پایه آبزیان در این ماه‌های خشک جریان صفر را پیشنهاد خواهد کرد.

جریان زیست محیطی برآورد شده در روش آرکانزاس، از روش تنانت در تمام ماهای سال، بیشتر می‌باشد (Shahriarinia et al., 2016).

**روش محدوده تغییر پذیری:** اساس ایده استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی در روش RVA، نگهداری شرایط جریان در محدوده تغییرات طبیعی آن و مرتبط کردن شاخص‌های گیاهی و جانوری رودخانه با ۵ گروه از متغیرهای هیدرولوژیکی می‌باشد، به نحوی که با حفظ هر کدام از آنها در فاصله‌ای منطقی از میانه یا میانگین جریان رودخانه، شرایط اکولوژیکی تحت تأثیر اثرات انسانی، حفظ خواهد ماند. در روش محدوده تغییر پذیری، برای حفظ اکوسیستم در حد قابل قبول، وجود ۵ مولفه جریان زیست محیطی (جریان‌های حداقل، جریان‌های حد پایین، پالس‌های بالای جریان، سیلاب‌های کوچک و سیلاب‌های بزرگ) لازم می‌باشد که در جدول ۴، ارائه گردیده است. چون بهره‌برداری از سد لتیان از سال ۱۳۴۳ شروع شده است، لذا این سال به عنوان نقطه شروع تغییرات هیدرولوژیکی در نظر گرفته شد. بنابراین از سال آبی ۱۳۲۴ تا ۱۳۴۳ به عنوان دوره جریان با رژیم طبیعی و سال‌های آبی ۱۳۴۳ تا ۱۳۹۷ به عنوان دوره با رژیم جریان تغییر یافته (پس از احداث سد) تقسیم می‌شود. با استفاده از مدل IHA، تعداد ۳۳ متغیر هیدرولوژیکی برای بررسی تغییرات هیدرولوژیکی محاسبه شد که این ۳۳ متغیر، یک نمایش دقیق از رژیم هیدرولوژیکی برای ارزیابی تغییرات هیدرولوژیکی را فراهم می‌کند. با توجه به جدول ۴، متغیرهای گروه ۱، نشان‌دهنده مقدار جریان ماهانه می‌باشند. بر این اساس می‌توان بیان کرد که جریان‌های ماهانه در بیشتر ماه‌ها (با درجه تغییر هیدرولوژیکی متوسط و زیاد) به طور معنی‌داری، کاهش یافته و نیز مقادیر حداقل جریان ماهانه به‌طور محسوسی تغییر کرده است. همچنین متوسط حداقل جریان‌های ماهانه در دوره‌های سیلابی برای دوره با رژیم تغییر یافته، به‌طور قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با دوره رژیم جریان طبیعی کاهش داشته است. با توجه به مقادیر تغییرات هیدرولوژیکی، مشخص می‌شود که متوسط جریان ماهانه در همه ماه‌های سال به جز اردیبهشت ماه (دوره پرآبی) به مقدار قابل توجهی و یا در حد متوسطی، دچار تغییر شده است. همچنین در جدول ۴، وقایع حدی که گروه ۲، ۳ و ۴ را تشکیل می‌دهند، شامل جریان‌های حداقل و حداکثر، روزهای جریان صفر، جریان‌های حداقل و حداکثر روزانه (۱روزه، ۳روزه، ۷روزه، ۳۰روزه و ۹۰روزه) و پالس‌های بالا و پایین می‌باشد. با توجه به متغیرهای گروه ۲ می‌توان گفت که مقادیر متوسط سالانه حداقل و حداکثر دارای تفاوت می‌باشد، به طوری که همه مقادیر در دوره قبل از احداث سد بیشتر از دوره بعد از احداث سد می‌باشد. همانطور که از جدول ۴ استنباط می‌شود، حداقل مقادیر جریان چند روزه جریان، کاهش محسوسی داشته و مقادیر جریان حداکثر چند روزه (با درجه تغییرات کم) به طور غیر محسوسی در

مقایسه با بقیه کاهش یافته است. همچنین از محدوده RVA، مشخص می‌شود که تغییرات جریان حداقل چند روزه، محسوس می‌باشد. در نهایت با توجه به مقادیر گروه ۵، می‌توان نتیجه گرفت که میزان نوسانات افزایشی در دبی جریان در دوره بعد از احداث سد (رژیم تغییر یافته)، نسبت به دوره قبل از احداث سد (رژیم جریان طبیعی)، کمتر شده است. همچنین متغیرهای نوسانات کاهشی در دبی جریان و تعداد برگشت جریان در دوره بعد از احداث سد نسبت به دوره قبل از احداث سد، افزایش یافته است. آنچه با بررسی مشخص می‌گردد، درجه تغییرات ۲۶ متغیر زیاد تا متوسط و فقط ۴ متغیر دیگر، درجه تغییرات آنها، پایین به‌دست آمد که بیان‌کننده درجه بالای تغییرات هیدرولوژیکی در ایستگاه هیدرومتری لتیان می‌باشد. نتایج جدول ۴، نشان‌دهنده اختلال قابل توجهی در رژیم جریان طبیعی بوده و متغیرهای هیدرولوژیکی که رابطه تنگاتنگی با اکوسیستم رودخانه جاجرود دارند، دچار تغییرات اساسی شده‌اند. روش حاضر با توجه به این مطلب و کاربرد مدل IHA، مقادیر جریان درون رودخانه‌ای در ماه‌های مختلف را پیشنهاد داده است که در جدول ۵ قابل ملاحظه است. مقادیر پیشنهادی این روش، حد پایین محدوده تغییرپذیری می‌باشد. نکته قابل توجه آنکه، مقادیر پیشنهادی در فصل تابستان کم می‌باشد که علت آن بالا بودن مصرف و رقابت بین سایر مصرف‌کنندگان و ذی‌نفعان از جریان آب (بخش‌های شرب، صنعت و...) است. در بررسی اثرات سد روی رژیم جریان رودخانه شایینگ در استان هنان چین با استفاده از شاخص‌های تغییر هیدرولوژیک، زو و لیانگ (۲۰۱۵) به این نتیجه رسیدند که احداث سد مذکور، باعث کاهش میزان جریان رودخانه در دوره پس از احداث سد از ۳/۵ به ۱/۸۱ درصد شده است (Zou and Liang, 2015). محققان مختلفی نیز در تحقیقاتشان گزارش کردند که میزان نوسانات افزایشی دبی جریان در دوره بعد از احداث سد، کاهش یافته است (Zhang et al., 2018; Zou and Liang, 2015) که این نتیجه را می‌توان به مطالعه حاضر تعمیم داد و از دیدگاه دیگر، جریان‌های مخرب و حداکثر احتمالاً تأثیرات مخربی نیز روی گونه‌های آبی خواهند داشت و به شرط حفظ حیات این گونه‌ها در پایین‌دست سدها، به‌نظر می‌رسد وجود سد البته با رعایت جریان زیست محیطی از این نظر مفید هم می‌تواند باشد.

### روش شبیه‌سازی زیستگاه

تعیین محدوده رژیم جریان اکولوژیکی، می‌تواند تخمین مناسبی جهت ارزیابی پاسخ اکولوژیکی رودخانه به تغییرات مورفولوژیکی ایجاد شده در اثر فرآیندهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی باشد. به این منظور در برآورد رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی رودخانه جاجرود با استفاده از شاخص‌های اکوهیدرولیکی، پس از مطالعات میدانی و با تولید و توسعه منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه، برای هر مرحله از زندگی گونه

هدف (تخم‌ریزی، نابالغ و بالغ) و ورود آن به مدل شبیه‌سازی زیستگاه River2D، مساحت قابل استفاده وزنی برای دبی‌های مختلف (منحنی دبی- فیزیک زیستگاه) در بازه‌های مورد مطالعه، استخراج گردید و در ادامه رژیم ماهانه جریان‌های اکولوژیکی به دست آمد.

جدول ۴- نتایج تغییرات پارامترهای IHA در روش RVA برای ایستگاه هیدرومتری لتیان در رودخانه جاجرود

پارامترهای تغییرات IHA	جریان با رژیم طبیعی			رژیم جریان تغییر یافته			اهداف RVA	
	متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
<b>گروه ۱- میزان آبدهی ماهانه</b>								
مهر	۲/۷۵	۱/۵	۶/۲	-۰/۵	۰/۱۳	۹/۷۵	۲/۵۶	۳/۴۴
آبان	۱/۳	۱/۸	۶/۲	۳/۹۷	-۰/۱۴	۱۲/۹۸	۲/۷۲	۳/۷۴
آذر	۳/۶	۲/۳	۵/۳	۲/۷۷	-۰/۴	۱۵/۸	۳/۴	۴/۷۴
دی	۴/۱	۲/۲	۶/۲	۱/۲	۰/۲۴	۸/۷	۳/۰۶	۴/۹
بهمن	۵/۷	۲/۱	۷/۵	۱/۰۱	۰/۲۹	۱۱/۱	۳/۶	۴/۴۲
اسفند	۱۰/۵۲	۴	۲۸	۸/۳۸	-۰/۵۹	۴۱/۳	۸/۹۲	۱۲/۲
فروردین	۱۱/۵۵	۳/۱	۲۳/۴۲	۱۰/۴۸	-۰/۷۵	۲/۹۲	۶/۳	۱۵/۶۷
اردیبهشت	۲۴/۳	۱۱	۵۷	۱۵/۵۸	-۰/۵۴	۵۱/۵	۱۸/۲	۲۳/۰۵
خرداد	۲۱/۳	۶/۶	۵۹	۵/۷۳	-۰/۴۴	۴۸	۱۶/۲۴	۳۰/۴
تیر	۱۱/۵	۳/۷	۲۸/۵	۳/۴۴	-۰/۳۵	۲۴/۵	۸/۵۶	۱۶/۳
مرداد	۵/۹	۱/۹	۷	۲/۷۴	-۰/۲۳	۱۲/۸	۴/۷	۷/۴۴
شهریور	۳/۷	۱/۳	۷/۵	۱/۸۳	-۰/۱۴	۱۲/۱	۲/۵	۴/۷۴
<b>گروه ۲- مقدار و مدت وقایع حدی (حداقل و حداکثر سالانه)</b>								
حداقل ۱ روزه	۲	-۰/۳	۳/۴	-۰/۵۶	-۰/۰۳	۱/۸	۱/۶۲	۲/۲
حداقل ۳ روزه	۲/۱	۱/۲	۳/۵	-۰/۶۲	-۰/۰۳	۲	۱/۸۲	۲/۲۲
حداقل ۷ روزه	۲/۱۱	۱/۲	۳/۹	-۰/۶۵	-۰/۰۴	۲/۵۳	۱/۸۲	۲/۲۳
حداقل ۳۰ روزه	۲/۲۹	۱/۳۲	۴/۳۷	-۰/۷۸	-۰/۱۰۱	۶/۵	۲/۱	۲/۹
حداقل ۹۰ روزه	۲/۲۹	۱/۶۸	۶/۴۵	۱/۱۸	-۰/۲۱	۷/۶۹	۲/۵۸	۳/۶۶
حداکثر ۱ روزه	۵۹	۱۷	۱۳۳	۳۷/۰۱	۵/۱۷	۱۸۷	۴۲/۶	۸۶/۳۸
حداکثر ۳ روزه	۴۸	۱۶/۳۳	۱۰۷/۳	۲۹/۹۸	۱/۹۷	۱۲۸/۳	۳۳/۷۳	۶۶/۹۳
حداکثر ۷ روزه	۴۲	۱۴/۸۶	۸۵/۸۶	۲۷/۹۴	۰/۹۸	۹۶/۸۶	۳۰/۸	۶۰/۱۴
حداکثر ۳۰ روزه	۲۱/۶۷	۱۲/۳۳	۶۵/۳۷	۲۲/۳۹	۰/۷۲	۷۳/۰۷	۲۵/۲۳	۴۳/۹۳
حداکثر ۹۰ روزه	۲۱/۴۵	۸/۰۴	۴۹/۶۸	۱۵/۵۲	-۰/۶۵	۵۸/۶۳	۱۸/۴۸	۳۰/۷۳
تعداد روزهای جریان صفر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
شاخص جریان پایه	-۰/۲۵	-۰/۱۱	۰/۳۲	-۰/۰۳	-۰/۳۷	۰/۲۲	۲۶۷	-۸۹ (H)
<b>گروه ۳- زمان وقوع جریان حدی</b>								
شماره روز وقوع حداقل جریان سالانه	۲۶۵	۹	۳۵۱	۲۳۷	۱	۲۶۰	۲۴۸	۲۶۷
شماره روز وقوع حداکثر جریان سالانه	۱۱۳	۷۸	۱۸۵	۸۱/۵	۳۸	۲۹۹	۱۰۷	۱۱۶/۲
<b>گروه ۴- تناوب و مدت تداوم پالس‌های کم و زیاد جریان</b>								
تداوم پالس جریان کم‌آبی	۴	۰	۹	۳	۱	۱۶	۲	۵
تعداد پالس جریان کم‌آبی	۹	۲	۶۳	۲۸/۲۵	۱	۲۱۳	۲/۶۱	۲۳/۳
تداوم پالس جریان پرآبی	۳	۱	۶	۲	۰	۱۵	۲/۶	۴
تعداد پالس جریان پرآبی	۸	۱	۱۱۱	۶/۵	۱	۱۸۸	۵	۱۵/۷
<b>گروه ۵- میزان و فراوانی تغییرات وضعیت جریان</b>								
میزان افت	-۰/۴	-۰/۲۷	-۰/۱	۱	-۰/۲۱۵	۱/۲	-۰/۳۳	-۰/۵
میزان افزایش	-۰/۴	-۱	-۰/۲	-۰/۲۱	-۱/۲۵	-۰/۰۵	-۰/۵	-۰/۳
تعداد برگشت‌های هیدرولوژیکی	۸۷	۵۹	۱۲۴	۱۰۷/۳	۳۷	۱۷۸	۸۰/۶	۹۶

H= High (> 67%), M=Middle (34-66%) , L=Low (< 33%)

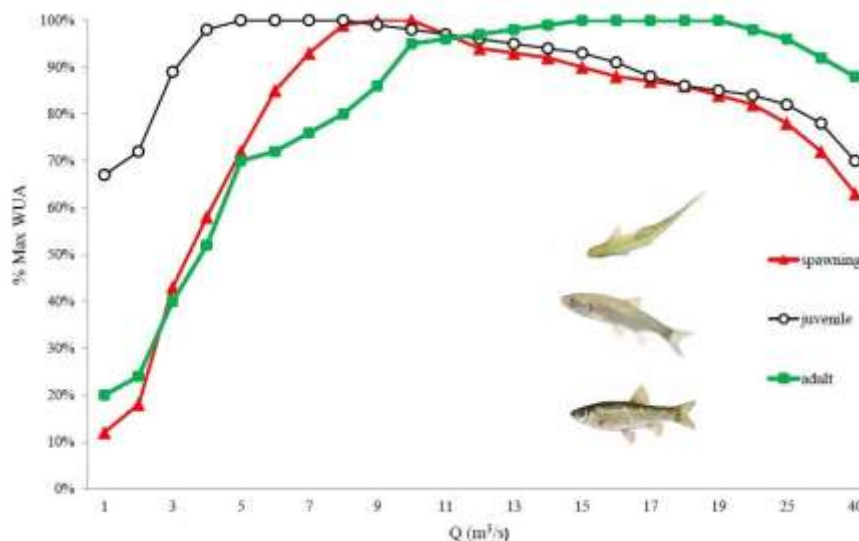
(۱۳۹۸)، فراوانی گونه‌های ماهی، وابسته به توزیع زیستگاه‌های مطلوب در طول رودخانه بوده و با افزایش مطلوبیت زیستگاه، تعداد ماهی نیز افزایش خواهد یافت (Hajiesmaeili et al., 2018). نتایج مطالعه فاضل‌نجم‌آبادی و افضل‌مهر (۲۰۱۹) با کاربرد مدل River2D نشان داد، دسترسی به زیستگاه تولید مواد غذایی، مساحت قابل استفاده وزنی و ارزیابی و پیش‌بینی بهتر زیستگاه ماهیان در رودخانه بابلرود، تحت تأثیر تغییرات هیدرولیکی توزیع عمق، سرعت جریان و اندازه ذرات بستر قرار می‌گیرد (Fazelnajafabadi and Afzalimehr, 2019).

همچنین نمایش ۳ بعدی نحوه پراکندگی جمعیت گونه هدف در زیستگاه رودخانه جاجرود، با تأثیر از متغیرهای اکوهیدرولیکی فیزیک زیستگاه (سرعت، عمق و بستر) در شکل ۷ ارائه شده است. در پژوهش حاضر، مطابق شکل ۷ می‌توان نتیجه گرفت که جریانانی به عنوان جریان زیست‌محیطی در رودخانه جاجرود برای گونه سفید ماهی رودخانه‌ای مناسب است که بتواند در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب اعماقی بین ۲۵ تا ۶۵ سانتی‌متر ایجاد کند و همچنین سرعت جریان در این زیستگاه‌ها، حدود ۰/۴۲ تا ۰/۸۳ متر بر ثانیه باشد.

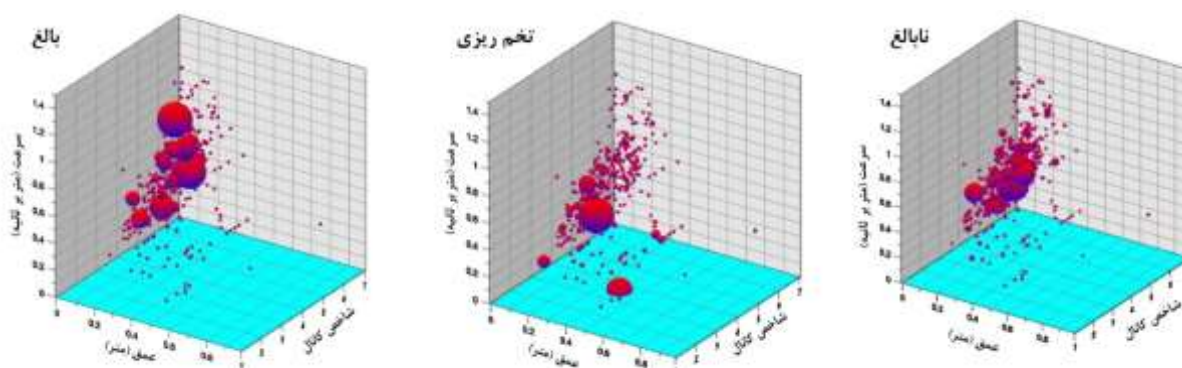
برای تعیین رژیم جریان اکولوژیکی، میزان مساحت قابل استفاده وزنی بر اساس درصد کاهش زیستگاه، دبی معادل مساحت قابل استفاده وزنی، قرائت گردید. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در خروجی نتایج مدل‌های زیستگاهی همواره بایستی تحلیل حساسیت صورت گیرد. تحلیل حساسیت این مدل‌ها به این نحو است که احتمال فقدان زیستگاه و میزان تأثیرپذیری رودخانه از جریان اکولوژیکی پیشنهادی بررسی می‌گردد. عدم تخصیص مناسب جریان زیست‌محیطی، موجب اختلال در فعالیت موجودات آبی، کاهش قدرت تولید غذای زیستگاه و دسترسی به مناطق مناسب جهت تخم‌ریزی و مهاجرت آبیان می‌گردد. با توجه به توضیحات ارائه شده درباره میزان زیستگاه در دسترس برای گونه هدف در رودخانه جاجرود، همچنین ملاحظات اکولوژیکی و میزان درصد کاهش زیستگاه تا مقداری که حداقل زیستگاه برای گونه شاخص حفظ شود، معادل ۵۰ درصد از زیستگاه‌های مطلوب در دسترس و به تبع آن ۷۰-۶۰ درصد میزان مطلوبیت زیستگاهی به عنوان سطح حفاظتی متوسط (برای زیستگاه‌هایی که گونه‌های با ارزش اکولوژیکی کمتری را داشته باشند) و ۱۰۰-۹۰ درصد میزان مطلوبیت زیستگاه در دسترس به عنوان حداقل حفاظت (برای زیستگاه‌هایی که گونه‌های با ارزش اکولوژیکی بالایی دارا باشند)، در تحلیل رژیم جریان زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود.

در نهایت میزان مطلوبیت رودخانه از لحاظ مقدار و موقعیت، مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس مدل اکوهیدرولیکی River2D، مساحت قابل استفاده وزنی برای دبی‌های مختلف جریان، در مراحل مختلف زندگی ماهی سفید رودخانه‌ای در شکل ۶ ارائه شده است. از منحنی دبی- فیزیک زیستگاه (شکل ۶) می‌توان نشان داد که در محدوده حداکثر میانگین جریان ماهانه که برابر ۱۹-۱۷ مترمکعب بر ثانیه و حدود ۲۷۸-۱۴۹ درصد میانگین جریان سالانه است، حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی (WUA) و میزان زیستگاه در دسترس برای دوره بالغ (adult) برابر با ۱۰۰ درصد است و بیشترین مساحت قابل استفاده وزنی برای دوره تخم‌ریزی (spawning) در ۱۳۱ درصد میانگین جریان سالانه قرار دارد. همچنین بیشترین میزان زیستگاه در دسترس برای دوره نابالغ (juvenile) در محدوده جریان ۱۱۷-۷۳ درصد میانگین جریان سالانه می‌باشد. تفاوت بین حداقل و حداکثر مقادیر مساحت قابل استفاده وزنی با توجه به دبی جریان در ماه‌های مختلف سال و مراحل زندگی ماهی سفید رودخانه‌ای نشان می‌دهد که نیاز به تجزیه و تحلیل‌های دقیق مبتنی بر مطلوبیت زیستگاه در تمامی مراحل زندگی این گونه داریم. با یک ارزیابی کلی از وضعیت زیستگاهی ماهی سفید رودخانه‌ای در رودخانه جاجرود می‌توان شرایط زیستگاهی را تحلیل کرد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افزایش جریان به میزان بیش از حداکثر میانگین دبی ماهانه رودخانه، باعث کاهش میزان زیستگاه خواهد شد. در منحنی دبی- فیزیک زیستگاه (شکل ۶)، حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی برای هر یک از دوره‌های زندگی تخم‌ریزی، نابالغ و بالغ به ترتیب در محدوده دبی‌های ۹-۱۰، ۸-۵ و ۱۷-۱۹ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.

مطابق با شکل ۶ با تغییر رژیم طبیعی جریان رودخانه و افزایش دبی به میزان بیشتر از حداکثر میانگین دبی جریان رودخانه که برابر با ۱۹/۹۴ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد، و در شرایط سیلابی میزان مساحت قابل استفاده برای دوره‌های مختلف گونه هدف کاهش می‌یابد، زیرا سیلاب‌ها، وضعیت 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. کاهش جریان به میزان کم‌تر از حداقل میانگین دبی جریان رودخانه که برابر با ۱/۶۲ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد نیز بیانگر پایین بودن میزان مساحت قابل استفاده برای دو دوره تخم‌ریزی و بالغ گونه هدف است، ولی برای دوره نابالغ با کاهش میزان دبی جریان، شرایط مناسب‌تری از نظر میزان مطلوبیت حاکم بوده و میزان مساحت قابل استفاده وزنی نسبت به دو دوره دیگر، بیشتر است. همچنین مطابق با تحقیقات حاجی‌اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۸)، خضری و همکاران (۱۳۹۸) و حاجی‌اسماعیلی



شکل ۶- منحنی دبی-فیزیک زیستگاه (WUA-Q) در دوره‌های مختلف زندگی ماهی سفید رودخانه‌ای زیستگاه جاجرود



شکل ۷- نحوه پراکنش گونه ماهی هدف در زیستگاه رودخانه جاجرود در برابر شاخص‌های اکوهیدرولیکی سرعت، عمق و بستر

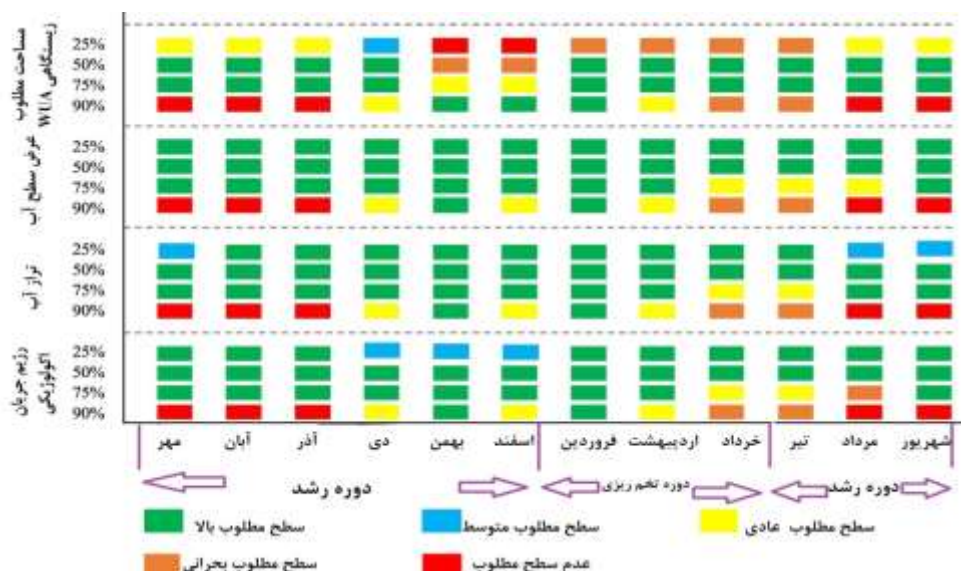
حفاظتی متوسط) برقرار باشد. در این جدول مشاهده می‌شود که مدل اکوهیدرولیکی River2D قادر به شبیه‌سازی نوسانات طبیعی جریان رودخانه جاجرود می‌باشد، در حالی که رژیم اکولوژیکی به دست آمده از این روش تقریباً برای همه ماه‌ها کمتر از میانگین جریان ماهانه می‌باشد. با توجه به جدول ۵، این نتیجه‌گیری به عمل می‌آید که مدل River2D قادر به ارائه رژیم اکولوژیکی رودخانه از دو نقطه نظر علمی و عملی می‌باشد.

با توجه به جدول ۵، تحلیل اساسی بر نیاز زیست‌محیطی در رودخانه جاجرود می‌توان ارائه داد. در رودخانه جاجرود با توجه به اختلاف میان مساحت مطلوب زیستگاهی در دوره‌های کم‌آبی (مهر) تا پرآبی (اردیبهشت)، می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که برداشت کمتری از آب رودخانه جاجرود امکان‌پذیر است و در کم‌آبی‌ها، شرایط بحرانی در میزان مساحت مطلوب زیستگاهی وجود دارد. شکل ۸، سطوح مناسب رژیم جریان اکولوژیکی و مقادیر مهم با رژیم‌های

برای به دست آوردن حداکثر دبی قابل برداشت از رودخانه برای حفظ اکوسیستم در همان حالت اولیه و به نحوی که آسیبی متوجه آن نشود، بر طبق پیشنهاد نیک‌قلب و همکاران (۲۰۱۶)، استامو و همکاران (۲۰۱۸) و نادری و همکاران (۱۳۹۹) کاهش جریان تا حدی که ۱۵-۲۰ درصد از فضای در اختیار موجودات زنده از دست برود، معادل حد نهایی قابل تحمل برای اکوسیستم می‌باشد (Nikghalb et al., 2018; al., 2016). نتایج تحلیل رژیم اکولوژیکی ماهانه پیشنهادی مدل River2D در مقابل میانگین جریان ماهانه در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق با جدول ۵، حداکثر و حداقل جریان مطلوب زیست‌محیطی برآورد شده در ماه‌های اردیبهشت و مهر به ترتیب معادل ۱۸/۵۵ و ۱/۲۴ مترمکعب بر ثانیه، با میانگین جریان سالانه ۵/۹۱ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۸۶/۷ درصد جریان طبیعی رودخانه) است که بایستی در داخل رودخانه جاجرود برای تأمین پتانسیل اکولوژیکی و حفاظت اکولوژیکی گونه هدف (معادل سطح

آب و عرض سطح آب هر ماه از سال، بیشتر می‌شود. بر اساس شکل ۸، در دبی جریان ۹۰ درصد هر ماه، رژیم جریان اکولوژیکی، تراز آب و عرض سطح آب در طی فصل رشد از سطح بالاتری نسبت به دوره تخم‌ریزی در ۳ بخش دیگر (۷۵ درصد، ۵۰ درصد و ۲۵ درصد)، برخوردار است.

مختلف ماهانه جریان رودخانه جاجرود را نشان می‌دهد. فراوانی جریان ۹۰ درصد، ۷۵ درصد، ۵۰ درصد و ۲۵ درصد به ترتیب به عنوان سطح یک فصل خشک، فصل نیمه‌خشک، فصل طبیعی و فصل مرطوب، انتخاب شدند. هرچه مقدار دبی جریان در ۳ بخش پایین‌تر باشد، سطح رژیم جریان اکولوژیکی مناسب و همچنین تراز



شکل ۸- نمایش سطح مطلوب و مناسب رژیم جریان اکولوژیکی و مقادیر مهم آن در بخش‌های مختلف در دوره‌های ماهانه رژیم جریان رودخانه جاجرود

جدول ۵- توزیع ماهانه جریان زیست‌محیطی با روش‌های مختلف در رودخانه جاجرود (متر مکعب بر ثانیه)

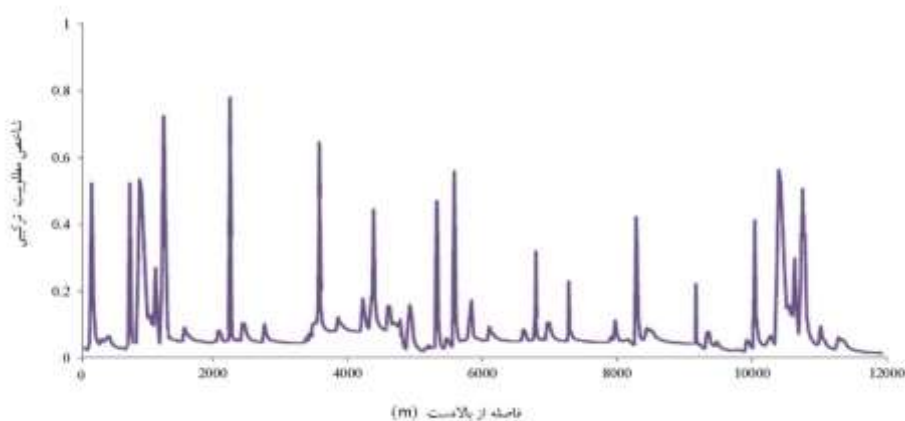
ماه	میانگین جریان	جریان پایه آبیان		محدوده تغییرپذیری		تانات		مدل River2D		آرکانزاس	
		درصد تخصیص	درصد تخصیص	درصد تخصیص	درصد تخصیص	درصد تخصیص	درصد تخصیص	درصد تخصیص	درصد تخصیص	درصد تخصیص	درصد تخصیص
مهر	۱/۶۲	۱۰۰	۲/۶۵	۱۶۳/۵	۰/۸۸	۵۴/۳۲	۱/۲۴	۷۶/۷۲	۰/۸۱	۵۰	
آبان	۲/۶۳	۶۱/۵۹	۲/۷۲	۱۰۳/۴	۰/۸۸	۳۳/۴۶	۱/۹	۷۲/۳۸	۱/۵۷	۶۰	
آذر	۳/۱۸	۵۰/۹۴	۳/۴	۱۰۶/۹	۰/۸۸	۲۷/۶۷	۲/۳۹	۷۵/۴۷	۱/۹	۶۰	
دی	۲/۶۵	۶۱/۱۳	۳/۰۶	۱۱۵/۴	۰/۸۸	۳۳/۲	۲/۱۵	۸۱/۱۶	۱/۵۹	۶۰	
بهمن	۳/۵	۴۶/۲۸	۳/۶	۱۰۲/۸۵	۰/۸۸	۲۵/۱۴	۲/۹۷	۸۴/۸۶	۲/۱	۶۰	
اسفند	۹/۴۵	۱۷/۱۴	۸/۹۲	۹۴/۳۹	۰/۸۸	۹/۳۱	۸/۹۲	۹۴/۴۲	۵/۶۷	۶۰	
فروردین	۱۱/۰۱	۱۴/۷۱	۶/۳	۵۷/۲۲	۲/۶۵	۲۴/۰۶	۹/۴۴	۸۵/۸۳	۷/۷	۷۰	
اردیبهشت	۱۹/۹۴	۸/۱۲	۱۸/۲	۹۱/۳۷	۲/۶۵	۱۳/۲۸	۱۸/۵۵	۹۳/۰۶	۱۳/۹۵	۷۰	
خرداد	۱۳/۵۱	۱۱/۹۸	۱۶/۲۴	۱۲۰/۲	۲/۶۵	۱۹/۶۱	۱۱/۵۶	۸۵/۶۴	۹/۴۵	۷۰	
تیر	۷/۴۷	۲۱/۶۸	۸/۵۶	۱۱۴/۵	۲/۶۵	۳۵/۴۷	۶/۴۷	۸۶/۶۲	۵/۲۲	۷۰	
مرداد	۴/۳۲	۳۷/۵	۴/۷	۱۰۹/۳	۲/۶۵	۶۱/۳۴	۳/۳۴	۷۷/۴۱	۲/۱۶	۵۰	
شهریور	۲/۷۶	۵۸/۶۹	۲/۵	۹۰/۵	۲/۶۵	۹۶/۰۱	۲/۰۲	۷۳/۳۱	۱/۳۸	۵۰	
میانگین	۶/۸۲	۳۳/۷۵	۶/۷۳	۹۸/۶۸	۱/۷۶	۲۵/۸۷	۵/۹۱	۸۶/۷	۴/۱۴	۶۰/۸۳	

آمده از طریق روش تنانت (۱۰ درصد میانگین جریان سالانه) خیلی پایین‌تر از میانگین جریان در تمام ماه‌های یک سال آبی می‌باشد. بر اساس آنچه که توسط محققین دیگر گزارش شده است (Yasi and Nikghalb et al., 2016; Ashori, 2017؛ نادری و همکاران،

مطابق جدول ۵، شبیه‌سازی فیزیکی زیستگاه برای حداقل جریان‌ات نشان داد که حداقل جریان برآوردی توسط روش‌های هیدرولوژیکی، ممکن است در تأمین حداقل نیاز برای زیستگاه آبی کافی نباشد. در جدول ۵، نتایج حداقل جریان زیست‌محیطی به‌دست



به شکل ۹ مشاهده می‌شود، میزان مطلوبیت زیستگاهی در طول رودخانه شرایط کاملاً متفاوتی دارد. توزیع مطلوبیت زیستگاهی در دبی‌های مختلف نشان داد که به طور کلی محدوده بالادست رودخانه به لحاظ مطلوبیت پارامترهای فیزیکی زیستگاه در دبی‌های مختلف دارای مطلوب ترین شرایط بوده و در محدوده پایین دست رودخانه شرایط ضعیف تری مشاهده می‌شود. دلیل آن نیز کاهش شیب رودخانه و در نتیجه کاهش سرعت جریان رودخانه و کاهش عمق جریان به سمت پایین دست رودخانه می‌باشد. همان طور که در شکل مربوط به بررسی توزیع مطلوبیت در طول رودخانه دیده می‌شود (شکل ۹)، نوسانات مشاهده شده در پراکنش ماهی سفید رودخانه‌ای 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 ماهی سفید رودخانه‌ای در ایستگاه‌های مختلف رودخانه جاجرود نیز صحت این مطلب را تأیید می‌کند (جدول ۲).



شکل ۹- توزیع مطلوبیت زیستگاهی ترکیبی گونه ماهی هدف در طول رودخانه جاجرود (پایین دست سد لتیان)

تخم‌ریزی ماهیان با بهینه‌سازی رهاسازی آب از مخزن سد، نشان دادند که برای متعادل‌سازی حداکثر نیازهای تولید انرژی و فرآیندهای اکولوژیکی زیستگاه ماهیان در سال‌های نرمال و مرطوب، باید بخشی از سود اقتصادی را در حدامکان کاهش داد تا جریان مورد نیاز تخم‌ریزی ماهیان تأمین شود (Li et al., 2020).

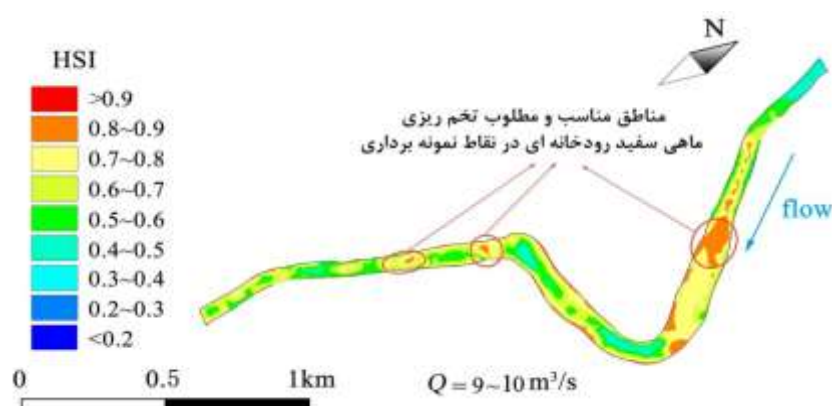
نکته مهم دیگر آن است که رژیم مطلوب جریان اکولوژیکی، هنگامی اثربخش خواهد بود که در زمان مناسبی در رودخانه رهاسازی شود. در شرایط سیلابی، تغییر مورفولوژیکی رودخانه، نقش بسزایی در فرآیندهای جدید زیستی، شرایط مطلوب جهت ایجاد زیستگاه‌های جدید، تغییرات قابل توجه در فراوانی و تنوع کفزیان و اکولوژی رودخانه ایفا می‌کند (Fazelnajafabadi and Zhang et al., 2018; Afzalimehr, 2019).

۱۳۹۷؛ اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ نادری و همکاران، ۱۳۹۹) اگر در رودخانه‌ای چنین رژیم اکولوژیکی تجویز شود، زیستگاه رودخانه با فاجعه مواجه خواهد شد. این در حالی است که در فصل بهار و تابستان با افزایش رقابت برای استفاده از آب برای مصارف مختلف کشاورزی، شرب و صنعت روبرو هستیم و در این فصول نیز در بخش‌های پایین دست سد لتیان در رودخانه جاجرود که دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است، فصل تخم‌ریزی و تولیدمثل برای گونه‌های مختلف ماهی است (Mouludi Saleh; Hoghoghi et al., 2016; et al., 2017; احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۷) و نیاز به تأمین شرایط اکولوژیکی خوب و مناسب برای حفاظت زیستگاه رودخانه و نزدیک به شرایط طبیعی می‌باشد.

در شکل ۹، توزیع مطلوبیت زیستگاهی در طول رودخانه جاجرود برای ماهی سفید رودخانه‌ای در دبی متوسط سالانه (۶/۸۲ مترمکعب بر ثانیه) نشان داده شده است. محور عمودی در این شکل، شاخص مطلوبیت ترکیبی است که در رابطه ۲ نشان داده شده است. با توجه

منطقه تخم‌ریزی مناسب و مطلوب ماهی سفید رودخانه‌ای در یک بازه مورد بررسی رودخانه جاجرود با روش شبیه‌سازی زیستگاه در شکل ۱۰، نشان داده شده است. با توجه به داده‌های مورد بررسی و نقاط نمونه‌برداری، مناطق مطلوب تخم‌ریزی ماهی سفید رودخانه‌ای، عمدتاً در ۳ ناحیه، متمرکز شده است که نزدیک به بهترین منطقه مناسب با توجه به نتایج شبیه‌سازی زیستگاه و شاخص‌های مطلوبیت عمق، سرعت جریان و مساحت قابل استفاده وزنی است.

پژوهشگران مختلفی در مطالعات خود بیان کرده‌اند که روش‌های شبیه‌سازی زیستگاه در تعیین جریان زیست‌محیطی، اجزای ریز اکوسیستم (ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی) علاوه بر آبریزان رودخانه را در نظر می‌گیرند (Phelan et al., Li et al., 2015; 2017; Hajiesmaeili et al., 2018). لی و همکاران (۲۰۲۰) نیز در مطالعه تعیین مؤثرترین فرآیند افزایش جریان برای بهبود شرایط



شکل ۱۰- توزیع مناطق مطلوب تخم‌ریزی ماهی سفید رودخانه‌ای در رودخانه جاجرود

مولودی‌صالح و کیوانی (۱۳۹۷) در مطالعه‌شان گزارش کردند که ماهی سفید رودخانه‌ای، یک ماهی مهاجر بالارو بوده و در زیستگاه‌هایی که دارای سرعت جریان حدود  $0.4$  متر برثانیه و با عمق  $0.1$  تا  $0.8$  متر می باشد، تخم‌ریزی می‌نمایند (در بین گیاهان یا در آب‌های آهسته و ساکن). با توجه به نتایج این بخش مشاهده می‌شود که میزان فضای مطلوب زیستگاهی در طول رودخانه به شدت تحت تأثیر میزان دبی جریان و دوران زندگی ماهی بوده، لذا ضروری است که این توزیع زیستگاهی در مدیریت اکوسیستم رودخانه مورد توجه قرار گیرد. این یافته‌ها با افزایش زیستگاه مطلوب ماهیان نشان داده شده در جدول ۶ مورد تأیید قرار می‌گیرد و بر این اساس حداکثر کاهش مطلوبیت زیستگاه مربوط به زمانی است که رژیم رودخانه، زیر آستانه جریان‌های اکولوژیکی است. با این حال، با توجه به منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه و مساحت قابل استفاده وزنی، حداکثر زیستگاه بهینه و مطلوب در دوره‌های بالغ و نابالغ گونه ماهی سفید، در صورت دبی بیش از حد کاهش می‌یابد و می‌توان بیان داشت مطابق جدول ۵ و شکل ۸، توزیع تقاضای آب اکولوژیکی مناسب، در طول سال برابر نیست. احمدزاده و همکاران (۱۳۹۷) اولویت‌های انتخابی زیستگاه سیاه‌ماهی مرکزی ( *Capoeta buhsei*, Kessler, 1877) در رودخانه جاجرود را، مناطقی با سرعت بالای آب، با عمق و عرض زیاد، دمای پایین و بستر با قطر سنگ بستر بزرگ عنوان کردند که نتایج مطالعه حاضر نیز حاکی از همسو بودن با آن مطالعه را دارد. همچنین حقوقی و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه ارزیابی شاخص مطلوبیت زیستگاه خیاطه‌ماهی نمکی، رودخانه جاجرود گزارش کردند که این ماهی، بخش‌های بالادست رودخانه با شیب بیشتر، عمق بیشتر، عرض کمتر، سرعت جریان کمتر، بسترهایی با تخته سنگ و پوشش جنگلی ترجیح می‌دهد (Hoghoghi et al., 2016).

بر این اساس با فراهم کردن شرایط مناسب برای بازسازی موجودات کفزی از جنبه‌های تغذیه‌ای در چرخه زندگی لارو ماهیان و استقرار شرایط زیستی نسبتاً پایدار، ایجاد می‌کند. بر اساس آنچه که گفته شد، هدف اصلی جریان‌های اکولوژیکی، آماده‌سازی بستر رودخانه برای تخم‌ریزی ماهی‌ها و ایجاد پناهگاه مناسب برای بی‌مهرگان است. در نهایت با توجه به این امر که رژیم هیدرولوژیکی، نیروی محرکه فرآیند و تحولات اکولوژیکی به حساب می‌آید (ElJabi, Zou and Liang, 2015; and Caissie, 2019)، زیست‌محیطی پیشنهادی باید در محدوده رژیم طبیعی رودخانه تعریف گردد. نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد اگرچه ۱۰ درصد پیشنهادی روش تنانت، می‌توان موقتاً اکوسیستم آبی را حفظ کند، اما جریان‌های کم برای سلامت بلندمدت اکوسیستم کافی نیستند (Nikghalb et al., 2016; Yasi and Ashori, 2017; اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۷؛ نادری و همکاران، ۱۳۹۹). دشتی و همکاران (۱۳۹۶)، حداقل نیاز زیست‌محیطی پایین دست سد علویان در رودخانه صوفی‌چای را با استفاده از روش هیدرولوژیکی تنانت برای دوره‌های کم‌آبی (مرداد تا دی) برابر  $0.894$  متر مکعب برثانیه و برای دوره‌های پربابی (بهمن تا تیر) برابر  $2.548$  متر مکعب برثانیه، در نظر گرفتند. پنگ و سان (۲۰۱۶)، نیک‌قلب و همکاران (۲۰۱۶) و نادری و همکاران (۱۳۹۸) نیز در پژوهش‌های صورت گرفته، نتیجه‌گیری کرده‌اند که جهت جلوگیری از تنش‌های جبران ناپذیر برای اکوسیستم رودخانه‌ها، به خصوص در ماه‌های بحرانی مانند تخم‌ریزی گونه مدنظر، توزیع مکانی زیستگاهی در طول رودخانه استخراج و سپس با توجه به نمودار سری زمانی مطلوبیت هر بازه، میزان جریان زیست‌محیطی تخمین زده شود (Nikghalb et al., 2016; Peng and Sun, 2016).

جدول ۶- تجزیه و تحلیل مطلوبیت زیستگاه گونه هدف، تحت تأثیر رژیم‌های چندگانه جریان به عنوان درصدی از حداکثر مساحت (منطقه) مرطوب

دبی (متر مکعب بر ثانیه)	مساحت مرطوب (متر مربع)	ماهی سفید رودخانه‌ای (نابالغ)	ماهی سفید رودخانه‌ای (بالغ)
<b>زیستگاه موجود (درصد مساحت خیس شده)</b>			
۱	۵۵/۶۱	۱۶/۶	۸/۷
۳	۱۴۸/۳۴	۳۶/۵	۳۲/۶
۷	۲۲۸/۵۲	۶۵/۹	۵۱/۶
۱۱	۴۵۵/۱۹	۸۴/۳	۸۷/۹
۱۵	۶۵۸/۸۶	۷۲/۶	۷۴/۲
۲۰	۱۲۵۷/۶۹	۶۳/۶	۶۶/۴
<b>زیستگاه مطلوب (درصد مساحت خیس شده)</b>			
۱	۵۵/۶۱	۲۹/۳	۲۴/۶
۳	۱۴۸/۳۴	۳۲/۸	۳۴/۳
۷	۲۲۸/۵۲	۵۴/۲	۴۵/۱
۱۱	۴۵۵/۱۹	۸۴/۳	۶۲/۲
۱۵	۶۵۸/۸۶	۷۶/۲	۴۵/۲
۲۰	۱۲۵۷/۶۹	۵۳/۱	۳۲/۲
<b>زیستگاه بهینه و ایده‌آل (درصد مساحت خیس شده)</b>			
۱	۵۵/۶۱	۱۷/۱	۲۱/۲
۳	۱۴۸/۳۴	۳۸/۶	۳۵/۳
۷	۲۲۸/۵۲	۴۵/۳	۷۰/۲
۱۱	۴۵۵/۱۹	۷۳/۸	۶۶/۸
۱۵	۶۵۸/۸۶	۶۳/۲	۴۹/۲
۲۰	۱۲۵۷/۶۹	۳۲/۶	۲۸/۴

جریان و افزایش عمق به سمت پایین دست رودخانه دلیچای، محدوده بالادست به لحاظ وضعیت زیستگاهی دارای ضعیف‌ترین شرایط و با حرکت به سمت پایین دست به لحاظ مطلوبیت پارامترهای فیزیکی زیستگاه، شرایط مساعدتری دارد (Hajiesmaeili et al., 2018). پیشکاه‌پور و همکاران (۱۳۹۷) با محاسبه میزان مطلوبیت زیستگاه در دسترس در بازه‌های مختلف رودخانه دینورآب استان کرمانشاه گزارش کردند که میزان ناحیه مطلوب در بازه‌های این رودخانه، ۴۰۶/۸۰۱ مترمربع برای زیست گونه شاه‌کولی سلال بوده و از این نظر اکوسیستم تقریباً پایداری را برای زندگی این ماهی فراهم کرده است. یکی از محدودیت‌های روش‌های هیدرولوژیکی این است که در این روش‌ها به طور مستقیم بر ارزش‌های اکولوژیکی موجود تمرکز نمی‌شود. این رویکرد همچنین در تعاملات تخصیص آب، از قابلیت دفاع کمی برخوردار است. از سوی دیگر مدل River2D در بسیاری از مطالعات پیشین در ارتباط با برآورد جریان اکولوژیکی، نتایج رضایت‌بخش و قابل قبولی ارائه داده است (Nikghalb et al., 2016؛ Macura et al., 2018؛ نادری و همکاران، ۱۳۹۸؛ Mezger et al., 2019؛ Phelan et al., 2017). در نظر گرفتن شرایط اکولوژیکی گونه‌های ماهی و نیز بررسی تأثیر توامان عوامل زیستی،

در ارزیابی زیستی رودخانه حفاظت شده جاجرود با استفاده از شاخص‌های زیستی (ساختار جمعیت کفزیان، ماکروبتوزها و جوامع بنتیک)، پروندی و همکاران (۱۳۹۵) کاهش فراوانی و تنوع گونه‌ای ماکروبتوزها و پلانکتون‌ها را در ایستگاه‌های پایین دست این رودخانه گزارش کردند و دریافتند که سد لتیان، به عنوان یک عامل فیزیکی، اکوسیستم رودخانه جاجرود را در بازه‌های پایین دست، به کلی تغییر داده است. بنابراین، بدیهی است با توجه به نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، کاهش عمق آب از قسمت‌های بالادست رودخانه به قسمت‌های پایین دست یکی از عوامل مهم کاهش تنوع گونه‌ای ماهیان و تراکم آنها است. فاضل‌نجم‌آبادی و افضل‌مهر (۲۰۱۹) در پژوهش خود در شبیه‌سازی میزان زیستگاه در دسترس ماهیان با کاربرد مدل اکوهیدرولیکی River2D، گزارش کردند که زیستگاه مناسب جهت تخم‌ریزی و زندگی جانداران آبی و به خصوص ماهی‌ها در رودخانه بابلرود، از بخش‌های بالادست به سمت پایین دست کاهش یافته است (Fazelnajafabadi and Afzalimehr, 2019). بر اساس نتایج پژوهش حاجی اسماعیلی و همکاران (۲۰۱۸) در ارزیابی توزیع مطلوبیت زیستگاهی در دبی‌های مختلف، به دلیل کاهش شیب رودخانه و در نتیجه کاهش سرعت

زیست‌محیطی رودخانه در نظر می‌گیرد. روش‌های دیگر تأمین جریان‌های زیست‌محیطی مقادیر بالاتر از ۲۵ درصد میانگین جریان سالانه را فراهم می‌کند، که محافظت بهتر جریان را برای زیستگاه رودخانه جاجرود فراهم می‌کنند. هنگام مقایسه میزان تخصیص آب برای تأمین جریان زیست‌محیطی، کمبود جریان در بخش‌های دیگر در طول تابستان و زمستان (جریان رودخانه کمتر از جریان زیست‌محیطی است) مشاهده می‌شود. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد، رژیم جریان مطلوب اکوهیدرولیکی اختصاص یافته با استفاده از روش شبیه‌سازی زیستگاه (مدل River2D)، قادر به حفاظت از رژیم جریان طبیعی برای نگهداری از ارزش‌های اکولوژیکی رودخانه جاجرود و استقرار شرایط مطلوب برای زیستن گونه‌های آبی می‌باشد. 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 جریان‌های سیلابی در تأمین نیازهای بیولوژیکی استفاده کند. بدیهی است، مدل شبیه‌سازی زیستگاه River2D، تجزیه و تحلیل‌های پیچیده‌تری را نسبت به رویکردهای متداول هیدرولوژیکی مبتنی بر تخمین حداقل جریان، که معمولاً در برنامه‌ریزی‌های اولیه منابع آب به کار می‌رود، فراهم می‌کند. بر مبنای نتایج بدست آمده در پژوهش حاضر، در صورت کمبود جریان در رودخانه (برخی ماه‌ها) نسبت به دبی زیست‌محیطی محاسبه شده توسط برخی روش‌ها (مانند روش محدوده تغییرپذیری)، جریان زیست‌محیطی محدود به دبی جاری در رودخانه شده و برداشت از رودخانه ممنوع خواهد بود. در مطالعه حاضر این نتیجه‌گیری دریافت می‌شود هنگامی که دبی جریان رودخانه بالاتر از یک آستانه مشخص باشد، سطح آب مقطع رودخانه جاجرود در کانال اصلی جاری می‌شود و شرایط هیدرودینامیکی مناسب (مانند عمق آب و سرعت جریان) برای زیستگاه گونه ماهی هدف در ساحل رودخانه، فراهم می‌شود. لذا با افزایش فراوانی جریان، حداقل میزان نیاز رژیم جریان اکولوژیکی در سال‌های خشک تأمین می‌شود و می‌توان تقاضای مناسب آب اکولوژیکی را در سال‌های مرطوب، تأمین کرد. این امر اکوسیستم پایین‌دست رودخانه را از تخریب محافظت می‌کند و زیستگاه بهتری را برای گونه‌های آبی فراهم می‌کند. یادآور می‌شود که هر چه روش تعیین جریان زیست‌محیطی گسترده‌تر و پیچیده‌تر باشد، بر قابلیت دفاع‌پذیری آن افزوده می‌شود. در ضمن مدل‌سازی زیستگاه فیزیکی، هیدرولیکی و هیدرومورفولوژیکی رودخانه، با توسعه مطالعات بیولوژیکی، اکوهیدرولیکی با کاربرد مدل مزوزیستگاهی MesoHABSIM، برای محاسبه تقاضای آب اکولوژیکی جهت حفظ شرایط مطلوب زندگی ماهیان درون رودخانه، به عنوان مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.

غیرزیستی، هیدرولیکی و ویژگی‌های مورفومتری آبی با کاربرد تئوری بیوانرژی، یک ضرورت اساسی در مدل‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای به منظور حفظ تنوع زیستی آبریان و کیفیت و مطلوبیت زیستگاه‌های آبی و در نهایت مدیریت صحیح اکوسیستم رودخانه می‌باشد (حاجی‌اسماعیلی، ۱۳۹۸).

نتایج مطالعه حاضر و سایر تحقیقات بر این نکته تأکید دارد که عدم درک صحیح از شرایط دینامیکی و فرآیندهای اکولوژیکی، منجر به برآوردهای غلط زیستگاهی خواهد شد. آنچه که مسلم است پیوستگی هیدرولوژیکی و اکولوژیکی سیستم رودخانه، نقش مهمی برای گونه‌هایی که شرایط زیستگاهی متفاوت را در چرخه رشد خود به سرعت آب، دمای آب، اندازه بستر و موادغذایی دارند، ایفا می‌نماید که سبب تغییر و جابه‌جایی آنها در زیستگاه‌ها می‌شود. از طرفی حرکت و جابه‌جایی بین زیستگاه‌های مکمل از رودخانه، به‌خصوص برای تخم‌ریزی، تداوم نسل و پایداری جمعیت ماهیان، تا حد زیادی به در دسترس بودن زیستگاه‌ها و پیوستگی هیدرولوژیکی، ارتباط دارد (Yao et al., 2017; Li et al., 2015). بر این اساس در طول زمان در سیستم‌های رودخانه‌ای، پویایی‌های ژئومورفولوژیکی و جریان‌های هیدرولوژیکی (رژیم‌های سیلابی)، عامل اصلی در ماندگاری تنوع زیستی در مقیاس اکولوژیکی و آشنفتگی در ایجاد ناهمگنی زیستگاهی، تعادل فرآیندهای مختلف هیدرولیکی - زیستی بوده و لذا ضمن حفظ ساختار مورفولوژیکی بستر، می‌توان ادامه حیات اکولوژیکی (مساعد نمودن مراحل مختلف زندگی موجودات زنده رودخانه) و سلامت رودخانه را تضمین کرد.

## نتیجه‌گیری

تعیین جریان زیست‌محیطی، مستلزم شناسایی و درک کمی و کیفی اجزای اکوسیستم رودخانه و روابط متقابل آنها است. در دهه‌های اخیر، جمعیت ماهیان رودخانه جاجرود به دلیل تنظیمات رودخانه‌ای و تأثیر آن بر فرآیندهای اکولوژیکی کاهش یافته است. در صورت عدم توجه به توسعه پایدار و میزان نیاز آبی محیط زیست رودخانه، خطرانی همچون جایگزین شدن بخش عمده اکوسیستم رودخانه جاجرود به گروه‌های مقاوم به آلودگی را در پی خواهد داشت. دلیل اینکه در این پژوهش برای تعیین جریان زیست‌محیطی، روش‌های هیدرولوژیکی با روش شبیه‌سازی زیستگاه مقایسه شدند این است که در روش‌های هیدرولوژیکی گونه آبی نقشی نداشته و تنها جریان‌های تاریخی معیار مقایسه می‌باشند، ولی در روش شبیه‌سازی زیستگاه اولویت با موجود زنده یا گونه شاخص است، بنابراین در صورت مقایسه، نتایج بدست آمده از روش شبیه‌سازی زیستگاه اعتبار بیشتری خواهد داشت. نتایج پژوهش حاضر نشان داد که روش تنانت باید در تابستان با احتیاط مورد استفاده قرار گیرد زیرا این روش محدوده ۹ تا ۹۶ درصد میانگین دبی سالانه را به عنوان دبی

## تقدیر و قدردانی

نویسندگان مقاله از راهنمایی‌ها و همفکری‌های ارزنده خانم دکتر Koljonen Saija در انستیتو ارزیابی زیست‌محیطی و بازگردانی زیستگاه کشور فنلاند، آقای دکتر Haitham Ghamry پژوهشگر شیلات و اقیانوس‌شناسی دانشگاه اوتاوا کانادا، جناب آقای دکتر Mark Gard بیولوژیست اداره شیلات و حیات وحش آمریکا، دکتر Rafael Munoz-Mas در انستیتو اکولوژی آبزیان دانشگاه گیرونا اسپانیا، آقای دکتر آزاد حیدری دانش‌آموخته دکترای عمران-منابع آب دانشگاه میشیگان آمریکا، مساعدت و همکاری شرکت مدیریت منابع آب ایران و دفتر محیط زیست طبیعی و تنوع زیستی اداره کل حفاظت محیط زیست استان تهران و نیز همکاری آزمایشگاه تکوین و بیوسستماتیک آبزیان گروه شیلات دانشگاه تهران و همراهی تیم عملیات میدانی (خانم مهندس زهرا پیشکاه‌پور و خانم مهندس سیده ریحان محمدی)، کمال امتنان و قدردانی را دارند.

## منابع

احمدزاده، م.، پورباقر، ه.، و ایگدری، س. ۱۳۹۷. تعیین شاخص مطلوبیت زیستگاه سیاه‌ماهی مرکزی ( *Capoeta buhsei*, Kessler, 1877) با استفاده از هموارسازی هسته‌ای در رودخانه جاجرو، حوضه دریاچه نمک ایران. مجله علوم آبی‌زی پروری. ۶ (۹): ۹۸-۱۰۸.

اسفندیاری درآباد، مصطفی‌زاده، ر.، شاهمرادی، ر.، و نصیری خیاوی، ع. ۱۳۹۸. تحلیل تغییرات شاخص‌های هیدرولوژیک جریان تحت تأثیر احداث سد در رودخانه‌های زرينه‌رود و ساروق‌چای (استان آذربایجان غربی). مجله هیدروژئومورفولوژی. ۵ (۱۸): ۵۷-۷۷.

اسماعیلی، ک.، صادقی، ز.، کابلی، ع. و شفائی، ح. ۱۳۹۷. کاربرد روش‌های هیدرولوژیکی در برآورد حبابه محیط زیستی رودخانه (مطالعه موری رودخانه گرگانرود). مجله محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران. ۷۱ (۴): ۴۳۷-۴۵۱.

ایوب‌زاده، س.، ع.، صدیق‌کیا، م.، و حاجی‌اسماعیلی، م. ۱۳۹۷. مقدمه‌ای بر اکوهیدرولیک و شبیه‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس: پژوهشکده مهندسی آب. ۲۸۸ ص.

پروندی، ش.، عبدلی، ا.، و هاشمی، س. ح. ۱۳۹۵. ارزیابی زیستی رودخانه جاجرو با استفاده از ساختار جمعیت ماکروبتوزها. مجله بوم‌شناسی آبزیان. ۶ (۱): ۲۰-۳۲.

پیشکاه‌پور، ز.، پورباقر، ه.، و ایگدری، س. ۱۳۹۷. ارزیابی تأثیر شرایط اکولوژیکی و متغیرهای فیزیکی رودخانه دینورآب استان کرمانشاه

بر شاخص مطلوبیت زیستگاه ماهی شاه‌کولی سلال ( *Alburnus Sella Heckel, 1843*). مجله شیلات. ۷۱ (۴): ۳۱۷-۳۲۸.

حاجی اسماعیلی، م. ۱۳۹۸. اصلاح مدل شبیه‌سازی inSTREAM با رویکرد بیوانرژی به منظور شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه در رودخانه‌ها (مطالعه موردی: ماهی قزل‌آلای خال قرمز در رودخانه الرم، پارک ملی لار). رساله دکتری مهندسی سازه‌های آبی. دانشگاه تربیت مدرس. ۲۷۸ ص.

خضری، ک.، عبدلی، ا.، حسن زاده کیابی، ب.، و اعظمی، ج. ۱۳۹۸. ارزیابی یکپارچگی اکولوژیکی رودخانه جاجرو با استفاده از سنجش‌های ماهیان و ماکروبتوزها. مجله علوم محیطی. ۱۷ (۳): ۲۰۹-۲۲۴.

داوری، ع.، باقری، ع.، و محمدولی سامانی، ج. ۱۳۹۸. ارزیابی جریان زیست‌محیطی در رودخانه کر: رویکردی جامع با استفاده از روش مدل‌سازی پویاشناسی سیستم‌ها. مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵ (۴): ۹۱-۶۸.

دشتی، ر.، ستاری، م. ت.، و نورانی، و. ۱۳۹۶. ارزیابی عملکرد الگوریتم تکاملی تفاضلی در بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزن سد علویان. مجله حفاظت منابع آب و خاک. ۶ (۳): ۶۱-۷۶.

رزاقی، پ.، بابازاده، ح.، و شوریان، م. ۱۳۹۲. توسعه سیاست جیره‌بندی بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره در شرایط محدودیت منابع آب با استفاده از مدل MODSIM 8.1. مجله حفاظت منابع آب و خاک. ۳ (۲): ۱۱-۲۳.

سودی، م.، احمدی، ح.، یاسی، م.، سیبیلای، ا.، و حمیدی، س. ۱۳۹۸. تنظیم منحنی فرمان سدها با استفاده از مفهوم جریان زیست‌محیطی (مطالعه موردی: رودخانه‌های منتخب منتهی به دریاچه ارومیه). مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵ (۲): ۳۲۹-۳۴۱.

لایقی، ص.، و کرم، ا. ۱۳۹۳. طبقه‌بندی هیدروژئومورفولوژیکی رودخانه جاجرو با مدل روزگن. مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی. ۳ (۳): ۱۳۰-۱۴۳.

کیوانی، ی.، نصری، م.، عباسی، ک.، و عبدلی، ا. ۱۳۹۵. اطلس ماهیان آب‌های داخلی ایران. سازمان حفاظت محیط زیست. ۲۱۶ ص.

لطفی، ا. ۱۳۹۱. راهنمای ارزیابی سریع خصوصیات محیط زیستی رودخانه‌ها. سازمان حفاظت محیط‌زیست. ۱۲۰ ص.

مولودی‌صالح، ع.، و کیوانی، ی. ۱۳۹۷. تنوع ریختی جمعیت‌های سه گونه ماهی سفید رودخانه‌ای در حوضه‌های آبی ایران. مجله

- indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*. 374.1-2: 136-147.
- Hoghoghi, M., Eagderi, S. and Shams-Esfandabad, B. 2016. Habitat use of *Alburnoides namaki*, in the Jajroud River (Namak Lake basin, Iran). *International Journal of Aquatic Biology*. 3.6: 390-397.
- Hajiesmaeili, M., Ayyoubzadeh, S.A. and Sedighkia, M. 2018. Effects of stream hydraulic characteristics on habitat suitability for rapid habitat assessment of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 6.5: 10-19.
- Im, D. and Kang, H. 2011. Two-dimensional physical habitat modeling of effects of habitat structures on urban stream restoration. *Water Science and Engineering*. 4: 386-395.
- Jia, Y., Sui, X. and Chen, Y. 2013. Development of a fish-based index of biotic integrity for wadeable streams in Southern China. *Environmental management*. 52.4: 995-1008.
- Kuriqi, A., Pinheiro, A.N., Sordo-Ward, A. and Garrote, L. 2019. Flow regime aspects in determining environmental flows and maximising energy production at run-of-river hydropower plants. *Applied Energy*. 256: 113980.
- Kim, S.K. and Choi, S.U. 2019. Comparison of environmental flows from a habitat suitability perspective: A case study in the Naeseong-cheon Stream in Korea. *Ecohydrology*. 12.6: 1-10.
- Li, J., Dong, S., Peng, M., Yang, Z., Liu, S., Li, X. and Zhao, C. 2013. Effects of damming on the biological integrity of fish assemblages in the middle Lancang-Mekong River basin. *Ecological indicators*. 34: 94-102.
- Li, R., Chen, Q., Tonina, D. and Cai, D. 2015. Effects of upstream reservoir regulation on the hydrological regime and fish habitats of the Lijiang River, China. *Ecological engineering*. 76: 75-83.
- Li, F.F., Liu, C.M. and Qiu, J. 2019. Quantitative identification of natural flow regimes in fish spawning seasons. *Ecological Engineering*. 138: 209-218.
- Li, F.F., Wei, J.H., Qiu, J. and Jiang, H. 2020. Determining the most effective flow rising process to stimulate fish spawning via reservoir operation. *Journal of Hydrology*. 582: 124490.
- Macura, V., Stefunkova, Z.S., Majorosova, M., Halaj, P. and Skrinar, A. 2018. Influence of discharge on fish habitat suitability curves in mountain watercourses in IFIM methodology. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 66.1: 12-22.
- یافته‌های نوین در علوم زیستی ایران. ۵ (۲): ۱۹۲-۲۰۴.
- مولودی صالح، ع.، کیوانی، ی.، و جلالی، س.ا.ج. ۱۳۹۷. مقایسه زیست‌سنجی ماهی سفید رودخانه‌ای (*Squalius namak*) (Khaefi et al., 2016) در رودخانه‌های حوضه نمک. *مجله زیست‌شناسی جانوری تجربی*. ۷ (۱): ۱۰۷-۱۱۸.
- نادری، م.ح.، ذاکری‌نیا، م.، و سالاری‌جزی، م. ۱۳۹۷. به‌کارگیری مدل PHABSIM در تبیین رژیم اکولوژیکی رودخانه به‌منظور برآورد جریان زیست‌محیطی و مقایسه با روش‌های هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو). *اکوهیدرولوژی*. ۵ (۳): ۹۴۱-۹۵۵.
- نادری، م.ح.، ذاکری‌نیا، م.، و سالاری‌جزی، م. ۱۳۹۸. بررسی تأثیر شاخص‌های اکوهیدرولیکی در تحلیل رژیم جریان زیست‌محیطی و شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه با کاربرد مدل River2D با تکیه بر بازسازی اکولوژیکی رودخانه زرین‌گل. *اکوهیدرولوژی*. ۶ (۱): ۲۲۰-۲۰۵.
- نادری، م.ح.، پورغلام آمیجی، م.، احمدآلی، خ.، امیری، ز.، قجقی، آ.، و قربانی‌مینائی، ل. ۱۳۹۹. تعیین و طراحی محدوده رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی رودخانه زرین‌گل با بررسی مشخصه‌های هیدرومورفو-اکولوژیکی، رویکردهای مبتنی بر شاخص هیدرولوژیکی و مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه. *شیلات، مجله منابع طبیعی ایران*. ۷۳ (۱): ۴۰-۱۷.
- 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.
- Chou, W.C and Chuang, M.D. 2011. Habitat evaluation using suitability index and habitat type diversity: a case study involving a shallow forest stream in central Taiwan. *Environmental monitoring and assessment*. 172: 689-704.
- Davis, M.M. 2005. Instream flow guidelines and protection of Georgia's aquatic habitats. *Georgia Institute of Technology*. 5 pp.
- ElJabi, N., and Caissie, D. 2019. Characterization of natural and environmental flows in New Brunswick, Canada. *River Research and Applications*. 35.1: 14-24.
- Fazelnajafabadi, E., and Afzalimehr, H. 2019. Comparison of Two-and Three-Dimensional Flow and Habitat Modeling in Pool-Riffle Sequences. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 1-10.
- Gao, Y., Vogel, R.M., Kroll, C.N., Poff, N.L. and Olden, J.D. 2009. Development of representative

- Development. 301: 119-125.
- Stamou, A., Polydera, A., Papadonikolaki, G., Martinez-Capel, F., Munoz-Mas, R., Papadaki, C. and Dimitriou, E. 2018. Determination of environmental flows in rivers using an integrated hydrological-hydrodynamic-habitat modelling approach. *Journal of environmental management*. 209: 273-285.
- Steffler, P., and Blackburn, J. 2002. River2D: Two-Dimensional Depth Averaged Model of River Hydrodynamics and Fish Habitat. Introduction to Depth Averaged Modeling and User's Manual. University of Alberta, Edmonton, Canada. 120 p.
- Tennant, D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources *Fisheries*. 1: 6-10.
- Vogel, R.M., Sieber, J., Archfield, S.A., Smith, M.P., Apse, C.D. and Huber-Lee, A. 2007. Relations among storage, yield, and instream flow. *Water Resources Research*. 43.5: 1-12.
- 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.
- Yao, W., Liu, H., Chen, Y., Zhang, W., Zhong, Y., Fan, H. and Bamal, S. 2017. Simulating Spawning and Juvenile Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Habitat in Colorado River Based on High-Flow Effects. *Water*. 9: 150.
- Yasi, M. and Ashori, M. 2017. Environmental flow contributions from in-basin Rivers and dams for saving Urmia Lake. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 41.1: 55-64.
- Zhang, Q., Gu, X., Singh, V.P. and Chen, X. 2015. Evaluation of ecological instream flow using multiple ecological indicators with consideration of hydrological alterations. *Journal of Hydrology*. 529: 711-722.
- Zhang, Q., Zhang, Z., Shi, P., Singh, V.P. and Gu, X. 2018. Evaluation of ecological instream flow considering hydrological alterations in the Yellow River basin, China. *Global and Planetary Change*. 160: 61-74.
- Zou, Q. and Liang, S.H. 2015. Effects of Dams on River Flow Regime Based on IHA/RVA. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 368: 275-280.
- Maghrebi, M., Tajrishy, M. and Jamshidi, M. 2010. Assessment of Jajrood River watershed microbial pollution: sources and fates. *Environmental Engineering and Management Journal (EEMJ)*. 9.3: 385-391.
- Mahjouri, N. and Kerachian, R. 2011. Revising river water quality monitoring networks using discrete entropy theory: the Jajrood River experience. *Environmental monitoring and assessment*. 175.1-4: 291-302.
- Mezger, G., De Stefano, L. and del Tanago, M.G. 2019. Assessing the Establishment and Implementation of Environmental Flows in Spain. *Environmental Management*. 1-15.
- Mouludi Saleh, A., Keivany, Y. and Jalali, S.A.H. 2017. Geometric Morphometric Comparison of Namak Chub (*Squalius namak*, Khaefi et al., 2016) in Rivers of Lake Namak Basin of Iran. *Research in Zoology*. 7.1: 1-6.
- Mouton, A.M., Schneider, M., Depestele, J., Goethals, P.L. and De Pauw, N. 2007. Fish habitat modelling as a tool for river management. *Ecological engineering*. 29.3: 305-315.
- 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: 4969-4984.
- Peng, L. and Sun, L. 2016. Minimum instream flow requirement for the water-reduction section of diversion-type hydropower station: a case study of the Zagunao River, China. *Environmental Earth Sciences*. 75.17: 1210.
- Phelan, J., Cuffney, T., Patterson, L., Eddy, M., Dykes, R., Pearsall, S., Goudreau, C., Mead, J. and Tarver, F. 2017. Fish and invertebrate flow-biology relationships to support the determination of ecological flows for North Carolina. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 53.1: 42-55.
- Shahriarinia, E.S., Asadollahfardi, G. and Heidarzadeh, N. 2016. Study of the environmental flow of rivers, a case study, Kashkan River, Iran. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 65.2: 181-194.
- Sojka, M., Jaskula, J., Wischer-Dysarz, J. and Dysarz, T. 2016. Assessment of dam construction impact on hydrological regime changes in Lowland River – A case of study: the Stare Miasto reservoir located on the Powa River. *Journal of Water and Land*

## Determination of Optimal and Desirable Environmental Flow Release from Latian Dam Reservoir with Consideration of Ecohydraulic, Hydrological and Hydromorphological Characteristics to Protect the Habitat of the Jajroud River

M.H. Naderi<sup>1\*</sup>, S. Alioghli<sup>2</sup>, O. Jahandideh<sup>3</sup>, Y. Rajabizadeh<sup>4</sup>, M. Salarijazi<sup>5</sup>

Recived: Apr.17, 2020

Accepted: Jun.18, 2020

### Abstract

A good understanding of the river natural flow regime plays an important role in many hydrological studies. Such studies also quantify the environmental flow, the basis for the conservation of river fish habitats and aquatic ecosystems, and need to be recognized in the policies and decisions of water resource development plans and their inclusion in watershed management plans. In the present study were calculated and evaluated hydrological methods such as Tennant, Aquatic Base Flow, Arkansas and Range of Variability Approach (RVA) to estimate the minimum ecological flow and Habitat Simulation model to preserve the ecological potential of the Jajroud River. In this regard, based on the research framework, after hydrological analysis and field observations, a habitat suitability model was developed for the target species and finally, habitat simulation was performed by combining ecohydraulic and hydrological indices of flow and analysis of flow - habitat physics time series using suitability curves. Based on the results, to maintain optimal conditions and protect the ecosystem components and habitat of biological communities, using the River2D model range of flow regime required to provide habitat ecological potential *Squalius namak*, it should be located along the Jajroud River between 1.24 to 18.55 m<sup>3</sup>/s, with mean annual flow 5.91 m<sup>3</sup>/s (86.7 Percent Mean Annual Flow). It is noteworthy that the Tennant methods should be used with caution in summer because this method offers between 9 and 96 percent of the mean annual flow. Finally, it was concluded that other methods of providing environmental flow provide values above 25% of the mean annual flow, which provide better protection of the stream for aquatic habitats. In contrast, the River2D ecohydraulic model can provide a general idea of habitat suitability across different river basins with respect to changes in natural flow regimes and the achievement of ideal and optimal flow conditions.

**Keywords:** Habitat Suitability, Hydrological Index, River Ecology Regime, Water Resources

1- M.Sc. of Water Resources Engineering and Ecohydraulic Researcher of River Habitat, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, Gorgan, Iran

2- M.Sc. of Water Resources Engineering, Department Water Resources Engineering, Tarbiat Modares Univesity, Tehran, Iran

3- M.Sc. Water Engineering Department, College of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

4- M.Sc. of Department of Water Structures Engineering, Tarbiat Modares Univesity, Tehran, Iran

5- Associate Professor, Department of Structure and Water Engineering, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(\*- Corresponding Author Email: naderigau@gmail.com)