

مدل سازی اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش ماهی سونگ، *Luciobarbus esocinus* Heckel

1843 در سناریوهای مختلف اقلیمی

محمود رضایی^۱، عبدالرحیم پذیرا^{۱*}، حسین مصطفوی^{۲*}، آزاد تیموری^۳ و فاضل امیری^۱

^۱گروه محیط زیست، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

^۲گروه تنوع زیستی و مدیریت اکوسیستم‌ها، پژوهشکده علوم محیطی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۳گروه زیست شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

سابقه و هدف: ایران یکی از نقاط داغ تنوع زیستی در جهان است، با این حال، گونه‌های ماهیان رودخانه‌ای در این کشور در حال حاضر در معرض تهدید انواع فشارهای انسانی و طبیعی قرار دارند. تغییر اقلیم به عنوان یک تهدید بزرگ در کنار سایر تهدیدها می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر تنوع زیستی ماهیان آب شیرین داشته باشد. در این راستا، پیش‌بینی تغییرات بالقوه زیستگاه در پاسخ به تغییرات اقلیمی برای گونه‌های ماهیان آب شیرین در ایران بسیار ضروری است. ماهی سونگ از خانواده کپورماهیان به عنوان یکی از ماهیان اقتصادی و ارزشمند و نیز یک گونه حفاظتی در طبقه آسیب‌پذیر اتحادیه بین‌المللی حفاظت از طبیعت (IUCN) قرار دارد. بنابراین، مطالعه اثر تغییر اقلیم بر پراکنش این گونه در حفظ ذخایر آن در آینده اهمیت بسزایی می‌تواند داشته باشد. هدف کلی از این مطالعه، مدل‌سازی پراکنش مکانی ماهی سونگ با استفاده از مدل مکسنت (MaxEnt) در دو مقیاس زمانی (۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ میلادی) تحت سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) در محیط نرم‌افزاری R می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه از مدل MaxEnt برای پیش‌بینی توزیع فضایی ماهی سونگ در دو مقیاس زمانی مختلف (۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ پس از میلاد) تحت سناریوهای خوش‌بینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) استفاده گردید. برای تحلیل از محیط نرم‌افزار R استفاده شده است. متغیرهای محیطی شامل شیب، محدوده دمایی سالانه، تجمع جریان، بارندگی سالانه، دمای میانگین سالانه و منطقه زهکشی بالادست می‌باشند.

نتایج و بحث: این مدل عملکرد عالی را در پیش‌بینی توزیع گونه‌ها نشان می‌دهد، همانطور که با AUC بالا ارزش معیار ۰.۹۸۹ نشان داده شده است. در بین متغیرهای محیطی، میانگین سالانه دما و شیب به عنوان مؤثرترین عوامل در تعیین پراکنندگی ماهی سونگ ظاهر می‌شوند. علاوه

* Corresponding Author: Email Address. devobio.sbuk@gmail.com; hmostafaviw@gmail.com

بر این، این مطالعه کاهش پیش بینی شده در محدوده پراکنش این گونه را تحت سناریوهای خوش بینانه و بدبینانه برای سال های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ نشان می دهد.

نتیجه گیری: برای حفاظت از ماهی سونگ، شناسایی و اجرای اقدامات مناسب برای مدیران ضروری است. هدف این اقدامات باید کاهش اثرات تغییرات آب و هوایی و کاهش تهدیدات مرتبط با این تغییرات باشد.

واژه‌های کلیدی: تنوع زیستی، حفاظت، تغییر اقلیم، مدلسازی توزیع گونه، ایران.

مقدمه

تنوع زیستی در واقع به گوناگونی موجودات زنده درون بوم نظام‌ها و مجموعه‌های بوم‌شناختی و روابط متقابل آن‌ها اشاره دارد. در یک اکوسیستم با تنوع بالاتر زنجیره غذایی طولانی‌تر، روابط متقابل پیچیده‌تر و خودتنظیمی اکوسیستم بالاتر است که نتیجه تمامی این‌ها پایداری اکوسیستم‌های با تنوع بالاتر است و برعکس آن اگر تنوع در اکوسیستمی پایین باشد به معنی روابط ضعیف‌تر و شکنندگی زنجیره‌های غذایی و چرخه‌های بیولوژیکی است که نتیجه آن ناپایداری اکوسیستم است.

بیش از دو دهه قبل، تنوع زیستی با تهدید بی‌سابقه‌ای از لحاظ از دست رفتن زیستگاه‌ها و دیگر فشارهای انسانی روبرو شد. از آن زمان پیشرفت در پژوهش‌های علمی و تکنولوژی، باعث بهبود اطلاعات مادر مورد جمعیت گسترده‌ای از حیوانات، گیاهان، قارچ‌ها، بی‌مهرگان و میکروارگانیسم‌های تشکیل‌دهنده‌ی اکوسیستم‌های زمین شده است، اما هنوز تهدیدات و فشارهای وارده بر تنوع زیستی که محصول مجموعه‌ای از فعالیت‌های انسانی است؛ به قوه‌ی خود باقی است (Staudinger *et al.*, 2013). فعالیت‌هایی همچون تخریب زیستگاه‌ها، معرفی گونه‌های غیربومی، بهره‌برداری بیش‌ازاندازه از منابع، آلودگی و بیماری‌ها از تهدیدات مهم بر تنوع گونه‌ای کشور محسوب می‌شوند (Makki *et al.*, 2023 a, b).

امروزه مجامع بین‌المللی و دولت‌ها، تغییر اقلیم را به عنوان رویداد مهم دیگری که آثار ناخوشایند آن کلیه زیست‌بوم‌های گیاهی، جانوری و انسانی را مورد تهدید قرار می‌دهد، مورد توجه قرار داده‌اند (Soboti, 2011)؛ چرا که تسریع در انقراض بسیاری از گونه‌های گیاهی، جانوری و آبی از پیامدهای این پدیده است (Niknam and Asadi Moghaddam, 1391). بنابراین، تغییر اقلیم یکی از عوامل جهانی تهدیدکننده تنوع زیستی محسوب می‌شود (Ricciardi and Rasmussen, 1999; Heino *et al.*, 2009).

اثرات تغییر اقلیم از نظر جغرافیایی و فصلی متفاوت است (Cheung *et al.*, 2009; Margules and Pressey, 2000) و اکوسیستم‌های آبی به ویژه اکوسیستم‌های آب شیرین از جمله مهم‌ترین اکوسیستم‌ها محسوب می‌شوند که تحت تاثیر پیامدهای تغییر اقلیم قرار می‌گیرند (Mostafavi *et al.*, 2014, 2019 a, b).

با توجه به روند تغییر اقلیم در مقیاس جهانی و موقعیت جغرافیایی فلات ایران این پدیده اثرات فراوانی بر اکوسیستم‌های آبی کشور خواهد داشت. بر اساس گزارشات و مدل‌سازی‌های انجام‌شده، کشور ایران در طی چند دهه آینده تغییرات قابل توجهی در الگوهای اقلیمی تجربه خواهد کرد (Abbaspour *et al.*, 2009).

استفاده از روش‌های مدل‌سازی برای شبیه‌سازی فرایندهای جهان واقعی به شکل ساده کمک می‌کنند تا شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های طبیعی با تمام پیچیدگی‌های موجود میسر شود. یکی از مهم‌ترین روش‌ها در مدل‌سازی عرصه‌های محیط طبیعی مدل‌سازی توزیع گونه‌ها (SDM) می‌باشد که به عنوان ابزاری جهت بررسی ارتباط بین داده‌های توزیع جغرافیایی گونه (حضور یا فراوانی در مکان‌های شناخته شده) با اطلاعات در مورد شرایط محیطی گونه تعریف می‌شود (Leathwick, 1998).

از مهم‌ترین جنبه‌های مدل‌سازی توزیع گونه‌ها (Species Distribution Modeling (SDM)) علاوه بر توانایی این روش برای استفاده در مطالعات گوناگون، پتانسیل این روش برای انجام مطالعات با هزینه و زمان کمتر نسبت به روش‌های معمول جمع‌آوری اطلاعات برای مقیاس‌های متفاوت زمانی و پیش‌بینی نتایج روندهای در حال وقوع برای آینده مانند بررسی اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌ها است.

از گذشته تا کنون، تغییر اقلیم سبب تغییرات چشم‌گیری در پراکنش گونه‌ها شده است (Davis, 1986) و با توجه به اینکه مدیریت یک گونه بدون آگاهی از نیازهای زیستگاهی آن امکان‌پذیر نیست، تحلیل روابط بین گونه و محیط زیست آن یک مسئله اساسی در دانش بوم‌شناسی می‌باشد (Verdipour, 2013) و شناخت زیستگاه و نیازهای زیستگاهی گونه می‌تواند در جهت حفاظت و تدوین برنامه‌های مدیریتی بسیار مؤثر واقع گردد (Shoreybi *et al.*, 2018).

در حال حاضر، MaxEnt یکی از قوی‌ترین و کارآمدترین روش معرفی شده مبتنی بر داده‌های حضور گونه با تعداد نقاط پراکنش کم در زمینه مدل‌سازی توزیع گونه‌ها است و کارایی آن به عنوان یکی از روش‌های مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای در مقایسه با سایر روش‌ها با نقاط کم مشاهدات بهتر ارزیابی شده است (Elith *et al.*, 2011). MaxEnt یکی از الگوریتم‌های بسیار رایج یادگیری ماشینی است و اصل آن به حداکثر آنتروپی یا نزدیک به واقعیت بر می‌گردد. بر این اساس مدل‌سازی زیستگاه به معنی انتخاب توزیعی که به توزیع یکنواخت نزدیک باشد، است (Elith *et al.*, 2006; Pearson *et al.*, 2007).

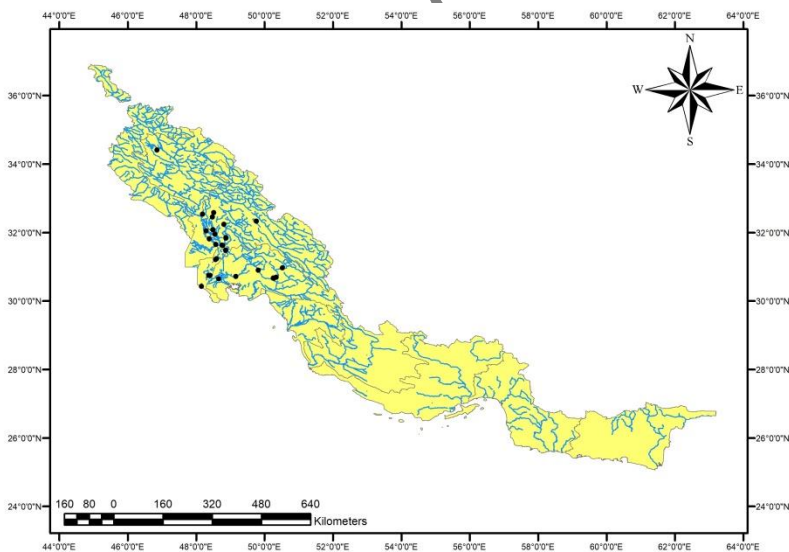
گونه‌ی مورد مطالعه

ماهی سونگ (*L. esocinus*) (شکل ۲) از خانواده کپورماهیان می باشد. پراکنش بومی این گونه محدود به حوضه ی آبریز دجله و فرات در عراق و حوضه ی آبریز خلیج فارس ایران (حوضه ی دجله) می باشد (Çiçek *et al.*, 2015). این ماهی تا اندازه‌های بزرگی رشد می‌کند و ممکن است به بیش از ۲ متر هم برسد. این ماهی یک گونه‌ی ماهی‌خوار بوده و زیستگاه آن شامل گودال‌های عمیق و قسمت‌های میانی رودخانه‌های بزرگ و سدها است. ماهی سونگ از لحاظ حفاظتی در شرایط مناسبی قرار ندارد. داده‌های پراکنش این گونه از منابع مختلف (Coad, 2018) و نمونه‌برداری‌های شخصی جمع‌آوری و نقشه پراکنش آن توسط نرم‌افزار ArcGIS ver. 10.8 تهیه و آماده شد (شکل ۳).



شکل ۲- شکل ظاهری ماهی سونگ (Keyvani *et al.*, 2016)

Fig. 2- *Luciobarbus esocinus* (Keyvani *et al.*, 2016)



شکل ۳- پراکنش بالفعل ماهی سونگ

Fig. 3- The realized distribution of *Luciobarbus esocinus*.

آماده‌سازی متغیرهای محیطی و اقلیمی

در این مطالعه، ابتدا لایه‌های مورد نیاز طبق منابع ذکر شده در جداول ۱ و ۲ دانلود و در مقیاس ایران با نرم‌افزار ArcGIS ver. 10.8 استانداردسازی شد. سپس محدوده مورد مطالعه در نرم‌افزار Google earth ver. 5.1 تعیین و لایه‌های مورد نیاز در این محدوده نیز توسط نرم‌افزار ArcGIS ver. 10.9 برش داده شدند. پس از آماده‌سازی لایه‌ها با توجه به نظر کارشناسی و نیاز اکولوژیکی گونه، در مجموع ۲۶ متغیر محیطی مربوط به پراکنش گونه مورد مطالعه در ابتدا انتخاب شدند (جدول ۱).

جدول ۱- متغیرهای محیطی مربوط به پراکنش گونه مورد مطالعه

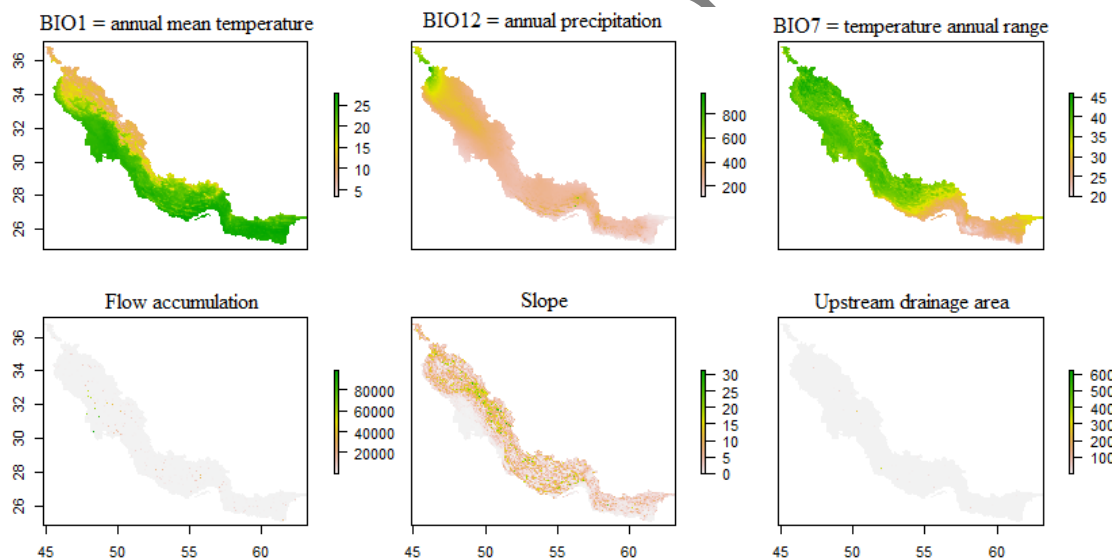
Table 1. Environmental variables associate with the distribution of the studied species

منبع	متغیرها	طبقه‌بندی
	دمای متوسط سالانه (°C)	
	محدوده‌ی متوسط دمای روزانه (°C)	
	دمای فصلی (انحراف معیار × ۱۰۰)	
	حداکثر دمای گرم‌ترین ماه (°C)	
	حداقل دمای سردترین ماه (°C)	
	محدوده‌ی سالانه دما (°C)	
	میانگین دما در سه ماهه مرطوب (°C)	
	میانگین دما در سه ماهه خشک (°C)	
	میانگین دمای گرم‌ترین سه ماهه (°C)	
	میانگین دمای سردترین سه ماهه (°C)	
www.worldclim.org	بارش سالانه (mm)	متغیرهای زیست اقلیمی
	بارش ماه‌های مرطوب (mm)	
	بارش ماه‌های خشک (mm)	
	بارش فصلی (mm)	
	بارش یک چهارم پر باران سال (mm)	
	بارش یک چهارم خشک سال (mm)	
	بارش گرم‌ترین یک چهارم سال (mm)	
	بارش سردترین یک چهارم سال (mm)	
	جهت (Degree)	
	شیب (Degree)	
www.worldgrids.org www.isric.org	ارتفاع (m)	متغیرهای توپوگرافی
	تابش خورشیدی ($\text{kJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)	
	جریان تجمعی (%)	مجموعه داده‌های هیدروگرافی جهانی
http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamadai/MERIT_Hydro/	ارتفاع متوسط حوضه (m)	

عرض رودخانه (m)

مساحت حوضه‌ی بالادست (Km²)

سپس همبستگی متغیرها با آزمون پیرسون (r) بررسی شد. اگر دو متغیر همبستگی بالایی داشتند ($|r| > 0.70$)، برای جلوگیری از هم خطی یکی از آن‌ها با توجه به نظر کارشناسی انتخاب و دیگری حذف شد (Elith *et al.*, 2011). برای نشان دادن تأثیرات تغییرات اقلیمی نیز متغیرهای پیش‌بینی‌شده آب و هوایی آینده (سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰) از وب‌سایت تغییرات آب و هوایی، کشاورزی و امنیت غذایی (<http://www.ccafs-climate.org>) استخراج شدند. برای این منظور، از مدل گردش عمومی (GCM) تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای خوش‌بینانه (RCP 2.6) و بدبینانه (RCP 8.5) میانگین گرفته شد. وضوح متغیرهای محیطی مورد استفاده در این مطالعه حدود 1×1 کیلومتر بود. در نهایت، شش متغیر محیطی شامل شیب، محدوده‌ی سالانه دما، جریان تجمعی، بارش سالانه، دمای متوسط سالانه و مساحت حوضه‌ی بالادست پس از آزمون همبستگی برای مدل‌سازی انتخاب شدند (شکل ۴). متغیرهای منتخب در جدول ۲ موجود است.



شکل ۴- لایه‌ها/متغیرهای محیطی انتخاب شده نهایی برای مدل‌سازی
Fig. 4- The final selected layers/environmental variables for modeling

جدول ۲- متغیرهای محیطی مورد استفاده در مدل‌سازی.

Table 2. Environmental variables employed in the modeling process

منبع	متغیرها	طبقه‌بندی
	BIO1 = دمای متوسط سالانه (°C)	
www.worldclim.org	BIO7 = محدوده‌ی سالانه دما (BIO5-BIO6) (°C)	متغیرهای زیست اقلیمی
	BIO12 = بارش سالانه (mm)	

تکنیک مدل‌سازی

در این مطالعه، مدل‌سازی توسط الگوریتم MaxEnt (Phillips *et al.*, 2006) در محیط نرم‌افزار R انجام شد. این الگوریتم از طریق بسته نرم‌افزاری dismo v1.1-4 در محیط برنامه‌نویسی R v3.2.3 (R Core Team, 2018) مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی مدل‌ها ۱۰ بار اعتبارسنجی متقابل انجام شد (Valavi *et al.*, 2019). در این راستا، داده‌ها به طور تصادفی به ۱۰ قسمت تقسیم شدند که ۹ قسمت آن برای ایجاد مدل و ۱ قسمت آن برای بررسی کارایی مدل مورد استفاده قرار گرفت. به منظور تعیین متغیرهای اصلی محیطی که بر پراکنش بالقوه گونه مورد مطالعه تأثیر می‌گذارد، از اهمیت جایگشتی در خروجی نرم‌افزار استفاده شد (Abdelaal *et al.*, 2019). برای ارزیابی صحت نتایج مدل‌سازی، مساحت زیر منحنی (AUC) محاسبه شد (Tuan *et al.*, 2019). دامنه AUC بین ۰ و ۱ است. مقادیر کمتر از ۰/۵ عملکرد پیش‌بینی تصادفی و مقادیر ۱ پیش‌بینی کامل را نشان می‌دهند (جدول ۳). در حقیقت، مقادیر کمتر از ۰/۵ نشانگر مدل‌های نامناسب است (Elith *et al.*, 2006).

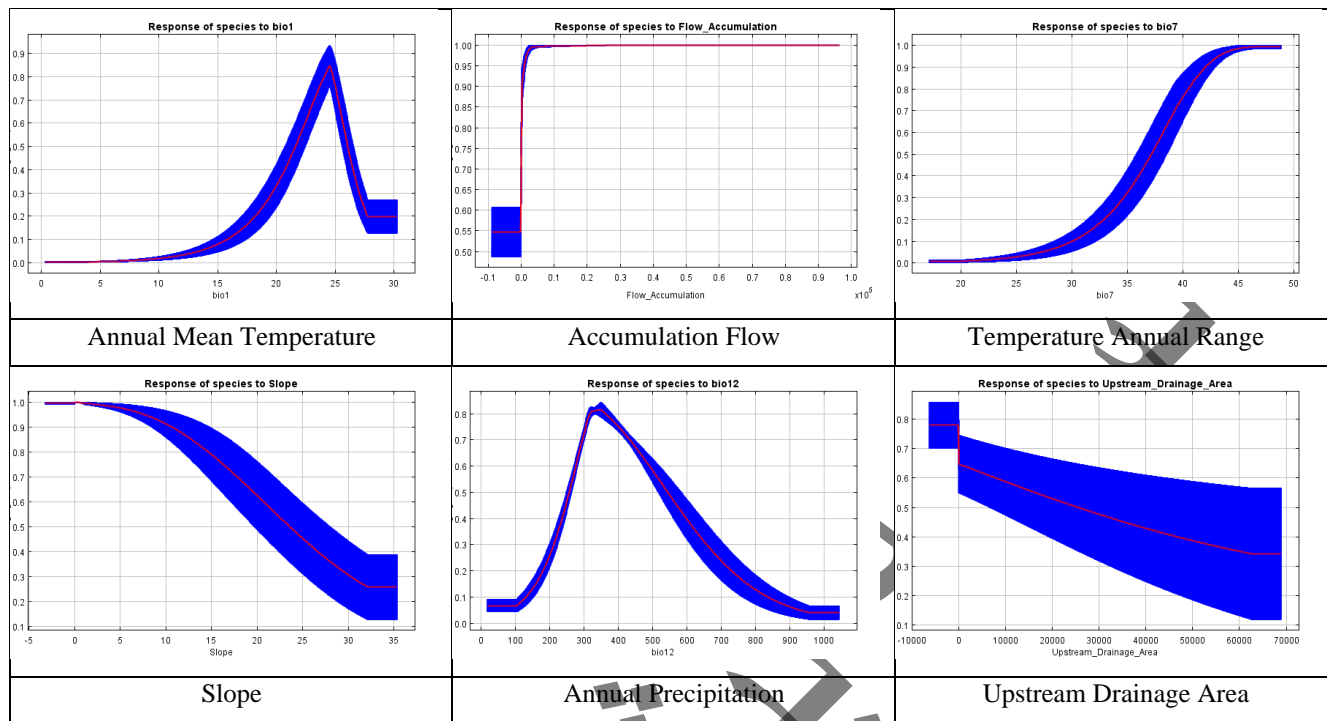
جدول ۳- طبقه‌بندی کمی و کیفی عملکرد مدل بر اساس شاخص AUC (Tuan *et al.*, 2019)

Table 3. Quantitative and qualitative classification of model performance based on the AUC index (Tuan *et al.*, 2019)

عملکرد مدل	مقادیر AUC
خیلی ضعیف	۰.۶-۰.۷
ضعیف	۰.۸-۰.۷
خوب	۰.۹-۰.۸
عالی	۱-۰.۹

نتایج و بحث

بر اساس شاخص AUC، مدل‌سازی با عملکرد عالی (0.918) انجام شده است. رابطه متغیرهای محیطی در ارتباط با پراکنش گونه در شکل ۵ بخوبی نشان داده شد. در عین حال، از میان متغیرهای به‌کار رفته برای مدل‌سازی، میانگین همای سالیانه (BIO1) بالاترین اهمیت و متغیر مساحت زهکشی منطقه بالادست (Upstream Drainage Area) کمترین اهمیت را در مدل‌سازی پراکنش این گونه داشته است (شکل ۵). نتایج مدل‌سازی نشان‌دهنده تغییرات شدید در محدوده پراکنش بالقوه برای این گونه تحت سناریو خوش‌بینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) در هر دو مقیاس زمانی (۲۰۵۰ و ۲۰۸۰) در آینده احتمالاً خواهد بود (جدول ۴ و شکل



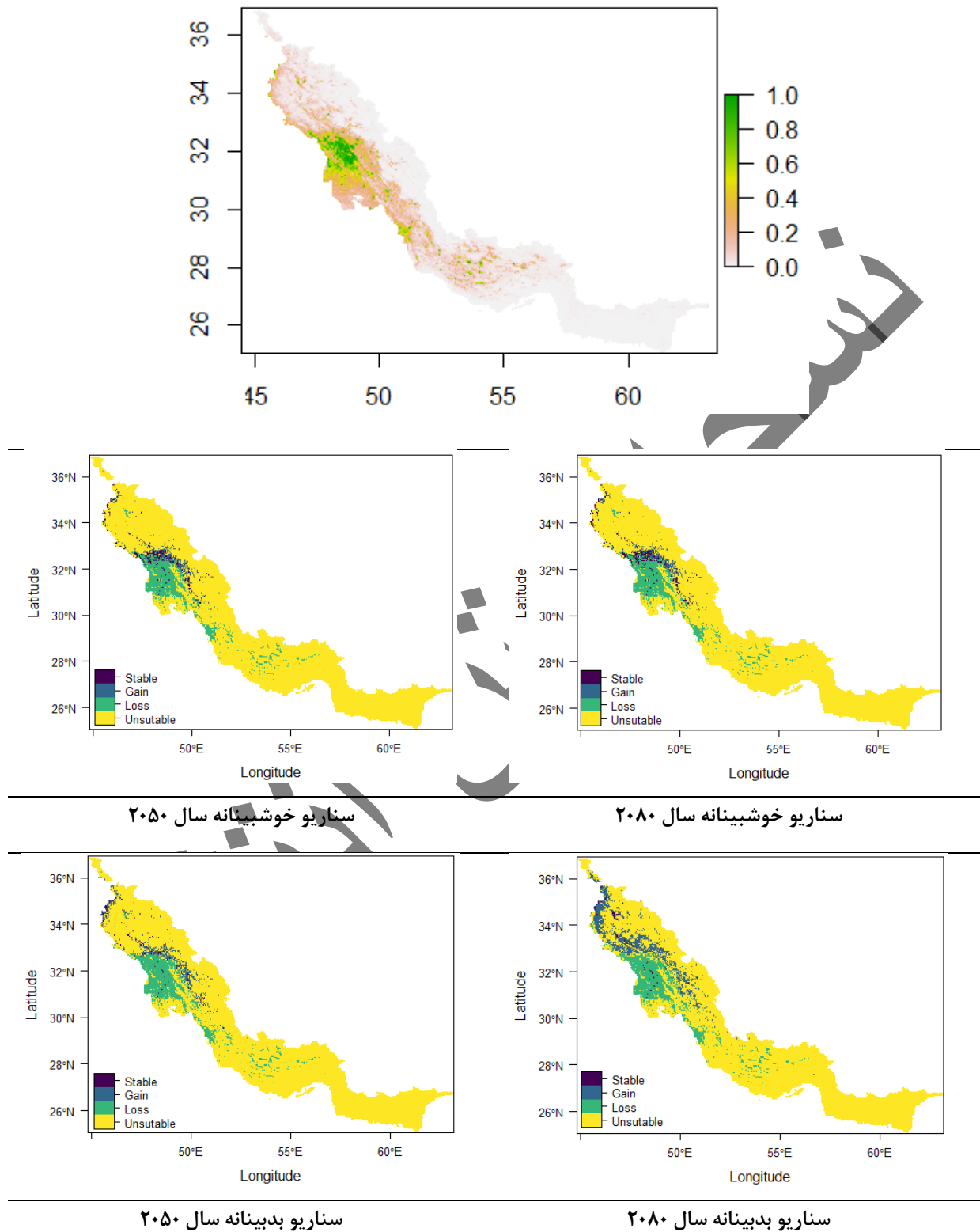
شکل ۵- منحنی پاسخ متغیرهای محیطی در ارتباط با پراکنش ماهی سونگ.

Fig. 5- Response curve of environmental variables concerning distribution of *Luciobarbus esocinus*

جدول ۴- میزان (درصد) تغییرات زیستگاهی در سناریوها و دوره‌های زمانی مختلف برای ماهی سونگ

Table 4. changes in habitat under various scenarios and time periods for *Luciobarbus esocinus*

سناریو خوشبینانه (RCP 2.6)			سناریو بدبینانه (RCP 8.5)			سناریو زمان
تغییر	Loss	Gain	تغییر	Loss	Gain	
-70.69	83.92	13.24	-65.56	90.92	25.36	2050
-66.86	82.59	15.73	-27.08	94.23	67.16	2080



شکل ۶- پراکنش بالقوه و نتایج مدل سازی تحت سناریوهای خوش بینانه و بدبینانه ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ برای ماهی سونگ.

Fig. 6- Potential distribution and modeling results under optimistic and pessimistic scenarios for the years 2050 and 2080 for *Luciobarbus esocinus*

هرچند نتایج حاصل از مدل‌سازی، به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در سناریوهای تغییر اقلیم (Heikkinen *et al.*, 2006) و در تکنیک‌های مدل‌سازی (Guisan *et al.*, 2017; Leathwick, 1998)، نمی‌تواند پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه دهد، اما این نتایج می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد تهدیدهای تنوع زیستی، محدوده‌های توزیع گونه‌ها در آینده، غنای گونه‌ای و ترکیب گونه‌ها ارائه دهد و در نتیجه بر اساس این نتایج می‌توان به ایده‌هایی برای طراحی استراتژی حفاظتی، تعیین اولویت‌های حفاظتی و حتی طراحی شبکه‌های حفاظتی برای گونه‌ها و مناطق دست یافت (Heino *et al.*, 2009; Leathwick, 1998). مدیران و سیاست‌گذاران نیز جهت برنامه‌ریزی‌های آینده برای مقابله با پدیده تغییر اقلیم در حفاظت از تنوع زیستی و در صورت لزوم، احیاء زیستگاه‌ها نیازمند آگاهی از چگونگی تأثیرپذیری آنها در برابر روند تغییرات آینده هستند. برای این منظور، مدل‌سازی توزیع گونه‌ها ابزار ارزشمند و کاربردی در دنیا شناخته شده است (Leathwick, 1998). معمولاً این مدل‌ها، کمی یا تجربی هستند که با استفاده از داده‌های مکانی موقعیت گونه‌ها و متغیرهای زیست‌محیطی که بر توزیع گونه‌ها اثر می‌گذارند، روابط گونه-محیط را مدل‌سازی می‌کنند. روابط تجربی بین توزیع امروزی گونه با متغیرهای اقلیمی، برای تخمین توزیع جغرافیایی گونه تحت سناریوهای اقلیمی آینده استفاده می‌شود. اگر شرایط جدید همچنان در دامنه‌ای باشد که گونه بتواند آن را تحمل کند، گونه قادر به ماندگاری است در غیر این صورت گونه مجبور به جابه‌جایی به مناطق مناسب جدید و در دسترس هست و یا در صورت عدم وجود زیستگاه مطلوب گونه ممکن است به سمت انقراض برود (Leathwick, 1998; Guisan *et al.*, 2017).

در این مطالعه، بر اساس مدل‌سازی انجام گرفته پیش‌بینی می‌شود که در گستره زیستگاهی ماهی سونگ در آینده، هم افزایش و هم کاهش بوجود آید، اما احتمالاً میزان کاهش بیشتر از افزایش خواهد بود. بنابراین، دامنه پراکنش یا برآیند توزیع مکانی گونه در آینده منفی یا کاهشی می‌شود. از آنجا که این گونه در لیست قرمز IUCN طبقه بندی شده است، بنابراین تغییر اقلیم فشار مضاعفی بر آن ایجاد خواهد کرد، که ممکن است حتی توزیع و جمعیت گونه را محدودتر نماید. این مطالعه، با مطالعات سایر محققین هم به نوعی سازگاری دارد که به آنها در زیر پرداخته می‌شود، زیرا گونه‌ها با توجه به نیاز و ذات اکولوژیکی شان یا واکنش فقط افزایشی، یا فقط کاهشی، یا هم کاهشی و افزایشی (در این حالت برآیند واکنش ممکن است مثبت یا منفی باشد) از خود نشان می‌دهند و یا حتی ممکن است تغییری در پراکنش آنها بر اثر تغییر اقلیم ایجاد نشود (Makki *et al.*, 2023 a, b).

Filipe *et al.* (2013) اثرات تغییرات اقلیمی را بر روی پراکنش ماهی قزل‌آلای خال قرمز در شبکه رودخانه‌ای حوضه‌های ابرو، دانوب و آلپ در اروپا بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داده که پراکنش این گونه در طول زمان و در سناریوهای مختلف زمانی محدودتر می‌شود.

Bond *et al.* (2011) پراکنش ۴۳ گونه از ماهیان رودخانه ویکتوریا را در ارتباط با تغییرات اقلیمی مدل‌سازی نموده‌اند. که نتایج آنها نشان داده خیلی از گونه‌ها از گستره پراکنش کنونی خود جابجا خواهند شد. تغییرات جابجایی در سناریوهای خوشبینانه تغییرات اقلیمی از ۳۸٪ تا ۶۳٪ و در سناریوهای بدبینانه از ۴۷٪ تا ۱۸۲٪ خواهد بود. در این مطالعه نیز با توجه به مدل‌سازی‌ها و نقشه‌ها، نشان داده شد که زیستگاه این گونه در مناطق پایین دست اغلب از دست خواهد رفت و گونه تا حدودی در سناریوهای مختلف به سمت بالادست مهاجرت می‌نماید.

در مطالعه‌ای دیگر توسط Kim *et al.* (2000)، از مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) برای پیش‌بینی توزیع ۷۶ گونه ماهی (بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ و سال‌های ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۵ و ۲۰۴۵ تا ۲۰۵۵) بر اساس سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 در پنج حوضه رودخانه‌های اصلی (Yeongsan, Seomjin, Geum, Nakdong, Han) در کره جنوبی استفاده شد. بر اساس این مطالعه، کاهش بارزی در شاخص غنای گونه‌ای تحت سناریوی RCP 8.5 نسبت به سناریو RCP 4.5 و در سال ۲۰۵۰ در مقایسه با سال ۲۰۳۰ مشاهده شد.

Buisson *et al.* (2008)، تغییر و تنوع ساختار ماهیان رودخانه‌ای ۹ حوضه آبخیز فرانسه را با روش presence-absence مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که گونه‌های سردابی کاهش قابل توجهی در سایت‌هایشان نشان داده‌اند. علاوه بر این، تعداد زیادی از گونه‌های گرمابی نیز محدود به سایت‌های جدید شدند. به عبارتی دیگر، گونه‌های مناطق بالادستی رودخانه نسبت به گونه‌های پایین دستی بسیار آسیب پذیرتر بوده‌اند. بنابراین، به احتمال زیاد، تغییر اقلیم سبب تغییر غنای گونه‌های محلی و در نتیجه تغییرات معنی‌داری در ساختار و ترکیبات ماهیان به وجود خواهد آورد.

در مطالعه ای دیگر، اثرات تغییر اقلیم بر توزیع سیاه ماهی ریزپولک (*Capoeta buhsei*) در آب‌های داخلی ایران مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه با استفاده از مدل MaxEnt اثرات تغییرات اقلیم بر پراکنش گونه مذکور پیش‌بینی شد. نتیجه بررسی پراکنش گونه تحت تاثیر تغییرات اقلیمی نشان داد که این گونه احتمالاً نزدیک به ۵۸ درصد از زیستگاه‌های مطلوب خود را تحت تاثیر تغییرات اقلیمی آینده (بر اساس مدل CCSM4 و سناریوی RCP 8.5 برای سال ۲۰۷۰) از دست خواهد داد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود تغییرات اقلیمی آینده تاثیرات منفی عمیقی روی این گونه بومزاد داشته باشد (Yousefi *et al.*, 2020).

در مطالعه ای دیگر، اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های توزیع گونه بر پراکنش ماهی کولی کورا (*Alburnus filippii*) توسط نه الگوریتم مختلف (GLM, GM, A GBM, RF, SRE, ANN, MARS, FDA, CTA) در دو مقیاس زمانی (۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ میلادی) تحت سناریوهای خوشبینانه و بدبینانه پیش‌بینی مورد مطالعه قرار گرفت (Mostafavi *et al.*, 2018). نتایج حاصل از این پژوهش نشان داده است که پراکنش این گونه در تمامی سناریوهای اقلیمی در دو مقیاس زمانی ۱۰٪ کاهش خواهد داشت و هیچ منطقه بالقوه جدیدی برای پراکنش این گونه پیش‌بینی نشده است.

Maki et al. (2019). پراکنش گونه فیل ماهی (*Huso huso*) را تحت سناریوهای اقلیمی خوش‌بینانه (RCP 4.5) و بدبینانه (RCP 8.5) در دو مقیاس زمانی (۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ میلادی) در رودخانه‌های حوضه جنوبی دریای خزر پیش‌بینی کردند و دریافتند که تغییر اقلیم احتمالاً سبب تغییر در زیستگاه‌های مطلوب این گونه در همه سناریوها در آینده خواهد شد.

علاوه بر این، Maki et al. (2021) اثر تغییر اقلیم را بر پراکنش ماهی گامبوزیا (*Gambusia holbrooki*) با استفاده از مدل MaxEnt تحت سناریوهای خوش‌بینانه (RCP 4.5) و بدبینانه (RCP 8.5) در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ در مقیاس ایران پیش‌بینی کرده‌اند. بر مبنای پیش‌بینی‌های آنها، زیستگاه‌های مطلوب این گونه نه تنها شامل مناطق حضور کنونی آن می‌شود، بلکه در برخی از حوضه‌های دیگر ممکن است گسترش یابد. به عبارتی دیگر، انتظار می‌رود این گونه در مناطق مطلوب جدیدی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در آینده، گسترش یابد. بنابراین، می‌توان دریافت که گونه‌ها واکنش‌های مختلفی را با توجه به نیازهای اکولوژیکی‌شان نشان می‌دهند و هر چه گونه‌ها به تغییر اقلیم و یا تغییرات محیطی حساس‌تر باشند، پراکنش آنها محدودتر خواهد شد.

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت از آنجایی که افزایش دما در آب‌ها به دنبال تغییر اقلیم، موجب کاهش اکسیژن محلول می‌شود و از آنجایی که گونه سونگ نسبت به کمبود اکسیژن کم تحمل است، نتایج مدل‌سازی نیز تایید می‌کنند که دامنه پراکنش این گونه در آینده با کاهش مواجه خواهد شد. در عین حال با توجه به وجود عدم قطعیت و خطا در مدل‌ها، پیشنهاد می‌شود که در آینده این نتیجه با متغیرها و داده‌های بیشتر و حتی با مدل‌های مکانیکی تست و بررسی شود. با توجه به امکان کاهش محدوده پراکنش این گونه تحت تاثیر تغییر اقلیم، توصیه می‌شود زیستگاه‌ها و مکان‌های مطلوب برای زیست آن شناسایی و حفظ شوند و در کنار آن، اقدامات مدیریتی لازم برای تعدیل، تطبیق و سازگاری در برابر اثرات تغییر اقلیم به کار گرفته شود. در خاتمه، نتایج مطالعه حاضر، در زمینه مدیریت و حفاظت این گونه، اطلاعات مفید و ارزشمندی را فراهم می‌کند و استفاده از راهبردهایی همچون مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها و پیش‌بینی محدوده پراکنش آنها می‌تواند اولویت‌های حفاظتی را تا حدودی تعیین کرده و به مدیران عرصه حفاظت از تنوع زیستی در ارائه استراتژی‌های گوناگون برای حفاظت از گونه‌ها و به طور کلی اکوسیستم‌های آب شیرین و رودخانه‌ها و نیز توسعه مرزهای دانش کمک شایانی بنماید.

منابع

Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S. and Yang, H. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*. 45(10), 1-16.

Abdelaal, T., Michielsen, L., Cats, D., Hoogduin, D., Mei, H., Reinders, M.J. and Mahfouz, A., 2019. A comparison of automatic cell identification methods for single-cell RNA sequencing data. *Genome Biology*. 20, 194.

- Bond, F. W., Hayes, S. C., Baer, R. A., Carpenter, K. M., Guenole, N., Orcutt, H. K., Waltz, T. and Zettle, R. D. 2011. Preliminary psychometric properties of the Acceptance and Action Questionnaire-II: a revised measure of psychological inflexibility and experiential avoidance. *Behavior Therapy*. 42(4), 676–688.
- Buisson, L., Thuiller, W., Lek, S., Lim, P. U. Y. and Grenouillet, G., 2008. Climate change hastens the turnover of stream fish assemblages. *Global Change Biology*. 14, 2232-2248.
- Coad, B. W., 2018. Freshwater fishes of Iran. Retrieved from <https://briancoad.com/Species%20Accounts/Contents%20new>.
- Cheung, W. W. L., Lam, V. W. Y., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R., and Pauly, D., 2009. Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish and Fisheries*. 10, 235–251.
- Çiçek, E., R. Fricke and S.S. Birecikligil., 2015. Freshwater fishes of Turkey: a revised and updated annotated checklist. *Biharean Biologist*. 9(2),141-157.
- Davis, M. B., 1986. Climatic instability, time lags, and community disequilibrium. IN: *Community ecology*. Ed. by Diamond, J. and T.J. Case. Harper and Row, Community Ecology. New York, 269-284.
- Elith, J., Graham, C. H., Anderson, R. P., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., and Zimmermann, N. E., 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*. 29, 129-151.
- Elith, J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee and C. J. Yates., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distribution*.17, 43-57.
- Filipe, A. F. et al., 2013. Forecasting fish distribution along stream networks: brown trout (*Salmo trutta*) in Europe. *Diversity and Distribution*. 19, 1059–1071.
- Guisan, A., Thuiller, W. and Zimmermann, N., 2017. Habitat suitability and distribution models with applications in R. In *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R (Ecology, Biodiversity and Conservation*, p. I). Cambridge: Cambridge University Press.
- Heikkinen, R. K. et al., 2006. Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography*. 30, 751–777.
- Heino, J., Virkkala, R. and Toivonen, H., 2009. Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptations in northern regions. *Biological Reviews*. 84, 39-54.
- Keivany, Y., Nasri, M., Abbasi, K. and Abdoli, A., 2016. Atlas of Inland Water Fishes of Iran. Iran Department of Environment. (In Persian with English abstract)
- Kim, Z., Shim, T., Koo, Y. M., Seo, D., Kim, Y. O., Hwang, S. J. and Jung, J., 2020. Predicting the impact of climate change on freshwater fish distribution by incorporating water flow rate and quality variables. *Sustainability*. 12, 10001.
- Leathwick, J. R., 1998. Are New Zealand's Nothofagus species in equilibrium with their environment?. *Journal of Vegetation Science*. 9, 719–732.
- Lobo, J.M., Jiménez-Valverde, A. and Real, R. 2008. AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*. 17, 145-151.

- Maki, T., Mustafavi, H., Matkan, A. A. and Aqiqi, H. 2019. Modeling the effects of climate change on the migration of elephant fish (*Huso huso* Linnaeus, 1754) in the rivers of the southern basin of the Caspian Sea, Journal of Aquaculture Sciences. 8(2), 15-23. (In Persian with English abstract)
- Makki, T., Mostafavi, H., Matkan, A.A. and Aghighi H., 2021. The effects of climate change on the distribution of an invasive fish in Iran: *Gambusia holbrooki* (Girard, 1859). Journal of Applied Ichthyological Research. 9(1), 1-8. (In Persian with English abstract)
- Makki, T., Mostafavi, H., Matkan, A.A., et al., 2023a. Predicting climate heating impacts on riverine fish species diversity in a biodiversity hotspot region. Scientific Reports. 13(1), 14347
- Makki, T., Mostafavi, H., Matkan, A.A., et al., 2023b. Impacts of climate change on the distribution of riverine endemic fish species in Iran, a biodiversity hotspot region
Freshwater Biology. 68(6), 1007–1019.
- Margules, C. R., and Pressey, R. L., 2000. Systematic conservation planning. Nature. 405, 243-253.
- Mostafavi, H., Pletterbauer, F., Coad, B.W., Mahini, A.S., Schinegger, R., Unfer, G., Trautwein C. and Schmutz, S., 2014. Predicting presence and absence of trout (*Salmo trutta*) in Iran. Limnologica. 46, 1-8.
- Mostafavi, H., Rashidian Duleskani, M. and Valavi, R. 2018. Modeling of climate change effect on distribution of *Alburnus filippii* Kessler, 1877 in Iran. Applied Ichthyology Researches. 6(4), 1-12. (In Persian with English abstract)
- Mostafavi, H., Kordjazi, Z., Valavi, R., Shafizadeh-Moghadam, H., Kambouzia, J. and Infante, D.M., 2019a. Ensemble Modelling of Sensitive Stream Fish Species Distributions in Iran: Expanding knowledge to Aid Species Conservation. American Fisheries Society Symposium. 90, 1-5.
- Mostafavi, H., Teimori, A., Schinegger, R. and Schmutz, S., 2019b. A new fish based multi-metric assessment index for cold-water streams of the southern Caspian Sea Basin in Iran. Environmental Biology of Fishes. 102, 645-662.
- Niknam, A. and Asadi Moghadam, B., 2018. Study of the effects of climate change on the water ecosystems of the country and appropriate strategies to reduce and control its negative effects with an emphasis on the Caspian Sea, National Aquatic Conference, Bushehr. (In Persian with English abstract)
- Pearson, R. G., Raxworthy, C. J., Nakamura, M. and Townsend Peterson, A., 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. Journal of Biogeography. 34, 102-117.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P. and Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling. 190, 231-259.
- Ricciardi, A. and Rasmussen, J. B., 1999. Extinction rates of North American freshwater fauna. Conservation Biology. 13, 1220-1222.
- R Core Team., 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna.
- Sharibi, Z., Khalilpour, A. and Mohammad Asgari, H., 2018. Modeling the habitat desirability of the marbled duck (*Marmaronetta angustirostris*) using the maximum entropy method. Animal Environment Research. 10(2), 64-57. (In Persian with English abstract)

- Soboti, Y., 2011. Warm Earth: Armaghane of the 21st century, Institute of Geography and Cartography of Gitanos, Tehran. (In Persian with English abstract)
- Staudinger, M. D., Carter, S. L., Cross, M. S., Dubois, N. S., Duffy, J. E., Enquist, C., Griffis, R., Hellmann, J. J., Lawler, J. J., Morrison, S. A., Sneddon, L., Stein, B. A., Thompson, L. M. and Turner, W., 2013. Biodiversity in a changing climate: A synthesis of current and projected trends in the US. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 11(9), 465-473.
- Tuan, T.A., Long, H.V., Kumar, R., Priyadarshini, I. and Son, N.T.K., 2019. Performance evaluation of Botnet DDoS attack detection using machine learning. *Evolutionary Intelligence*. 1-12.
- Valavi, R., Elith, J., Lahoz-Monfort, J.J. and Guillera-Arroita, G., 2019. block CV: An r package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution*. 10, 225-232.
- Verdipour, M., 2013. Application of habitat suitability modeling in wildlife management, first national conference on environment, energy and biodefense, Tehran. (In Persian with English abstract)
- Yousefi, M., Jouladeh-Roudbar, A. and Kafash, A., 2020. Using endemic freshwater fishes as proxies of their ecosystems to identify high priority rivers for conservation under climate change. *Ecological Indicators*. 112, 106-137.

Modeling the impacts of climate change on the distribution of the Song fish *Luciobarbus esocinus* Heckel, 1843 under various climate scenarios

Mahmood Rezaei¹, Abdolrahim Pazira,^{1*} Hossein Mostafavi,^{2*} Azad Teimori³ and Fazel Amiri¹

¹ Department of Environment, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

² Department of Bio-diversity and Ecosystem Management, Environmental Sciences Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

³ Department of Biology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Introduction: Iran stands out as one of the world's biodiversity hotspots. Simultaneously, river fish species within the country face imminent threats from various human activities. Climate change, among other challenges, poses a significant risk to the biodiversity of Iran. Consequently, there is a critical need to anticipate potential habitat changes for freshwater fish species in response to climate change. This study focuses on evaluating the impact of climate change on the habitats of the Song fish, a species with economic value and protective significance. The Song fish is currently classified as Vulnerable (VU) by the International Union for Conservation of Nature (IUCN), making the examination of climate change effects crucial for the future population of this species.

Material and methods: This study employs the MaxEnt model to predict the spatial distribution of the Song fish at two different time scales (2050 and 2080 AD) under both optimistic (RCP2.6) and pessimistic (RCP8.5) climate scenarios. The R software environment is used for the analysis. Environmental variables, including slope, annual temperature range, flow accumulation, annual precipitation, annual mean temperature, and upstream drainage area, are considered.

Results and discussion: The model demonstrates excellent performance in predicting species distribution, as indicated by the high AUC (Area Under the Curve) criterion value of 0.989. Among the environmental variables, annual average temperature and slope emerge as the most influential factors in determining the distribution of the Song fish. Furthermore, the study reveals a projected decrease in the distribution range of this species under both optimistic and pessimistic scenarios for 2050 and 2080.

Conclusion: To safeguard the Song fish, it is imperative for managers to identify and implement appropriate measures. These measures should aim to mitigate the effects of climate change and alleviate threats associated with these changes.

Keywords: biodiversity, conservation, climate change, species distribution modeling, Iran.

* Corresponding Author: *Email Address.* devobio.sbuk@gmail.com; hmostafaviw@gmail.com