

تغییر در پاسخ ماهی آزاد دریای خزر (*Salmo caspius*, Kessler, 1877)

به متغیرهای زیست‌اقليمی

هادی پورباقر، سهیل ایگدری*

گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

چکیده

ماهی آزاد خزری از گونه‌های ارزشمند حوضه دریای خزر بوده که جمعیت آن در معرض فشار زیادی قرار دارد. عواملی چند از جمله فعالیت‌های انسانی در این مسئله دخیل هستند. در مطالعه حاضر، تأثیر متغیرهای زیست‌اقليمی بر توزیع آینده این گونه و همچنین پاسخ آن به چند متغیر زیست‌اقليمی در زمان حال و آینده، تحت سناریوهای مختلف اقلیمی مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های ماهی در نقاط مختلف حوضه دریای خزر صید و محل حضور آنها ثبت گردید. نمونه‌ها پس از ثبت مختصات محل صیدشان رها شدند. با مدل مکسنت احتمال حضور زمان حال و آینده این گونه در سراسر حوضه بررسی شد. با استفاده از نقشه‌های رستر، احتمال حضور گونه در زمان حال و آینده، منحنی‌های پاسخ برای این دو زمان تخلیه و سطح مشترک این دو منحنی در گرادینانی از متغیرهای زیست‌اقليمی برآورد شد. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که احتمال حضور گونه در آینده با کاهش قابل ملاحظه‌ای روبه‌رو خواهد شد و همچنین پاسخ گونه با متغیرهای زیست‌اقليمی، نسبت به آنچه در زمان حال مشاهده می‌شود، متفاوت خواهد بود. سطح زیر منحنی‌های پاسخ برای زمان حال و آینده با گذشت زمان کوچکتر شده که حاکی از تغییر بیشتر پاسخ این گونه با گذشت زمان می‌باشد.

کلید واژگان: ماهی آزاد دریای خزر، مکسنت، مدل، تغییر اقلیم، منحنی پاسخ

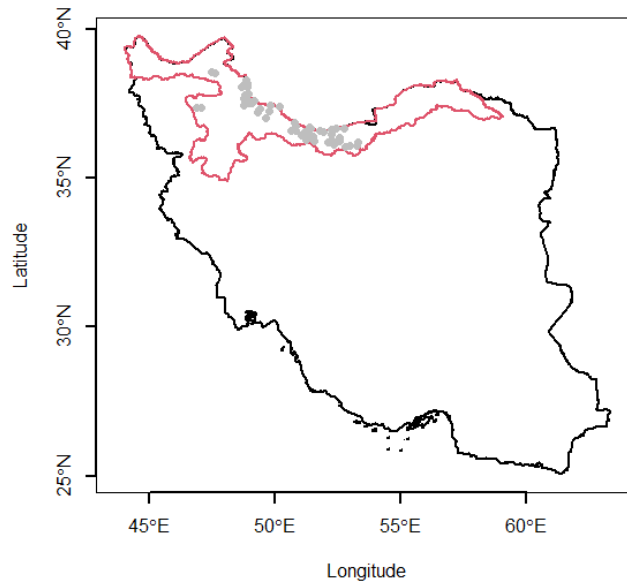
مقدمه

تغییرات اقلیمی تهدیدی جدی برای اکوسیستم‌ها به شمار می‌آید و بر بقای موجودات زنده و سلامت اکوسیستم‌های آبی تأثیر می‌گذارد (Grimm *et al.*, 2013). افزایش دمای آب می‌تواند نرخ متابولیسم در ماهی‌ها را افزایش دهد و به نیازهای اکسیژن بالاتری منجر شود که ممکن است در آب‌های گرم‌تر تأمین نشود (Carozza *et al.*, 2019). این افزایش دما همچنین می‌تواند بر چرخه‌های تولیدمثل اثر بگذارد (Pankhurst and Munday, 2011). علاوه بر این، تغییر الگوهای بارش منجر به سیلاب‌های بیشتری شود (Poff, 2002) که خود می‌تواند پیامدهای اکولوژیک داشته باشد. تخریب زیستگاه‌های حیاتی مانند تالاب‌ها و نواحی حاشیه‌ای نیز این چالش‌ها را تشدید می‌کند (Desta *et al.*, 2012)، زیرا این مناطق برای تخم‌ریزی، تغذیه و پناهگاه ضروری هستند. علاوه بر این، تغییرات اقلیمی می‌تواند گونه‌های مهاجم گرما دوست را گسترش دهد (Rahel and Olden, 2008). به طور کلی، این عوامل تهدیدی برای تنوع زیستی جمعیت‌های ماهی‌های آب شیرین به شمار می‌آید و سلامت کلی اکوسیستم‌های آب شیرین را به خطر می‌اندازد. تأثیر تغییرات اقلیمی بر توزیع ماهی‌های آب شیرین می‌تواند به طور مؤثری با استفاده از مدل‌های حضور-فقط، مانند حداکثر آنتروپی یا مکسنت مورد بررسی قرار گیرد (Elith *et al.*, 2011). این مدل‌ها به ویژه در مطالعات اکولوژیک، که داده‌های مربوط به وقوع گونه‌ها در دسترس است، اما داده‌های جامع موجود نیست، مفید هستند. چنین مدل‌هایی می‌تواند به محققان کمک کند تا ارزیابی کنند که این تغییرات چگونه ممکن است زیستگاه‌های مناسب برای آبزیان را جابجا کند (Hu *et al.*, 2022). با وارد کردن داده‌های اقلیمی کنونی و پیش‌بینی شده به مدل، دانشمندان می‌توانند مناطقی را شناسایی کنند که شرایط ممکن است برای گونه‌های خاص ماهی بیشتر یا کمتر مطلوب شود (Ranjbari *et al.*, 2022). این قابلیت پیش‌بینی برای درک جابجایی‌های احتمالی دامنه‌ها بسیار حیاتی است، زیرا برخی گونه‌ها ممکن است در پاسخ به افزایش دما، به آب‌های خنک‌تر یا ارتفاعات بالاتر مهاجرت کنند، در حالی که بقیه ممکن است در صورت عدم توانایی در سازگاری یا جابجایی، با خطر انقراض محلی مواجه شوند. علاوه بر این، مکسنت امکان گنجاندن عوامل اکولوژیک و اقلیمی مختلف را فراهم

می‌کند و درک دقیق‌تری از چگونگی تعامل چندین فشار بر توزیع ماهی‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد. توانایی این مدل در تولید نقشه‌های احتمال وقوع گونه‌ها می‌تواند به استراتژی‌های حفاظت کمک کند و مناطقی را که ممکن است نیاز به حفاظت یا احیا داشته باشند یا به‌عنوان شرایط اقلیمی تغییر می‌کند، برجسته کند.

ماهی آزاد خزری (*Salmo caspius*) متعلق به خانواده Salmonidae و بومی حوضه دریای خزر می‌باشد (Eagderi *et al.*, 2022). این گونه به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر خطرات محیطی، انسانی و تغییرات اقلیمی قرار دارد. تخریب زیستگاه‌ها به دلیل ساخت سدها، انحراف آب برای کشاورزی و توسعه شهری می‌تواند الگوهای مهاجرت و محل‌های تخم‌ریزی این گونه را مختل کند و به کاهش جمعیت آن منجر شود. همچنین، آلودگی ناشی از رواناب‌های کشاورزی، فاضلاب‌های صنعتی و فاضلاب‌های غیرمجاز می‌تواند کیفیت آب را کاهش دهد و بر سلامت و موفقیت تولیدمثل این ماهی تأثیر منفی بگذارد. فعالیت‌های انسانی مانند صید بیش از حد نیز در کاهش جمعیت‌های *S. caspius* موثر است. از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی با افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و افزایش فراوانی حوادث جوی شدید، می‌تواند فشار بیشتری بر این گونه وارد می‌کند. به‌عنوان مثال، افزایش دما می‌تواند بر رشد و تولیدمثل این ماهی تأثیر بگذارد و تغییرات در جریان‌های آبی می‌تواند زیستگاه‌های تخم‌ریزی را تحت تأثیر قرار دهد. به‌طور کلی، این عوامل تهدیدی جدی برای بقای ماهی‌های آزاد خزری به‌شمار می‌آیند و نیاز به استراتژی‌های حفاظتی جامع و پایدار را برای حفظ این گونه و اکوسیستم‌های آبی مرتبط برجسته می‌کنند.

تغییرات اقلیمی می‌تواند بر توزیع گونه‌ها اثرگذار باشد. این را می‌توان از نقشه‌های احتمال حضور مدلی چون مکسنت دریافت. مدل مکسنت در مطالعات مربوط به ماهیان ایران مورد استفاده قرار گرفته است (Tabasinezhad *et al.*, 2024). اما رویکردی جدیدی در استفاده از خروجی مدل نمی‌توان مشاهده کرد. خروجی چنین مدل‌هایی نقشه‌های احتمال حضور است که هم برای زمان حال و هم با استفاده از داده‌های زیست‌اقلیمی محاسبه شده در سناریوهای اقلیمی آتی قابل ایجاد است. برای این که دریابیم مقادیر احتمال حضور در زمان حال با مقادیری که



شکل ۱- نقاط نمونه برداری (●) در شمال ایران در حوضه دریای خزر که به رنگ قرمز نمایش داده شده است.

در آینده گونه خواهد داشت چقدر مشابهت دارد، روشی کمی تدوین نشده است. از این رو مطالعه حاضر با استفاده از منحنی‌های پاسخ حاصل از مدل و محاسبه سطح زیر این منحنی‌ها برای زمان حال، به طور کمی مقدار تغییر در احتمال حضور گونه ماهی آزاد دریای خزر را محاسبه می‌کند. چنین روشی می‌تواند در بررسی تغییر در پاسخ گونه‌ها به تغییرات اقلیمی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

داده‌های حضور ماهی: از صید الکترونیکی با استفاده از یک دستگاه الکترونیکی قابل حمل (Samus MP 750) برای صید ماهیان در رودخانه‌های حوضه خزر استفاده گردید (شکل ۱). برای این منظور از پایین دست رودخانه‌ها اقدام به نمونه‌برداری گردید، تا مانع از پراکنده شدن ماهیان در نقاط بالادست شود. شناسایی گونه با استفاده از کلیدهای معتبر (Eagderi *et al.*, 2022) و ثبت مختصات در محل نمونه‌برداری انجام شد. ماهیان سپس در تشتی در کنار رودخانه نگهداری شده و پس از بازگشتن به حالت عادی رهاسازی شدند. داده‌های حضور ماهی که شامل جنس و گونه، طول و عرض جغرافیایی وارد MySQL (نسخه 8.0.31) گردید و داده‌های تکراری از نظر ترکیبی از جنس، گونه، طول و عرض جغرافیایی حذف شدند. طول و عرض جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری با یک دستگاه GPS دستی (Hand-held) (Garmin eTrex 30X) ثبت شد

(Taiwan).
انتخاب مدل اقلیمی جهانی (Global climate model (GCM)): بیش از ۳۵ مدل اقلیمی جهانی (GCM) وجود دارد که برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دهه‌های آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند. داده‌های پارامترهای اقلیمی تولید شده توسط این مدل‌ها با یکدیگر تفاوت دارند و این تفاوت‌ها بر نتایج نهایی پیش‌بینی‌ها تأثیرگذار هستند. در این زمینه، تلاش‌هایی برای شناسایی مناسب‌ترین مدل GCM صورت گرفته است (Fajardo *et al.*, 2020). در پژوهش حاضر، از ابزار تحت وب GCMeval برای انتخاب بهترین مدل GCM متناسب با شرایط جغرافیایی ایران استفاده شد (Parding *et al.*, 2020). براساس این ارزیابی، داده‌های اقلیمی آینده برای ایران از مدل CMIP6.HadGEM3 به‌عنوان بهترین گزینه تشخیص داده شد که از پایگاه داده worldclim استخراج گردید.

استخراج داده زیست‌اقليمی: متغیرهای اقلیمی که در این تحقیق به کار رفته‌اند، از سایت worldclim استخراج شده‌اند. این متغیرها از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ را پوشش می‌دادند و شامل بارش، دمای کمینه و بیشینه بودند. با تابع biovar در محیط نرم‌افزار R (Robert J. Hijmans *et al.*, 2020) تبدیل به متغیرهای زیست‌اقليمی شدند (جدول ۱). این متغیرها به‌منظور شناسایی همخطی با استفاده از همبستگی پیرسون مورد ارزیابی قرار گرفتند و متغیرهایی که دارای همبستگی بالا بودند، حذف شدند. به این صورت، از

جدول ۱- متغیرهای زیست اقلیمی مورد استفاده در مطالعه حاضر پیش از بررسی همخطی

نام متغیر	نام مختصر	استفاده شده
دمای میانگین سالانه	AMT	BIO1 =
دامنه روزانه میانگین دماهای ماهانه (حداکثر دما - حداقل دما)	MDR	BIO2 =
$(\text{BIO2}/\text{BIO7}) \times 100$ (ایزوترمیک بودن)	Iso	BIO3 =
فصلی بودن دما (انحراف معیار $\times 100$)	TS	BIO4 =
حداکثر دمای گرم‌ترین ماه	MTWM	BIO5 =
حداقل دمای سردترین ماه	MTCM	BIO6 =
دامنه دمای سالانه (BIO5-BIO6)	TAR	BIO7 =
دمای میانگین مرطوب‌ترین فصل	MTWeQ	BIO8 =
دمای میانگین خشک‌ترین فصل	MTDQ	BIO9 =
دمای میانگین گرم‌ترین فصل	MTWaQ	BIO10 =
دمای میانگین سردترین فصل	MTCQ	BIO11 =
بارش سالانه	AP	BIO12 =
بارش مرطوب‌ترین ماه	PWM	BIO13 =
بارش خشک‌ترین ماه	PDM	BIO14 =
فصلی بودن بارش (ضریب تغییر)	PS	BIO15 =
بارش مرطوب‌ترین فصل	PWeQ	BIO16 =
بارش خشک‌ترین فصل	PDQ	BIO17 =
بارش گرم‌ترین فصل	PWaQ	BIO18 =

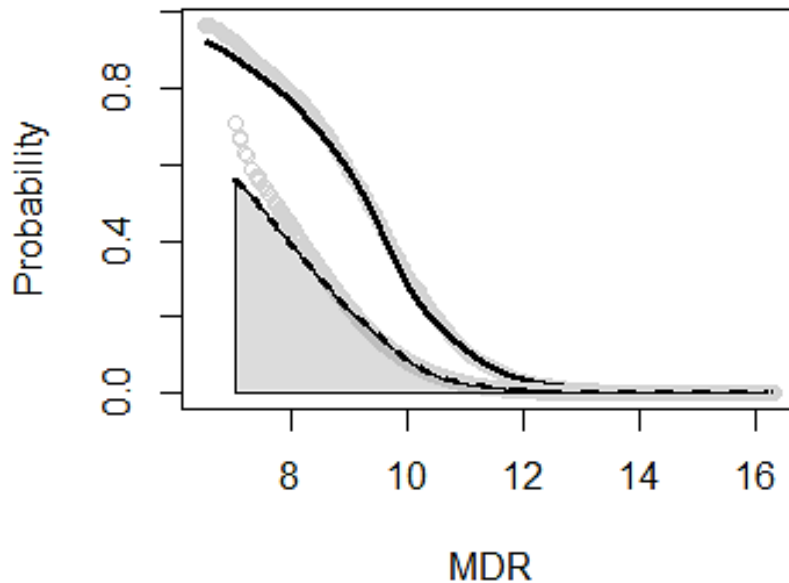
استفاده گردید (Elith *et al.*, 2011). برای آموزش مدل ۷۰ درصد داده‌های حضور مورد استفاده قرار گرفت و بقیه برای تست مدل به کار رفتند. کیفیت مدل با AUC بررسی شد. از روش جک‌نایف برای بررسی اهمیت هر یک از متغیرهای زیست‌اقلیمی استفاده شد. پیش از ایجاد مدل، متغیرهای زیست‌اقلیمی که دارای همبستگی بالایی با سایر متغیرها داشتند (بیش از ۹۰٪)، حذف شده بودند.

تهیه منحنی‌های پاسخ (Response curve): از مدل به‌دست آمده برای پیش‌بینی احتمال حضور ماهی در حوضه دریای خزر در زمان حال استفاده شد تا منحنی‌های پاسخ به هر متغیر زیست‌اقلیمی تهیه شود. منحنی پاسخ عبارت بود از تغییرات احتمال حضور گونه در گرادپانی از یک متغیر زیست‌اقلیمی با این فرض که سایر متغیرهای زیست‌اقلیمی در متوسط مقدارشان ثابت بمانند. به عبارتی دیگر، این منحنی‌ها اثرات حاشیه‌ای (Marginal effects) تنها یک متغیر زیست‌اقلیمی را نشان می‌دادند. مشابه همین کار برای دهه‌های آتی انجام شد. برای تهیه منحنی پاسخ در زمان حال برای هر متغیر زیست‌اقلیمی، مقادیر پیکسل‌های فایل‌های رستر مربوط به متغیرهای زیست‌اقلیمی تمامی متغیرها به‌جز متغیری که قرار بود برای آن منحنی پاسخ تهیه شود با مقدار میانگین متغیر زیست‌اقلیمی خودشان

میان دو متغیری که همبستگی پیرسون آن‌ها ۰/۹ یا بیشتر بود، متغیری که مجموع همبستگی‌هایش با دیگر متغیرها بالاتر بود، کنار گذاشته شد (Zuur *et al.*, 2007). برای این کار، از تابع findCorrelation در بسته caret (Kuhn, 2019) در R استفاده شد. رزلوشن تمامی متغیرهای زیست اقلیمی ایجاد شده ۰/۰۰۸ در ۰/۰۰۸ درجه بودند. این ۱۹ متغیر در یک رستر استک قرار داده شدند و برای حوضه دریای خزر کراپ (Crop) شدند. در نهایت پس از بررسی همخطی، ۱۳ متغیر مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۱).

تهیه فایل رستر مربوط به متغیرهای زیست‌اقلیمی: فایل رستر زمان حال بارش، دمای کمینه و بیشینه که برای هر یک از این سه متغیر ماهیانه بوده و میانگین ۲۰ سال بودند (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱)، با استفاده از بسته raster در R به‌صورت رستر استک (Raster stack) در آورده شدند. سپس با تابع biovar در پکیج dismo به ۱۹ متغیر زیست‌اقلیمی در آورده شدند.

مدل‌سازی حضور گونه: مختصات نقاط حضور گونه وارد R گردید و داده‌های لایه‌های رستر درون رستر استک متغیرهای زیست‌اقلیمی با استفاده از تابع extract از بسته raster برای نقاط حضور گونه استخراج شد. از مدل بیشینه آنتروپی برای پیش‌بینی حضور ماهی در زمان حال و آینده



شکل ۲- مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل مکسنت با داده‌های زمان حال (●) و آینده (○). داده‌های آینده برای سناریوی ssp126 و سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ می‌باشند. متغیر مستقل در این گراف MDR می‌باشد. خط سیاه ممتد که بالاتر قرار گرفته است (—)، پیش‌بینی داده برای داده‌های زمان حال و خط سیاه شکسته (---) که پایین‌تر قرار گرفته است، داده‌های پیش‌بینی شده برای زمان آینده است. بخش خاکستری رنگ سطح مشترک بین این دو نمودار است که در معادله ۱ به صورت $A \cap B$ نشان داده شده است.

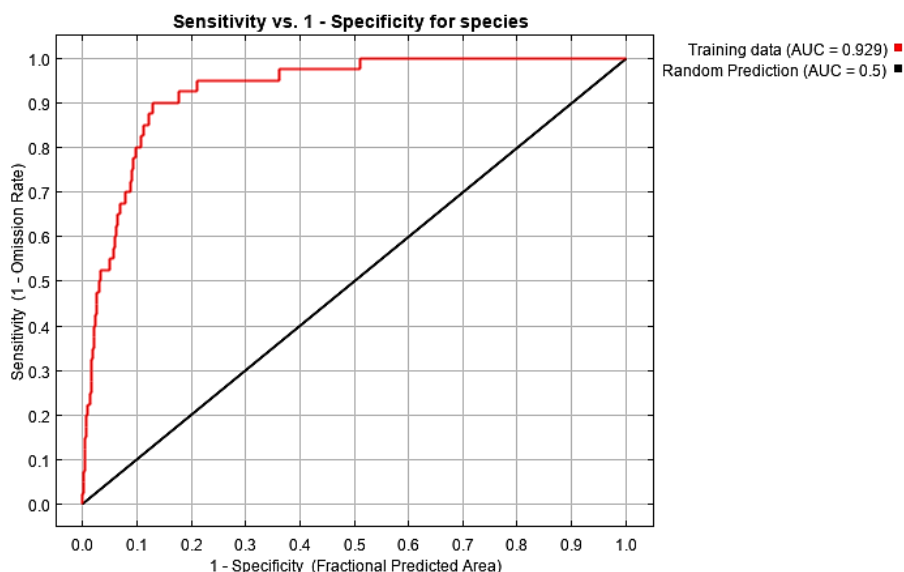
هر منحنی با هموارسازی هسته‌ای برازشی صورت گرفت تا هموار به‌دست آمده برای محاسبات بعدی همپوشانی به‌کار رود چون هموارهای به‌دست آمده ناپارامتری بودند یک چند جمله‌ای با مرتبه ۲۵ بر آن‌ها برازش داده شد تا بتوان با آن معادله پیش‌بینی احتمال گونه صورت پذیرد. تعیین بهترین پهنای باند نیز صورت گرفت. جزئیات این روش در بررسی احمدزاده و همکاران (۱۳۹۷) آمده است. نمونه‌ای دیگر این روش مشابه کار انجام شده برای همپوشانی نیچ ماهیان آب شیرین می‌باشد (Mouludi-Saleh *et al.*, 2024a, b). برای هر متغیر زیست‌اقلیمی، میزان همپوشانی دو منحنی، یعنی سطح مشترک زیر دو منحنی با فرمول زیر محاسبه شد. در این فرمول سطح زیر دو نمودار A و B می‌باشند. $A \cap B$ سطح مشترک بین دو منحنی است که در شکل ۲ به صورت یک سطح خاکستری رنگ نشان داده شده است.

$$\text{معادله ۱} \quad \text{overlap} = \frac{A \cap B}{A \cup B - (A \cap B)}$$

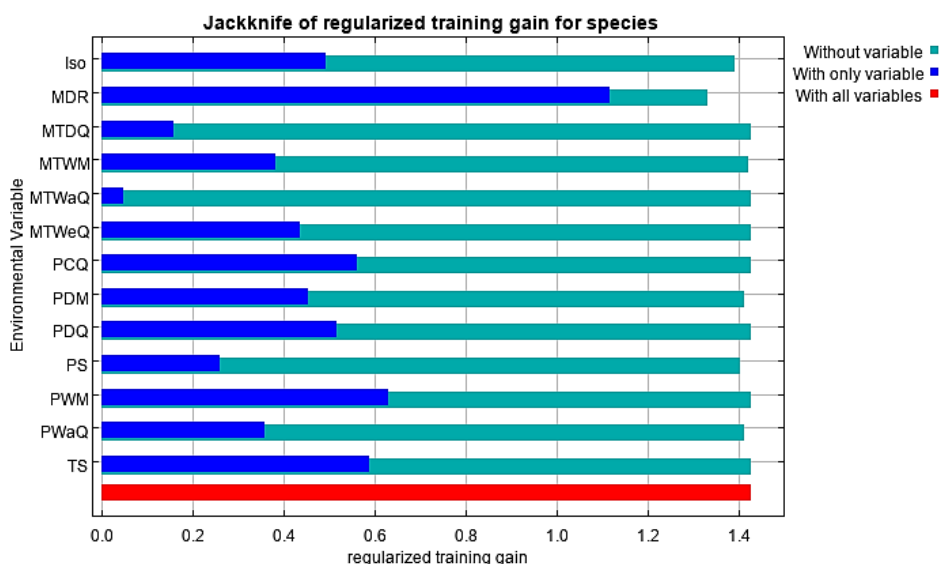
نمونه‌ای از سطح زیر نمودار دو منحنی در شکل زیر برای متغیر MDR نشان داده شده است. به‌علت این که ۱۱۷ گراف نظیر این شکل در این مطالعه قابل ترسیم بود، امکان گنجانیدن آن‌ها در این مقاله میسر نبود و تنها به این گراف برای روشن‌تر شدن روش کار بسنده گردید.

جایگزین شدند. چون ۱۳ متغیر زیست‌اقلیمی بعد از بررسی همبستگی بالا در مطالعه باقی ماندند، این عمل ۱۳ بار تکرار شد تا ۱۳ منحنی پاسخ برای زمان حال تهیه شود. برای زمان آینده فایل‌های رستر برای سه سناریو ssp126، ssp245 و ssp585 که هر یک برای سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰، ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۰ و ۲۰۶۰ تا ۲۰۸۰ وجود داشتند. پس نه بار منحنی‌های پاسخ برای ترکیبی از سناریو و سال برای ۱۳ متغیر زیست‌اقلیمی تهیه شد که در مجموع ۱۱۷ منحنی شدند. با توجه به این که رزلوشن فایل‌های رستر آینده بسیار بیشتر از فایل‌های رستری بود که تهیه شده بود و برای زمان حال بود، فایل‌های زیست‌اقلیمی آینده با تابع projectRaster به رزلوشنی به اندازه فایل‌های رستر زمان حال متغیرهای زیست‌اقلیمی رسانده شدند تا محاسبه همپوشانی منحنی‌های حال و آینده میسر شود.

تهیه میزان همپوشانی منحنی‌های پاسخ حال و آینده: برای هر متغیر زیست‌اقلیمی دو منحنی وجود داشت (برای ترکیبی از سناریو و سال). یک منحنی مقادیر احتمال محاسبه شده از حضور گونه بود که پاسخ گونه به آن متغیر زیست‌اقلیمی برای زمان حال محسوب می‌شد و نحوه محاسبه آن قبلاً بیان شد. منحنی دیگر پاسخ گونه به همان متغیر زیست‌اقلیمی در سناریوی و سالیانی خاص بود. برای



شکل ۳- مقدار AUC محاسبه شده برای مدل مکسنت



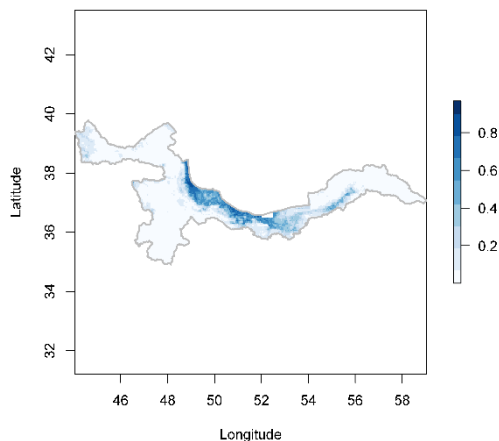
شکل ۴- آزمون جک نایف برای تعیین اهمیت پارامترهای زیست اقلیمی

مطابق پیش‌بینی صورت گرفته با مدل، در آینده طبق تمامی سناریوهای اقلیمی مورد استفاده در این مطالعه، این گونه احتمال حضور کمتری در محدوده گسترش خود خواهد داشت (شکل ۶). در تمامی نقاط حوضه دریای خزر احتمال حضور گونه به زیر ۰/۳ خواهد رسید و با گذشت زمان این احتمال کمتر نیز خواهد شد. نظیر زمان حال، این گونه محدود به نواحی جنوبی کرانه‌های ایرانی دریای خزر خواهد بود. در تمامی سناریوهای اقلیمی مقدار همپوشانی منحنی‌های پاسخ به متغیرهای زیست‌اقلیمی مقادیر پایینی را نشان داد. علاوه بر این در سال‌های آتی این همپوشانی کاهش هم نشان داد (جدول ۲).

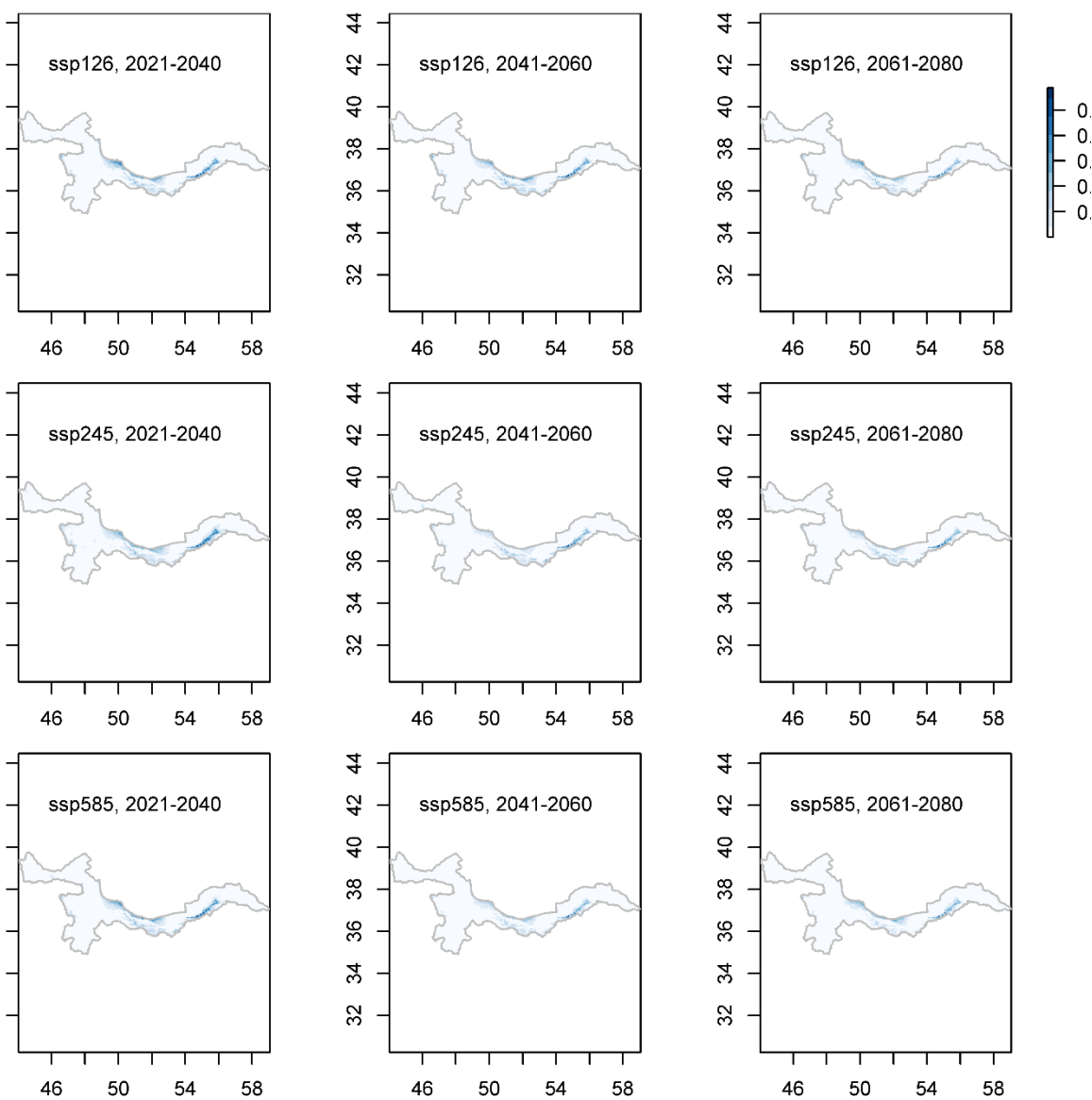
نتایج

مدل به‌دست آمده دارای کیفیت مطلوبی بود. مقدار AUC بیش از ۰/۹۲ بود که حاکی از کیفیت بالای مدل بود (شکل ۳). آزمون جک‌نایف نشان داد که MDR مهم‌ترین فاکتور برای ماهی آزاد دریای خزر می‌باشد و کم‌تأثیرترین فاکتور MTWaQ بود (شکل ۴).

پیش‌بینی برای سراسر حوضه دریای خزر برای زمان حال: بیشتر حوضه دریای خزر براساس پیش‌بینی صورت گرفته، محل مناسبی برای حضور این گونه نبود (شکل ۵). محل‌های مناسب نواحی عمدتاً به نواحی جنوبی کرانه‌های دریای خزر محدود بود.



شکل ۵- احتمال حضور پیش‌بینی شده با داده‌های بیوکلماتیک زمان حال



شکل ۶- احتمال حضور پیش‌بینی شده با داده‌های بیوکلماتیک زمان آینده تحت سناریوهای مختلف

جدول ۲. مقدار همپوشانی نمودارهای احتمال زمان حال و آینده در سناریوهای اقلیمی و سال‌های مختلف

	سناریوها								
	ssp126			ssp245			ssp585		
متغیرهای زیست‌اقلیمی	۲۰۲۱-۲۰۴۰	۲۰۴۱-۲۰۶۰	۲۰۶۱-۲۰۸۰	۲۰۲۱-۲۰۴۰	۲۰۴۱-۲۰۶۰	۲۰۶۱-۲۰۸۰	۲۰۲۱-۲۰۴۰	۲۰۴۱-۲۰۶۰	۲۰۶۱-۲۰۸۰
MDR	۰/۳۷۲۶	۰/۳۴۱۵	۰/۲۸۷۶	۰/۴۷۸۹	۰/۳۶۰۸	۰/۲۶۲۸	۰/۳۷۴۱	۰/۲۲۷۷	۰/۱۵۶۸
Iso	۰/۱۳۷۳	۰/۱۲۱۰	۰/۰۸۳۲	۰/۲۶۷۳	۰/۱۳۳۰	۰/۰۷۵۶	۰/۱۴۴۵	۰/۰۵۰۸	۰/۰۳۷۷
TS	۰/۱۳۱۴	۰/۱۱۵۷	۰/۰۸۰۴	۰/۲۶۲۰	۰/۱۱۸۵	۰/۰۷۵۴	۰/۱۳۷۹	۰/۰۵۶۴	۰/۰۳۵۸
MTWM	۰/۱۸۸۰	۰/۱۸۷۹	۰/۱۲۹۰	۰/۴۰۵۴	۰/۱۹۰۴	۰/۱۲۵۲	۰/۲۱۹۰	۰/۰۹۵۹	۰/۰۶۶۸
MTWeQ	۰/۱۰۲۰	۰/۰۹۶۵	۰/۰۶۵۹	۰/۳۳۱۸	۰/۰۹۸۸	۰/۰۵۸۶	۰/۱۱۸۷	۰/۰۴۴۸	۰/۰۲۶۸
MTDQ	۰/۱۲۵۰	۰/۱۱۸۵	۰/۰۸۰۳	۰/۲۵۰۷	۰/۱۱۷۰	۰/۰۶۹۹	۰/۱۴۲۶	۰/۰۵۲۹	۰/۰۳۰۷
MTWaQ	۰/۱۳۴۸	۰/۱۲۷۳	۰/۰۸۶۷	۰/۲۹۴۴	۰/۱۲۸۵	۰/۰۷۷۸	۰/۱۵۲۹	۰/۰۵۸۸	۰/۰۳۵۳
PWM	۰/۰۸۸۱	۰/۰۷۳۶	۰/۰۵۶۷	۰/۲۰۰۸	۰/۰۷۰۸	۰/۰۴۱۷	۰/۰۹۸۰	۰/۰۳۴۸	۰/۰۲۵۰
PDM	۰/۰۹۹۱	۰/۰۹۵۳	۰/۰۶۶۸	۰/۲۰۷۹	۰/۰۹۵۴	۰/۰۵۹۸	۰/۱۱۱۹	۰/۰۴۵۹	۰/۰۲۹۷
PS	۰/۱۴۹۴	۰/۱۶۷۴	۰/۱۱۵۴	۰/۳۱۷۰	۰/۱۱۰۷	۰/۰۷۵۵	۰/۱۶۳۷	۰/۰۸۳۵	۰/۰۵۲۴
PDQ	۰/۱۳۹۰	۰/۱۳۴۷	۰/۰۹۶۲	۰/۲۸۴۳	۰/۱۳۷۴	۰/۰۸۶۵	۰/۱۵۷۸	۰/۰۶۷۱	۰/۰۴۳۶
PWaQ	۰/۱۲۹۷	۰/۱۲۹۴	۰/۰۸۹۳	۰/۲۰۹۸	۰/۱۳۱۲	۰/۰۵۲۵	۰/۱۳۴۹	۰/۰۵۷۵	۰/۰۲۸۲
PCQ	۰/۱۲۸۳	۰/۱۲۰۲	۰/۰۸۵۰	۰/۲۷۲۱	۰/۱۲۷۷	۰/۰۷۵۵	۰/۱۴۶۸	۰/۰۵۹۲	۰/۰۳۸۱
میانگین هر ستون	۰/۱۴۶۵	۰/۱۴۰۷	۰/۱۰۱۷	۰/۲۸۳۳	۰/۱۳۸۵	۰/۰۸۷۴	۰/۱۶۱۸	۰/۰۷۲۵	۰/۰۴۶۷

بحث

این گونه نشان داد. دامنه دمایی بیشتر می‌تواند بر نرخ‌های متابولیک، چرخه‌های تولیدمثل و استرس فیزیولوژیکی کلی تأثیر بگذارد (Whitney *et al.*, 2016) که برای بقا و رشد ماهی‌های آب شیرین حیاتی هستند. با ادامه تغییرات اقلیمی و تغییر الگوهای دما، پیامدهای مربوط به MDR به‌طور فزاینده‌ای اهمیت می‌یابد. براساس منحنی پاسخ MDR دامنه دمایی کمتر برای این گونه مناسب‌تر است و احتمال حضور بیشتری را ایجاد می‌کند در حالی که نوسانات شدید موجب احتمال حضور کمتر شده که می‌تواند ناشی از افزایش استرس و مرگ و میر باشد.

نمودارهای پاسخ استخراج‌شده از مدل نشان داد که ماهی آزاد دریای خزر چگونه به متغیرهای زیست‌اقلیمی خاص تحت سناریوهای اقلیمی مختلف پاسخ می‌دهد و دیدگاه‌هایی در مورد پاسخ‌های آبی این گونه به متغیرهای زیست‌اقلیمی نشان می‌دهد. این نمودارها پاسخ گونه را به یک متغیر زیست‌اقلیمی خاص، در حالی که سایر متغیرها در مقادیر میانگین خود نگه‌داشته شده‌اند، نشان می‌دهند یعنی اثرات حاشیه‌ای هر متغیر را بر توزیع گونه برجسته می‌کنند. تغییرات مشاهده شده در این نمودارهای پاسخ در سناریوهای اقلیمی مختلف نشان داد که حساسیت آزاد ماهی دریای خزر به عوامل زیست‌اقلیمی ثابت نیست یعنی پاسخ گونه به متغیرهای زیست‌اقلیمی در زمان حال با آنچه برای آینده پیش‌بینی شده است متفاوت خواهد بود. نکته مهم در مطالعه حاضر همین یافته است که در مطالعات قبلی مربوط به گونه

یافته‌های مدل مکسنت نشان‌دهنده یک روند نگران‌کننده برای ماهی آزاد خزری در حوضه دریای خزر است و کاهش قابل توجهی در احتمال حضور این گونه تحت سناریوهای آینده تغییرات اقلیمی را پیش‌بینی می‌کند. باید توجه داشت این گونه در حال حاضر نیز در معرض خطر قرار دارد و نتایج امیدبخشی برای وجود آن در حوضه مورد بررسی وجود ندارد. این کاهش در احتمال حضور پیش‌بینی شده در درجه اول به نوسانات دمایی در آینده مربوط می‌باشد که احتمالاً تعادل اکولوژیک محیط‌های آب شیرین که این گونه به آن وابسته است را مختل می‌کند (Verma, 2021). با ادامه فشار تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌های آبی، احتمال از دست رفتن و تکه‌تکه شدن زیستگاه‌ها افزایش می‌یابد (Knouft and Ficklin, 2017) و این امر آسیب‌پذیری ماهی آزاد دریای خزر را به‌دنبال خواهد داشت. کاهش پیش‌بینی شده در توزیع این گونه نه تنها نیاز فوری به استراتژی‌های حفاظت هدفمند را برجسته می‌کند، بلکه اهمیت نظارت بر تأثیرات تغییرات اقلیمی بر تنوع زیستی آب شیرین را نیز نشان می‌دهد. پرداختن به این چالش‌ها برای حفظ این گونه و سلامت کلی اکوسیستم‌های آبی حوضه دریای خزر ضروری خواهد بود.

تحلیل‌ها نشان داد که دامنه روزانه میانگین (MDR) یا BIO2، که تفاوت بین حداقل و حداکثر دما در ماه را نشان می‌دهد، مهمترین نقش را در توزیع ماهی آزاد دریای خزر ایفا می‌کند. این یافته اهمیت تغییرپذیری پاسخ به دما را در

یافته‌ها نشان می‌دهد که مساحت مشترک بین نمودارهای پاسخ کنونی و آینده آزاد ماهی خزری در تمامی سناریوهای اقلیمی مورد استفاده پیش‌بینی می‌شود که کاهش خواهد یافت و به‌ویژه در مقیاس زمانی طولانی‌مدت ۸۰ ساله، این مساحت به کمتر از ۰/۱ خواهد رسید. این کاهش قابل توجه به این معناست که زیستگاه اکولوژیک آزاد ماهی دریای خزر ممکن است به‌طور فزاینده‌ای با تغییرات اقلیمی ناسازگار شود. با کاهش مساحت مشترک، این امر نشان‌دهنده احتمال از دست رفتن تاب‌آوری است، به این معنا که این گونه ممکن است در سازگاری با شرایط محیطی جدیدی که در آینده حاکم خواهد بود، با چالش‌هایی مواجه شود. این روند احتمال از دست رفتن کامل زیستگاه‌های موجود این گونه و کاهش جمعیت یا حتی انقراض آن را نشان می‌دهد. کاهش پیش‌بینی‌شده در مساحت مشترک همچنین بر نیاز به استراتژی‌های مدیریت پیشگیرانه تأکید می‌کند که بر حفاظت و احیای زیستگاه‌ها و همچنین ایجاد کریدورهای اکولوژیک برای تسهیل حرکت گونه‌ها در پاسخ به تغییرات اقلیمی تمرکز دارد. به‌طور کلی، این یافته‌ها نیاز فوری به اقدام برای کاهش تأثیرات تغییرات اقلیمی بر آزاد ماهی دریای خزر را فراخوانی می‌کند.

به‌عنوان نتیجه‌گیری، مطالعه حاضر بر ضرورت اقدامات بیشتر برای ماهی آزاد خزری و وضعیت نامناسب آبی آن صحنه زیادی گذاشت. این گونه با تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده در سناریوهای اقلیمی با مخاطرات زیادی روبه‌رو خواهد شد. پاسخ گونه به متغیرهای زیست‌اقليمی نیز تغییر خواهد کرد که ممکن است ناشی از تغییر در مکانیسم‌های سازگاری یا تعامل گونه با تغییر در پیش‌رو باشد. در نهایت با استفاده از محاسبه مساحت مشترک زیر منحنی‌های پاسخ می‌توان وسعت این تغییر پاسخ‌ها را کمی‌سازی نمود.

ماهیان آب‌شیرین تغییر توزیع گونه‌ها را پیش‌بینی نموده‌اند (Comte *et al.*, 2013) اما تغییر پاسخ مورد اشاره قرار نگرفته است. تغییرات در الگوهای دما یا بارش ممکن است آستانه‌هایی را که در آن‌ها حضور این گونه می‌تواند وجود داشته باشد، تغییر دهد پس کاهش زیستگاه‌های مناسب ممکن است تا حدی نیز به تغییرات فیزیولوژیک گونه مربوط شود که البته امکان اثبات آن در مطالعه حاضر میسر نیست. به هر حال، این تغییر در پاسخ گونه حاکی از پیچیدگی تعاملات گونه با متغیرهای محیطی است که نمی‌توان آن‌را تنها با نقشه‌های تولید شده توسط مدل مکسنت دریافت. در ضمن این یافته این مسئله را پیشنهاد می‌کند که شاید استراتژی‌های حفاظتی فعلی همیشه مناسب نباشد و به مرور زمان نیازمند مدیریتی تطبیق یافته با تغییر آستانه‌های پاسخ گونه به متغیر اقلیمی باشیم.

محاسبه مساحت مشترک بین نمودارهای پاسخ کنونی و آینده آزاد ماهی خزری بیانگر یک رویکرد نوآورانه در مطالعه حاضر است که بعد مهمی به درک ما از چگونگی سازگاری این گونه با شرایط اقلیمی در حال تغییر می‌افزاید. با کمی‌سازی همپوشانی بین پاسخ‌های کنونی و پیش‌بینی‌شده به متغیرهای زیست‌اقليمی، می‌توان انتظار داشت چه مقدار تغییر در احتمال حضور این گونه در گرادانی از متغیرهای زیست‌اقليمی مورد انتظار خواهد بود. این تصویری به محقق می‌دهد که این گونه تا چه میزان ممکن است دچار آسیب شود. مساحت مشترک به‌عنوان یک شاخص از احتمال بقای موجود عمل نماید یعنی دامنه‌های با همپوشانی کم یا عدم همپوشانی می‌تواند نشان‌دهنده از دست رفتن زیستگاه یا کاهش قابلیت زیست باشد. این تحلیل به کار رفته در مطالعه حاضر می‌تواند به سایر گونه‌ها و اکوسیستم‌ها نیز اعمال شود و راه را برای ارزیابی‌های جامع‌تری از پاسخ‌های تنوع زیستی به تغییرات محیطی هموار کند.

منابع

احمدزاده م.، پورباقر ه.، ایگدری، س. ۱۳۹۷. تعیین شاخص مطلوبیت زیستگاه سیاه‌ماهی مرکزی (*Capoeta buhsei*) (Kessler, 1877) با استفاده از هموارسازی هسته‌ای در رودخانه جاجرود، حوضه دریاچه نمک ایران. *مجله علوم آبی‌زی پروری*. ۲۶(۲): ۹۹-۱۰۸.

Carozza D.A., Bianchi D., Galbraith E.D. 2019. Metabolic impacts of climate change on marine ecosystems: Implications for fish communities and fisheries. *Global Ecology and Biogeography* 28(2), 158-169.

Comte L., Buisson L., Daufresne M., Grenouillet G. 2013. Climate-induced changes in the

- distribution of freshwater fish: observed and predicted trends. *Freshwater Biology* 58(4), 625-639.
- Desta H., Lemma B., Fetene A. 2012.** Aspects of climate change and its associated impacts on wetland ecosystem functions: A review. *Journal of American Science* 8(10), 582-596.
- Eagderi S., Mouludi-Saleh A., Esmaeli H.R., Sayyadzadeh G., Nasri M. 2022.** Freshwater lamprey and fishes of Iran; a revised and updated annotated checklist-2022. *Turkish Journal of Zoology* 46(6), 500-522.
- Elith J., Phillips S.J., Hastie T., Dudík M., Chee Y.E., Yates C.J. 2011.** A statistical explanation of MaxEnt for ecologists: Statistical explanation of MaxEnt. *Diversity and Distributions* 17(1), 43-57.
- Fajardo J., Corcoran D., Roehrdanz P.R., Hannah L., Marquet P.A. 2020.** GCM compareR: A web application to assess differences and assist in the selection of general circulation models for climate change research. *Methods in Ecology and Evolution* 11(5), 656-663.
- Grimm N.B., Chapin III F.S., Bierwagen B., Gonzalez P., Groffman P.M., Luo Y., Melton F., Nadelhoffer K., Pairis A., Raymond P.A. 2013.** The impacts of climate change on ecosystem structure and function. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11(9), 474-482.
- Hu W., Du J., Su S., Tan H., Yang W., Ding L., Dong P., Yu W., Zheng X., Chen B. 2022.** Effects of climate change in the seas of China: Predicted changes in the distribution of fish species and diversity. *Ecological Indicators* 134, 108489.
- Knouft J.H., Ficklin D.L. 2017.** The potential impacts of climate change on biodiversity in flowing freshwater systems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 48(1), 111-133.
- Kuhn M. 2019.** The caret Package [WWW Document]. URL <http://topepo.github.io/caret/index.html> (accessed on 3.6.19).
- Mouludi-Saleh A., Eagderi S., Poorbagher H. 2024a.** How the morphology of two closely related riverine sympatric species are reflected in ecological niche overlapping? A case study of two *Capoeta* species. *Limnology* 25(3), 267-275.
- Mouludi-Saleh A., Eagderi S., Poorbagher H., Esmaeli H.R. 2024b.** Ecological niche overlap from occurrence of two cyprinid sympatric species, *Paracapoeta trutta* and *Capoeta damascina* in the Sirvan River, Persian Gulf Basin. *Nova Biologica Reperta* 11(1), 87-95.
- Pankhurst N.W., Munday P.L. 2011.** Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages. *Marine and Freshwater Research* 62(9), 1015-1026.
- Parding K.M., Dobler A., McSweeney C.F., Landgren O.A., Benestad R., Erlandsen H.B., Mezghani A., Gregow H., Rätty O., Viktor E. 2020.** GCMeval--An interactive tool for evaluation and selection of climate model ensembles. *Climate Services* 18, 100167.
- Poff N.L. 2002.** Ecological response to and management of increased flooding caused by climate change. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 360(2002), 1497-1510.
- Rahel F.J., Olden J.D. 2008.** Assessing the Effects of Climate Change on Aquatic Invasive Species. *Conservation Biology* 22(3), 521-533.
- Ranjbari N.G., Poorbagher H., Eagderi S., Fegghi J., Mirzaei M.R. 2022.** Habitat suitability modelling of *Nemipterus japonicus* using MaxEnt in the Makran Sea. *Journal of Fisheries* 75(3).
- Hijmans R.J., Phillips S., Leathwick J., Elith J. 2020.** dismo: Species Distribution Modeling, R package.
- Tabasinezhad N., Mousavi-Sabet H., Mostafavi H. 2024.** Forecasting habitat changes of *Vimba persa* (Pallas, 1814) under climate change using machine learning techniques in the southern Caspian Sea basin. *International Journal of Aquatic Biology* 12(1), 109-119.
- Verma A.K. 2021.** Influence of climate change on balanced ecosystem, biodiversity and sustainable development: An overview. *Int. J. Biol. Innov.*
- Whitney J.E., Al-Chokhachy R., Bunnell D.B., Caldwell C.A., Cooke S.J., Eliason E.J., Rogers M., Lynch, A.J., Paukert, C.P. 2016.** Physiological basis of climate change impacts on North American inland fishes. *Fisheries* 41(7), 332-345.
- Zuur A.F., Ieno E.N., Smith G.M. 2007.** Analysing ecological data. Springer, USA.

Change in the response of Caspian Sea trout (*Salmo caspius*, Kessler, 1877) to bioclimatic variables

Hadi Poorbagher, Soheil Eagderi*

Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Corresponding author: soheil.eagderi@ut.ac.ir

Received: 18.Dec.2024

Accepted: 8.Mar.2025

Abstract

The Caspian Sea trout is an economically important species of the Caspian Sea basin, and its population comes under strong pressure. Some reasons, including human activities, are accountable. In this research, the future presence distribution of this species as modulated by bioclimatic variables, and the response of this species to a set of bioclimatic variables in the present and future in different climatic situations were explored. Fishes were caught from different points of the Caspian Sea basin, and their occurrence was mapped. After recording the coordinates of their catch points, the samples were released. The probability of presence of the species in the future and present was explored throughout the basin using a MaxEnt model. Using the raster maps of species presence probability for present and future, response curves for these two time periods were constructed, and the overlapping area between the curves was calculated over a range of bioclimatic variables. The present research identified that the presence probability of the species in the future will suffer an immense decrease, and the species' response to bioclimatic variables will be diverse from the present. The area under the present and future response curves has been decreasing with time, showing an increasing difference in the response of this species with the passage of time.

Keywords: Caspian trout, Maxent, Model, Climate Change, Response Curve