Archive of SID

محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره ۷۲، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸
صفحات ۲۶۳ تا ۲۷۷

بهبود روش شبیه‌سازی زیستگاه با کاربرد مدل هیدرودینامیکی River2D به منظور تعیین رژیم اکولوژیکی رودخانه

محمدحسن نادری[۱]؛ مهدی ذاکری‌نیا*[۲] و میثم سالاری‌جزی[۳]

۱- کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

(تاریخ دریافت ۹۷/۰۶/۰۳ - تاریخ پذیرش ۹۷/۰۷/۱۸)

چکیده:

مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبریز به طور فزاینده‌ای به تخصیص جریان زیست‌محیطی به عنوان یک ابزار جهت بهبود کیفیت زیستگاه اکوسیستم‌های آبی در پروژه‌های حفاظت و احیاء رودخانه مرتبط می‌باشد. در این راستا برای تسهیل تخمین جریان زیست‌محیطی رودخانه قره‌سو استان گلستان، برپایه چارچوب تحقیق پس از آنالیز هیدرولوژیکی و مطالعات و مشاهدات میدانی، مدل مطلوبیت زیستگاهی گونه سیاه‌ماهی *C.Capoeta gracilis* توسعه داده شد و در مرحله بعد، مدل‌سازی هیدرودینامیکی پارامترهای هیدرولیکی جریان انجام شد و در نهایت مدل‌سازی و شبیه‌سازی زیستگاهی با تلفیق مطالعات اکولوژیک و هیدرودینامیکی جریان صورت گرفت و رژیم جریانات اکولوژیک استخراج شد. بر پایه نتایج حاصله، گونه سیاه‌ماهی در مراحل مختلف زندگی به تغییرات پارامترهای هیدرولیکی (عمق و سرعت) و نرخ جریان عکس‌العمل نشان داده و برای حفاظت از اکوسیستم رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل River2D و متغیرهای فیزیک زیستگاه، شاخص مطلوبیت زیستگاه مبتنی بر مساحت قابل استفاده وزنی، حداقل و حداکثر جریان زیست‌محیطی به ترتیب معادل ۰/۴۷ مترمکعب بر ثانیه برای ماه شهریور و ۳/۰۳ مترمکعب بر ثانیه برای ماه اردیبهشت پیشنهاد می‌گردد. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از مدل دوبعدی هیدرودینامیکی برای مدلسازی مطلوبیت زیستگاه گونه هدف می‌تواند به عنوان ابزاری مفید جهت بهبود عملکرد مدلسازی در شبیه‌سازی زیستگاه و پیاده‌سازی رژیم اکولوژیکی در پروژه‌های حفاظت و احیاء مهندسی رودخانه توصیه شود.

کلید واژگان: جریان زیست‌محیطی، فیزیک زیستگاه، مساحت قابل استفاده وزنی، مطلوبیت زیستگاه، River2D

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۱۱۷۷۳۲۶۵ ایمیل: mzakerinia@gau.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان یک اکوسیستم زنده و پویا، تمام اجزا و پیکره آن زیستگاه انواع کفزیان، فیتوپلانکتون‌ها، زئوپلانکتون‌ها، آبزیان، گیاهان آبزی و کنار آبزی و انواع پرندگان بومی و مهاجم هستند. هر اکوسیستم آبی، برای حفظ شرایط استاندارد هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی و حیات زیست‌بوم‌های وابسته به رودخانه، نیازمند مقدار معینی آب می‌باشد که آن را جریان زیست‌محیطی یا نیاز آبی محیط‌زیستی می‌نامند (Ksiazek *et al.,* 2019؛ Naderi *et al.,* 2019) و در صورت عدم تأمین جریان زیست‌محیطی، ادامه حیات زیست‌بوم رودخانه با بحران مواجه خواهد شد (Khanmohammady Fallah & Shokoohi, 2018). در مدیریت اکوسیستمی رودخانه‌ها، جریان زیست‌محیطی از دو جنبه مورد بررسی قرار می‌گیرد: ۱- جریان مورد نیاز برای حفظ زیستگاه‌های موجودات وابسته به آب رودخانه اعم از گیاهان و جانوران و نیز مصارف صنعتی و کشاورزی (Melcher *et al.,* 2018)، ۲- جریان مورد نیاز برای حفظ بستر رودخانه که ارتباط تنگاتنگی با کنترل سیلاب دارد (Maddock *et al.,* 2013؛ Guedes *et al.,* 2016). در این راستا اگر بتوان حداقل جریان رودخانه را به نحو صحیح پیش‌بینی کرد، می‌توان برنامه‌ریزی برداشت از رودخانه را برای ماه‌های مختلف ارائه داد (Baeza Sanz *et al.,* 2018). به دلیل تأثیرات نامطلوب تغییر در شرایط هیدرولوژیکی و کیفی منابع آب رودخانه‌ها و نیز لزوم حفاظت از اکوسیستم‌های با ارزش رودخانه، می‌بایست به شناخت، ارزیابی و مدیریت شرایط مناسب حیات آبزیان پرداخت (Saadatpour & Heravi, 2016؛ Yao *et al.,* 2018). به منظور ارزیابی سلامت رودخانه‌ها، استفاده از رویکردهای توسعه یافته مدل‌سازی زیستگاه‌های رودخانه‌ای و ارزیابی جامع وضعیت زیست‌محیطی رودخانه‌ها ضروری است (Sedighkia *et al.,* 2017؛ Melcher *et al.,* 2018).

مدل‌سازی هیدرودینامیکی زیستگاه با استفاده از شاخص مطلوبیت زیستگاه به عنوان روشی جامع برای برآورد جریان زیست‌محیطی اکوسیستم‌های آبی و کاهش اثرات زیست‌محیطی پایین‌دست سدها در کشورهای کره‌شمالی، آمریکا و پرتقال توسعه داده شده است (Im & Kang, 2011؛ Ochs *et al.,* 2018؛ Schwartz *et al.,* 2015). مدل‌سازی هیدرودینامیکی زیستگاه و تعیین متغیرهای مهم فیزیکی و هیدرولوژیکی زیستگاه ماهیان در بازسازی محیط‌زیست رودخانه (Jowett & Duncan, 2012؛ Hayes *et al.,* 2015)، بهبود عملکرد مدل‌سازی شرایط زیستگاه گونه هدف در اکوهیدرولیک (Naderi *et al.,* 2019؛ Sachser *et al.,* 2017) و احیای اکوسیستم‌های تخریب شده و حمایت از گونه‌های در معرض خطر با اختصاص جریان زیست‌محیطی، یک روش کلیدی در پروژه‌های بازگردانی و بازطبیعی سازی تنوع‌زیستی و اکوسیستم‌های آبی است (Kim *et al.,* 2016؛ Fukuda *et al.,* 2015). در تحقیقی Naderi و همکاران (2019) در تحلیل رژیم جریان زیست‌محیطی برای باززنده‌سازی اکولوژیکی رودخانه زرین‌گل بیان کردند مدل River2D قادر به شبیه‌سازی نوسانات

www.SID.ir

Archive of SID

طبیعی جریان رودخانه می‌باشد. مطالعات تغییرات هیدرولیکی و مورفولوژیکی در رودخانه‌ها با استفاده از مدل‌های فیزیکی مستلزم صرف وقت و هزینه بالایی می‌باشد که در بسیاری از موارد از لحاظ اقتصادی توجیه چندانی ندارد، از این‌رو بررسی درازمدت و یا حتی کوتاه‌مدت این گونه تغییرات بدون استفاده از مدل‌های ریاضی تقریباً غیرممکن می‌باشد. بر این اساس در پژوهش حاضر با استفاده از مدل ریاضی هیدرودینامیکی River2D و شبیه‌سازی هیدرولیکی زیستگاه، رژیم اکولوژیکی رودخانه قره‌سو استان گلستان جهت برنامه‌ریزی، مدیریت و حفاظت اکولوژیکی زیستگاه، تعیین می‌گردد.

۲. مواد و روش‌ها

۲. ۱. منطقه مورد مطالعه

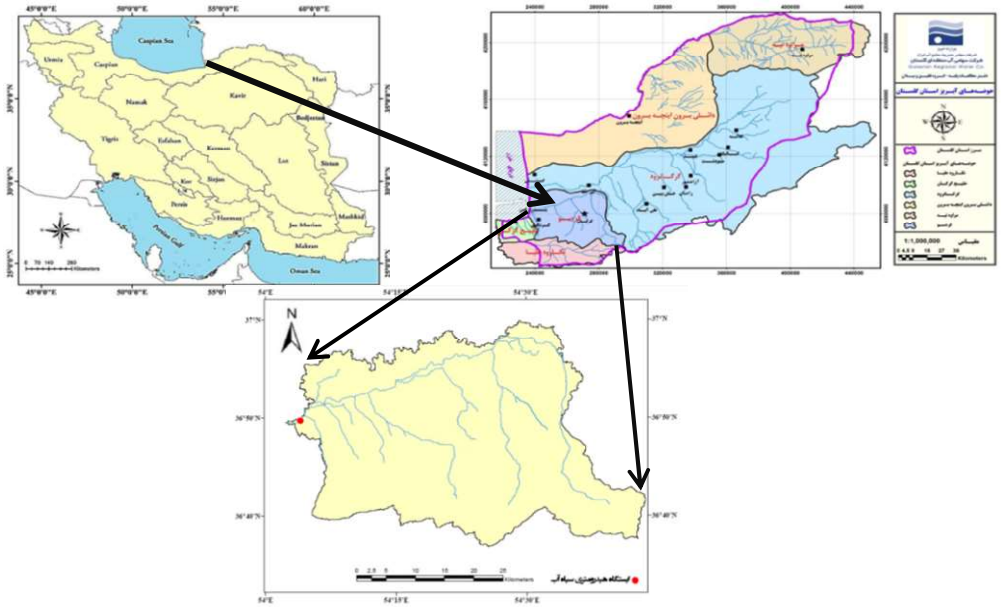
محدوده مورد مطالعه، بازه‌ای از رودخانه قره‌سو واقع در جنوب‌غربی حوزه آبریز قره‌سو استان گلستان، از ۳ کیلومتر پایین‌دست مصب ورودی خلیج گرگان تا ایستگاه هیدرومتری سیاه‌آب می‌باشد (شکل ۱). موقعیت این بازه بین مختصات جغرافیایی "۲۰´۰۳˚۵۴ تا "۱۰ ´۰۴˚۵۴ طول شرقی و"۴۰´۵۰˚۳۶ تا "۸۲ ´۵۰ ˚۳۶ عرض شمالی قرار گرفته است. طول شاخه اصلی رودخانه قره‌سو ۵۸ کیلومتر و شیب متوسط بستر آن در ناحیه کوهستان ۵ درصد و در قسمت جلگه ۱ درصد می‌باشد. سطح حوزه آبریز آن ۱۶۳۸ کیلومترمربع و ارتفاع متوسط آن برابر ۶۴۱ متر (حداکثر و حداقل به‌ترتیب ۳۲۰۰ و ۲۶- متر) می‌باشد. طول بازه مورد مطالعه در حدود ۲/۵ کیلومتر و با توجه به تراز توپوگرافی ابتدا و انتهای بازه به‌ترتیب در حدود ۲۵- و ۲۳- متر از سطح دریا است.

با توجه به اینکه قسمت مصب تا قسمت‌های میانی رودخانه قره‌سو دارای ارزش زیستگاهی است، لذا حدود ۳ کیلومتر بالادست مصب رودخانه به‌عنوان ناحیه تحت بررسی انتخاب شد. برای انجام محاسبات هیدرولوژیکی از داده‌های ایستگاه هیدرومتری سیاه‌آب به‌دلیل اینکه در پایین‌دست حوضهٔ آبریز قره‌سو و مصب ورودی به خلیج گرگان واقع شده است، بهره گرفته شد. توزیع فصلی جریان در ایستگاه سیاه‌آب نشان می‌دهد که تغییرات دبی رودخانه قره‌سو در فصول مختلف متفاوت است (شکل ۲). فصل بهار حداکثر جریان را به خود اختصاص می‌دهد، به‌طوری که ۴۰/۶ درصد از جریان رودخانه در این فصل جریان می‌یابد. فصل تابستان کم‌آب‌ترین فصل رودخانه به شمار می‌رود به طوری که تنها ۸/۸ درصد از جریان سالیانه در این فصل جریان دارد. بر اساس تجزیه و تحلیل و محاسبات آماری دبی‌های ماهانه ایستگاه هیدرومتری سیاه‌آب در طول سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۵، حداکثر میانگین دبی جریان ماهانه رودخانه قره‌سو در ایستگاه سیاه‌آب در ماه اردیبهشت و برابر ۳/۷۹ مترمکعب بر ثانیه و حداقل میانگین دبی جریان ماهانه در ماه شهریور و برابر ۰/۵۷ مترمکعب بر ثانیه و میانگین دبی سالانه[1] ۱/۹۵ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.

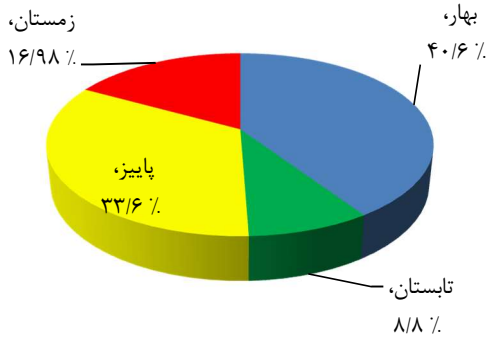
1-Mean Annual Flow: MAF

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱- نقشه حوزه آبخیز قره‌سو و محدوده مورد مطالعه (یافته‌های پژوهش)



شکل۲- رژیم فصلی آبدهی ایستگاه هیدرومتری سیاه‌آب

۲,۲. مدل River2D

یکی از برنامه‌های شناخته شده‌ای که برای شبیه‌سازی دوبعدی استفاده می‌شود، مدل River2D توسعه یافته توسط Steffler و Blackburn (۲۰۰۲) در دانشگاه Alberta کانادا می‌باشد. 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

www.SID.ir

Archive of SID

رابط بین هیدرولیک رودخانه و زیستگاه موجودات آب‌زی استفاده می‌کند. پارامتر زیستگاه خروجی آن نیز سطح قابل استفاده وزنی[1] می‌باشد (Im & Kang, 2011). نرم‌افزار River2D مدل شبیه‌ساز دوبعدی عمق متوسط می‌باشد. جزء هیدرودینامیک این مدل بر اساس حل دوبعدی معادلات سنت و نان 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 & Blackburn, 2002). معادلات اصلی که این مدل بر اساس آنها پایه‌گذاری شده است را می‌توان به صورت رابطه ۱ و ۲ ارائه داد:

رابطه (۱) معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial \mathrm{Qx}}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial \mathrm{Q_y}}{\partial \mathrm{y}}=0$$

رابطه (۲) معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(UQ_x)+\frac{\partial}{\partial y}(VQ_y)+\frac{g}{2}\frac{\partial}{\partial x}H^2=gH(S_{0x}-S_{fx})+\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial x}(H_{\tau xx})\right]+\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial y}(H_{\tau xy})\right]$$

$$\frac{\partial \mathrm{Q_y}}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}(\mathrm{UQ_y})+\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}(\mathrm{VQ_y})+\frac{\mathrm{g}}{2}\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}\mathrm{H}^2=\mathrm{gH}(\mathrm{S_{0y}}-\mathrm{S_{fy}})+\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}(\mathrm{H_{\tau yx}})\right]+\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial \mathrm{y}}(\mathrm{H_{\tau yy}})\right]$$

که در معادلات ۱ و ۲، H عمق جریان، U و Vسرعت متوسط در جهت x و y می‌باشند. Qx و Qyشدت‌های جریان می‌باشند که به صورت qx=uh و qy=vh به سرعت مرتبط می‌شوند. G شتاب ثقل و ρ چگالی آب می‌باشد. S_{0x} و S_{0y} شیب کف در جهت x و y می‌باشد. S_{fx} و S_{fy} شیب اصطکاک مربوط می‌باشند. τyx، τyy، τxx و τxy اجزای بردار تنش افقی آشفتگی جریان می‌باشند (Steffler & Blackburn, 2002). روند به‌کار گرفته شده در مدل River2D، به‌طور شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

۲. ۳. شبیه‌سازی زیستگاه در River2D

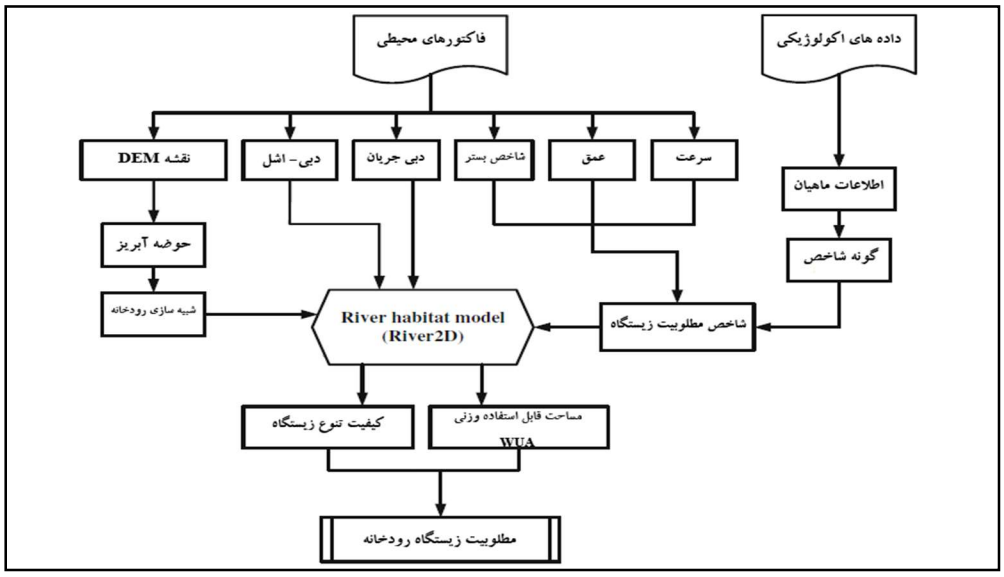
اشکال مختلف بستر رودخانه، موضوع مهمی در شرایط اکولوژیکی و چرخه مواد غذایی ماهیان در زیستگاه‌های رودخانه‌ای است. جریان‌های سریع در حفظ انرژی، تغییرات هیدرودینامیکی و شرایط زیستگاهی گونه‌های مختلف ماهیان اهمیت دارند. ویژگی‌های هندسی و هیدرولیکی هر رودخانه، تعیین کننده زیستگاه مناسب برای انواع موجودات آبزی است. زیستگاه‌های طبیعی در رودخانه‌ها از طریق برآمدگی‌ها (خیزاب) و فرورفتگی‌های کف (گوداب) ایجاد و توسعه می‌یابند (Ayyoubzadeh *et al.*, 2018). ایجاد و توسعه شکل‌های بستر با سلسله روابط پیچیده‌ای همراه است. از این رو مطالعه شکل بستر و برهمکنش آنها با ساختار جریان در توسعه زیستگاه‌های طبیعی و تحکیم آنها از موضوعات مهم در ریخت‌شناسی رودخانه می‌باشد. برای شبیه‌سازی رودخانه با برنامه River2D در ابتدا با استفاده از نقشه توپوگرافی در محیط GIS، نقشه DEM و TIN تهیه گردید. در ادامه با استفاده از نقشه توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و استفاده از DEM، لایه TIN منطقه تهیه و مسیر

2- Weighted Usable Area: WUA

www.SID.ir

Archive of SID

جریان در رودخانه به لایه TIN افزوده شد. برای شبیه‌سازی رودخانه در River2D علاوه بر آماده‌سازی توپوگرافی زمین در مراحل قبل، نیاز به دبی جریان در مرز ورودی و رقوم سطح آب (دبی- اشل) در مرز خروجی می‌باشد. با داشتن رابطه دبی – اشل، مقدار رقوم سطح آب به ازای دبی‌های مختلف محاسبه شد.



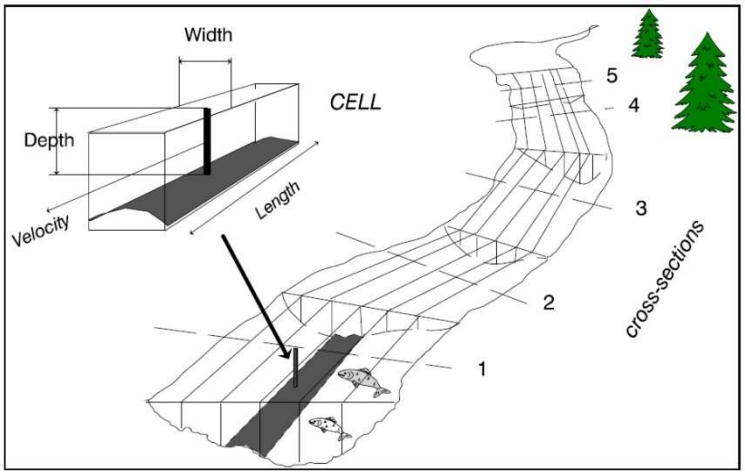
شکل ۳- فلوچارت مدل River2D (Chou & Chuang, 2011)

۲. ۴. مدل‌سازی هیدرولیکی مطلوبیت زیستگاه

تحلیل روابط بین گونه و محیط زندگی آن همواره یک مسئله اساسی در دانش بوم‌شناسی بوده و کمی‌سازی این روابط، اساس مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه است (Sachser *et al.*, 2017؛ Asadi *et al.*, 2014). مجموعه‌ای از شرایط ساختار زیستگاه و جریان با عنوان فیزیک زیستگاه تعریف می‌شود که بیشترین تأثیر را بر فراوانی ماهی در این نوع زیستگاه‌ها دارد (Maddock *et al.*, 2013). ساختار فیزیک زیستگاه، پارامتر مهمی در تعیین فراوانی وجود گونه‌ها در آبراهه است (شکل ۴). انتخاب مناطق تخم‌ریزی و پرورش نوزادان ماهی‌ها بر اساس قطر ذرات بستر، سرعت جریان و عمق آب است (Ayyoubzadeh *et al.*, 2018) و این موضوع اهمیت متغیرهای فیزیکی را در زیستگاه‌های آبی نشان می‌دهد (Hashemi *et al.*, 2016).

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴- ساختار میکروزیستگاه در یک مقطع عرضی رودخانه و نمایش پارامترهای فیزیک زیستگاه (Jowett *et al.*, 2008)

یکی از عوامل مهم در شبیه‌سازی زیستگاه رودخانه‌ای وجود منحنی‌های دقیق مطلوبیت زیستگاه است. منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه[1]، نمایش گرافیکی از مطلوبیت شرایط فیزیکی و شیمیایی زیستگاه هستند. این منحنی‌ها برای باززنده‌سازی اکولوژیکی، تعیین حقابه زیست‌محیطی، فرآیندهای هیدرولوژیکی و مورفولوژیکی بر روی زیستگاه‌های فیزیکی جریان، مدیریت اکوسیستم رودخانه کاربرد دارند (Melcher *et al.*, 2018؛ Sedighkia *et al.*, 2017). به منظور انتخاب یک مدل بیولوژیک دقیق، بایستی پژوهش‌های دقیق برای دوره‌های زیستی، تولیدمثل و سایر موارد بیولوژیک صورت گرفته باشد. بر اساس نظرات کارشناسان و متخصصان اکولوژی آبزیان، مطالعات کتابخانه‌ای و بررسی کلیه رفتارهای محیطی خانواده کپورماهیان در رودخانه‌های استان گلستان، گونه سیاه‌ماهی به‌عنوان گونه شاخص در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت. گونه سیاه‌ماهی *C. Capoeta capoeta* از خانواده کپورماهیان و یکی از گونه‌های غالب و بومی حوضه آبریز جنوبی دریای‌خزر با حداکثر طول کل ۳۵ سانتیمتر می‌باشد (Asadi *et al.*, 2014). این گونه به لحاظ ماهی‌گیری در آب‌های داخلی، صید ورزشی و مطالعات بیوسیستماتیک جانوری نیز حاضر اهمیت می‌باشد (Abdoli & Naderi, 2009). به دلیل نیاز به منحنی‌های مطلوبیت، مطالعات اندازه‌گیری میدانی و سنجش فاکتورهای هیدرولیکی (سرعت جریان، عمق آب، عرض رودخانه، ذرات بستر) و اکولوژیکی در اردیبهشت و خرداد ماه ۱۳۹۶، از پایین‌دست رودخانه (ایستگاه هیدرومتری سیاه‌آب) به سمت بالادست و در طول رودخانه قره‌سو انجام شد. ایستگاه‌های نمونه‌برداری، بر اساس فاکتورهایی شامل عدم هم‌پوشانی با یکدیگر، فاصله از محل ورود به رودخانه اصلی، تنوع در ریخت‌شناسی رودخانه (عرض کم رودخانه، گودال‌های مسیر رودخانه، زیستگاه‌های سنگلاخی و ایستگاه‌های گیاهی حاشیه رودخانه)، انتخاب شدند. به منظور محاسبه شاخص مطلوبیت زیستگاه (Suitability Index: SI)، برای گونه مورد مطالعه در رودخانه قره‌سو

1-Habitat Suitability Criteria: HSC

www.SID.ir

Archive of SID

از رابطه میانگین هندسی $HSI=(SI_v \times SI_d \times SI_s \times \ldots SI_n)^{1/n}$ استفاده شد. مقادیر شاخص مطلوبیت هر یک از فاکتورهای محیطی برای گونه سیاه‌ماهی در رودخانه قره‌سو برای هر متغیر آورده شده است. محاسبه شاخص مطلوبیت زیستگاه نشان داد که میزان شاخص مطلوبیت زیستگاه رودخانه قره‌سو برای گونه سیاه‌ماهی برابر ۰/۴۸ است (جدول ۱).

خروجی مدل River2D، منحنی مساحت قابل استفاده وزنی می‌باشد، که دبی جریان را به یک شاخص زیستگاه ماهیان برای مراحل مختلف زندگی گونه هدف مرتبط می‌کند (رابطه ۳). با استفاده از تابع WUA در مقابل Qجریان می‌توان جریان زیست‌محیطی را به ازای ماه‌ها و دوره‌های مختلف زندگی گونه شاخص رژیم اکولوژیکی جریان استخراج کرد (Sedighkia *et al.,* 2017).

$$WUA = \sum_{i=1}^{M} A_i HSI_i \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در رابطه ۳، A_i: سطح هر سلول زیستگاهی و HSI_i: شاخص مطلوبیت زیستگاه و WUA (مساحت قابل استفاده وزنی) تابعی از Q (دبی جریان) می‌باشند.

جدول ۱- مقادیر شاخص مطلوبیت کل برای هر متغیر و شاخص مطلوبیت زیستگاه (HSI) رودخانهٔ قره‌سو برای گونهٔ سیاه‌ماهی

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

۳. نتایج

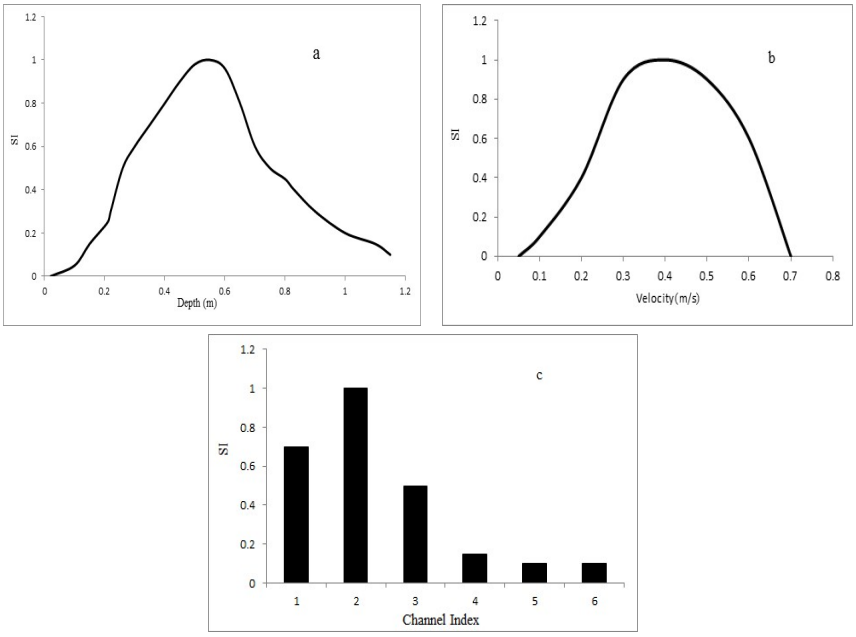
تعیین محدوده رژیم جریان اکولوژیکی، می‌تواند تخمین مناسبی جهت ارزیابی پاسخ اکولوژیکی رودخانه به تغییرات مورفولوژیکی ایجاد شده در اثر فرآیندهای هیدرولوژیکی و هیدرولیکی باشد. در پژوهش حاضر، منحنی‌های مطلوبیت زیستگاهی با توسعه شاخص‌های میکروزیستگاهی مطابق با شکل ۵ استخراج شد. در شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که جریاناتی به‌عنوان جریان زیست‌محیطی مناسب است که بتواند اعماقی بیش از ۴۰ سانتی‌متر را ایجاد کند و همچنین سرعت جریان برابر حدود ۰/۳ تا ۰/۷ متر برثانیه باشد. درصدهای مختلف میانگین جریان سالانه، حداقل، حداکثر و ۴۰٪ حداکثر میانگین جریان ماهانه، برای رویکرد شبیه‌سازی زیستگاه مورد استفاده قرار گرفت که این جریان‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- جریان‌های مورد استفاده در روش شبیه‌سازی زیستگاه (m^3/s)

٪۱۰ MAF	٪۴۰ MAF	٪۶۰ MAF	٪۸۰ MAF	٪۱۰۰ MAF	٪۲۰۰ MAF	Min (MMF)	Max (MMF)	Max٪۴۰ (MMF)
۰/۱۹	۰/۷۸	۱/۱۷	۱/۵۶	۱/۹۵	۳/۹	۰/۵۷	۳/۷۹	۱/۵۱

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵ - منحنی‌های مطلوبیت زیستگاهی سرعت (a)، عمق (b) و شاخص بستر (c)

۳. ۱. تنظیم جریان رودخانه و آنالیز حساسیت برای بررسی اثر عمق و سرعت بر WUA

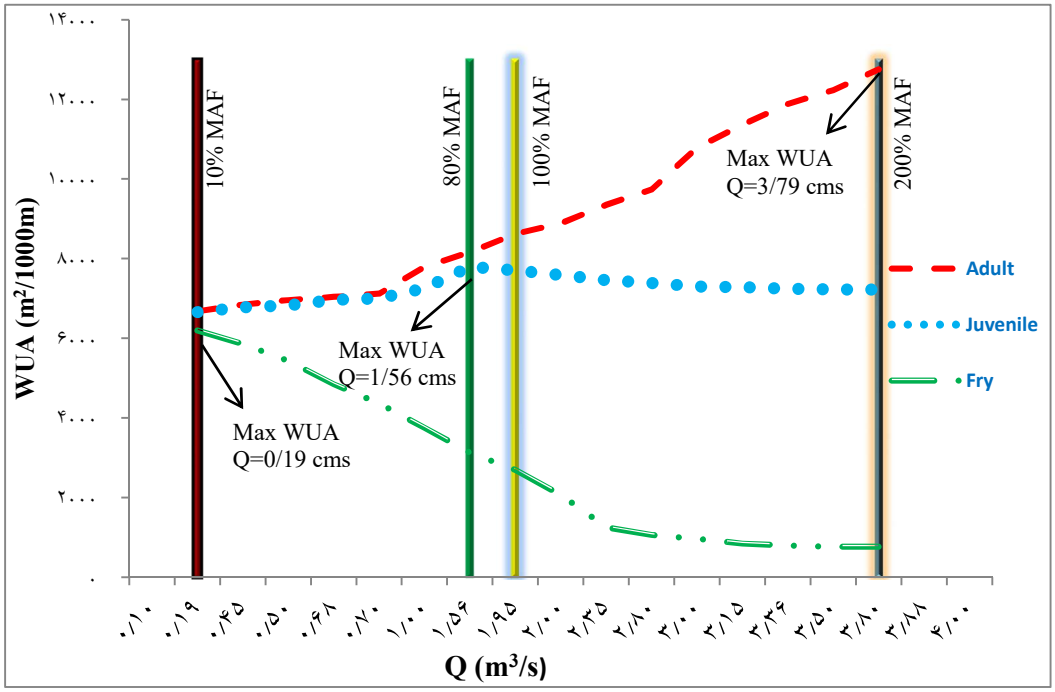
بر اساس مدل دو بعدی هیدرودینامیکی شبیه‌سازی زیستگاه، مساحت قابل استفاده وزنی برای دبی‌های مختلف جریان، در مراحل مختلف زندگی سیاه‌ماهی در شکل ۶ ارائه شده است. از منحنی رابطه WUA-Q شکل ۶ می‌توان نشان داد که در حداکثر میانگین جریان ماهانه که برابر ۳/۷۹ مترمکعب بر ثانیه و حدود ۱۹۴ درصد MAF است، حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی (WUA) و میزان زیستگاه در دسترس برای سیاه ماهی بالغ[1] است و WUA حداکثر برای بچه ماهی[2] سیاه‌ماهی در ۱۰ درصد MAF قرار دارد. همچنین بیشترین میزان زیستگاه در دسترس برای سیاه‌ماهی جوان[3] در محدوده جریان ۸۰ درصد MAF می‌باشد. تفاوت بین حداقل و حداکثر مقادیر WUA با توجه به دبی جریان در ماه‌های مختلف سال و مراحل زندگی سیاه‌ماهی 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 سیاه‌ماهی در رودخانه قره‌سو 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. مطابق با شکل‌های ۶ و ۷ نیز عامل محدودکننده مطلوبیت زیستگاه گونه هدف در دبی‌های کم عمق، عمق کم جریان و در دبی‌های زیاد، سرعت بالای جریان رودخانه می‌باشد. مطابق با شکل ۶

1- Adult
2- Fry
3- Juvenile

www.SID.ir

Archive of SID

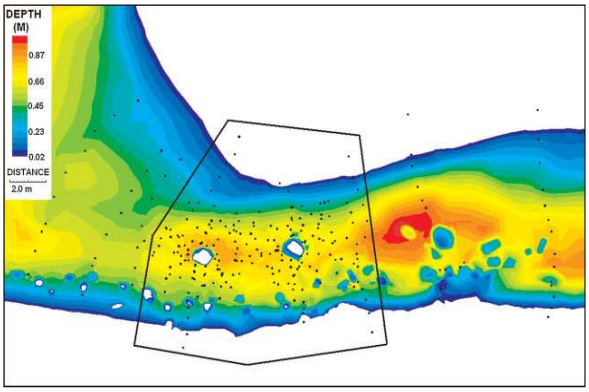
با تغییر رژیم طبیعی جریان رودخانه و افزایش دبی به میزان بیشتر از حداکثر میانگین دبی جریان رودخانه که برابر با ۳/۷۹ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. پارامترهای هیدرولیکی نظیر سرعت جریان، مساحت جریان، عرض سطح آب، عمق هیدرولیکی، تنش برشی و شعاع هیدرولیکی همگی به نوعی وابسته به دبی جریان رودخانه هستند. در شکل ۷ نمایش دوبعدی پارامتر عمق در پلان و مقطع عرضی رودخانه و در شکل ۸ میزان مطلوبیت زیستگاه بر اساس سناریوهای مختلف دبی از دبی ۲ تا ۶ مترمکعب بر ثانیه، برای گونه سیاه‌ماهی در مقطع عرضی نشان داده شده است. در شکل ۷ در بررسی اثر عمق جریان بر میزان زیستگاه در دسترس مشاهده می‌شود، با کاهش جریان رودخانه و در دبی‌های کم‌تر از حداقل میانگین دبی جریان ماهانه رودخانه به دلیل کاهش عمق جریان، میزان زیستگاه در دسترس (WUA) کاهش یافته است و می‌توان گفت یکی از دلایل محدودکننده مطلوبیت زیستگاه و در نتیجه کاهش زیستگاه در دسترس در دبی‌های کم جریان رودخانه، عمق کم جریان می‌باشد.



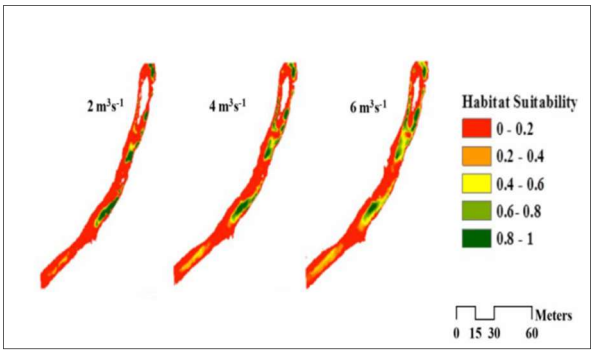
شکل ۶- منحنی دبی- فیزیک زیستگاه (WUA-Q) برای سه گروه سنی سیاه‌ماهی

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷- مدل‌سازی هیدرولیکی تغییرات عمق در پلان عرضی



شکل ۸- میزان مطلوبیت زیستگاه در دبی‌های مختلف جریان

با افزایش دبی جریان رودخانه به‌دلیل افزایش عمق جریان، میزان زیستگاه در دسترس افزایش می‌یابد. یکی از عوامل محدود کننده مطلوبیت زیستگاه و در نتیجه کاهش زیستگاه در دسترس در دبی‌های کم رودخانه، عمق کم جریان و همچنین در دبی‌های بالای جریان رودخانه، سرعت بالای جریان می‌باشد. سرعت جریان را می‌توان مهمترین پارامتر فیزیکی تأثیرگذار بر زیستگاه آبزیان دانست که نقش اساسی به عنوان یک شاخص اکوهیدرولیکی بازی می‌کند (Ayyoubzadeh *et al.*, 2018). عمق، یک شاخص اکوهیدرولیکی مهم در حیات آبزیان رودخانه است. عمق آب می‌تواند، محافظی در برابر شکارچیان خشکی و هوایی باشد و فضای بیشتری را برای جستجوی غذا و تغذیه در اختیار قرار دهد (Ksiazek *et al.*, 2019). از طرفی عمق‌های بسیار زیاد هم برای حیات سیاه‌ماهی و خانواده کپورماهیان مطلوب نیست (Asadi *et al.*, 2014). برای بدست 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 Sedighkia و همکاران (۲۰۱۷) و Baeza Sanz و همکاران (۲۰۱۸) 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. نتایج تحلیل رژیم اکولوژیکی ماهانه پیشنهادی مدل River2D در مقابل میانگین جریان ماهانه در جدول ۳ و شکل ۹ ارائه شده است. در شکل ۹ مشاهده می‌شود

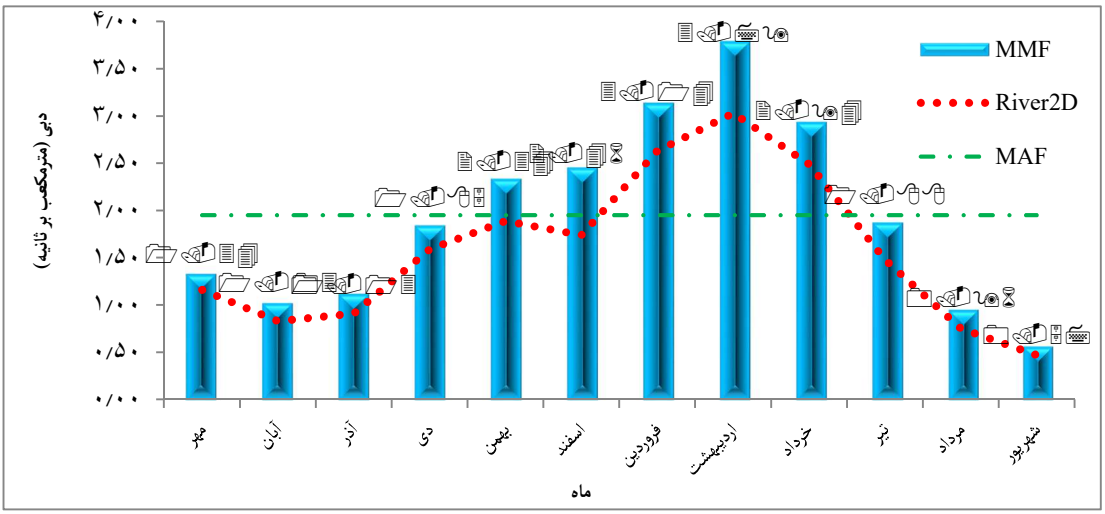
www.SID.ir

Archive of SID

که مدل River2D قادر به شبیه‌سازی نوسانات طبیعی جریان رودخانه قره‌سو می‌باشد، در حالی که رژیم اکولوژیکی به دست آمده از این روش تقریباً برای همه ماه‌ها کمتر از میانگین جریان ماهانه می‌باشد.

جدول ۳- رژیم اکولوژیکی ماهانه پیشنهادی مدل River2D (m^3/s)

ماه	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
جریان زیست‌محیطی	۱/۱۶	۰/۸۳	۰/۹۱	۱/۵۹	۱/۸۹	۱/۷۴	۲/۶۳	۳/۰۳	۲/۴۹	۱/۴۸	۰/۷۵	۰/۴۷	۱/۵۸



شکل ۹- توزیع مقادیر رژیم جریان اکولوژیکی پیشنهادی مدل River2D و میانگین دبی ماهانه

با توجه به شکل ۹ این نتیجه‌گیری به‌عمل می‌آید که مدل River2D قادر به ارائه رژیم اکولوژیکی رودخانه از دو نقطه‌نظر علمی و عملی می‌باشد که با نتایج تحقیق Fukuda و همکاران (۲۰۱۵)، Schwartz و همکاران (۲۰۱۵) و Yao و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. با توجه به شکل ۶ و ۹، تحلیل اساسی بر نیاز زیست‌محیطی در رودخانه قره‌سو می‌توان ارائه داد. در رودخانه قره‌سو با توجه به اختلاف میان مساحت مطلوب زیستگاهی در دوره‌های کم آبی (خرداد) تا پرآبی (اردیبهشت)، می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که برداشت کمتری از آب رودخانه قره‌سو امکان‌پذیر است و در کم‌آبی‌ها، شرایط بحرانی در میزان مساحت مطلوب زیستگاهی وجود دارد.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در شکل‌گیری طولانی مدت فرآیندهای اکولوژیکی، رژیم جریان رودخانه و حفظ جریان طبیعی جهت دستیابی به یکپارچگی، ضروری قلمداد می‌گردد. اندازه‌گیری حجم زیستگاه مناسب برای حیات گونه‌های مختلف ماهی بر اساس پارامترهای فیزیکی و

www.SID.ir

Archive of SID

هیدرولیکی (Sachser *et al.,* 2017) و در نظر گرفتن اهداف کمی توأم با شرایط زیست‌محیطی اکوسیستم، اهمیت حفاظت از منابع آبی و لزوم بهره‌وری از منابع طبیعی را نمایان می‌سازد (Saadatpour & Heravi, 2016؛ Fukuda *et al.,* 2015؛ Schwartz *et al.,* 2015). به منظور حل برآورد ناصحیح پارامترهای هیدرولیکی در پلان و بستر رودخانه، مدل River2D به‌عنوان روشی علمی و مؤثر برای مدیریت رودخانه‌ها پذیرفته شده است (Khanmohammady Fallah & Shokoohi, 2018؛ Fukuda *et al.,* 2015) که با مدل‌سازی دوبعدی پلان و مقطع عرضی رودخانه و همچنین شبیه‌سازی جریان‌های بحرانی و فوق بحرانی در آبراهه‌های طبیعی مرسوم شده است (Ochs *et al.,* 2018؛ Chou & Chuang, 2011؛ Schwartz *et al.,* 2015). تفاوت مدل هیدرودینامیکی دوبعدی River2D در مقایسه با مدل‌های یک‌بعدی ریاضی، این است که شبیه‌سازی هیدرولیکی مدل River2D قوی‌تر می‌باشد و نمایش گرافیکی بهتری نیز ارائه می‌دهد (Jowett & Duncan, 2012). Naderi و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان دادند مدل River2D در مشارکت دادن توپوگرافی بستر رودخانه، مدل‌سازی دوبعدی و شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه برای اهداف بازگردانی زیستگاه رودخانه، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. روش شبیه‌سازی زیستگاه با مدل‌سازی اثرات تغییر جریان روی زیستگاه آبزیان در رودخانه، رژیم جریان مطلوب زیستگاه‌ها را تعیین می‌کند. در تعیین رژیم جریان زیست‌محیطی رودخانه Formoso برزیل، با استفاده از مدل River2D و متغیرهای فیزیک زیستگاه و شاخص مطلوبیت زیستگاه برای گونه *Hypostomus auroguttatus*، بیان شد که مساحت قابل استفاده وزنی برای ماه‌های اکتبر و سپتامبر به ترتیب معادل ۶۰ درصد و ۷۰ درصد میانگین جریان دراز مدت سالانه رودخانه است (Guedes *et al.,* 2016). Khanmohammady Fallah و Shokoohi (۲۰۱۸) در مطالعه ارزیابی رژیم اکولوژیکی و تعیین جریان زیست‌محیطی رودخانه کاظم‌رود در استان مازندران با استفاده از مدل River2D بیان کردند که رژیم اکولوژیکی پیشنهادی حاصل از مدل River2D در همه ماه‌ها قابل تأمین نمی‌باشد. Kim و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل River2D، جریان زیست‌محیطی رودخانه JeonJu Cheon را برای گونه ماهی *Coreoleuciscus splendidu*، ۱/۸ متر مکعب بر ثانیه و گونه ماهی *Zaccoplatypus*، ۲ متر مکعب بر ثانیه تعیین کردند. Guedes و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل River2D، حداقل و حداکثر جریان زیست‌محیطی را به ترتیب معادل ۲/۸۵ متر مکعب بر ثانیه برای ماه دسامبر و ۴/۱۳ متر مکعب بر ثانیه برای ماه می در رودخانه Formoso برزیل، برآورد کردند.

در این پژوهش ترکیب مدل‌سازی دوبعدی هیدرولیکی با روش شبیه‌سازی زیستگاه به کمک مدل River2D انجام شد. حداقل و حداکثر رژیم جریان اکولوژیکی به ترتیب برای ماه شهریور و اردیبهشت معادل ۰/۴۷ و ۳/۰۳ مترمکعب برثانیه با استفاده از مدل River2D با میانگین دبی سالانه ۱/۵۸ مترمکعب بر ثانیه (معادل ۸۱ درصد میانگین جریان دراز مدت سالانه رودخانه) بایستی در طول رودخانه قره‌سو برای حفظ شرایط مطلوب و جلوگیری از فجایای

www.SID.ir

Archive of SID

زیست‌محیطی برقرار باشد. از جمله مزیت‌های غیر قابل انکار مدل هیدرودینامیکی شبیه‌سازی زیستگاه River2D می‌توان مواردی همچون تعیین جریان زیست‌محیطی ماهانه متغیر و یا یک رژیم اکولوژیکی قابل اعتماد برای حفظ زیستگاه ماهیان و همچنین شبیه‌سازی رفتار طبیعی و درون سالی رودخانه را ذکر کرد (Yao *et al.,* 2018؛ Melcher *et al.,* 2018). از آنجا که مدل River2D پارامترهای محاسباتی را به صورت دوبعدی ارائه و نمایش می‌دهد، به نظر می‌رسد که خروجی‌های این مدل قابلیت بالایی در نمایش تغییرات زیستگاه برای گونه موردنظر را دارند. 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 عمدتا مرتبط با هزینه-اثربخشی، بهره‌وری در زمان، تخصص مورد نیاز و در دسترس بودن اطلاعات، محدود شده است.

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، دوستان عزیز سرکارخانم مهندس مریم محمدی و مهندس سعید نیک‌قلب، همراهی و همکاری تیم مطالعات میدانی (مهندس صابرجمالی و مهندس حسین بلنج)، کمال امتنان و قدردانی را دارند.

References:

Abdoli A., Naderi, M., 2009. Biodiversity of Fishes of the Southern Basin of the Caspian Sea. Abzian Scientific Publication. 242 p. (In Persian)

Asadi, H., Sattari., M, 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, 1-9. (in Persian)

Ayyoubzadeh, S.A., Sedighkia, M., Hajiesmaeili, M., 2018. Ecohydraulics and Simulation of River Habitats.Water Engineering Research Institude Tarbiat Modares University. 252 p. (In Persian)

Baeza Sanz, D., Lopez Santiago, C.A., Atienzar Pertusa, I., Novo Ruiz, P., 2018. Proposal of Environmental Flow Assessment Criteria for Exceptional Hydrologic Situations. Journal of Environmental Engineering 144, 04018044.

Chou, W.C., 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.

Fukuda, S., Tanakura, T., Hiramatsu, K., Harada, M., 2015. Assessment of spatial habitat heterogeneity by coupling data-driven habitat suitability models with a 2D hydrodynamic model in small-scale streams. Ecological informatics 29, 147-155.

Guedes, H.A., Silva, D.D., Dergam, J.A., Elesbon, A.A., 2016. Ecohydrological modeling and environmental flow regime in the Formoso River, Minas Gerais State, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências 884, 2429-2440.

Hashemi, S., Tabatabai, M. R. M., Mousavi-Nadoushani, R. 2016. Brown trout functional flows range, based on morphologic and physical habitat

www.SID.ir

Archive of SID

parameters in Lar Headwaters. Natural Environment, Natural Resources of Iran 69, 865-880. (in Persian)

Hayes, J.W., Shearer, K.A., Goodwin, E.O., Hay, J., Allen, C., Olsen, D.A., Jowett, I.G., 2015. Test of a benthic macroinvertebrate habitat—flow time series model incorporating disturbance and recovery processes. River research and applications 31, 785-797.

Im, D., Kang, H., 2011. Two-dimensional physical habitat modeling of effects of habitat structures on urban stream restoration. Water Science and Engineering 4, 386-395.

Khanmohammady Fallah, S., Shokoohi, A., 2018. Using RVA Model for Defining Rivers' Ecological Regime for Determining Environmental Flow. Journal of Iran-Water Resources Research 14, 231-241. (in Persian)

Kim, K.O., Park, Y.K., Kang, J.I., Lee, B.S., 2016. Estimation of Ecological Flow and Habitat Suitability Index at Jeonju-Cheon Upstream. Journal of Korean Society of Environmental Engineers 38, 47-55.

Ksiazek, L., Wos, A., Florek, J., Wyrebek, M., Mlynski, D., Walega, A. 2019. Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisloka river, Poland: case study. Environmental Monitoring and Assessment 191, 254.

Jowett, I.G., Hayes, J.W., Duncan, M.J., 2008. A guide to instream habitat survey methods and analysis. NIWA Science and Technology Series No. 54. 121 p.

Jowett, I.G., Duncan, M.J., 2012. Effectiveness of 1D and 2D hydraulic models for instream habitat analysis in a braided river. Ecological Engineering 48, 92-100.

Maddock, I., Harby, A., Kemp, P., Wood, P.J., 2013. Ecohydraulics: an integrated approach. John Wiley & Sons.

Melcher, A., Hauer, C., Zeiringer, B., 2018. Aquatic Habitat Modeling in Running Waters. In Riverine Ecosystem Management. Springer, Cham. pp. 129-149.

Naderi, M.H., Zakerinia, M., 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, 205-222. (in Persian)

Ochs, K., Rivaes, R.P., Ferreira, T., Egger, G., 2018. Flow Management to Control Excessive Growth of Macrophytes–An Assessment Based on Habitat Suitability Modeling. Frontiers in plant science 9, 356.

Saadatpour, M., Heravi, A. 2016. Study of Environmental Performance Criteria in Karkheh Reservoir with Enhanced Model of CE-QUAL-W2 (V3.72). Journal of Iran-Water Resources Research 12, 50-64 . (in Persian)

Sachser, F., Nopp-Mayr, U., Zohmann, M., Schweiger, A.K., Grünschachner-Berger, V., Immitzer, M., 2017. Searching the right tie—Expert-based vs. statistical niche modeling for habitat management at the alpine treeline ecotone. Ecological Engineering 100, 107-119.

Schwartz, J.S., Neff, K.J., Dworak, F.E., Woockman, R.R., 2015. Restoring riffle-pool structure in an incised, straightened urban stream channel using an ecohydraulic modeling approach. Ecological Engineering 78, 112-126.

Sedighkia, M., Ayyoubzadeh, S.A., Hajiesmaeli, M. 2017. Modification of Tennant and Wetted Perimeter Methods in Simindasht Basin, Tehran Province. Civil Engineering Infrastructures Journal 50, 221-231.

Steffler, P., 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.

Yao, W., Liu, H., Chen, Y., Zhang, W., Zhong, Y., Fan, H., Bamal, S, 2017. Simulating Spawning and Juvenile Rainbow Trout (Oncorhynchus mykiss) Habitat in Colorado River Based on High-Flow Effects. Water 9, 150.

www.SID.ir