تحقیقات آب و خاک ایران | دوره ۵۲ | شماره ۱۱ | بهمن ۱۴۰۰ (ص ۲۸۱۴-۲۷۸۹)

https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2021.332402.669103

(مقاله علمی - پژوهشی)

Investigating the Relationships between Hydromorphological and Hydrological Characteristics on Habitat Suitability under Scenarios of Changing the Environmental Flow Regime based on Kordan River Ecosystem Restoration

MOHAMMAD HASAN NADERI[*1], MASOUD POURGHOLAM-AMIJI[2], MOJTABA KHOSHRAVESH[3], MEYSAM SALARIJAZI[1], EFAT MOHAMMADI[4], MOHAMMAD GHOLIZADEH[5]

1. Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
4. Water Engineering Department, Faculty of Water and Soil Engineering, Zabol University, Zabol, Iran.
5. Department of Fisheries Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Golestan, Iran.

(Received: Oct. 15, 2021- Revised: Nov. 15, 2021- Accepted: Nov. 27, 2021)

ABSTRACT

River restoration and protection of the natural and ecological life of the river in besides to using it for various purposes is one of the most prominent areas of applied water resources science. Environmental flow provision is recognized as a prominent tool to reduce the negative effects of regulation river flow and conservation, restoration, and improvement of natural river habitat quality in watershed management and integrated water resources management. In this study, in order to evaluate and estimate the environmental flow regime of Kordan River, the Flow Duration Curve method based on hydrological statistics of the hydrometric station during the 35-year statistical period (1985-2020) and MesoHABSIM hydromorphocological model based on field studies and observations were used and accordingly, the available habitat suitability of the target fish species in different scenarios of the flow regime was examined. The results showed that the distribution of the minimum amount of ecological flow during the year is relatively uniform and within the river basin flow range (maximum of 1.8 m^3/s in April and minimum of 0.3 m^3/s in October). However, the optimal ecological flow distribution to provide optimal hydromorphological habitats throughout the year is unequal. Also, the maximum required amount of optimal ecological flow in May is equal to 3.6 m^3/s, and the minimum amount of optimal ecological flow in October is equal to 0.7 m^3/s. On the other hand, according to the analysis, at most times of the year, flow less than the average annual flow in the studied river which is equal to 3.95 m^3/s, while these flows are insufficient to meet the ecological needs of aquatic. The results of the present study show that changes in the hydromorphology of Kordan River due to long-term regulation of river flow, lead to changes in the distribution of optimal morphological habitats. It is noteworthy that the MesoHABSIM model simulates the desirability and availability of fish species habitats for different scenarios of flow regime and river morphology and can also be used in river ecological restoration projects and environmental flow determination.

Keywords: Habitat Suitability Curve, Natural Flow Regime, River Ecology, Regulation River Flow, Water Resources.

* Corresponding Author Email: naderigau@gmail.com

بررسی روابط بین مشخصه‌های هیدرومورفولوژیکی و هیدرولوژیکی بر میزان مطلوبیت زیستگاه تحت سناریوهای تغییر رژیم جریان زیست‌محیطی مبتنی بر احیای اکوسیستم رودخانه کردان

محمدحسن نادری*[۱]، مسعود پورغلام آمیجی[۲]، مجتبی خوش‌روش[۳]، میثم سالاری‌جزی[۱]، عفت محمدی[۴]، محمد قلی‌زاده[۵]

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زارعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران.

۵. گروه شیلات، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد کاووس، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۲۳- تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۸/۲۴- تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۹/۶)

چکیده

احیای رودخانه، حفظ حیات طبیعی و بوم شناختی رودخانه در کنار بهره‌برداری از آن برای مصارف مختلف، یکی از برجسته‌ترین حوزه‌های علمی کاربردی منابع آب است. تأمین جریان زیست‌محیطی، به‌عنوان ابزاری برجسته برای کاهش تأثیرات منفی تنظیم رودخانه و حفاظت، احیا و بهبود کیفیت زیستگاه رودخانه‌های طبیعی در مدیریت حوزه‌های آبخیز و مدیریت یکپارچه منابع آب، شناخته شده است. در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی و برآورد رژیم جریان زیست‌محیطی رودخانه کردان، روش منحنی تداوم جریان بر اساس آمار هیدرولوژیکی ایستگاه هیدرومتری در طول دوره آماری ۳۵ ساله (از سال آبی ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۹) و مدل هیدرومورفواکولوژیکی MesoHABSIM، بر پایه مطالعات و مشاهدات میدانی مورد استفاده قرار گرفتند و مطابق با آن، مطلوبیت زیستگاه در دسترس گونه ماهی هدف در سناریوهای مختلف رژیم جریان، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد توزیع حداقل میزان جریان اکولوژیکی در طول سال، نسبتا یکنواخت و در محدوده جریان پایه رودخانه است (حداکثر مقدار ۱/۸ مترمکعب بر ثانیه در ماه فروردین و حداقل ۰/۳ مترمکعب بر ثانیه در ماه مهر). با این حال، توزیع جریان مطلوب اکولوژیکی برای فراهم کردن زیستگاه‌های هیدرومورفولوژیکی مطلوب در طول سال، نابرابر است. همچنین حداکثر مقدار مورد نیاز جریان اکولوژیکی مطلوب در اردیبهشت برابر با ۳/۶ مترمکعب بر ثانیه و کمترین مقدار جریان اکولوژیکی مطلوب در مهر برابر با ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه است. از طرفی دیگر، با توجه به تجزیه و تحلیل صورت گرفته، در بیشتر اوقات سال، دبی کمتر از میانگین جریان سالانه در رودخانه مورد مطالعه که برابر ۳/۹۵ مترمکعب برثانیه می باشد، جاری است و این در حالی است که این جریان‌ها برای تامین نیازهای اکولوژیکی آبزیان، ناکافی است. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که تغییرات هیدرومورفولوژی رودخانه کردان در اثر تنظیم طولانی‌مدت جریان رودخانه، منجر به تغییر در توزیع زیستگاه‌های مطلوب مورفولوژیکی می‌شود. قابل ذکر است مدل MesoHABSIM، مطلوبیت و در دسترس بودن زیستگاه گونه‌های ماهی را برای سناریوهای مختلف رژیم جریان و مورفولوژی رودخانه را به خوبی شبیه‌سازی کرده و نیز در پروژه‌های احیای اکولوژیکی رودخانه و تعیین جریان زیست‌محیطی، می‌تواند کاربرد داشته باشد.

واژه‌های کلیدی: اکولوژی رودخانه، تنظیم جریان رودخانه، رژیم جریان طبیعی، منابع آب، منحنی مطلوبیت زیستگاه.

مقدمه

از دیرباز، بسیاری از رودخانه‌ها برای کنترل طغیان سیلاب، تامین انرژی برقابی، تفرج، آبیاری مزارع کشاورزی و تأمین آب شرب، تنظیم شده‌اند. تاکنون ۲ میلیون و ۸۰۰ هزار سد بر روی ۶۳ درصد از رودخانه‌های اصلی جهان ساخته شده است (Perry *et al.*, 2021; Loire *et al.*, 2019). تغییر جریان هیدرولوژی رودخانه‌ها ناشی از ساخت و بهره‌برداری از سد، منجر به تخریب و اثرات سو بر پایداری اکوسیستم رودخانه می‌شود. مطالعات مختلف نشان داده که سدها اثرات قابل توجه، اما متغیری بر رژیم‌های جریان پایین‌دست رودخانه دارند (Magilligan *et al.*, 2016; Mianabadi *et al*, 2021) و علاوه بر این، رژیم جریان دینامیکی طبیعی رودخانه‌ها را مختل می‌کنند (Gronsdahl *et al.*, 2021). از سوی دیگر، رژیم رودخانه و رژیم آب‌شناسی، ساختار گونه‌های ساحلی و آبزی و زیست‌بوم آنها را تحت تأثیر

* نویسنده مسئول: naderigau@gmail.com

قرار می‌دهد. در این راستا در دهه‌های اخیر، کمبود بی‌سابقه منابع آب، آلودگی و تخریب اکوسیستم‌ها در بسیاری از نقاط جهان، محققان و سیاست‌گذاران را وادار به وقف تلاش بیشتر در راستای حفظ و احیا سلامت اکولوژیکی سامانه‌های آبی کرده تا به توازن میان نیاز انسان و طبیعت دست یابند (Ban *et al.*, 2019; Arthington *et al.*, 2018; Mathers *et al.*, 2020; Naderi *et al.*, 2020b). حفظ و بهبود سلامت زیست‌محیطی رودخانه از طریق احیای رودخانه، مستلزم ارزیابی دقیق شرایط فعلی بوم‌شناختی زیست‌بوم رودخانه است. احیای رودخانه به صورت کمک به ترمیم ساختار و عملکرد یک زیست‌بوم رودخانه‌ای تخریب شده، از طریق جایگزینی اجزای جدید با اجزای از بین رفته، تخریب شده و یا در معرض خطر و همچنین برقراری مجدد فرآیندهای ضروری برای پشتیبانی از زیست بوم طبیعی و بهبود خدمات زیست محیطی که توسط رودخانه فراهم می شود، تعریف می شود (Magilligan *et al.*, 2016; Naderi *et al.*, 2020b; Bennetsen *et al*, 2021). عمدتا هدف احیای رودخانه، بازگرداندن رودخانه به شرایط طبیعی است (Stoffers *et al.*, 2021؛ Wohl *et al.*, 2015).

با توجه به تغییرات احتمالی اکولوژیکی سدها در سیستم‌های رودخانه‌ای، محققان، ترمیم و احیای یک رژیم جریان طبیعی‌تر را توصیه کرده‌اند (Magilligan *et al.*, 2016؛ Naderi *et al.*, 2020a). رژیم طبیعی رودخانه، متغیر است و این تنوع برای حفظ گونه‌های بومی و به طور کلی تنوع‌زیستی، بسیار مهم است. از این لحاظ، رژیم جریان طبیعی نقش اساسی در شکل‌گیری زیستگاه‌های رودخانه‌ای و جوامع زیست‌شناختی، تحریک استراتژی‌های تاریخ زندگی گونه‌های آبزی، حفظ اتصال جانبی و طولی و کنترل تهاجم گونه‌های مهاجم و غیربومی در رودخانه‌ها دارد (Schmidt *et al.*, 2001؛ Robinson *et al.*, 2004). لذا ضروری است که احیای رودخانه در قالب مدیریت جامع و پایدار منابع آب و منابع طبیعی دیده شود. از آن جا که احیای رودخانه قسمتی از سامانه مدیریت منابع آب می‌باشد، این امر می‌تواند با دیگر جنبه‌های سامانه نیز مرتبط شود.

بر اساس بررسی منابع علمی، انواع اقدامات احیای رودخانه شامل: بازپیوسته‌سازی سیلابدشت، اصلاح مسیر رودخانه، تثبیت سواحل رودخانه، مدیریت سواحل رودخانه، حذف یا اصلاح سد، اصلاح زیستگاه رودخانه‌ای، مدیریت کیفیت آب رودخانه، اصلاح بستر و مسیر رودخانه، مدیریت گونه‌های آبزی و اصلاح جریان رودخانه (احیای رژیم جریان) است (Thompson *et al.*, 2018؛ Owusu *et al.*, 2021؛ Magilligan *et al.*, 2016). به طور کلی، احیای رژیم جریان، شامل تعیین، حفاظت و مدیریت جریان‌های زیست‌محیطی (جریان اکولوژیکی) و اعمال رهاسازی جریان موردنیاز از سد برای حفظ جریان پایه لازم در آبراهه (Yu *et al.*, 2021) و حفظ الگوی طبیعی پیوستگی طولی (بالادست و پایین‌دست رودخانه) و عرضی (سیلابدشت) برای حیات جمعیت بسیاری از گونه‌های گیاهان، بی‌مهرگان و ماهیان در آبراهه می‌باشد (Bennetsen *et al.*, 2021؛Naderi *et al.*, 2019).

اخیراً، توجه به احیای رودخانه‌ها با تأکید بر جنبه‌های زیست‌محیطی رودخانه‌ها، در حال افزایش است (Stoffers *et al.*, 2021)، اما شروع احیای رودخانه نیاز به ارزیابی مناسب جریان زیست‌محیطی موردنیاز اکوسیستم دارد. به‌طور کلی، «جریان اکولوژیکی» به «جریان اصلی و مناسب زیست محیطی» تقسیم می‌شود. اولی «حداقل جریان برای نیازهای اساسی اکوسیستم های رودخانه» است و دومی «مناسب‌ترین جریان برای ایجاد زیستگاه مطلوب رودخانه‌ها» می‌باشد. در دهه‌های اخیر، مدیریت جریان زیست‌محیطی شاهد پیشرفت‌های چشم‌گیری در زیربنای علمی بوده است (Theodoropoulos *et al.*, 2018)، با این حال، در عمل، اثربخشی ارزیابی و اجرای جریان‌های زیست‌محیطی هنوز با چالش‌هایی از جمله: (۱) عدم اثربخشی در احیای اکولوژیکی (عدم پیشرفت مورد انتظار) و (۲) تعارضات بین تقاضای آب زیست‌محیطی و منافع اقتصادی و اجتماعی، روبرو است (Arthington *et al.*, 2018 ؛Thompson *et al.*, 2018). در بسیاری از کشورهای کم آب، تقاضای آب بیش از میزان تأمین آب است و از این رو تخصیص نیاز جریان زیست‌محیطی، محدود و اغلب نادیده گرفته می‌شوند (Padikkal *et al*, 2019؛ Yang *et al.*, 2021). در دهه‌های اخیر، پیچیدگی تعیین رژیم جریان موردنیاز به تخصیص منابع آب بین مصرف‌کنندگان و گرودارن، موجب محدودیت پیاده‌سازی جریان‌های زیست‌محیطی به‌عنوان یک هسته اصلی مدیریت یکپارچه منابع آب شده است (Perry *et al.*, 2021؛ Mianabadi *et al.*, 2021).

تغییرات زمانی جریان‌های طبیعی، عنصر اساسی برای حفظ سلامت زیست محیطی یک رودخانه با استفاده از طیف وسیعی از طرح‌های جریان زیست‌محیطی که شامل تنوع درون سالانه و بین سالانه رژیم جریان طبیعی است، بر فرآیندهای ژئومورفیک، زیستگاه فیزیکی، کیفیت آب، دما و فعل و انفعالات زیست‌شناختی، ساختار و فراوانی پوشش گیاهی حاشیه رودخانه و سلامتی اکوسیستم رودخانه تاثیرگذار است (Joseph et al., 2021؛ Virbickas *et al.*, 2020). در تلاش برای کاهش این تأثیرات و حمایت از اکوسیستم‌های پایدار، رهاسازی‌های مدیریت شده آب برای تأمین نیازهای جریان رودخانه یا «جریان‌های زیست‌محیطی» در سال‌های اخیر، به طور فزاینده‌ای مورد توجه

جوامع مدیریت منابع آب و احیای رودخانه قرار گرفته است. از سوی دیگر تنظیم جریان زیست‌محیطی برای هر رودخانه تنظیم‌شده باید متناسب با تغییرات رژیم جریان، اثرات زیست‌محیطی مرتبط و وضعیت اکولوژیکی موردنظر در آینده از اکوسیستم آبی باشد (Koutrakis *et al.*, 2019؛ Loire *et al*, 2019). در تحقیقات Magilligan *et al.*, (2016) و Ban *et al.*, (2019) به این مطلب اشاره شده است که تاثیر پروژه‌های احداث سدهای بزرگ بر جریان‌های کم تابستانه، بسیار زیاد است و نیز این نگرانی درباره میزان آب باقیمانده در رودخانه برای حفاظت از ماهی و حیات وحش و موقعیت‌های تفریحی از آن، وجود دارد. در این راستا مطالعات بسیاری در مورد ارتباط ماهی‌ها با متغیرهای جریان ازجمله مورفولوژی و جریان رودخانه‌ها و نیاز جریان درون رودخانه‌ای، انجام شده است (Gronsdahl *et al.*, 2021؛ Bennetsen *et al.*, 2021؛ Yang *et al.*, 2021). بررسی این عوامل، این واقعیت را برجسته می‌کند که تأثیرات منفی رژیم‌های جریان تغییر یافته روی پوشش گیاهی، ممکن است با بازیابی اجزای رژیم جریان طبیعی، معکوس شود.

یک چالش اساسی برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی، تعیین این است که چه مقدار از رژیم اصلی جریان باید به پایین‌دست رودخانه و بر روی دشت‌های سیلابی آن اختصاص یابد تا ویژگی‌های ارزشمند یک اکوسیستم حفظ شود. هدف از نسخه تجویزی جریان زیست‌محیطی باید تا حد ممکن تقلید از رژیم جریان طبیعی باشد (Karimi *et al.*, 2021). آنچه که باید مدنظر قرار گیرد این است که رژیم‌های جریان باید نیازهای آستانه‌های جریان، اعم از آستانه دبی زیست‌محیطی، آستانه دبی مقطع پر و آستانه دبی رسوبی را برطرف کرده و نیز نیازهای فرآیندهای زیستی و هیدرومورفولوژیک را تأمین نماید. به همین دلایل، برای حفظ سلامت اکولوژیکی یک رودخانه، نسخه‌های جریان بین سالانه و درون سالانه، مورد نیاز است (Padikkal *et al.*, 2019؛ Mouton *et al.*, 2009؛ King *et al.*, 2009).

مشکلات فعلی در تعیین جریان اکولوژیکی رودخانه‌ها در کشورهای مختلف، تناسب نامناسب روش‌ها و در نظر نگرفتن کافی عوامل محیطی است. بررسی منابع علمی مختلف نشان می‌دهد کاربرد روش‌های هیدرولوژیکی به تنهایی در برآورد رژیم جریان اکولوژیکی، مشکل‌ساز به نظر می‌رسد و بایستی با احتیاط مورد استفاده قرار گیرند (Karimi *et al.*, 2021؛ Naderi *et al.*, 2020a). از سوی دیگر، شناخت و بررسی ویژگی‌های زیستگاه انتخابی ماهیان می‌تواند در مطالعات برآورد رژیم جریان زیست‌محیطی و در مدیریت اکوسیستمی و اقدامات احیای اکولوژیکی رودخانه‌ها مفید واقع شود (Gholizadeh *et al.*, 2017؛ Gronsdahl *et al.*, 2021). در همین راستا، ابزارهای مدل‌سازی مختلفی در دسترس قرار دارد که یکی از آنها شبیه‌سازی زیستگاه است. اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی نیاز به درک ویژگی‌های بیولوژیکی و شرایط موردنیاز زیستگاه آبزیان بومی رودخانه دارد. از جمله مدل‌های اکوهیدرولیکی-اکوهیدرودینامیکی-هیدرومورفواکولوژیکی مطلوبیت زیستگاه می‌توان به PHABSIM، River2D، MesoHABSIM، CASiMiR، SEFA و inSTREAM اشاره کرد. همچنین باید به این مطلب اشاره کرد که مدل‌های شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه از متغیرهای هیدرولیکی مانند (سرعت آب، عمق جریان و بستر) برای ارزیابی مطلوبیت زیستگاه استفاده می‌کنند (Adamczyk *et al.*, 2019؛ Gronsdahl *et al.*, 2021)، اما فاقد توانایی ارزیابی اثر کیفیت آب هستند.

با احیای فرایندهای رودخانه‌ای در امتداد رودخانه، رهاسازی جریان زیاد می‌تواند به طور بالقوه زیستگاه‌های فیزیکی را نسبت به اقدامات ترمیم و احیای هیدرومورفولوژیکی، بهبود بخشد (Wegscheider *et al.*, 2020؛ Bennetsen *et al.*, 2021). گزارش تحقیقات علمی تا حد زیادی بر لزوم مدیریت جریان‌های حداکثر به منظور تقلید از اثرات سیل طبیعی تا حد امکان توافق دارند (Virbickas *et al.*, 2020؛ Loire *et al.*, 2019). انتشار و تخلیه جریان‌های زیاد یا «جریان‌های شستشو» ابزاری برای مدیریت رهاسازی جریان از سد است که هدف از انجام آن عمل در مورفولوژی رودخانه‌های پایین‌دست سدها برای دستیابی به اهداف زیست‌محیطی است (Robinson *et al.*, 2004). در بیشتر موارد، جریان‌های رهاسازی از سد، با هدف تقلید از یک دوره جریان طبیعی زیاد انجام می‌شوند و انتخاب پارامترهای کلیدی مانند اندازه و مدت زمان، مسائل متعددی را ایجاد می‌کند. به‌طور خاص، این پارامترها باید برای محاسبه اتلاف انرژی جریان رهاسازی یافته هنگام حرکت در پایین‌دست تعیین شوند، در نتیجه منجر به کاهش اثربخشی در امتداد رودخانه (کاهش ظرفیت حمل مواد معلق) می‌شود (Stoffers *et al.*, 2021؛ Perry *et al.*, 2021). انتخاب دبی جریان بستگی به سرعت و تنش برشی بستر دارد که برای القای روند مورفولوژیکی موردنظر لازم است (Gronsdahl *et al.*, 2021). این نکته را باید مدنظر قرار داد که تعیین پیش‌بینی زمان مورد نیاز برای رهاسازی جریان دشوار است، زیرا به پارامترهای مختلفی مانند مورفولوژی زیستگاه (به ویژه واحدهای مزوزیستگاه) بستگی دارد (Magilligan *et al.*, 2016). از سوی دیگر، کاهش فراوانی سیلاب‌های کوچک باعث مسدود شدن بسترهای آبرفتی درشت توسط رسوبات ریز می‌شود، که می‌تواند عملکرد بیولوژیکی را به‌طور قابل توجهی مختل کند و باعث کاهش جمعیت ماهی شود (Schmidt *et al*, 2001).

همچنین جریان‌های حداکثر دارای اهداف مختلف و گاه متعددی هستند، از جمله کاهش گرفتگی در مناطق تخم‌ریزی ماهیان، بهبود شرایط زیستگاه عمومی، کنترل تکثیر جلبک‌ها در کانال رودخانه و نگهداری پوشش نوارسبز ساحلی آبراهه (Robinson *et al*, 2004؛ Mathers *et al.*, 2020).

بررسی منابع نشان می‌دهد که پژوهشگران مختلفی به بررسی و تحلیل مباحث مربوط به کاربرد شاخص‌های اکوهیدرولیکی و هیدروموفولوژیکی در تحلیل جریان زیست‌محیطی، نقش رژیم هیدرولوژیکی و متغیرهای هیدرولیکی بر میزان مطلوبیت زیستگاه جوامع بیولوژیکی، مدیریت جریانات زیست‌محیطی برای پایداری و احیا و بازطبیعی سازی اکوسیستم‌های رودخانه‌ای با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی زیستگاه، در طی سال‌های اخیر پرداخته‌اند که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

Ban *et al.*, (2019) اثر سد سه دره در کشور چین بر روی رژیم جریان پایین‌دست و جمعیت ماهی کپور را از طریق بررسی‌های سیستماتیک شاخص‌های مختلف هیدرولوژی پیش و پس از احداث سد ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که احداث سد در الگوهای جریان طبیعی اختلال ایجاد می‌کند و مقدار جریان در مناطق پایین‌دست را به مقیاس‌های کم، محدود می‌کند و این در حالی است که این جریان‌ها برای تامین نیازهای اکولوژیکی گونه ماهی، ناکافی بوده و جمعیت و پراکنش ماهیان، به شدت تحت تأثیر حضور سد قرار گرفته است. Bennetsen *et al.*, (2021) برای ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریت رودخانه و تجزیه و تحلیل اقدامات احیای رودخانه فلاندر بلژیک از مدل‌های مطلوبیت زیستگاه بی‌مهرگان استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد، رابطه قوی بین عملکرد مدل‌های مطلوبیت، شاخص زیست‌شناختی بی‌مهرگان و متغیرهای هیدرومورفولوژیکی زیستگاه برای بررسی جنبه‌های مختلف سیستم رودخانه، وجود دارد. در تحقیق دیگری، Naderi *et al.*, (2019) با کاربرد روش‌های مختلف هیدرولوژیکی و مدل اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه SEFA در ارزیابی جریان زیست‌محیطی و شناسایی شرایط مطلوب زیستگاه سیاه‌ماهی رودخانه قره‌سو استان گلستان، بیان داشتند، با برقراری مستمر جریان مطلوب زیست‌محیطی به‌منظور نگهداری از تنوع زیستی آبزیان و حفظ اجزای مهم اکولوژیکی رژیم جریان طبیعی با کاربرد مدل مدیریت زیستگاهی، نه‌تنها شرایط اکولوژیکی و زیستگاه‌های رودخانه‌ای بهبود می‌یابد، بلکه باعث ایجاد فرصت بهتری برای انعطاف‌پذیری در سطح مدیریت زیستی رودخانه و موفقیت‌آمیز بودن پروژه‌های احیا و بازطبیعی‌سازی در طرح‌های توسعه منابع آب در سامانه رودخانه می‌گردد. در پژوهشی دیگر، Koutrakis *et al.*, (2019) با اندازه‌گیری مشخصه‌های هیدرومورفولوژیکی (عمق آب، دبی جریان و بستر) و نمونه‌برداری از ماهیان برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی حوزه آبریز مدیترانه‌ای رودخانه نستوس در یونان با کاربرد مدل شبیه‌سازی زیستگاه MesoHABSIM، بیان داشتند، پتانسیل جریان رودخانه به طور مؤثری در تنوع زیستگاه‌های مورفولوژیکی و حفظ تعادل فرآیندهای اکولوژیکی تأثیرگذار بوده و با برقراری سرعت جریان و عمق آب مطلوب اکولوژیکی (توزیع جریان اکولوژیکی مطلوب)، حداکثر زیستگاه بهینه و مطلوب در دوره‌های مختلف زندگی گونه ماهی شاخص در زیستگاه‌های هیدروموفولوژیکی، فراهم می‌شود. Adamczyk *et al.*, (2019) در ارزیابی زیستی و مدیریت منابع آبی در حوضه رودخانه استورادی دمونته در شمال‌غربی ایتالیا از مدل MesoHABSIM، برای بررسی تغییر در زیستگاه‌های هیدروموفولوژیکی مطلوب آبزیان (گوداب و خیزاب) در اثر تنظیم جریان آب، استفاده کردند. نتایج تجزیه و تحلیل آنها نشان داد، مدل MesoHABSIM، از توانایی مناسبی برای بررسی واکنش ماهی در برابر تغییرات شرایط محیطی و برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب در مقیاس رودخانه و حوضه، برخوردار است. در تحقیق دیگری، Theodoropoulos *et al.*, (2018) روش‌های هیدرولوژیکی و مدل دو بعدی هیدرودینامیکی زیستگاه را برای برآورد جریان مورد نیاز زیست‌محیطی در پایین‌دست سد ماراتن یونان، مورد مقایسه قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد چارچوب یکپارچه‌سازی با پیوند روش‌های هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی هیدرولیکی- هیدرودینامیکی زیستگاه، می‌تواند مبنای قابل اطمینان‌تری برای بهره‌برداری و عملکرد بهینه مخزن سد برای نیاز موجودات آبزی و حفاظت از اکوسیستم رودخانه و مدیریت پایدار منابع آب را فراهم کند. Virbickas *et al.*, (2020) در بررسی جریان رهاسازی مورد نیاز زیست‌محیطی از نیروگاه‌های برقابی کوچک برای پایداری جمعیت گونه‌های کپورماهیان در سه رودخانه لیتوانی از مدل MesoHABSIM، جهت مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد نیروگاه‌های برقابی به دلیل عدم رهاسازی جریان زیست‌محیطی به میزان قابل‌قبول در دوره‌های کم جریان در سال‌های خشک، تأثیر قابل توجهی بر در دسترس بودن زیستگاه مطلوب ماهیان و هیدرومورفولوژی در پایین‌دست رودخانه دارند. با توجه به مشکلات و چالش‌های مختلف اجتماعی و اقتصادی که در زمینه احداث سد بهشت‌آباد برای انتقال آب از حوضه کارون به حوضه زاینده‌رود وجود دارد، Hayatgheibi *et al.*, (2021) نیاز آبی زیست محیطی رودخانه‌های کوهرنگ، بهشت‌آباد و کارون در

بالادست و پایین‌دست سد بهشت‌آباد را با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی تنانت، تنانت اصلاح شده، منحنی تداوم جریان و انتقال منحنی تداوم جریان، مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد با توجه به نتایج روش‌های مختلف مورد استفاده، جریان آب رودخانه کارون برای تأمین حداقل نیازهای آب زیست‌محیطی رودخانه در برخی ماه‌ها و سال‌ها، کافی نمی‌باشد. همچنین در تحقیق دیگری، Karimi *et al.*, (2021) با ارزیابی مقایسه‌ای مقادیر جریان زیست‌محیطی رودخانه زهره در جنوب‌غربی ایران با استفاده از روش‌های مختلف هیدرولوژیکی به این مطلب اشاره داشتند که الگوی جریان زیست‌محیطی اختصاص یافته برای حفاظت از اکوسیستم رودخانه، زمانی قابل اعتماد و قابل قبول است که با تغییرات متوسط جریان رودخانه در دوره‌های خشک و مرطوب در طول سال، مطابقت داشته باشد و از آن پیروی کند.

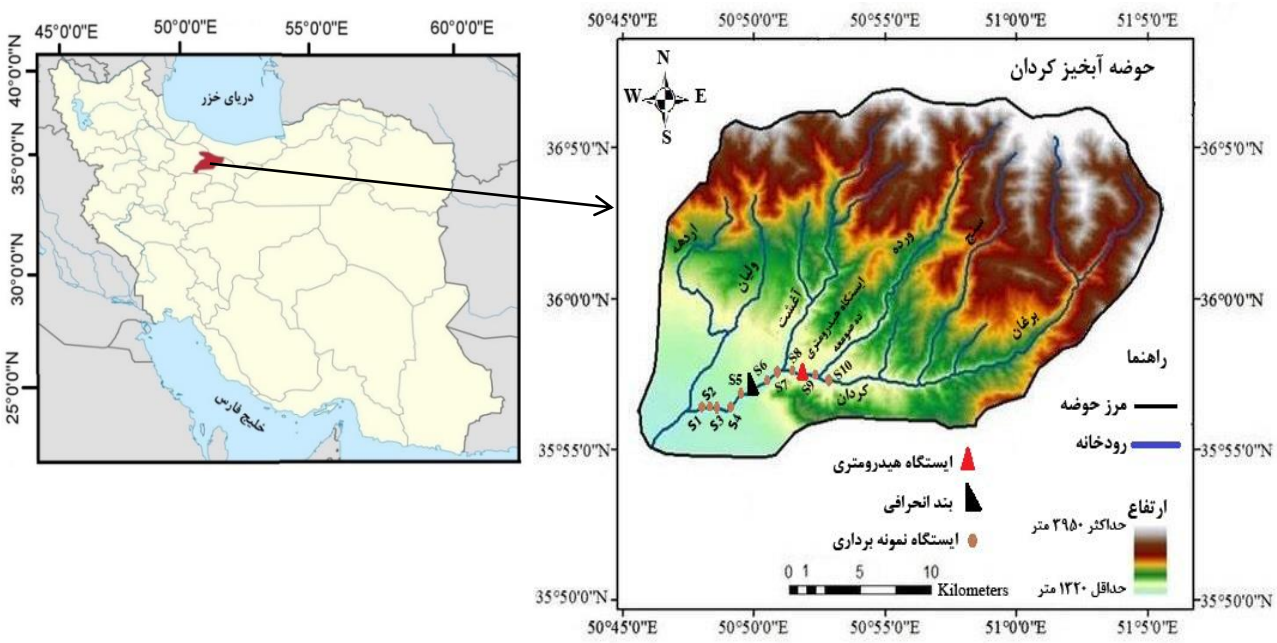
رودخانه کردان، یکی از رودخانه‌های مهم و دائمی در استان البرز و حوضه آبریز دریاچه نمک می‌باشد. علی‌رغم نقش مهم این رودخانه در منطقه به عنوان منبع تأمین آب برای مصارف مختلف، تاکنون در ایران مطالعه‌ای در خصوص بهبود و احیای فرآیندهای هیدرولوژیکی تأثیرگذار بر هیدرومورفولوژی و اکولوژی این رودخانه، صورت نگرفته است. از سوی دیگر، احداث بند انحرافی کردان (سدکردان) بر روی این رودخانه با هدف کنترل سیلاب و تامین آب شرب و انتقال آب به مزارع و شبکه آبیاری هشتگرد و نظرآباد بر روی حوضه رودخانه کردان، پیامدهای نامطلوبی را برای جریان رودخانه و رژیم رسوبات آن به همراه داشته است و نیز تاثیرات عمده‌ای در ژئومورفولوژی و اکولوژی رودخانه در پایین‌دست، داشته است و همچنین تاثیرات خاصی بر روی تنوع‌زیستی از جمله جمعیت ماهیان و کاهش حقابه زیست‌محیطی تالاب صالحیه نظرآباد، داشته است (Tabatabaei *et al.*, 2015؛ Morid *et al.*, 2016). لذا بررسی اثرات تنظیم جریان بند انحرافی در بالادست بر رژیم هیدرولوژیکی و زیستگاه‌های ماهی به منظور برآورد سطوح مختلف رژیم جریان اکولوژیکی با کاربرد و مقایسه مدل‌های هیدرولوژیکی، اکوهیدرودینامیکی و هیدرومورفواکولوژیکی جهت احیای اکوسیستم رودخانه کردان در بازه‌های پایین‌دست، هدف پژوهش حاضر، قلمداد می‌شود. بنابراین این پژوهش می‌تواند در ارزیابی میزان جریان حداقل، بهینه و مطلوب زیست‌محیطی رودخانه با توجه به تغییرات رژیم هیدرولوژیکی، شاخص‌های هیدرولیکی و ویژگی‌های فیزیک زیستگاه موجود، تأثیرگذار باشد. با درنظر گرفتن این موضوع که بهره‌گیری از مدل‌سازی هیدرومورفواکولوژیکی- مزوزیستگاهی با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه مانند مدل MesoHABSIM که تغییرات منطقه قابل استفاده وزنی در رودخانه و اثر نوسان‌های جریان سالانه بر زیستگاه رودخانه، دقیق‌تر و واضح‌تر مشخص می‌شود، در محاسبه میزان تخصیص آب برای تأمین نیاز آبی اکولوژیکی جوامع آبزی و تجزیه و تحلیل‌های نیازهای استفاده از آب در اهداف مهم حفاظت زیستگاه رودخانه، پیشنهاد می‌شود.

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته کتابخانه‌ای و میدانی، ضرورت تحقیقاتی به‌منظور بررسی جریان درون رودخانه‌ای، زمان‌بندی تنظیم جریان آب، تخصیص رژیم جریان مطلوب زیستگاه‌ها و بررسی اثرات کاهش جریان آب یا نوسان در نرخ جریان و احیا و باززنده‌سازی هیدرولیکی زیستگاه ماهیان در مدیریت و برنامه‌ریزی اکوسیستم رودخانه جهت دستیابی به مدیریت صحیح حوضه آبریز و تضمین پایداری اکوسیستم‌های رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه نمک، احساس می‌شود. طبق بررسی‌های انجام شده، تاکنون از مدل MesoHABSIM در مطالعات احیا و بازطبیعی‌سازی اکوسیستم‌های رودخانه‌ای ایران، استفاده نشده است و نیازمند تحقیقاتی در این زمینه می‌باشد. در این مطالعه به دلیل اهمیت زیستگاه رودخانه‌های حوزه آبریز دریاچه نمک، رودخانه کردان به منظور بررسی دقیق شرایط زیستگاهی و برآورد جریان اکولوژیکی با استفاده از روش هیدرولوژیکی و شبیه‌سازی میزان مطلوبیت زیستگاه ماهی با کاربرد مدل هیدرومورفواکولوژیکی MesoHABSIM، مورد تمرکز قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز رودخانه کردان با وسعتی برابر ۸۳۸ کیلومتر مربع، در موقعیت جغرافیایی '۵۵ °۳۵ تا '۰۵ °۳۶ عرض شمالی و '۴۵ °۵۰ تا '۰۵ °۵۱ طول شرقی در استان البرز واقع شده است (شکل ۱). حوضه مطالعاتی بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی دومارتن، دارای ماکرو اقلیم از نوع نیمه خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب و مرطوب است. میانگین بارش سالانه منطقه ۴۵۰ میلی‌متر است. حداکثر بارش در زمستان به صورت برف و حداقل آن در تابستان به صورت رگبار، می‌بارد. متوسط درجه حرارت سالانه، ۱۳ درجه سانتی‌گراد بوده، متوسط حداکثر و حداقل دمای مطلق سالانه نیز به‌ترتیب ۳ و ۱۰- درجه سانتی‌گراد است (Morid *et al.*, 2016). رودخانه کردان یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های استان البرز است که در حوضه آبریز ایران مرکزی و در زیر حوضه دریاچه نمک، در شمال‌غربی شهر کرج جریان دارد. همچنین طول این رودخانه ۴۸ کیلومتر و شیب متوسط بستر آن ۰/۸ درصد است. این رودخانه دارای آب دائمی بوده و رژیم حوضه

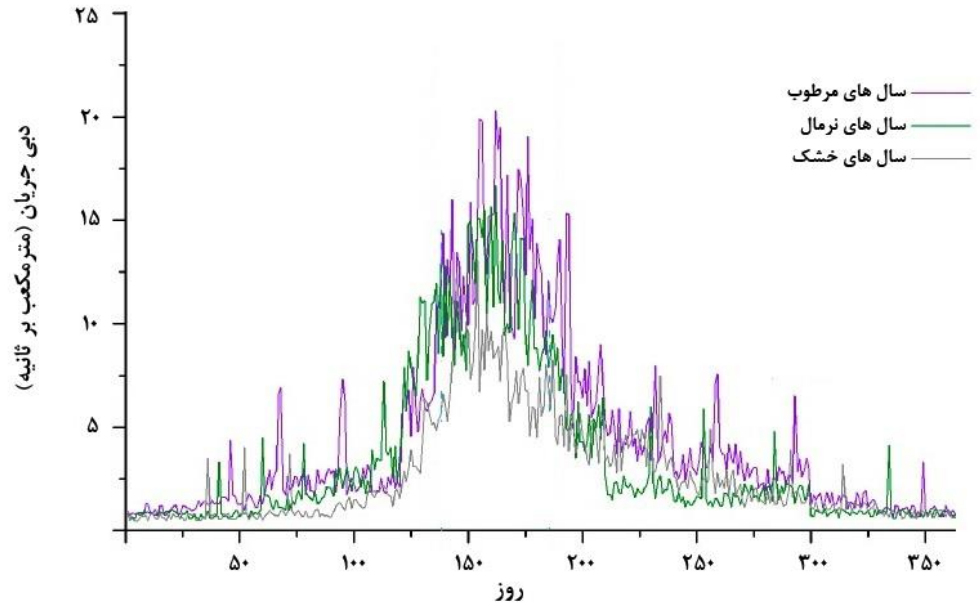
آبریز آن، برفی-بارانی است. علاوه بر این، رودخانه مورد مطالعه، از شاخه‌های رودخانه شور و از بهم پیوستن شاخه رودخانه‌های برغان و آغشت، ورده و سنج تشکیل شده است. شاخه برغان از ارتفاعات البرز مرکزی، کوه‌های سیگز و جوچال از دامنه‌های کوه کهار برزدگ واقع در شمال کرج، شاخه آغشت از ارتفاعات طالقان سرچشمه می‌گیرد (Tabatabaei *et al.*, 2015؛ Yamani *et al.*, 2015). شکل (۱)، موقعیت حوضه آبریز کردان، منطقه مورد مطالعه و نمایی از رودخانه به همراه موقعیت ایستگاه‌های نمونه برداری را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز کردان، منطقه مورد مطالعه و نمایی از رودخانه به همراه موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

بخشی از آورد رودخانه کردان از طریق بند انحرافی احداث شده نزدیکی ده‌صومعه بر روی شاخه برغان در جنوب باغبانکلا به روستاهای هشتگرد جهت استفاده‌های کشاورزی انتقال می‌یابد. ارتفاع بند انحرافی کردان از پی، حدود ۸ متر و از کف بستر رودخانه، ۶ متر می‌باشد. رودخانه کردان تا این محل تقریباً در تمامی سال دارای آبدهی می‌باشد. مجموع مساحت اراضی تحت پوشش بند انحرافی کردان حدود ۱۰۲۰۰ هکتار می‌باشد. مدیریت این بند انحرافی و نحوه بهره‌برداری از آن، بر عهده شرکت آب منطقه‌ای استان البرز می‌باشد. در ادامه، رودخانه کردان در جنوب راه‌آهن تهران- تبریز، در راستای شمال‌شرقی به سمت جنوب غربی ادامه مسیر داده و پس از عبور از کنار روستای نجم‌آباد و ورود به پهنه باتلاقی-کویری دشت قزوین، در مواقع پرآبی به رود شور می‌پیوندد. شایان ذکر است رودخانه کردان به عنوان یکی از زیستگاه‌های بومی کپورماهیان در ایران، مطرح می‌باشد (Jouladeh-Roudbar *et al.*, 2020؛ Tabatabaei *et al.*, 2015؛ Ghanavi *et al.*, 2016).

در این مطالعه از داده‌های ایستگاه هیدرومتری ده‌صومعه، برای محاسبات هیدرولوژیکی استفاده شد که در موقعیت "۵۹ '۵۶ °۳۵ عرض شمالی و "۵۲ '۴۹ °۵۰ طول شرقی و ارتفاع ۱۴۲۷ متر از سطح دریا واقع شده است. ایستگاه ده‌صومعه از نوع درجه یک و تجهیزات موجود در آن شامل اشل، لیمنوگراف و پل‌تلفریک می‌باشد. بر اساس آمار و اطلاعات دوره ۳۵ ساله (از سال آبی ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۹) ایستگاه هیدرومتری ده‌صومعه، دریافتی از دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای استان البرز، حداکثر میانگین دبی جریان ماهانه رودخانهٔ کردان در ماه فروردین و برابر ۱۲/۴۱ مترمکعب بر ثانیه و حداقل میانگین دبی جریان ماهانه در ماه شهریور و برابر ۰/۴۳ مترمکعب بر ثانیه و میانگین دبی سالانه، ۳/۹۵ مترمکعب برثانیه است. همچنین آورد سالانه رودخانه کردان، ۱۱۰ میلیون مترمکعب و دبی پایه این رودخانه در روزهای عادی ۰/۸ متر مکعب در ثانیه بوده و حداکثر دبی جریان رودخانه کردان، ۳۰ مترمکعب در ثانیه به ثبت رسیده است. با توجه به داده‌های هیدرولوژیکی ایستگاه هیدرومتری ده‌صومعه در طی دوره آماری در منطقه مورد مطالعه، نمودار جریان روزانه رودخانه کردان بر اساس سال‌های مرطوب، سال‌های خشک و سال‌های نرمال در شکل (۲)، نشان داده شده است. بر اساس داده‌های جریان روزانه، حداکثر جریان عمدتا در اوایل ماه اسفند تا اواسط ماه خرداد، رخ داده است.



شکل ۲- نمودار جریان روزانه رودخانه کردان در دوره های خشک، مرطوب و نرمال دوره آماری ۳۵ ساله (از سال آبی ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۹)

در راستای بررسی سناریوهای مختلف برآورد رژیم جریان اکولوژیکی زیستگاه رودخانه کردان، در پژوهش حاضر روش‌های هیدرولوژیکی منحنی تداوم جریان و مدل شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه مورد استفاده قرار گرفتند که در ادامه به شرح مبانی و اصول اولیه این روش‌ها، پرداخته می‌شود.

«منحنی تداوم جریان»، نمودار دبی جریان رودخانه در برابر فراوانی تجاوز آن است که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌های نشان دادن پاسخ رواناب در حوضه آبریز شناخته می‌شود. بخشی از منحنی تداوم جریان در شرایط خشک و حداقل شامل شاخص‌های Q_{70} تا Q_{99} است. منظور از شاخص

Q_{70} تا Q_{99}، دبی جریانی است که به‌ترتیب در بیشتر از ۷۰ درصد و ۹۹ درصد مواقع اندازه‌گیری در رودخانه، جریان دارد. آگاهی از وضعیت جریان رودخانه در فصول خشک سال، برای تعیین میزان و نوع بهره‌برداری از جریان رودخانه، به‌منظور حفظ شرایط اکولوژیکی و زیست‌محیطی آن، ضروری به نظر می‌رسد. در روش منحنی تداوم جریان، جریان زیست‌محیطی به‌صورت درصدی از متوسط آورد سالانه اکوسیستم آبی یا به صورت جریان با احتمال تجاوز مشخص از روی منحنی تداوم جریان در مقیاس زمانی سالانه یا ماهانه تعیین می‌گردد.

مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه رودخانه، میزان کیفیت زیستگاه را بر اساس شاخص‌های مطلوبیت (عمق آب، سرعت جریان و بستر)، ارائه داده و برای ارزیابی و تعیین در دسترس بودن زیستگاه برای گونه‌های مختلف ماهیان، ترجیح و یا نیاز زیستگاهی گونه در زیستگاه رودخانه، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Tabatabaei *et al.*, 2015؛ Gholizadeh *et al.*, 2017). به‌علاوه مدل‌های مطلوبیت زیستگاه برای ارزیابی اثرات طرح‌های مختلف کنترل آب از قبیل اثرات احداث سدها بر وضعیت اکولوژیکی رودخانه و نیز برای تعیین حداقل، بهینه و مطلوب جریان مورد نیاز برای پایداری جمعیت‌های آبزیان، کاربرد دارند (Yang *et al.*, 2021). همچنین این مدل‌ها می‌توانند برای شبیه‌سازی و ارزیابی پروژه‌های احیا و بازطبیعی‌سازی رودخانه به‌وسیله تغییر متغیرهای محیطی مورد استفاده قرار گیرند (Naderi *et al.*, 2019؛ Koutrakis *et al*, 2019).

مدل MesoHABSIM، به‌عنوان یک روش نوآورانه و توانمند مدل‌سازی زیستگاه هیدرومورفولوژیکی، توسط پارازیویچ به منظور حفاظت از جوامع آبزی (Parasiewicz, 2007)، برآورد جریان اکولوژیکی مورد نیاز ماهیان و برنامه‌ریزی احیای زیستی رودخانه (Parasiewicz *et al*, 2012)، ارائه شد. MesoHABSIM، مدلی اکوهیدرولیکی- هیدرومورفواکولوژیکی است که اکوسیستم رودخانه را در یک مقیاس مزو (منطقه مورد استفاده گونه‌های آبزی در بازه رودخانه) با استفاده از نرم‌افزار Sim-Stream مدل سازی می‌کند (Vezza *et al*, 2014؛ Parasiewicz, 2007). به‌منظور محاسبه جریان‌های اکولوژیکی، مدل MesoHABSIM، ارزیابی مناسب بودن و در دسترس بودن زیستگاه، داده‌های جمع آوری شده میدانی را با مشاهدات بیولوژیکی و اطلاعات هیدرولوژیکی و هیدرومورفولوژیکی، ترکیب کرده و تغییرات هیدرومورفولوژی رودخانه را تحت رژیم‌های متعدد جریان شبیه سازی می‌کند و در نهایت یک زیستگاه مطلوب را نمایش می‌دهد که تحت شرایط خاص جریان شکل می‌گیرد. شرایط خاص جریان نشان دهنده جریان‌های اکولوژیکی است. خروجی مدل شبیه‌سازی مزوزیستگاه، تجزیه و تحلیل سری زمانی مطلوبیت زیستگاه در دوره‌های مختلف زیستی گونه هدف می‌باشد (Parasiewicz *et al*, 2012؛ Virbickas *et al.*, 2020).

مدل شبیه‌سازی MesoHABSIM، شامل ۳ زیرمدل هیدروموفولوژیکی، بیولوژیکی و زیستگاهی است (Adamczyk *et al*, 2019). توانایی MesoHABSIM این است که مقیاس مزو، امکان بررسی بخش‌های بزرگ رودخانه و مشاهده ارتباط بین زیستگاه‌ها را فراهم کرده و این امکان برای شناخت تنوع هیدرومورفواکولوژیکی را در طول کل رودخانه به روشی مناسب برای ارزیابی وضعیت اکولوژیکی رودخانه می‌دهد (Adamczyk *et al*, 2019؛ Parasiewicz, 2007). در مقیاس مزوزیستگاه، خصوصیاتی مانند سرعت متوسط جریان، نوع مورفولوژیکی زیستگاه و پوشش و ساختار بستر آبراهه، تاثیرگذار هستند. بررسی منابع علمی مختلف نشان می‌دهد عموماً پژوهش‌ها و شبیه‌سازی های اکوهیدرولیکی در محدوده و مقیاس مزوزیستگاه (سیستم های خیزآب و گودآب) صورت می‌گیرد (Koutrakis *et al*, 2019؛ Gronsdahl *et al.*, 2021). بسترهای شامل توپوگرافی گوداب- خیزاب محل پرورش و تخم‌ریزی آبزیان از جمله ماهی‌ها می‌باشد. ماهیان رودخانه‌ای بر اساس سازگاری‌های رفتاری، فیزیولوژیکی و مورفولولوژیکی، زیستگاه خاصی را ترجیح می‌دهند که برای بقا و پایداری افراد و جمعیت‌ها، حائز اهمیت می‌باشند (Tabatabaei *et al.*, 2015؛ Gholizadeh and Zibaei, 2021). در همین راستا، اطلاعات مهم در مورد خصوصیات اکولوژیکی ماهی (مانند عدم حضور، حضور یا فراوانی)، پوشش و ساختار بستر، سرعت جریان و عمق آب به مدل MesoHABSIM، وارد می‌شود. در منابع مختلفی (Vezza *et al*, 2014؛ Virbickas *et al.*, 2020؛ Parasiewicz *et al*, 2012؛ Parasiewicz, 2007)، شرح تفصیلی این مدل آمده است.

به‌دلیل نیاز به منحنی‌های شاخص مطلوبیت، با بازدیدهای میدانی از رودخانه کردان با حضور تیم عملیاتی (متشکل از پژوهشگران اکولوژی آبزیان و مهندسی آب) و بهره‌مندی از نظرات کارشناسان با تجربه در زمینه اکولوژی آبزیان در دانشگاه تهران (بر اساس اطلاعات بلندمدت اجرای مطالعات بیولوژیکی و بررسی ویژگی‌های زیست‌سنجی و خصوصیات زیست‌شناختی فون ماهیان در منطقه) و همچنین گزارشات علمی (Tabatabaei *et al.*, 2015؛ Jouladeh-Roudbar *et al.*, 2020)، اندازه‌گیری و بررسی پارامترهای اکولوژیکی، هیدرولیکی و هیدرومورفواکولوژیکی (مقاطع عرضی رودخانه شامل فاصله هر مقطع از مقطع پایین‌دست، موقعیت جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی، عمق آب با استفاده

از خط‌کش مدرج فلزی (با دقت ۰/۵ سانتی‌متر)، عرض مقاطع با استفاده از مترنواری، سرعت جریان در نقاط مختلف با استفاده از سرعت‌سنج (مولینه صحرایی مدل MCF:DL با دقت ۰/۰۰۵ متر بر ثانیه) در ۰/۴ عمق آب به منظور به‌دست آوردن میانگین سرعت ستون آب در نقطه نمونه‌گیری، ساختار و پوشش بستر (قطر سنگ‌های غالب بستر رودخانه در پلات تصادفی)، پوشش گیاهی و شکل مورفولوژی زیستگاه (گوداب و خیزاب)) در نقاط حضور ماهی، صورت پذیرفت. در این راستا نمونه‌برداری از ماهیان (جهت تخمین سن و مرحله زندگی آن) به صورت نقطه‌ای و دقیق، با استفاده از تور ساچوک و نیز یک تور گوشگیر ریز چشمه، از ۱۰ ایستگاه نمونه‌برداری (شکل ۱ و جدول ۱) از پایین‌دست رودخانه کردان (ایستگاه S_1، محدوده پل ارتباطی کردان به کوهسار) به سمت بالادست (ایستگاه S_{10}، محدوده ایستگاه هیدرومتری ده‌صومعه)، جهت تولید منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه سیاه‌ماهی البرزی (*Capoeta alborzensis*) در فصول مختلف سال (۱۴۰۰-۱۳۹۷)، انجام شد (داده‌ها برای ۱۶۳ نمونه سیاه‌ماهی البرزی با طول کل ۸۱-۱۵۲ میلی‌متر، ثبت شد).

در این مطالعه برای شبیه‌سازی تغییر در کیفیت و کمیت زیستگاه سیاه‌ماهی‌البرزی در پاسخ به تغییرات جریان و هیدرومورفولوژی رودخانه کردان، سری زمانی تاریخی داده‌های جریان روزانه در شرایط طبیعی و تغییر یافته برای توصیف مطلوبیت زیستگاه در تمام شرایط هیدرولوژیکی ممکن برای سال‌های مرطوب، طبیعی و خشک، ایجاد شد. در ادامه با استفاده از ویژگی‌های هیدرولیکی رودخانه (داده‌های عمق آب و سرعت جریان اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مطالعاتی)، همراه با مشاهدات میدانی حضور و فراوانی ماهی (شاخص مطلوبیت زیستگاه مشروط ماهی در شرایط طبیعی و وضعیت خوب اکولوژیکی)، وارد مدل MesoHABSIM شده و شبیه‌سازی هیدرمورفولوژیکی- زیستگاهی سیاه‌ماهی البرزی در رودخانه کردان در الحاقیه SimStream QGIS، صورت گرفت. همچنین سناریوهای مختلف مدیریت جریان بر میزان مطلوبیت زیستگاه در دسترس و منحنی‌های سری زمانی دبی- مساحت قابل استفاده وزنی در دوره‌های مختلف زندگی گونه ماهی در زیستگاه‌های هیدرومورفولوژیکی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی، مشخصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری و میانگین پارامترهای هیدرولیکی و محیطی در رودخانه کردان

موقعیت جغرافیایی			پارامترهای محیطی در دوره نمونه‌برداری				
ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	سرعت جریان انحراف معیار ± میانگین	عمق آب انحراف معیار ± میانگین	عرض مقطع مرطوب انحراف معیار ± میانگین	فراوانی سیاه‌ماهی البرزی
			(متر)	(متر بر ثانیه)	(متر)	(متر)	(قطعه در متر مربع)
S_1	۵۰° ۴۷' ۱۷"	۳۵° ۵۶' ۴۹"	۱۳۳۴	۰/۳۱ ± ۰/۱۱	۰/۴۶ ± ۰/۱۲	۴/۱ ± ۱/۶	۰/۴۲۴
S_2	۵۰° ۴۷' ۵۲"	۳۵° ۵۶' ۶۰"	۱۳۳۸	۰/۳۶ ± ۰/۱۲	۰/۴۴ ± ۰/۱۸	۴/۳ ± ۲/۳	۰/۴۸۲
S_3	۵۰° ۴۸' ۱۲"	۳۵° ۵۶' ۸۶"	۱۳۴۲	۰/۳۸ ± ۰/۱۵	۰/۴۹ ± ۰/۲۴	۵/۸ ± ۱/۴	۰/۴۷۶
S_4	۵۰° ۴۸' ۴۵"	۳۵° ۵۷' ۴۲"	۱۳۵۴	۰/۴۲ ± ۰/۱۴	۰/۵۲ ± ۰/۱۴	۶/۳ ± ۱/۷	۰/۴۳۶
S_5	۵۰° ۴۹' ۲۳"	۳۵° ۵۸' ۴۶"	۱۳۸۲	۰/۴۶ ± ۰/۱۸	۰/۵۶ ± ۰/۲۶	۸/۴ ± ۲/۴	۰/۳۴۴
S_6	۵۰° ۵۱' ۴۵"	۳۵° ۶۲' ۱۴"	۱۴۱۸	۰/۵۲ ± ۰/۱۵	۰/۶۵ ± ۰/۱۳	۱۱/۶ ± ۱/۶	۰/۲۲۳
S_7	۵۰° ۵۲' ۳۱"	۳۵° ۶۳' ۱۱"	۱۴۲۶	۰/۵۸ ± ۰/۱۲	۰/۳۵ ± ۰/۲۴	۱۲/۳ ± ۱/۴	۰/۱۷۵
S_8	۵۰° ۵۲' ۶۳"	۳۵° ۶۳' ۴۹"	۱۴۴۷	۰/۶۳ ± ۰/۲۴	۰/۳۲ ± ۰/۲۶	۱۶/۷ ± ۲/۳	۰/۱۲۴
S_9	۵۰° ۵۳' ۲۲"	۳۵° ۶۲' ۳۵"	۱۴۸۲	۰/۷۲ ± ۰/۲۸	۰/۴۳ ± ۰/۱۷	۱۳/۴ ± ۱/۶	۰/۱۱۸
S_{10}	۵۰° ۵۴' ۲۸"	۳۵° ۶۲' ۵۶"	۱۴۸۶	۰/۸۶ ± ۰/۲۳	۰/۴۲ ± ۰/۱۶	۱۴/۶ ± ۱/۴	۰/۱۳۴

شایان ذکر است متداول‌ترین توزیع‌های احتمالاتی مورد استفاده جهت تعیین بهترین تابع احتمال برای تحلیل خصوصیات هیدرولیکی-اکولوژیکی زیستگاه ماهیان در رودخانه، توزیع گامبل، گاما، ویبول و پیرسون تیپ ۳، می‌باشد. منظور از برازش یک توزیع احتمالاتی، یافتن بهترین تخمین از پارامترهای آن توزیع است. در همین راستا، در مطالعه حاضر، انتخاب توزیع مناسب تابع احتمال، بر اساس محاسبه معیار ضریب تعیین (R^2)، معیار اطلاعاتی آکائیکه (AIC) و میانگین مربعات خطا (MSE)، صورت می‌گیرد. معادلات این معیارها، به شرح زیر می‌باشد:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})(O_i-\bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^{n}(P_i-\bar{P})^2 \sum_{i=1}^{n}(O_i-\bar{O})^2}: \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$AIC=2N-LnL \quad \text{(رابطه ۳)}$$

که در روابط ۱، ۲ و ۳، P_i مقادیر برآورد شده، $\bar{P}$ متوسط مقادیر برآورد شده، O_i مقادیر اندازه گیری شده، $\bar{O}$ متوسط مقادیر اندازه گیری شده، n تعداد مشاهدات، N تعداد پارامترهای مدل آماری و L مقدار حداکثر تابع درست‌نمایی برآورد شده می‌باشد.

در پژوهش حاضر جهت تولید و توسعه منحنی‌های

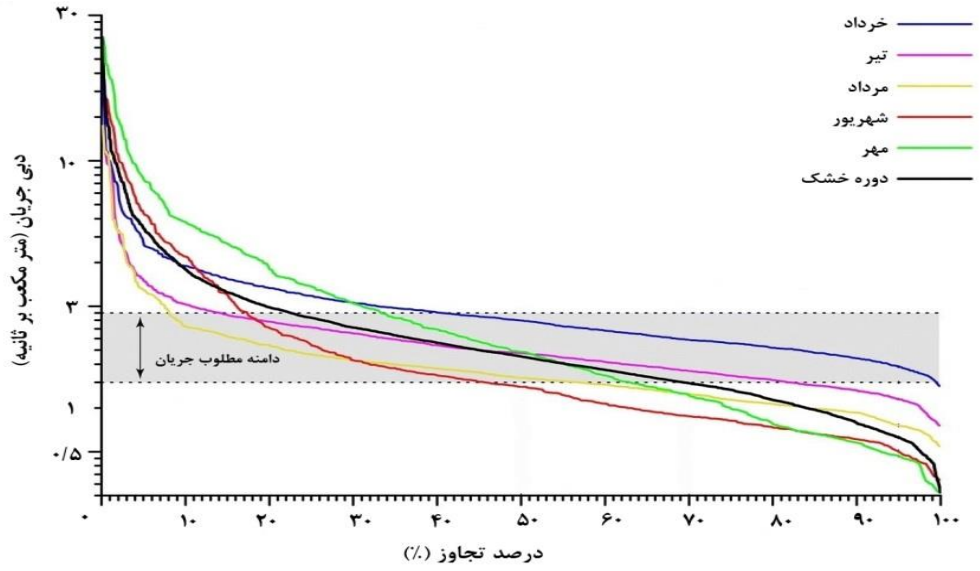
مطلوبیت زیستگاه (عمق آب و سرعت جریان)، از الگوریتم ایولف[1] استفاده گردیده است. شایان ذکر است با توجه به اینکه مطالعات قبلی در زمینه بررسی خصوصیات زیستگاه ماهیان در رودخانه کردان صورت پذیرفته است (Jouladeh-Roudbar *et al.*, 2020؛ Tabatabaei *et al.*, 2015) و همچنین در بررسی‌های میدانی مطالعه حاضر نیز، این اطلاعات بیش از پیش تکمیل گردید، لذا مناسب‌ترین روش برای توسعه منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه، الگوریتم ایولف می‌باشد. با استفاده از رابطه ۴، شاخص انتخابی زیستگاه، محاسبه خواهد شد. در نمودار زیستگاه انتخابی، محور طولی دسته‌های آماری هر پارامتر مورد مطالعه مانند عمق آب و سرعت جریان و محور عرضی، فراوانی هر دسته در مقیاس ۰ تا ۱ است و با حرف P نشان داده شده و نمودار زیستگاه استفاده شده نیز بر اساس مشاهدات میدانی در نقاط حضور ماهی، با حرف r نشان داده می‌شود (r_i فراوانی نسبی ماهیان در کلاس فراوانی برای هر متغیر فیزیکی (عمق و سرعت)، و p_i فراوانی نسبی کلاس i است). به‌طور خاص، در این مطالعه، برای اعمال الگوریتم ایولف، P_i بر اساس مقادیر عمق و سرعت به‌دست آمده در تمام مقاطعی که شبیه‌سازی اکوهیدرولیکی -هیدرومورفواکولوژیکی انجام شده است، محاسبه گردید.

$$S = \frac{r_i - P_i}{r_i + P_i}$$ (رابطه ۴)

نتایج و بحث

در مطالعه حاضر، به‌وجود آوردن شرایط مناسب و مؤثر برای پویایی جمعیت آبزیان و احیا اکوسیستم رودخانه کردان مبتنی بر مشخصه‌های هیدرومورفواکولوژیکی و هیدرولوژیکی بر میزان مطلوبیت زیستگاه تحت سناریوهای تنظیم، مقدار و زمان‌بندی رژیم جریان زیست‌محیطی، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

روش منحنی تداوم جریان: منحنی تداوم جریان، یک نمایش گرافیکی از رابطه بین فراوانی و میزان جریان‌ها را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، نمودار منحنی‌های تداوم جریان به‌دست آمده در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد، هموارتر و معمولا در محدوده کم جریان (Q_{70} تا Q_{99})، مسطح است و نشان می‌دهد که حوضه آبریز قادر به حفظ مقدار زیادی جریان پایه در این ماه‌ها است، این در حالی است که در این ماه‌ها، وقوع جریان‌های سیلابی، کوتاه‌مدت بوده و نیز فراوانی زیادی ندارند. از سوی دیگر، منحنی‌های تداوم جریان به‌دست آمده برای ماه‌های شهریور و مهر بسیار شیب‌دارتر هستند، به ویژه برای ماه مهر و گویای این مطلب است که حوضه آبریز کردان در این ماه‌های خاص، تنوع و تغییرپذیری جریان زیادی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- منحنی‌های تداوم جریان ماهانه برای هر ماه از فصول خشک و برای کل دوره خشک در دوره آماری ۱۳۹۹-۱۳۶۵

علاوه بر این، همان‌طور که در همان شکل (۳) مشاهده می‌شود، جریان‌های کم، از خرداد تا مهر در حال کاهش است. منحنی تداوم جریان برای کل فصل خشک، تصویری ترکیبی از ویژگی‌های مختلف منحنی تداوم جریان‌های ماهانه را نشان می

1- Ivlev Algorithm

دهد. تفاوت نمودارهای منحنی تداوم جریان‌های توسعه یافته برای هر ماه از فصل خشک، تنوع زمانی را در شرایط جریان برجسته می‌کند که انتخاب یک حداقل جریان زیست‌محیطی مناسب را که به‌عنوان نسبتی از رژیم جریان طبیعی به‌دست می‌آید، پیچیده می‌کند. بررسی داده‌های آماری در مطالعه حاضر نشان می‌دهد، طی فصل‌های تابستان و پاییز، بیشترین فراوانی وقوع حداقل مقادیر جریان در شبکه رودخانه کردان، مشاهده می‌گردد. منحنی‌های تداوم جریان در شکل (۳)، دبی جریان را در مقابل درصد تجاوزی که یک دبی خاص برابر یا بیشتر آن شده است، نشان می‌دهد. به‌طور خاص بخشی از منحنی‌های تداوم جریان که با متوسط جریان روزانه در محدود خاکستری رنگ منطبق است، «دامنه مطلوب جریان» را توصیف کرده است. بر همین اساس می‌توان گفت احتمال دامنه مطلوب جریان برای ماه‌های خرداد و تیر، زیاد است (بیش از ۸۰ درصد)، در حالی که برای ماه‌های شهریور و مهر، ۶۳ درصد است. با این حال، شهریور ماه، دارای کمترین احتمال از دیگر ماه‌ها در حدود ۵۰ درصد است. دامنه مطلوب جریان برای کل فصل خشک که با خط سیاه نشان داده شده است، از ۲۰ تا ۷۰ درصد محتمل است. همچنین احتمال وقوع سیلاب‌های شدید و جریان‌های سیلابی بزرگ با درصد تجاوز نسبتاً کم (کمتر از ۱۰ درصد) وجود دارد. بر طبق شکل ۳، دامنه جریان مطلوب از ۱/۴ متر مکعب در ثانیه تا ۲/۹ متر مکعب در ثانیه است، که تحت آن عملکردهای اصلی اکولوژیکی رودخانه می‌تواند در شرایط خوبی باقی بماند. همچنین باید به این نکته توجه داشت که، تخصیص دامنه مطلوب جریان در طول فصل خشک، احتمالاً مناطق وسیعی از زیستگاه رودخانه کردان را برای حضور سیاه ماهی البرزی، فراهم می‌کند.

شبیه‌سازی و ارزیابی واحدهای هیدرومورفولوژیکی

با بررسی داده‌های اندازه‌گیری شده (عمق آب، سرعت جریان، بستر و ...) و مشاهدات صورت گرفته میدانی در ۱۰ ایستگاه نمونه برداری شده، در مجموع ۷۳ واحد زیستگاه هیدرومورفولوژیکی مختلف، مشخص شد. این اطلاعات به‌طور کامل در جدول (۲)، خلاصه شده است. به‌طور خاص الف) اگر عمق آب کمتر از ۰/۵ متر باشد و سرعت جریان کمتر از ۰/۳ متر بر ثانیه باشد، مزوزیستگاه در نظر گرفته شده، گوداب کم عمق (زیستگاه با تلاطم کم) است، ب) اگر عمق آب بیشتر از ۰/۵ متر باشد و سرعت جریان کمتر از ۰/۳ متر بر ثانیه باشد، مزوزیستگاه در نظر گرفته شده، گوداب عمیق است، ج) اگر عمق آب کمتر از ۰/۵ متر و سرعت جریان بیشتر از ۰/۳ متر بر ثانیه باشد، مزوزیستگاه در نظر گرفته شده، خیزاب است و د) اگر عمق آب بیشتر از ۰/۵ متر و سرعت جریان بیشتر از ۰/۳ متر بر ثانیه باشد، مزوزیستگاه در نظر گرفته شده، بینابین است. همچنین برای هر واحد زیستگاه هیدرومورفولوژیکی، ویژگی‌هایی نظیر درصد بستر خوب، حداکثر اندازه بستر و در دسترس بودن پوشش گیاهی و بقایای چوب، بر اساس میانگین وزنی، مورد ارزیابی قرار گرفت. شایان ذکر است در دسترس بودن پوشش گیاهی و بقایای چوب با تقسیم سطح واحد هیدرومورفولوژیکی طبقه‌بندی شده، به‌عنوان پوشش گیاهی برای کل مساحت زیستگاه در نظر گرفته شده، محاسبه شد و از این منظر که با ناپیوستگی جریان آب در بخش‌هایی که عمق آب بیشتر از ۰/۳ متر و حداکثر اندازه بستر بیش از ۰/۵ متر در تعامل بود، مورد توجه قرار گرفت. به همین دلیل، توزیع در دسترس بودن پوشش گیاهی و بقایای چوب با جریان‌های مختلف ثابت نبوده، بلکه با آن متفاوت است. ذکر این نکته ضروری است که یک واحد هیدرومورفولوژیکی، می‌تواند به عنوان مأمن، پناهگاه و زیستگاهی برای مرحله خاصی از حضور سیاه‌ماهی البرزی، در نظر گرفته شود. در جدول (۲)، متغیرهای مورد بررسی بر اساس نوع زیستگاه، دسته‌بندی شده است.

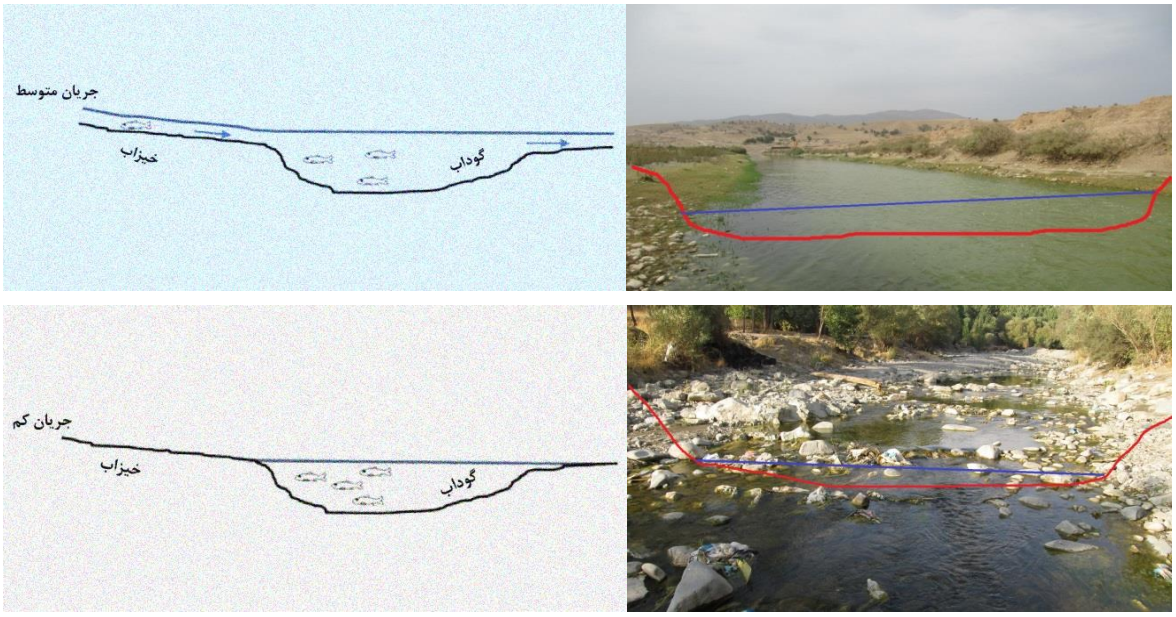
جدول ۲- مقادیر متوسط و انحراف از معیار مشخصات زیستگاه‌های نمونه‌برداری شده و میانگین تراکم سیاه‌ماهی البرزی در رودخانه کردان

ویژگی / پارامتر	زیستگاه (تعداد)				
	با تلاطم کم (۱۴)	گوداب (۱۶)	خیزاب (۲۱)	با تلاطم متوسط (۱۳)	بینابین و انتقالی (۹)
مساحت (متر مربع)	۵۷ ±۳۶	۸۲ ±۴۳	۱۱۶ ±۴۸	۱۸ ±۹	۴۷ ±۲۱
عمق آب (متر)	۰/۲۶ ± ۰/۰۸	۰/۵۴ ± ۰/۱۲	۰/۳ ± ۰/۰۸	۰/۴۶ ± ۰/۱۸	۰/۳۶ ± ۰/۱۳
سرعت جریان (متر بر ثانیه)	۰/۱۶ ± ۰/۰۶	۰/۳۸ ± ۰/۰۴	۰/۶۷ ± ۰/۰۷	۰/۴۶ ± ۰/۱۶	۰/۳۲ ± ۰/۰۵
حداکثر اندازه بستر (متر)	۰/۳۵ ± ۰/۲۳	۰/۴۲ ± ۰/۱۳	۰/۳۳ ± ۰/۲۳	۰/۴۸ ± ۰/۲	۰/۲۵ ± ۰/۱۲
درصد بستر خوب	۳۴ ±۱۶	۳۴ ±۱۷	۳۱ ±۱۸	۲۴ ±۱۱	۲۹ ±۱۳
پوشش گیاهی (درصد)	۳۵ ±۱۶	۶۲ ±۲۸	۲۳ ±۶	۴۸ ±۱۴	۳۵ ±۲۶
بالغ (قطعه در مترمربع)	۰/۲۴۵ ± ۰/۰۶۱	۰/۴۳۷ ± ۰/۰۸۲	۰/۱۷۴ ± ۰/۰۲۵	۰/۳۲۱ ± ۰/۰۸۴	۰/۱۳۷ ± ۰/۰۴۳
نابالغ (قطعه در مترمربع)	۰/۱۶۵ ± ۰/۰۵۲	۰/۲۳۸ ± ۰/۰۲۳	۰/۲۶۳ ± ۰/۰۳۴	۰/۲۰۵ ± ۰/۰۶۳	۰/۱۸۴ ± ۰/۰۲۶

در بررسی و بازدید میدانی صورت گرفته از رودخانه کردان، پوشش گیاهی کناره‌های رودخانه از نوع درختان ریزبرگ است. این نوع پوشش‌های گیاهی کنار رودخانه‌ای سبب پایداری زیستگاه ماهیان می‌شوند و عملکردهای مختلفی از جمله ایجاد

سایه و جلوگیری از نوسانات شدید دمای آب، پایداری سواحل و جلوگیری از فرسایش سواحل و ورود رسوبات، کنترل زنجیره غذایی با فراهم کردن بقایای گیاهی، بستری برای رشد موجودات بی مهره‌گان، می‌تواند داشته باشد (Bennetsen *et al.*, 2021؛ Gholizadeh *et al.*, 2017). همچنین با ورود ریشه‌ها و قطعات چوبی درختان در کناره رودخانه و محیط آبی در کنترل جریان آب و حرکت رسوبات درون رودخانه‌ای و فراهم نمودن تنوع زیستگاهی با ایجاد مناطق گوداب و جریان‌دار، نقش موثری در پویایی زیستگاه‌های طبیعی رودخانه کردان دارند.

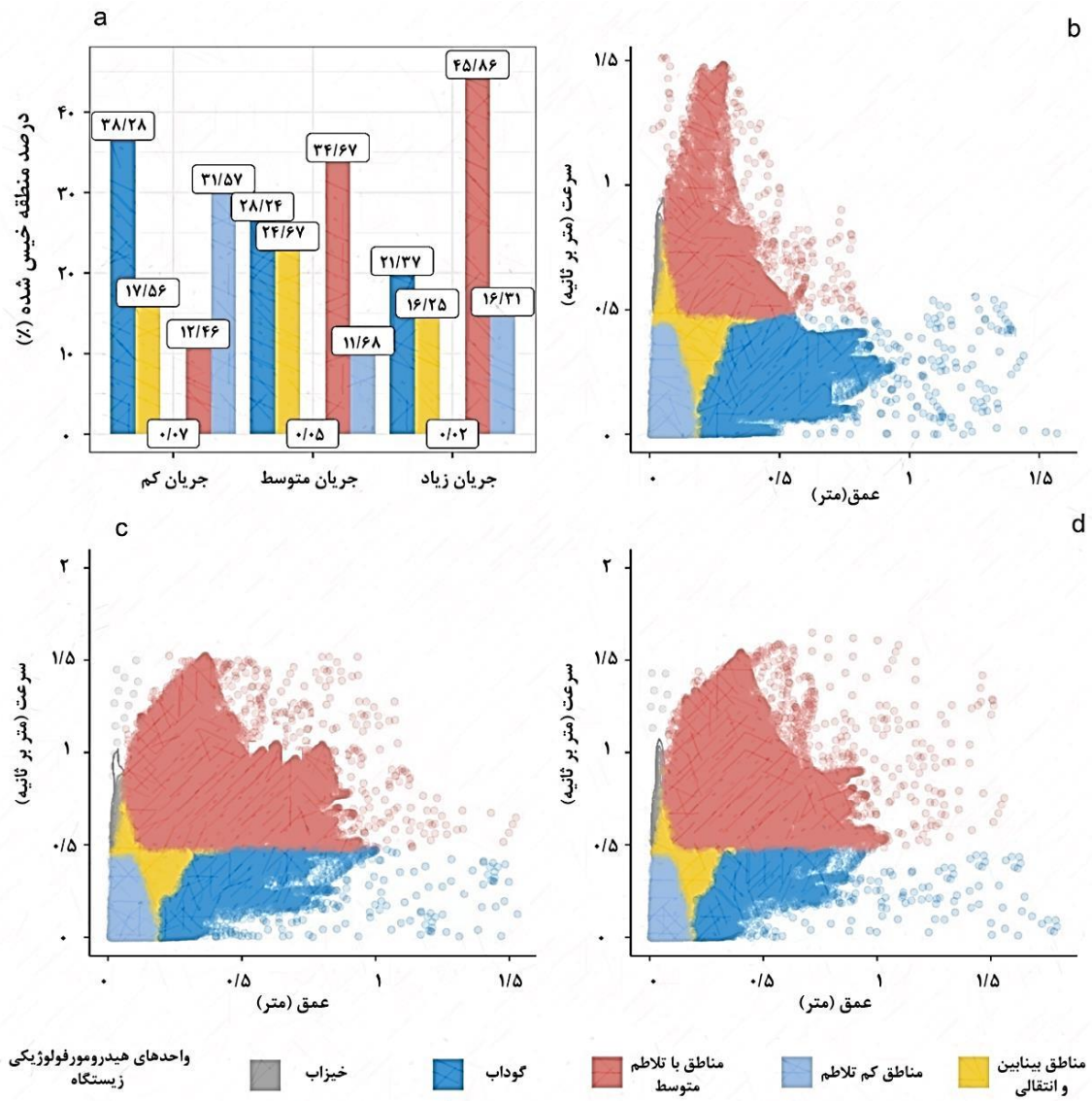
در شکل (۴)، نمونه‌ای از حضور و نحوه پراکنش سیاه‌ماهی البرزی در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب در شرایط جریان‌های مختلف رودخانه کردان، نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مقدار جریان مناسب، هم در زیستگاه گوداب و هم در زیستگاه خیزاب، ماهی حضور دارد و با کاهش ۵۰ درصدی دبی جریان و کاهش محیط خیس شده در زیستگاه خیزاب، حضور ماهی در زیستگاه گوداب برای زنده‌مانی و دسترسی به بی‌مهرگان آبزی برای تغذیه، بیشتر می‌شود و این در حالی است که منطقه قابل استفاده ماهی در جریان‌های کم، به سرعت کوچک می‌شود و ممکن است زیستگاه گوداب، ۵۰ درصد کاهش نسبی با کاهش دبی را نشان ندهد زیرا با کاهش جریان، مساحت و عمق گوداب به‌طور خاصی نسبتا آهسته تغییر کند. دلیل این امر، آن است که عمق گوداب باقیمانده در قسمت پایین‌دست خیزاب، حداقل زیستگاه را برای حضور ماهی حفظ خواهد کرد، حتی اگر جریان آب، کاملا متوقف شود و منطقه خیزاب، خشک شود.



شکل ۴- تغییرات مورفولوژی زیستگاه موجود ماهیان در فرم بستر گوداب و خیزاب در شرایط مختلف جریان

مقایسه شکل و الگوهای واحدهای هیدرومورفولوژیکی حاصل از بررسی‌های میدانی و شبیه‌سازی مدل اکوهیدرودینامیکی MesoHABSIM، نشان داد که برآورد شباهت واحدهای هیدرومورفولوژیکی زیستگاه بینابین و زیستگاه با تلاطم کم (گوداب کم عمق) با مقادیری در محدوده ۰/۷۴ تا ۰/۹۲، بدون درنظرگرفتن جریان، زیاد است که نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل است (جدول ۲ و شکل ۵). از طرف دیگر، برآورد شباهت زیستگاه گوداب در جریان‌های کم، زیاد بود (۰/۸۶)، اما در جریان متوسط و زیاد، کاهش یافت (به ترتیب ۰/۶۳ و ۰/۵). با این حال، زیستگاه خیزاب، کمتر از ۱ درصد از کل منطقه مرطوب را برای تمام جریان‌های مدل شده، نشان می‌دهد (شکل ۵). با توجه به موارد مطرح شده، شایان ذکر است تجزیه و تحلیل دقیق از پیکربندی مکانی واحدهای هیدرومورفولوژیکی خارج از محدوده این مقاله است، اما الگوهای واضحی، در بازه‌های مختلف رودخانه کردان، مشاهده شد (شکل ۵ و شکل ۶). در همین راستا، بازه‌های بالادست منطقه مورد مطالعه در رودخانه کردان، عمدتاً زیستگاه بینابین و خیزاب در ترکیب با بستری درشت دانه، بود، در حالی که زیستگاه آبراهه در بازه‌های میانی با جریان آهسته، زیستگاه‌هایی با تلاطم متوسط و گوداب، تشکیل شده است. همچنین انتهای پایین‌دست منطقه مورد مطالعه، با کاهش عرض کانال و نیز وجود اندازه ذرات متوسط در بستر، زیستگاه گوداب تعیین گردید.

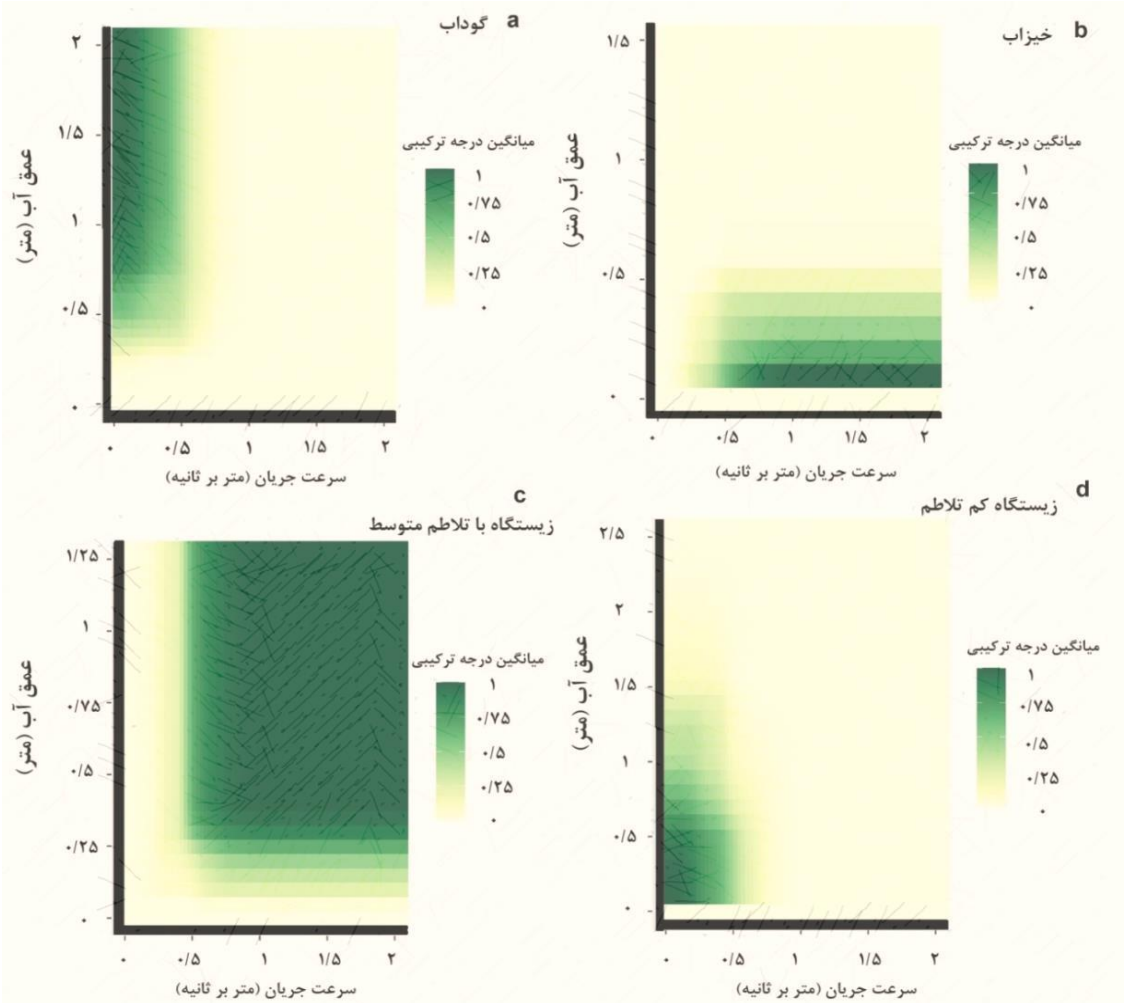
شکل (۵)، گویای این مطلب است که با افزایش جریان از ۱ متر مکعب بر ثانیه (دبی جریان کم آبی در سال خشک) به ۳ متر مکعب بر ثانیه (دبی جریان متوسط در سال نرمال) و ۵ متر مکعب بر ثانیه (جریان زیاد در سال مرطوب)، نسبت کل منطقه خیس شده از زیستگاه گوداب (۳۸ به ۲۸ و ۲۱ درصد) به زیستگاه با تلاطم متوسط (۱۲ تا ۳۵ و ۴۶ درصد)، تغییر شکل زیستگاه داده است. از منظری دیگر در رودخانه کردان، زیستگاه‌های غالب با مرزهای انتقالی، عمدتا متشکل از زیستگاه گوداب - مناطق با تلاطم متوسط و زیستگاه گوداب - بینابینی است. در مقابل نسبت کلی منطقه خیس شده زیستگاه مناطق کم تلاطم در ابتدا با افزایش جریان از ۳۱ درصد به ۱۱ درصد کاهش یافت و پس از آن با افزایش جریان، منطقه خیس شده به ۱۶ درصد، رسید.



شکل ۵- درصد تغییرات منطقه خیس شده (a) و تخمین توزیع عمق و سرعت برای واحدهای هیدروموفولوژیکی رودخانه کردان تحت شرایط دبی جریان کم (b)، جریان متوسط (c) و جریان زیاد (d)

شکل (۶)، الگوهای شبیه‌سازی واحدهای هیدرومورفولوژیکی رودخانه کردان و آستانه‌های هیدرولیکی تعریف شده بر اساس تحقیقات مختلف (Salmela et al., 2020؛ Wegscheider *et al.*, 2020؛ Virbickas et al., 2020)، مناطق واضح و قابل تشخیص در زمینه عمق آب و سرعت جریان را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶)، بالاترین درجه عضویت (میانگین درجه ترکیبی>۰/۵) با سرعت کمتر از ۰/۴۲ متر بر ثانیه در ترکیب با عمق بیش از ۰/۷ متر یا ۰/۵ متر، به ترتیب برای زیستگاه گوداب و زیستگاه کم تلاطم، در نظر گرفته شده است. همچنین زیستگاه بینابینی برای عمق بیشتر از ۰/۲۵ متر و سرعت جریان بیش از ۰/۵۴ متر بر ثانیه، طبقه‌بندی گردید، در حالی‌که، زیستگاه‌هایی با سرعت بیش از ۰/۵۵ متر بر ثانیه و عمق کمتر از

۰/۴۳ متر، به عنوان زیستگاه خیزاب، در نظر گرفته شد. ذکر این نکته لازم است که رودخانه‌های کوهپایه‌ای نظیر رودخانه کردان دارای شیب نسبتا زیاد، معمولا اندازه ذرات بستر آنها بسیار بزرگ می‌باشد که سبب ایجاد تلاطم و کاهش قابل توجهی در سرعت جریان می‌شود.

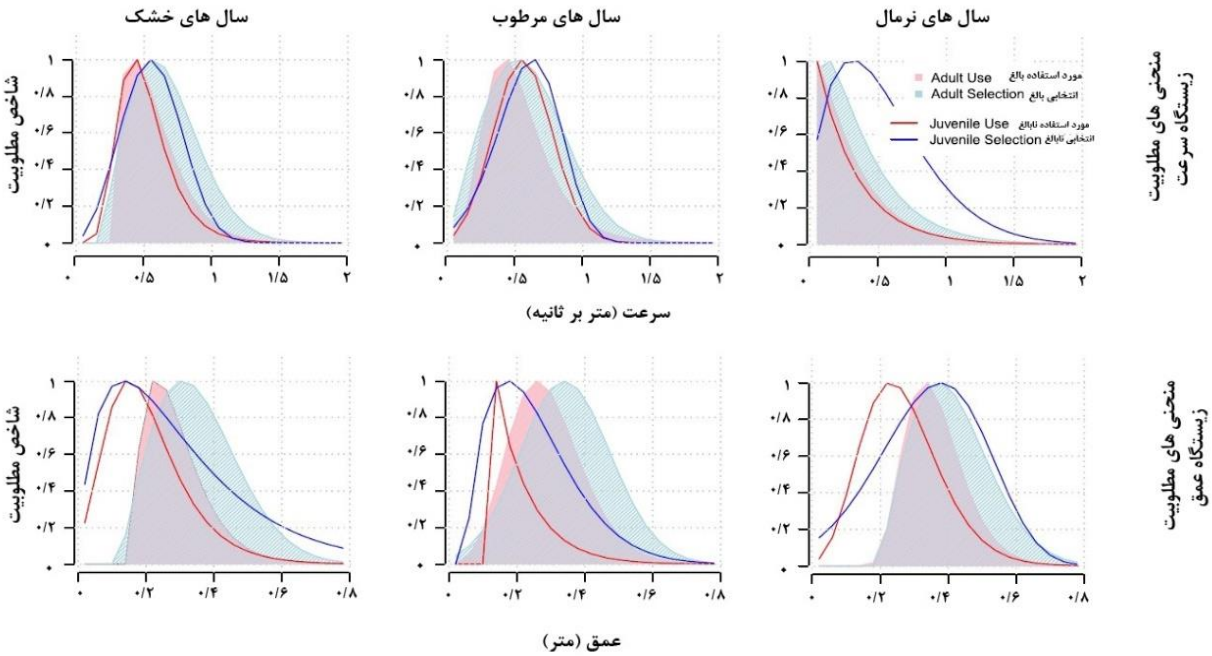


شکل ۶- الگوهای شبیه‌سازی میانگین درجه ترکیبی پارامترهای هیدرولیکی (عمق و سرعت) برای واحدهای هیدرومورفولوژیکی رودخانه کردان

در ادامه منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه (انتخابی و مورد استفاده) با استفاده از داده‌های عمق آب و سرعت جریان جمع‌آوری شده در دوره‌های مرطوب، خشک و نرمال، ایجاد شدند. برای همین منظور با استفاده از مقادیر معیارهای ضریب تعیین، معیار اطلاعاتی آکائیکه و میانگین مربعات خطا و داده‌های جمع‌آوری شده سیاه‌ماهی البرزی، بهترین تابع احتمال برای ایجاد منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه دو پارامتر سرعت و عمق، انتخاب گردید (جدول ۳). در نهایت، منحنی‌های مورد استفاده زیستگاه در مراحل مختلف زندگی سیاه‌ماهی البرزی با توجه به جدول فراوانی داده‌های عمق آب و سرعت جریان و تجزیه و تحلیل غیرخطی گشتاور خطی و تعیین توابع توزیع احتمال مناسب، ایجاد شدند (شکل ۷). همچنین منحنی‌های انتخابی زیستگاه در مراحل مختلف زندگی سیاه‌ماهی البرزی، با یک فرآیند مشابه گفته شده، ایجاد و مقادیر انتخابی محاسبه شدند (شکل ۷). شایان ذکر است معیار اطلاعاتی آکائیکه، یک چارچوب کلی را برای انتخاب تابع توزیع احتمال، ایجاد می‌کند. برای هر تابع توزیع احتمال، اختلاف آکائیکه، تناسب منحنی مطلوبیت زیستگاه را با داده‌ها، نشان می‌دهد. بر این اساس، هرچه اختلاف آکائیکه، بیشتر باشد، تناسب تابع توزیع احتمال با داده‌ها، کمتر می‌شود و می‌توان گفت بهترین تابع توزیع احتمال، کمترین مقدار آکائیکه را دارد. با توجه به شکل (۷)، می‌توان این‌گونه تفسیر کرد گونه سیاه‌ماهی البرزی در هر دو مرحله زندگی مشخص شده (بالغ و نابالغ)، اولویت قابل توجهی برای مقادیر میانی سرعت نشان می‌دهد (محدوده بهینه سرعت در حدود ۰/۵متر بر ثانیه).

جدول ۳-توابع توزیع احتمال انتخاب شده و معیارهای انتخاب برای تولید و توسعه منحنی مطلوبیت زیستگاه با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده اکولوژیکی-هیدرولیکی در رودخانه کردان

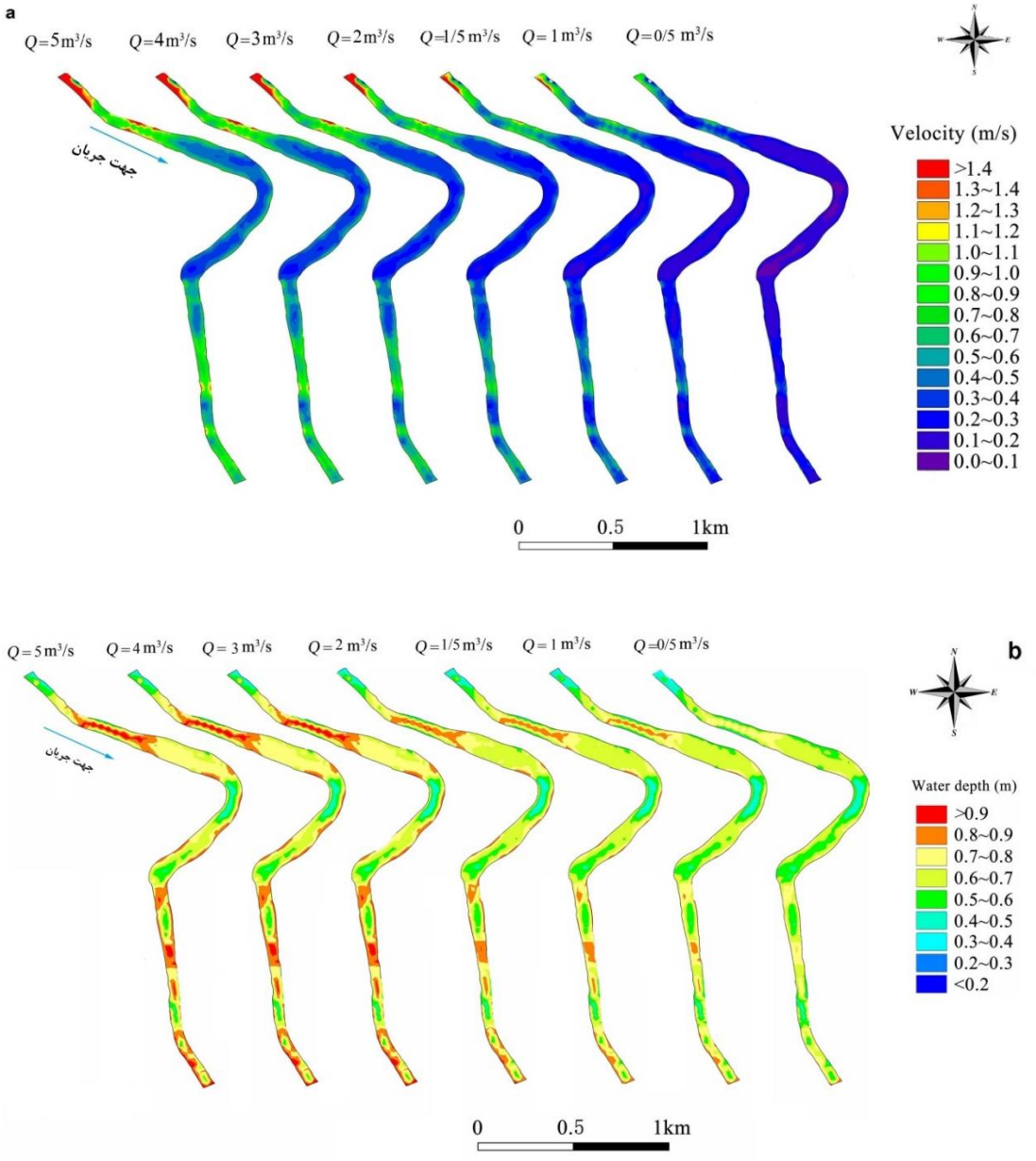
ویژگی هیدرولیکی	نوع سال	تیپ منحنی مطلوبیت زیستگاه	مرحله زندگی گونه ماهی (سیاه‌ماهی البرزی)	انتخاب توابع توزیع احتمال	معیارهای انتخاب		
					R^2	AIC	MSE
سرعت	خشک	مورد استفاده	بالغ (بزرگسال)	پیرسون تیپ ۳	۰/۹۳	-۳۹/۴۶	۰/۰۱
			نابالغ (جوان)	گامبل	۰/۸۲	-۲۳/۳۴	۰/۰۲
		انتخابی	بالغ (بزرگسال)	گامبل	۰/۹۵	-۳۲/۶۴	۰/۰۱
			نابالغ (جوان)	گاما	۰/۹۱	-۲۲/۴۶	۰/۰۲
	مرطوب	مورد استفاده	بالغ (بزرگسال)	ویبول	۰/۹۶	-۵۶/۳۶	۰/۰۱
			نابالغ (جوان)	گاما	۰/۹۴	-۴۹/۱۹	۰/۰۱
		انتخابی	بالغ (بزرگسال)	ویبول	۰/۸۹	-۲۳/۰۱	۰/۰۲
			نابالغ (جوان)	ویبول	۰/۸۸	-۲۳/۷۳	۰/۰۲
	نرمال	مورد استفاده	بالغ (بزرگسال)	گاما	۰/۸۵	-۱۱/۷۸	۰/۰۲
			نابالغ (جوان)	ویبول	۰/۹۲	-۲۳/۱۷	۰/۰۱
		انتخابی	بالغ (بزرگسال)	گاما	۰/۸۷	-۳۱/۴۵	۰/۰۲
			نابالغ (جوان)	ویبول	۰/۴۹	۲/۷۲	۰/۰۸
عمق	خشک	مورد استفاده	بالغ (بزرگسال)	پیرسون تیپ ۳	۰/۹۱	-۳۶/۱۳	۰/۰۱
			نابالغ (جوان)	گامبل	۰/۶۶	-۱۳/۵۶	۰/۰۶
		انتخابی	بالغ (بزرگسال)	گاما	۰/۸۶	-۲۴/۳۵	۰/۰۳
			نابالغ (جوان)	پیرسون تیپ ۳	۰/۸۵	-۲۵/۵۲	۰/۰۱
	مرطوب	مورد استفاده	بالغ (بزرگسال)	پیرسون تیپ ۳	۰/۷۹	-۱۱/۸۳	۰/۰۳
			نابالغ (جوان)	پیرسون تیپ ۳	۰/۸۲	-۲۲/۳۷	۰/۰۳
		انتخابی	بالغ (بزرگسال)	گاما	۰/۶۴	۶/۰۵	۰/۰۶
			نابالغ (جوان)	گاما	۰/۵۷	۷/۴۲	۰/۰۷
	نرمال	مورد استفاده	بالغ (بزرگسال)	پیرسون تیپ ۳	۰/۶۱	۸/۰۷	۰/۰۷
			نابالغ (جوان)	ویبول	۰/۵۸	۹/۳۴	۰/۰۹
		انتخابی	بالغ (بزرگسال)	گاما	۰/۴۸	۸/۵۵	۰/۰۹
			نابالغ (جوان)	ویبول	۰/۵۷	۰/۳۸	۰/۰۶



شکل ۷- منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه مورد استفاده و انتخابی عمق و سرعت گونه سیاه‌ماهی البرزی (بالغ و نابالغ) رودخانه کردان در سال‌های خشک، مرطوب و نرمال

شبیه‌سازی سرعت جریان و عمق آب زیستگاه‌های سیاه‌ماهی البرزی تحت هفت سناریوی مختلف جریان، در شکل

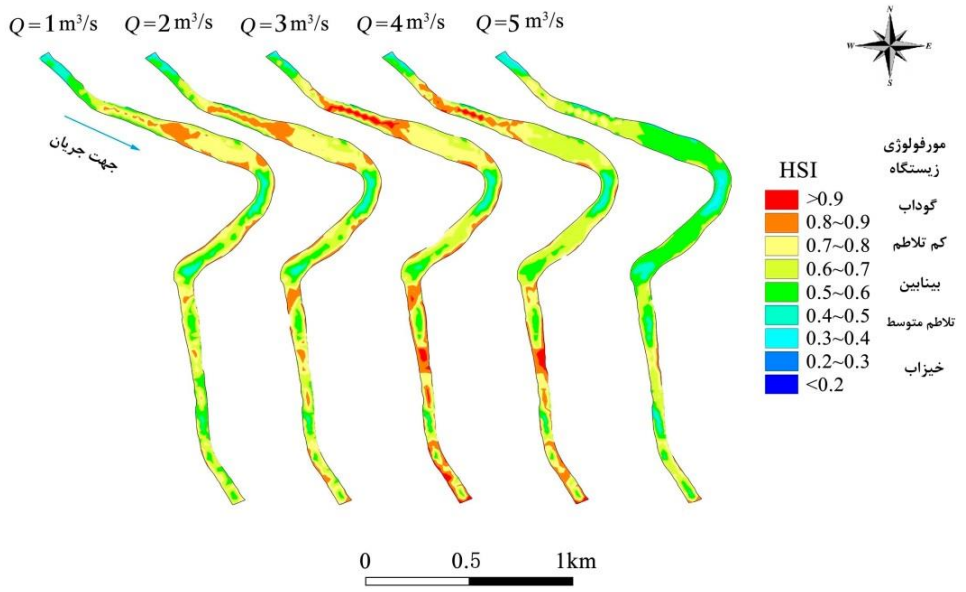
(۸) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است، سرعت جریان در امتداد مستقیم رودخانه، نسبتاً زیاد است و در پیچ‌های رودخانه، کم می‌شود. همچنین عمق آب در پیچانرود رودخانه، عمیق است. به طور خاص، افزایش جریان، منجر به افزایش عمق آب و نیز سرعت جریان، می‌شود. همچنین بایستی به این نکته توجه داشت که عمق آب، نقش مهمی در تعریف مناسب بودن زیستگاه سیاه‌ماهی البرزی دارد و این اثر می‌تواند با این واقعیت برجسته شود که عمق آب بیشتر، باعث ایجاد زیستگاه‌های گوداب عمیق در مقیاس مزو، می‌گردد و لذا ترجیح زیستگاهی گونه ماهی هدف در این زیستگاه، افزایش می‌یابد. باید خاطر نشان کرد یکی از عوامل محدودکننده 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.



شکل ۸- توزیع سرعت جریان (a) و عمق آب (b) تحت سناریوهای مختلف جریان در رودخانه کردان

در ادامه چهار سطح در تجزیه و تحلیل شاخص مطلوبیت زیستگاه (۰/۷۵<HSI≤۱ خیلی مطلوب؛ ۰/۵<HSI≤۰/۷۵ مطلوب؛ ۰/۲۵<HSI≤۰/۵ نامطلوب؛ ۰≤HSI≤۰/۲۵ خیلی نامطلوب) برای مدیریت اکوسیستمی رودخانه، تعیین شد. هرچه مقدار آستانه شاخص مطلوبیت زیستگاه بالاتر باشد، تلاش‌های بیشتری باید برای مدیریت رودخانه مدنظرقرار گیرد. وقتی شاخص مطلوبیت زیستگاه کمتر از ۰/۲۵ باشد، به معنی زیستگاه بی‌کیفیت است. بر عکس، وقتی شاخص مطلوبیت زیستگاه بالاتر

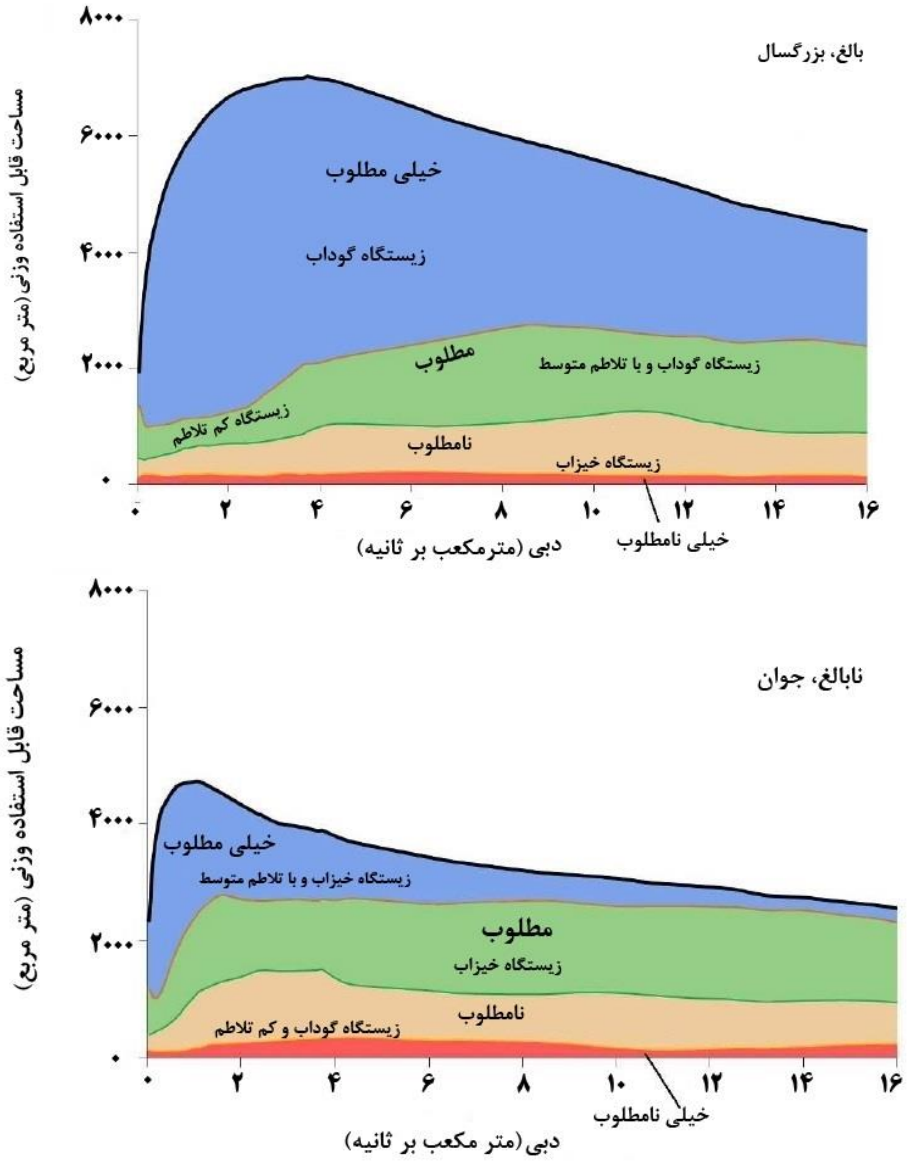
از ۰/۲۵ باشد، نشان‌دهنده شرایط مناسب زیستگاه ماهی است. با توجه به موارد مطرح شده و نیز توزیع شاخص مطلوبیت زیستگاه در سناریوهای مختلف جریان (شکل ۱۰)، می‌توان این گونه بیان کرد که میانگین شاخص مطلوبیت زیستگاه سیاه‌ماهی البرزی، در ۱۰ ایستگاه نمونه‌برداری تحت سناریوهای جریان کم، جریان متوسط و جریان زیاد، به ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۹ و ۰/۸ بود. همچنین بالاترین شاخص مطلوبیت زیستگاه در محدوده میانی سایت مورد مطالعه برآورد گردید که نشان‌دهنده دسترسی مناسب‌ترین زیستگاه برای گونه سیاه‌ماهی البرزی در رودخانه کردان است. از سوی دیگر، تجزیه و تحلیل شاخص مطلوبیت زیستگاه گونه ماهی هدف تحت سناریوهای مختلف جریان نشان می‌دهد که دسترسی مناسب زیستگاه تقریباً در ۳۰ درصد جریان کم، در ۴۰ درصد جریان متوسط و در ۱۵ درصد از جریان زیاد، دارای مقادیر شاخص مطلوبیت زیستگاه بالاتر از ۲۵ درصد می باشد. همچنین با توجه به شکل (۹)، ملاحظه می گردد که تحت سناریوهای کم و زیاد جریان، الگوی زیستگاه رودخانه شامل گوداب (۲۵-۸ درصد) و کم تلاطم (۶۰-۱۲ درصد) می‌باشد، در حالی که در سناریو متوسط جریان، الگوی زیستگاه رودخانه شامل گوداب (۳۵-۲۰ درصد) تعیین گردید. همانطور که در شکل (۹)، نشان داده شده است، در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب، ارتباط قابل توجهی بین شاخص مطلوبیت زیستگاه و مورفولوژی زیستگاه رودخانه، مشاهده می‌شود. بر همین اساس، بین زیستگاه گوداب و شاخص مطلوبیت زیستگاه، همبستگی مثبت و یک رابطه منفی بین زیستگاه خیزاب و شاخص مطلوبیت زیستگاه، وجود دارد. لذا می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که همبستگی منفی بین مطلوبیت زیستگاه و تنوع زیستگاه خیزاب نشان می‌دهد که شکل و فرم مورفولوژی زیستگاه، شاخص مهمی برای مناسب بودن زیستگاه است. از سوی دیگر می‌توان گفت، شاخص مطلوبیت زیستگاه بایستی به عنوان عامل اساسی در پروژه احیای اکولوژیکی رودخانه کردان، مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۹- توزیع شاخص مطلوبیت زیستگاه در سناریوهای مختلف جریان در رودخانه کردان

بر اساس مدل اکوهیدرومورفولوژیکی MesoHABSIM، مساحت قابل استفاده وزنی برای دبی‌های مختلف جریان، در مراحل مختلف زندگی سیاه‌ماهی البرزی در زیستگاه‌های گوداب و خیزاب در شکل ۱۰، ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۰ دریافت می‌شود، میزان مساحت قابل استفاده وزنی برای گونه ماهی شاخص در دوره بالغ، با افزایش دبی جریان، افزایش می‌یابد و در دبی ۴ مترمکعب بر ثانیه (محدوده حداکثر میانگین جریان رودخانه) به حداکثر ۶۸۵۰ مترمربع می‌رسد. سپس با افزایش دبی، به تدریج کاهش می‌یابد و در دبی ۱۶ مترمکعب بر ثانیه (دبی اوج لحظه‌ای رودخانه) به حداقل ۴۲۶۰ مترمربع می‌رسد. به طور خاص، افزایش دبی تا حداکثر میانگین جریان، باعث افزایش عمق و حجم آب می‌شود و از این طریق، زیستگاه مناسب‌تری برای گونه ماهی شاخص فراهم می‌کند. با این حال، با توجه به منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه، شاخص مطلوبیت زیستگاه گونه ماهی هدف در صورت دبی بیش از حد، کاهش می‌یابد و این باعث می‌شود مساحت قابل استفاده وزنی (میزان زیستگاه در دسترس) کاهش یابد. از سوی دیگر، در منحنی دبی-مساحت قابل استفاده وزنی (شکل ۱۰)، حداکثر مساحت قابل

استفاده وزنی برای دوره زندگی نابالغ گونه هدف در محدوده دبی ۲ مترمکعب بر ثانیه، قرار می‌گیرد. همچنین در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، تغییر جریانی که می‌تواند برای یک مرحله زندگی ماهی مفید باشد، ممکن است برای مرحله دیگری، مطلوب نباشد. از سوی دیگر، جریان آب بیشتر به معنی زیستگاه در دسترس بیشتر نمی‌باشد، زیرا کیفیت زیستگاه‌های مختلف در رودخانه به‌وسیله موجودات آن‌ها تعریف شده است و هیچ جریانی حداکثر زیستگاه را برای همه موجودات آبزی حفظ نخواهد کرد (Naderi *et al.*, 2021؛ Mouton *et al.*, 2009؛ Koutrakis *et al.*, 2019). با توجه به نتایج این بخش مشاهده می‌شود که میزان فضای مطلوب زیستگاهی در رودخانه به شدت تحت تأثیر میزان دبی جریان و دوران زندگی ماهی بوده، لذا ضروری است که توزیع مطلوبیت زیستگاهی در مدیریت اکوسیستم رودخانه، مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱۰- منحنی دبی- مساحت قابل استفاده وزنی در دوره های مختلف زندگی سیاه ماهی البرزی در زیستگاه رودخانه کردان

با توجه به موارد مطرح شده، بایستی به این مطلب اشاره کرد که الگوهای در دسترس بودن زیستگاه با اثرات مختلف تغییرات عمق و سرعت وابسته به جریان، همچنین با ویژگی‌های بستر رودخانه به‌دست آمده یا از دست رفته و به دنبال آن طیف وسیعی از جریان‌ها ایجاد می‌شود که در دسترس بودن زیستگاه را برای مراحل مختلف زندگی سیاه‌ماهی البرزی در رودخانه کردان به حداکثر می‌رساند. برای همین منظور، محدوده جریان‌های مطلوب اکولوژیکی برای مراحل مختلف زندگی گونه ماهی هدف در ایستگاه‌های مورد مطالعه، با توجه به مساحت مرطوب زیستگاه، درصد زیستگاه موجود، بهینه و ایده‌آل، مطابق

جدول (۴) در نظر گرفته شد. آنچه مسلم است، در نظر گرفتن دامنه جریان مطلوب اکولوژیکی، می‌تواند بیشترین تأثیر را بر میزان زیستگاه مطلوب برای دوره زندگی بالغ گونه هدف، داشته باشد.

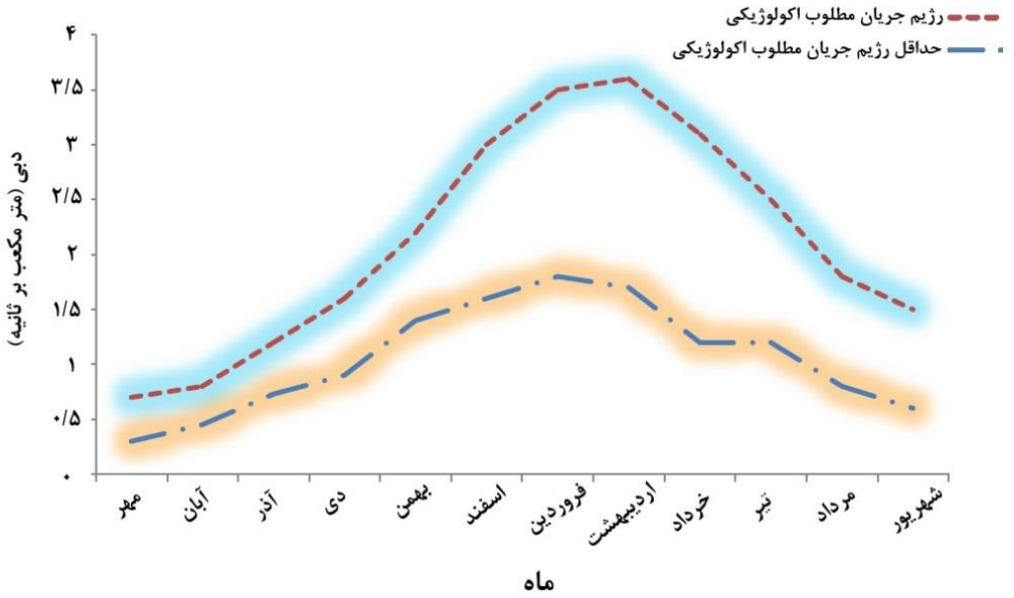
جدول ۴- توزیع جریان‌های مطلوب اکولوژیکی محاسبه شده برای ۱۰ ایستگاه مورد مطالعه در رودخانه کردان و معیارهای نسبی بیولوژیکی در محدوده قابل قبول رژیم جریان

ایستگاه	جریان مطلوب اکولوژیکی (متر مکعب بر ثانیه)	مساحت مرطوب (متر مربع)	زیستگاه موجود (درصد)		زیستگاه بهینه و ایده‌آل (درصد)	
			بالغ	نابالغ	بالغ	نابالغ
S_1	۱/۴۳	۴۷	۴۷	۵۸	۸۶	۷۶
S_2	۱/۵۷	۵۳	۵۷	۶۸	۷۷	۸۵
S_3	۱/۶۸	۵۷	۶۳	۷۷	۹۶	۸۸
S_4	۱/۷۳	۶۶	۵۲	۶۷	۸۴	۹۶
S_5	۱/۸۲	۷۳	۶۸	۷۳	۸۷	۱۰۰
S_6	۲/۱۸	۸۹	۵۳	۶۷	۹۰	۸۴
S_7	۲/۳۵	۹۳	۷۶	۸۲	۹۱	۹۸
S_8	۲/۵۶	۱۲۱	۷۳	۸۶	۹۶	۱۰۰
S_9	۲/۸۴	۱۳۶	۶۴	۷۴	۹۸	۸۶
S_{10}	۳/۲۳	۱۴۸	۷۳	۷۷	۱۰۰	۸۹

از منظری دیگر، با توجه به نتایج مشاهدات میدانی (جدول ۱) و برآورد توزیع جریان مطلوب اکولوژیکی در ایستگاه‌های مختلف (جدول ۴) دریافت می‌شود که حداکثر جریان مطلوب اکولوژیکی موردنیاز، در بازه‌های بالادست و میانی رودخانه می‌باشد و این در حالی است که حداقل جریان مطلوب اکولوژیکی، در بازه پایین‌دست رودخانه کردان، محاسبه شده است. به‌طور کلی در مطالعه حاضر، فراوانی سیاه‌ماهی البرزی، ارتباط خاصی با سرعت و دبی جریان در بازه بالادست رودخانه کردان که در ناحیه کوهپایه‌ای و در محیطی با پوشش متراکم درختان، واقع شده است، دارد. همچنین رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی در مقابل حداقل رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی در ماه‌های مختلف سال در حوضه رودخانه کردان، در شکل (۱۱)، نشان داده شده است. بر اساس محاسبات پژوهش حاضر در شکل (۱۱)، توزیع حداقل میزان جریان مطلوب اکولوژیکی (۲۵ درصد کل زیستگاه‌های هیدرومورفولوژیکی مطلوب) رودخانه کردان در طول سال، بین حداقل ۰/۳ مترمکعب بر ثانیه در ماه مهر (در محدوده جریان پایه رودخانه) و حداکثر مقدار ۱/۸ مترمکعب بر ثانیه در ماه فروردین است. مطابق شکل ۱۱، حداکثر مقدار جریان مطلوب اکولوژیکی مطلوب (۸۰-۶۰ درصد میزان مطلوبیت زیستگاه در دسترس) در اردیبهشت برابر با ۳/۶ مترمکعب بر ثانیه و کمترین مقدار در ماه مهر برابر با ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه است که بایستی در داخل رودخانهٔ کردان برای تأمین پتانسیل اکولوژیکی و حفاظت اکولوژیکی گونهٔ هدف (معادل سطح حفاظتی متوسط و قابل قبول) برقرار باشد. بررسی موارد مطرح شده، این واقعیت را برجسته می‌کند که با افزایش فراوانی جریان، حداقل میزان نیاز آبی اکولوژیکی در سال‌های خشک تأمین می‌شود و می‌توان نیاز آبی اکولوژیکی مناسب و مطلوب را در سال‌های مرطوب، تأمین کرد. با این حال، توزیع نیاز آب اکولوژیکی مناسب در طول سال، نسبتا نابرابر است. از دیدگاه دیگر، رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی رودخانه کردان در فصل جاری شدن سیل (اسفند تا اردیبهشت) از فصل غیر سیلابی، بیشتر است. همچنین با توجه به میزان مساحت قابل استفاده وزنی، اجرای کلی محدوده مطلوب جریان اکولوژیکی در فصول خشک و کم‌آبی، زیستگاه‌های مناسبی را برای دوره‌های مختلف زندگی گونه سیاه‌ماهی البرزی در زیستگاه رودخانه کردان فراهم کرده و پیش‌بینی می‌شود تأثیرات مثبتی بر احیا و عملکرد اکوسیستم رودخانه داشته باشد.

به‌طور خاص، با در نظر گرفتن مقدار جریان متوسط زیست‌محیطی برآورد شده در ماه‌های مختلف سال مشخص می‌شود که در بازه میان‌مدت طولانی (چند سری سالانه)، میزان تخصیص جریان اکولوژیکی هر بازه مورد مطالعه (ایستگاه مطالعاتی) در دوره غیر مرطوب (ماه‌های خشک و کم آب) به ۸۶ درصد رسیده است، در حالی که میزان تخصیص در دوره سیلابی و مرطوب (ماه‌های پرآب)، حدود ۸۱ درصد است. علاوه بر این، طی یک بازه کوتاه مدت (سری روزانه در طول سال)، برای محاسبه میزان تخصیص در سال، سال‌های مرطوب، نرمال و خشک، میانگین میزان تخصیص جریان اکولوژیکی به حدود ۶۷ درصد رسیده است. در عمل، استفاده مشترک از میزان تخصیص جریان اکولوژیکی میان‌مدت و کوتاه‌مدت، می‌تواند هم برنامه‌ریزی بلندمدت و هم تنظیم کوتاه‌مدت منابع آب حوضه رودخانه کردان را در نظر بگیرد و از هر لحاظ، جنبه‌های توسعه پایدار اکوسیستم

رودخانه را فراهم کند. همچنین بررسی نتایج پژوهش نشان می‌دهد که کمبود آب سالانه در حال حاضر، در فاصله زمانی بین ماه‌های خرداد تا مهر اتفاق می‌افتد و همزمان با آن، شرایط جریان زیست‌محیطی «ضعیف» و «تخریب شده» است.



شکل ۱۱- توزیع رژیم جریان اکولوژیکی مطلوب رودخانه کردان در ماه‌های مختلف سال

مدیریت جریان رودخانه، از جمله تخصیص آب بیشتر برای تأمین نیازهای زیستگاهی، به طور فزاینده‌ای برای اصلاح تأثیرات منفی ناشی از تنظیم جریان رودخانه، را در نظر می‌گیرد. Karimi *et al.*, (2021) در مطالعه‌شان به این نکته اشاره داشتند که بین الگوی سالانه جریان زیست‌محیطی اختصاص یافته و الگوی میانگین جریان ماهانه در رودخانه زهره، تناسب مناسبی وجود دارد. همچنین Naderi *et al.*, (2020a) در مطالعه‌شان به این مطلب اشاره داشته‌اند که شهریور و مهرماه، چالش برانگیزترین ماه‌ها برای جریان‌های طبیعی رودخانه از منظر برقراری جریان در مسیر مهاجرت ماهیان در دوره‌های مختلف زندگی آبزیان است که این مطلب در مطالعه حاضر نیز مورد تائید قرار گرفته و بر این اساس، در نظر گرفتن دقیق پویایی تنوع و تغییرپذیری جریان فصلی و بین‌سالی، از اجزای حیاتی یک استراتژی مدیریت مؤثر برای نگهداری و حفاظت برقراری جریان زیستگاهی بین بازه‌های بالادست، میانی و پایین‌دست رودخانه کردان است. بسیاری از تجزیه و تحلیل نیازهای جریان زیست‌محیطی در تحقیقات مختلفی استنباط می‌کنند که حداقل حدود ۳۰ تا ۵۰ درصد متوسط جریان سالانه باید برای تأمین نیازهای جریان زیست‌محیطی در یک حوضه آبریز تخصیص داده شود (Hayatgheibib *et al.*, 2021؛ Karimi *et al.*, 2021؛ Padikkal *et al.*, 2019). باید خاطر نشان کرد تنظیم جریان رودخانه، عامل اصلی کاهش توزیع و فراوانی ماهی در زیستگاه‌های مطلوب است (Yu *et al.*, 2021). به‌عنوان یکی از پیامدهای تنظیم جریان رودخانه کردان، می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که رژیم کم جریان و دخالت‌های انسانی، بر اتصال رودخانه (بازه‌های بالادست و پایین دست) تأثیر می‌گذارد و در نتیجه منجر به تکه‌تکه شدن زیستگاه و اختلال در مسیرهای مهاجرت ماهیان در رودخانه می‌شود. در همین حال، ۲۳۸ روز با دبی کمتر از میانگین دبی سالانه جریان (۳/۹۵ متر مکعب بر ثانیه) وجود داشت که نشان می‌دهد بیشتر اوقات در منطقه مورد مطالعه تحت شرایط جریان کم است.

در تحقیقات Li *et al.*, (2009)، Mathers *et al.*, (2020) و Naderi *et al.*, (2021) به این مطلب اشاره شده است که مدیریت رژیم‌های جریان رودخانه (از جمله حفظ وقایع جریان حداکثر و تنوع جریان) در حفظ تنوع زیست‌محیطی جوامع بیولوژیکی (بی‌مهرگان و ماهیان) به‌طور خاصی، موثر است و از سوی دیگر، مقدار کم جریان، احتمال حضور گونه‌های غیربومی و مهاجم (به دلیل تأثیرات زیست‌محیطی بر اکوسیستم) را افزایش می‌دهد (Gholizadeh and Zibaei, 2021). با توجه به موارد ذکر شده و دیدگاه دیگر تحقیقات (Theodoropoulos *et al.*, 2018؛ Koutrakis *et al.*, 2019) می توان به این مطلب اشاره کرد که، جریان‌های زیست‌محیطی، فقط حداقل جریان‌ها نیستند. در واقع، این جریان‌ها، ترکیبی از جریان‌های کم و زیاد (رژیم جریان متغیر در فصول مختلف) است که در رودخانه با فراوانی‌های مختلف نگهداری می‌شوند. از این رو یک فرضیه رایج بیان می‌کند که برای

برآورد دقیق جریان زیست‌محیطی، اجزای اصلی که باید در نظر گرفته شوند شامل جریان پایه، سیلاب‌های کوچک با تناوب زیاد، سیلاب‌های بزرگ با تناوب کم و جریان‌های هدف خاص (جریان نگه دارنده)، هستند (Joseph *et al*, 2021؛ King *et al.*, 2009؛ *Owusu et al.*, 2021).

محققان مختلفی در بررسی ارتباط کاربری اراضی، زیستگاه و جمعیت‌های ماهیان رودخانه‌ای گزارش کرده‌اند که ثبات جریان، ثبات ساحل و ثبات پوشش ساحلی، همبستگی مثبتی با یکدیگر داشته و مناطق با پوشش گیاهی واجد بسترهایی با ذرات درشت، می‌باشند (Gronsdahl *et al.*, 2021؛ Gholizadeh *et al.*, 2017). از سوی دیگر در رودخانه‌های کوچک، تغییرات نسبتاً زیاد پارامترهای محیطی سبب می‌شود که رودخانه به طور متناوب از بخش‌های گوداب و خیزاب شکل گیرد و این تغییرات در مقیاس کوچک سبب نوسانات در عمق آب و سرعت جریان می‌شود (Salmela *et al.*, 2020؛ Vezza *et al*, 2014). همچنین در بررسی میدانی و تحلیل مباحث صورت گرفته می‌توان بیان کرد در برخی از ایستگاه‌های رودخانه کردان، با کاهش عرض و افزایش عمق، سرعت جریان آب نیز بالا بوده و در دوره‌های خاصی از دوره رشد ماهی، قادر به تحمل شدت جریان بالای آب بودند که این موضوع سبب کاهش میزان شاخص تنوع و افزایش شاخص غالبیت شدند. افزایش عرض رودخانه سبب افزایش زیستگاه‌های مطلوب و در نتیجه افزایش تنوع گونه‌ای خواهد شد (Magilligan *et al.*, 2016؛ Wegscheider *et al.*, 2020) و در واقع عرض رودخانه هم معرف اندازه رودخانه و هم بیان کننده تنوع زیستگاهی در مقیاس محلی است (Gholizadeh and Zibaei, 2021؛ Virbickas *et al.*, 2020) که در مطالعه حاضر با افزایش عرض رودخانه، تنوع گونه‌ای، افزایش و با کاهش عرض رودخانه، تنوع گونه‌ای، کاهش یافت. نتایج حاصل در پژوهش حاضر، نیز ضمن تأیید نتایج پژوهش اشاره شده، نشان دهنده این مطلب است که با افزایش فراوانی زیستگاه گوداب، ارتباط زیستگاه بیشتری به‌وجود آمده است و پیش‌بینی می‌شود تأثیرات مثبتی بر بازگردانی و عملکرد اکوسیستم رودخانه کردان، داشته و تا ۳ برابر افزایش تعداد ماهیانی که رودخانه می‌تواند از آنها پشتیبانی و حمایت کند، در پی داشته باشد که با نتایج مطالعات Mathers *et al.*, (2020)، Yang *et al.*, (2021)، Bennetsen *et al.*, (2021) و Li *et al.*, (2009) مبنی بر وابستگی فراوانی گونه‌های مختلف ماهی به توزیع زیستگاه‌های مطلوب در طول رودخانه، در یک راستا است.

Theodoropoulos *et al.*, ،Koutrakis *et al.*, (2019) (2018) و Naderi *et al.*, (2021) در مطالعاتشان اظهار کردند که بین مطلوبیت زیستگاه ماهیان در رودخانه‌های مختلف در مراحل مختلف زندگی، تفاوت وجود دارد و چنانچه منحنی‌های مطلوبیت زیستگاه، در مراحل مختلف زندگی ماهی و در فصول مختلف در نظر گرفته شوند، می‌تواند به عنوان یک ابزار مدیریتی برای یک رودخانه مشخص یا بخشی از یک حوزه آبریز، مطرح باشند. لذا تأمین رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی، می‌تواند الگوهای اتصال طولی (مانند بالادست و پایین‌دست) و عرضی (مانند سیلابدشت) رودخانه کردان در بازه مورد مطالعه، را حفظ کند. بر این اساس و بررسی دیگر تحقیقات (Perry *et al.*, 2021؛ Wohl *et al.*, 2015؛ Wegscheider *et al.*, 2020؛ King *et al.*, 2009) می‌توان به این موضوع اشاره کرد که تنوع رژیم جریان، شرایط اکوسیستم رودخانه و عملکرد اکولوژیکی رودخانه را تعیین می‌کند و به‌طور خاص، تأمین جریان زیست‌محیطی این امکان را می‌دهد تا تنوع بیولوژیکی و سلامت رودخانه حفظ شود و به‌عنوان پاسخی به تخریب اکوسیستم‌های آبی که بیش از حد توسط اقدامات انسانی منجر شده است، مدنظر قرار گیرد. در همین راستا، پیشنهاد می‌گردد از پالس‌های مختلف جریان مانند حداکثر جریان جهت پویایی جمعیت ماهیان در زیستگاه و همچنین فعالیت‌های زیستی دوران رشد، استفاده کرد و شرایط مطلوبی را مطابق با رژیم جریان پایه رودخانه برای فعالیت‌های زیستی وابسته به تخم ریزی و تکثیر، فراهم کرد. نتایج تجزیه و تحلیل جریان زیست‌محیطی نشان می‌دهد که جریان‌های اساسی اکولوژیکی موردنیاز برای دوره تخم‌ریزی (فروردین-خرداد)، دوره نابالغ (تیر-آبان) و دوره رشد (آذر-اسفند) سیاه‌ماهی البرزی در رودخانه کردان (بخش پایین‌دست بند انحرافی) به ترتیب ۳/۴۲ متر مکعب در ثانیه ، ۱/۴۸ متر مکعب در ثانیه و ۲/۱۴ متر مکعب در ثانیه، به‌عنوان حداقل جریان مورد نیاز برای هر دوره زمانی، پیشنهاد می‌شود. همچنین در پایان دوره تخم‌ریزی (اوایل تیر)، یک جریان با حداکثر تداوم ۷ روزه (احتمال وقوع ۹۰ درصد) با دبی اوج جریان ۷/۶ متر مکعب در ثانیه جهت اطمینان از شرایط هیدرولوژیکی لازم برای تخم‌ریزی ماهی، یک فرایند سیلاب کوچک با دبی اوج جریان ۱۶/۸ متر مکعب در ثانیه برای شستشوی رسوبات ریزدانه و یک فرآیند سیل بزرگ در فصل سیلابی به مدت ۳ روز (احتمال وقوع ۵۰ درصد) با حداکثر مقدار ۲۴/۳ متر مکعب در ثانیه برای انتقال رسوبات درشت دانه و حفظ شکل کانال و نیز همزیستی و تعامل سیلابدشت با کانال رودخانه، تحریک خارجی موثر را برای تخم‌ریزی سیاه‌ماهی البرزی، فراهم می‌کند.

از دیدگاه دیگر، نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که تغییرات هیدرومورفولوژی رودخانه منجر به تغییر در توزیع

زیستگاه‌ها (خیزاب، گوداب و ...) می‌شود. همچنین می‌توان این‌گونه بیان کرد که مطالعه حاضر، به درک بهتر از تجزیه و تحلیل مطلوبیت زیستگاه ماهی ناشی از تغییرات هیدرولوژیکی عوامل فیزیکی ساخته انسان و پاسخ جوامع ماهی به این تغییرات منفی ناشی از سد و نگهداشت آب رودخانه‌ها با کاربرد مدل MesoHABSIM، کمک می‌کند. با توجه به موارد مطرح شده در پژوهش حاضر، باید خاطر نشان کرد که مدل هیدرومورفواکولوژیکی MesoHABSIM، در شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه ماهیان، تعیین جریان زیست‌محیطی ماهانه و یک رژیم اکولوژیکی قابل اعتماد برای حفظ زیستگاه ماهیان و نیز بررسی مشخصه‌های هیدرولیکی- مورفولوژیکی در احیای رودخانه، از قابلیت اعتماد بالایی برخوردار می‌باشد که این نتیجه‌گیری با مطالعات Vezza *et al,* (2014)، Koutrakis *et al.,* (2019)، Adamczyk *et al.,* (2019) و Virbickas *et al.,* (2020) همسو می‌باشد. شایان ذکر است با استفاده از مدل مزوزیستگاهی MesoHABSIM، می‌توان اهداف احیای رودخانه کردان را با تجزیه و تحلیل‌های خاصی که در کدام بازه‌های رودخانه، زیستگاه‌های در دسترس متعددی برای گونه ماهی هدف وجود دارد و تعداد آنها بسیار کم است، را با دقت بیشتری تعیین کرد. ازین منظر، قبل از انجام برنامه‌ریزی احیای رودخانه، شبیه‌سازی تغییرات هیدرومورفولوژی و تعیین اینکه آیا می‌توان مقدار مناسبی از زیستگاه‌های مطلوب و مناسب را احیا کرد، مفید خواهد بود. اگرچه این شبیه‌سازی‌ها، تقریبی هستند، اما ارزیابی اثرات اعمال شده بر حفظ زیستگاه جوامع ماهیان را امکان‌پذیر می‌کند و بنابراین راه‌حل‌های بهتری را جهت برنامه‌ریزی، پیشنهاد می‌دهد. این موارد، صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان و هزینه‌های پروژه را به همراه خواهد داشت، اما مهمتر از همه، امکان به‌دست آوردن و تأیید نتایج مورد انتظار را می‌دهد. بارزترین نکته در پژوهش حاضر این است که مطالعه حاضر شواهد کمی را برای سناریوهای مناسب تنظیم جریان رودخانه و استراتژی های حفاظت از زیستگاه ماهی ارائه می‌دهد که می‌تواند برای یافتن محدوده جریان مناسب برای ادامه فعالیت‌های زیستی آبزیان با درنظر گرفتن حساسیت‌های فصلی جوامع بیولوژیکی به کاهش جریان، آستانه سیلابی و آستانه زیستی، موثر واقع شود. نتایج بررسی مطالعات مختلف (Padikkal *et al.,* 2021؛ Perry *et al.,* 2019؛ Magilligan *et al.,* 2016) و همچنین مطالعه حاضر، اهمیت حفظ زیستگاه‌های رودخانه‌ای با احیای رژیم جریان را به خصوص در رودخانه‌های کوهپایه‌ای، نشان می‌دهند. شایان ذکر است که در آخرین بازدید میدانی صورت گرفته در آذرماه سال ۱۴۰۰ از بازه‌های مورد مطالعه رودخانه کردان، عملیات اجرایی طرح ساماندهی و دیواره‌سازی کناره‌های رودخانه با گابیون در حال انجام است، که بر اساس موارد مطرح شده در این پژوهش، پیشنهاد می‌گردد به منظور پایدارسازی و تثبیت کناره‌های رودخانه از رویکردهای حفاظت زیستی، احیای بیولوژیکی و ایجاد پوشش گیاهی در نوارهای بافر سبز ساحلی رودخانه جهت بهبود زیستگاه آبزیان، کمک به حفظ ظرفیت کانال رودخانه و بهبود فرصت‌های تفریحی در طول ساحل رودخانه، بهره‌گیری شود.

نتیجه‌گیری

مدیریت و برنامه‌ریزی جریان زیست‌محیطی رودخانه، یک استراتژی ضروری برای حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب به شیوه‌ای پایدار و از مهمترین ابزار در مدیریت جامع و یکپارچه منابع آب است. الگوهای تنظیم جریان رودخانه نقش کلیدی در تعاملات و فعل و انفعالات اکوهیدرولوژی و تعیین ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های آبی، ایفا می‌کند و همچنین مستقیماً بر متغیرهای هیدرودینامیکی، زیستگاه مورفولوژیکی ماهیان و پویایی جمعیت ماهیان، تأثیر می‌گذارند. نتایج مطالعه حاضر بر اهمیت برآورد و محاسبه جریاناتی که بر 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 آبزی و کنار رودخانه‌ای و سیلابدشت، تأثیر می‌گذارند، تاکید می‌کند و بر همین اساس، رهیافت شبیه‌سازی یکپارچه زیستگاهی، یک مجموعه کامل از مدل‌سازی و شبیه‌سازی اکوهیدرولیکی- هیدرومورفواکولوژیکی و قضاوت‌های کارشناسی را برای مدیریت جریان رودخانه، مطابق با رژیم طبیعی جریان، جهت حفاظت و احیا زیستگاه هیدرولیکی رودخانه، فراهم می‌کند. فعالیت‌های انسانی، مانند احداث بند انحرافی کردان و انتقال آب جهت مصارف آب کشاورزی دشت حاصل‌خیز هشتگرد و نظرآباد، ویژگی‌های طبیعی حوزه آبخیز کردان را تا حدودی تغییر داده و منجر به رقابت منابع آب بین ذینفعان شده است. در این مطالعه زیستگاه‌های هیدرومورفولوژیکی و وضعیت فراوانی آنها بر اساس سناریوهای مختلف رژیم جریان اکولوژیکی، تجزیه و تحلیل شد. همچنین سناریوهای تنظیم جریان اکولوژیکی رودخانه مبتنی بر شاخص مطلوبیت زیستگاه سیاه‌ماهی البرزی، مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس، حداکثر شاخص مطلوبیت زیستگاه همبستگی خاصی با حداکثر مساحت قابل استفاده وزنی به میزان ۶۸۵۰ متر مربع در دبی ۴ متر مکعب بر ثانیه، را جهت تنظیم حد بالا و پایین محدوده جریان اکولوژیکی در سال‌های مرطوب و خشک، نشان می‌دهد. همچنین نتایج تجزیه و تحلیل به‌دست

آمده از مدل‌سازی هیدرومورفواکولوژیکی - اکوهیدرولیکی نشان می‌دهد که جریان مطلوب اکولوژیکی در محدوده ۲/۱۲ متر مکعب بر ثانیه، است. ذکر این نکته لازم است که تنظیم طولانی‌مدت جریان رودخانه، منجر به کاهش جمعیت سیاه‌ماهی البرزی در بازه‌های پایین‌دست رودخانه کردان می‌شود. با این حال، بسته به تقاضای آب برای مصارف بخش کشاورزی، سطوح مختلف کاهش میزان زیستگاه در دسترس و الگوهای توزیع و پراکنش مکانی و زمانی گونه‌های ماهی، وجود خواهد داشت. در حال حاضر جریان اکولوژیکی موجود در رودخانه کردان تنها می‌تواند بخشی از نیاز آبی موجودات آبزی و ماهیان در اکوسیستم رودخانه را در ماه‌های مختلف تامین نماید. به‌عنوان یک نتیجه دیگر، بر اساس مطالعات میدانی، بازه‌های پایین‌دست بند انحرافی در رودخانه کردان، با فرآیندهای کاهش و فقر زیستگاه‌های مناسب برای جوامع بیولوژیکی، در معرض خطر است. در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که روش محاسبه جریان اکولوژیکی مبتنی بر راه‌حل‌های مبتنی بر شبیه‌سازی مطلوبیت زیستگاه ماهیان از قابلیت اعتماد بالاتر و قابل قبولی برخوردار بوده و نتایج برآورد شده در این روش، به صورت پیشنهادی است. همچنین در مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود، «بررسی تأثیر احیای سیلابدشت رودخانه در مقیاس حوضه بر تاب‌آوری سیل، فرآیندهای هیدروژئومورفولوژیکی و کریدور رودخانه»، مدنظر قرار گیرند.

سپاس‌گزاری

از راهنمایی‌ها و همفکری‌های ارزنده آقای دکتر پائولو ووزا در دپارتمان مهندسی محیط‌زیست و زمین دانشگاه تورینو ایتالیا، آقای دکتر پیوتر پارازیویچ (توسعه‌دهنده مدل شبیه‌سازی زیستگاه رودخانه) و خانم دکتر آنا گارسیاوگا در دپارتمان اکوهیدرولیک کاربردی دانشگاه والادولید اسپانیا، همراهی و همکاری تیم عملیات میدانی (آقای مهندس نوروز عباسی و ناصر رمضان‌پور) و آقای دکتر آرش جولاده‌رودبار در گروه شیلات و اکولوژی آبزیان دانشگاه تهران و همکاری دفتر مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای البرز، تشکر و قدردانی می‌گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

Adamczyk, M., Parasiewicz, P., Vezza, P., Prus, P. and De Cesare, G. (2019). Empirical validation of MesoHABSIM models developed with different habitat suitability criteria for bullhead Cottus Gobio L. as an indicator species. *Water*, 11(4), 726.

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*, 63(8), 1022-1034.

Ban, X., Diplas, P., Shih, W., Pan, B., Xiao, F. and Yun, D. (2019). Impact of Three Gorges Dam operation on the spawning success of four major Chinese carps. *Ecological Engineering*, 127, 268-275.

Bennetsen, E., Gobeyn, S., Everaert, G. and Goethals, P. (2021). Setting priorities in river management using habitat suitability models. *Water*, 13(7), 886.

Ghanavi, H.R., Gonzalez, E.G. and Doadrio, I. (2016). Phylogenetic relationships of freshwater fishes of the genus Capoeta (Actinopterygii, Cyprinidae) in Iran. *Ecology and Evolution*, 6(22), 8205-8222.

Gholizadeh, M., Toomaj, A. and Hosseindost, S. (2017). Modeling habitat requirements of riverine stone loach, Paracobitis hircanica (Teleostei: Nemacheilidae) in the Zarin-Gol River, Caspian Sea basin, Iran. *Iranian Journal of Ichthyology*, 4(4), 340-351.

Gholizadeh, M. and Zibaei, M. (2021). Evaluation of Fish Farm Effluent Contamination Using Bio-Indicators Based on Macroinvertebrate Communities. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 21(3), 107-116.

Gronsdahl, S., McParland, D., Eaton, B., Moore, R. D., & Rosenfeld, J. (2021). Evaluation of a geomorphic instream flow tool for conducting hydraulic-habitat modelling. *River Research and Applications*, *37*(10), 1520-1537.

Hayatgheibi, F., Shahnoushi, N., Ghahreman, B., Samadi, H., Ghorbani, M. and Sabouhi, M. (2021). Environmental Flow Assessment of Karun River in Upstream and Downstream of BeheshtAbad Dam. *Journal of Water and Soil*, 35(3), 319-333. (In Farsi)

Karimi, S., Salarijazi, M., Ghorbani, K. and Heydari, M. (2021). Comparative assessment of environmental flow using hydrological methods of low flow indexes, Smakhtin, Tennant and flow duration curve. *Acta Geophysica*, 69(1), 285-293.

King, A. J., Tonkin, Z. and Mahoney, J. (2009). Environmental flow enhances native fish spawning and recruitment in the Murray River, Australia. *River Research and Applications*, 25(10), 1205-1218.

Koutrakis, E.T., Triantafillidis, S., Sapounidis, A.S., Vezza, P., Kamidis, N., Sylaios, G. and Comoglio, C. (2019). Evaluation of ecological flows in highly regulated rivers using the mesohabitat approach: a case study on the Nestos River, N. Greece. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(4): 598-609.

Li, F., Cai, Q., Fu, X. and Liu, J. (2009). Construction of habitat suitability models (HSMs) for benthic macroinvertebrate and their applications to instream environmental flows: a case study in Xiangxi River of Three Gorges Reservior region, China. *Progress in Natural Science*, 19(3), 359-

367.

Loire, R., Grospretre, L., Malavoi, J.R., Ortiz, O. and Piegay, H. (2019). What Discharge Is Required to Remove Silt and Sand Downstream from a Dam? An Adaptive Approach on the Selves River, France. *Water*, 11(2), 392.

Jouladeh-Roudbar , A., Ghanavi , H.R. and Doadrio, I. (2020). Ichthyofauna from Iranian freshwater: Annotated checklist, diagnosis, taxonomy, distribution and conservation assessment. *Zoological Studies*, 59: 21.

Joseph, N., Preetha, P.P. and Narasimhan, B. (2021). Assessment of environmental flow requirements using a coupled surface water-groundwater model and a flow health tool: A case study of Son River in the Ganga basin. *Ecological Indicators*, 121, 107110.

Magilligan, F.J., Nislow, K.H., Kynard, B.E. and Hackman, A.M. (2016). Immediate changes in stream channel geomorphology, aquatic habitat, and fish assemblages following dam removal in a small upland catchment. *Geomorphology*, 252, 158-170.

Mathers, K.L., White, J.C., Fornaroli, R. and Chadd, R. (2020). Flow regimes control the establishment of invasive crayfish and alter their effects on lotic macroinvertebrate communities. *Journal of Applied Ecology*, 57(5), 886-902.

Mianabadi, H., Alioghli, S. and Morid, S. (2021). Quantitative evaluation of 'No-harm'rule in international transboundary water law in the Helmand River basin. *Journal of Hydrology*, 599, 126368.

Morid, R., Delavar, M., Eagderi, S. and Kumar, L. (2016). Assessment of climate change impacts on river hydrology and habitat suitability of Oxynoemacheilusbergianus. Case study: Kordan River, Iran. *Hydrobiologia*, 771(1), 83-100.

Mouton, A.M., De Baets, B. and Goethals, P.L. (2009). Knowledge-based versus data-driven fuzzy habitat suitability models for river management. *Environmental Modelling & Software*, 24(8), 982-993.

Naderi, M.H., Zakerinia, M. and Salarijazi M. (2019). Aquatic Ecosystems Management and Restoration of Rivers through Implementation of the Environmental Flow Regime. *Journal of Ecohydrology*, 6(3), 719-737. (In Farsi)

Naderi, M.H., Zakerinia, M. and Salarijazi M. (2020b). Design and Analysis of Optimal Ecological Flow Regime Zarrin-Gol River Using Hydrological Methods and Ecohydraulic Habitat Simulation Model. *Journal of Water and Soil*, 34(3), 515-532. (In Farsi)

Naderi, M.H., Pourgholam-Amiji, M., Khoshravesh, M., & Rajabizadeh, Y. (2020b). Analysis of Hydrological and Hydraulic Aspects in Designing Ideal and Optimal Environmental Flow Regime for Conservation of Qarasoo River Ecosystem. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(2), 464-481. (In Farsi)

Naderi, M.H., Jahandideh., O., Khanahmadi, E., Arab, N., Arab, A. and Salarijazi M,. (2021). Analysis of Application of Hydrological and Hydromorphocological Approaches in Estimating the Ecological Water Demand and Habitat Suitability Salmo trutta in the Liqvanchay River. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 15(3), 645-664. (In Farsi)

Owusu, A.G., Mul, M., Van Der Zaag, P. and Slinger, J. (2021). Reoperating dams for environmental flows: From recommendation to practice. *River Research and Applications*, 37(2), 176-186.

Padikkal, S., Sumam, K. S. and Sajikumar, N. (2019). Environmental flow modelling of the Chalakkudi Sub-basin using 'Flow Health'. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19(1), 119-130.

Parasiewicz, P. 2007. The MesoHABSIM model revisited. *River Research and Applications*, 23(8), 893-903.

Parasiewicz, P., Castelli, E., Rogers, J.N. and Plunkett, E. 2012. Multiplex modeling of physical habitat for endangered freshwater mussels. *Ecological Modelling*, 228, 66-75.

Perry, D., Harrison, I., Fernandes, S., Burnham, S. and Nichols, A. (2021). Global Analysis of Durable Policies for Free-Flowing River Protections. *Sustainability*, 13, 2347.

Robinson, C.T., Uehlinger, U.R.S. and Monaghan, M.T. (2004). Stream ecosystem response to multiple experimental floods from a reservoir. *River Research and Applications*, 20(4), 359-377.

Salmela, J., Kasvi, E., Vaaja, M.T., Kaartinen, H., Kukko, A., Jaakkola, A. and Alho, P. (2020). Morphological changes and riffle-pool dynamics related to flow in a meandering river channel based on a 5-year monitoring period using close-range remote sensing. *Geomorphology*, 352, 106982.

Schmidt, J.C., Parnell, R.A., Grams, P.E., Hazel, J.E., Kaplinski, M.A., Stevens, L.E. and Hoffnagle, T.L. (2001). The 1996 controlled flood in Grand Canyon: flow, sediment transport, and geomorphic change. *Ecological Applications*, 11(3), 657-671.

Stoffers, T., Collas, F.P.L., Buijse, A.D., Geerling, G.W., Jans, L.H., Van Kessel, N. and Nagelkerke, L.A.J. (2021). 30 years of large river restoration: How long do restored floodplain channels remain suitable for targeted rheophilic fishes in the lower river Rhine?. *Science of the Total Environment*, 755, 142931.

Tabatabaei, S.N., Segherloo, I.H., Eagderi, S. and Faradonbeh, M. Z. (2015). Habitat use of two nemacheilid fish species, Oxynoemacheilus bergianus and Paracobitis sp. in the Kordan River, Iran. *Hydrobiologia*, 762(1), 183-193.

Theodoropoulos, C., Georgalas, S., Mamassis, N., Stamou, A., Rutschmann, P. and Skoulikidis, N. (2018). Comparing environmental flow scenarios from hydrological methods, legislation guidelines, and hydrodynamic habitat models downstream of the Marathon Dam (Attica, Greece). *Ecohydrology*, 11(8), e2019.

Thompson, R.M., King, A.J., Kingsford, R.M., Mac Nally, R. and Poff, N.L. (2018). Legacies, lags and long term trends: Effective flow restoration in a changed and changing world. *Freshwater Biology*, 63(8), 986-995.

Vezza, P., Parasiewicz, P., Spairani, M. and Comoglio, C. (2014). Habitat modeling in high gradient streams: the mesoscale approach and application. *Ecological Applications*, 24(4), 844-861.

Virbickas, T., Vezza, P., Kriauciuniene, J., Akstinas, V., Sarauskiene, D. and Steponėnas, A. (2020). Impacts of low-head hydropower plants on cyprinid-dominated fish assemblages in Lithuanian rivers. *Scientific Reports*, 10(1), 1-14.

Wegscheider, B., Linnansaari, T., Monk, W.A. and Curry, R.A. (2020). Linking fish assemblages to hydro-morphological units in a large regulated river. *Ecohydrology*, 13(7), 1-14.

Wohl, E., Lane, S.N. and Wilcox, A.C. (2015). The science and practice of river restoration. *Water Resources Research*, 51(8), 5974-5997.

Yamani, M., Goorabi, A. and Alizadeh, S. (2015). Prediction of kordan river geometric changes in the meandering Range. *Environmental Erosin Research*, 5 (3), 1-14. (In Farsi)

Yang, L., Hou, J., Cheng, L., Wang, P., Pan, Z., Wang, T. and Liu, N. (2021). Application of Habitat Suitability Model Coupling with High-precision Hydrodynamic Processes. *Ecological Modelling*, 462, 109792.

Yu, Z., Zhang, J., Zhao, J., Peng, W., Fu, Y., Wang, Q. and Zhang, Y. (2021). A new method for calculating the downstream ecological flow of diversion-type small hydropower stations. *Ecological Indicators*, 125, 107530.