مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه پلیکان پاخاکستری (*Pelecanus crispus*) با استفاده از روش حداکثر آنتروپی (MAXENT) در ایران

- **محمدعلی پویانی**: گروه محیط زیست، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
- **بهمن شمس‌اسفندآباد***: گروه محیط زیست، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
- **عباس احمدی**: گروه محیط زیست، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران
- **حمید ترنج‌زر**: گروه محیط زیست، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

تاریخ دریافت: مهر ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: دی ۱۳۹۸

چکیده

این پژوهش به‌صورت کمی به مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه پلیکان پاخاکستری با استفاده از مدل MAXENT در کشور پرداخته است. این تحقیق با استفاده از نقاط حضور این پرنده در ایران و داده‌های محیطی از پایگاه داده اقلیمی (world climate) به‌دست آمد. نتایج آزمون VIF جهت بررسی هم‌خطی بین متغیرها به‌کارگرفته شد که ۷ متغیر میانگین درجه حرارت سالیانه (Bio۱)، میانگین مقادیر روزانه (Bio۲)، هم دمایی (Bio۳)، تغییرات فصلی درجه حرارت (Bio٤)، بارش سالیانه (Bio۱۲)، تغییرات فصلی بارش (Bio۱۵)، میانگین بارش در خشک‌ترین فصل سال (Bio۱۷) دارای کم‌ترین میزان هم‌خطی بوده که به‌عنوان متغیرهای اقلیمی انتخاب و مورد استفاده قرار گرفتند. شاخص AUC مدل به‌میزان ۰/۹۵۳ به‌دست آمد. براساس نمودار جک نایف متغیرهای میانگین مقادیر روزانه حرارت (Bio۲) و تغییرات فصلی درجه حرارت (Bio٤) به‌ترتیب بیش‌ترین درصد مشارکت و اهمیت و متغیرهای میانگین بارش در خشک‌ترین فصل سال (Bio۱٤) و هم‌دمایی (Bio۳) کم‌ترین درصد مشارکت و اهمیت را در تهیه نقشه مطلوبیت زیستگاه گونه پلیکان پاخاکستری در مدل مکسنت را داشتند. در این مطالعه، نتایج مدل‌سازی MAXENT نشان می‌دهد تنها ۷۷۸۳۸ کیلومتر مربع (۵ درصد از مساحت کل کشور) برای حضور پلیکان پاخاکستری مطلوب می‌باشد.

کلمات کلیدی: پلیکان پاخاکستری، مطلوبیت زیستگاه، داده‌های اقلیمی، MaxEnt

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b-shams@iau-arak.ac.ir

مقدمه

تعیین مطلوبیت زیستگاه یکی از ارکان مهم در مدیریت و حفاظت گونه‌های حیات وحش محسوب می‌گردد که تاثیر به‌سزائی بر بقاء و تولیدمثل گونه‌ها خواهد داشت (Dong و همکاران، ۲۰۱۳). اما به‌دلیل مشکل زمان و بودجه قابل دسترس برای مطالعه زیستگاه‌ها در مقیاس وسیع، اجرای بسیاری از مطالعات را دشوار و در مواردی غیرممکن می‌سازد. لذا در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها ارائه شده است تا در مدیریت حیات‌وحش مورد استفاده قرار گیرد (Anderson و همکاران، ۲۰۰۰؛ Mack و همکاران، ۱۹۹۷). روش‌هایی مانند ENFA، GAM، GLM بعضی از آن‌ها هستند که به‌طور گسترده به‌عنوان ابزار ارزیابی، مدل‌سازی، مدیریت و حفاظت از زیستگاه استفاده شده‌اند (Sebastián-Gonzál و همکاران، ۲۰۱۴؛ Wilson و همکاران، ۲۰۱۱؛ Wang و همکاران، ۲۰۰۹؛ Tian و همکاران، ۲۰۰۹؛ Hirzel و همکاران، ۲۰۰۱). روش حداکثر آنتروپی (MAXENT)، یکی از ابزارهای بسیار متداول برای مدل‌سازی زیستگاه گونه‌ها و نیز پیش‌بینی و مدل‌سازی نحوه پراکنش گونه‌ها به‌کار می‌رود که با استفاده از داده‌های حضور و متغیرهای محیطی اجرا می‌شود. در مقایسه با سایر روش‌ها، این روش داده‌های زیادی لازم ندارد، بنابراین این روش راه حلی برای داده‌های کم حضور به‌وجود آورده است (Weber، ۲۰۱۶). توانایی این مدل در مطالعات زیستگاه گونه‌های مختلف (سرباز و همکاران، ۱۳۹۷؛ Ashrafzadeh و همکاران، ۲۰۱۸؛ Remya و همکاران، ۲۰۱۵؛ Yang و همکاران، ۲۰۱۳؛ Pearson و همکاران، ۲۰۰۷) مورد تائید قرارگرفته است. پرندگان به‌دلیل این‌که موجوداتی انتخابگر در نوع زیستگاه خود بوده و حساسیت زیادی به ساختار پوشش گیاهی دارند می‌توانند به‌عنوان نمایه مناسب، برای سنجش کیفیت زیستگاه مورد استفاده قرار گیرند (Fielding، ۱۹۹۵).مطالعات انجام پذیرفته درخصوص پرندگان آبزی و کنار آبچر نشان می‌دهد به‌دلیل وابستگی زیاد این موجودات به بوم سازگان‌های تالابی، پرندگان ازجمله شاخص‌های زیستی مهمی هستند که در تعیین و مشخص نمودن وضعیت محیط زیست و سلامت بوم سازگان‌های تالابی کاربرد بسیاری دارند (Tian و همکاران، ۲۰۰۹). در میان پرندگان تالابی مهم، پلیکان پاخاکستری (*Pelecanus crispus*) یا مرغ‌سقای پاخاکستری یا مرغ‌سقای کاکُلی گونه‌ای پرنده از راسته پلیکان‌سانان و راسته مرغ‌سقاسانان است که از اهمیت و جذابیت ویژه‌ای در ایران و جهان برخوردار است که براساس گزارش اتحادیه بین‌المللی حفاظت از محیط زیست (International= IUCN Union for Conservation of Nature) جز گونه‌های در معرض خطر (فهرست سرخ) قرار گرفته‌اند (گزارش ملی سرشماری زمستانی پرندگان آبزی و کنارآبزی زمستان، ۱۳۹۶). با توجه به اهمیت این گونه در کشور و اثرات تغییر اقلیم به‌خصوص افزایش دما بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و رفتاری، رشد، تولیدمثل، مرگ و میر و توزیع آن‌ها و لزوم پایش، پیش‌بینی و کنترل این اثرات با اتخاذ تصمیمات مدیریتی و محافظتی بهینه، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تعیین زیستگاه مطلوب برای آن و بررسی اثر تغییر اقلیم بر جمعیت آن در کشور انجام نشده است از این‌رو، در این پژوهش تلاش خواهد شد ضمن پرداختن به این مسئله، از روش‌های نوین ارائه شده در مطالعات خارجی برای اولین بار به‌صورت کمی به مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه پلیکان پاخاکستری (*Pelecanus crispus*) در کشور بپردازد. مطالعات زیادی در زمینه بررسی مطلوبیت زیستگاه پرندگان و هم‌چنین مطالعات محدودی در زمینه ویژگی‌های زیستگاهی و خصوصیات زیستگاهی این گونه در ایران و جهان به انجام رسیده است که می‌توان به مطالعات مشتاقی و همکاران (۱۳۹۲)، انصاری (۱۳۹۴)، شریبی و همکاران (۱۳۹۷)، Gonzalez و همکاران (۲۰۰۰)، Hua و همکاران (۲۰۱۲) اشاره کرد.

مواد و روش‌ها

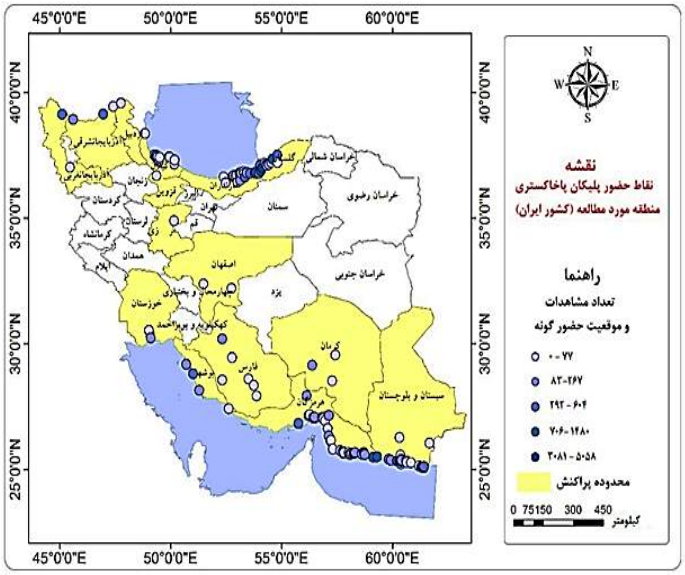
برای پیش‌بینی توزیع گونه‌ای با استفاده از مدل‌های پراکنش گونه، وجود رابطه میان حضور یک گونه با شرایط محیط زیست یک فرض اساسی محسوب می‌شود. بنابراین، برای ساخت یک مدل حداقل به دو گروه از داده‌های ورودی نیاز داریم که این داده‌ها شامل داده‌های زیستی و داده‌های محیطی هستند (Franklin و همکاران، ۲۰۱۰). بدین منظور اطلاعات مورد نیاز از سه روش مرور منابع کتابخانه‌ای، انجام بررسی‌های مستقیم میدانی و مراجعه به بانک‌های اطلاعات جهانی موجود استفاده شد. به‌منظور پیدا نمودن نقاط دقیق حضور این پرنده از داده‌های ثبت شده در سازمان حفاظت محیط زیست و گزارش جهانی فقط حضور این پرنده (Status Report for the Dalmatian Pelican Pelecanus crispus) استفاده شد. داده‌های محیطی مورد استفاده نیز از پایگاه www.worldclim.org، داده اقلیمی، به‌دست آمد که این داده‌ها شامل ۱۹ متغیر آب و هوایی از مناطق خشکی کره زمین است که براساس درون‌یابی داده‌های هواشناسی سال‌های ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۰ به‌دست آمده است (جدول ۱). در این پژوهش به‌منظور کاهش تعداد متغیرها و نیز به‌دلیل کاهش تأثیر منفی همبستگی بین متغیرها، ضریب همبستگی دو به دو متغیرها محاسبه شده و سپس با لحاظ کردن شاخص تورم واریانس (VIF=Variance Inflation Factor) متغیرهایی که دارای همبستگی بیش‌تر از ۰/۷ بودند از ادامه تحلیل‌ها حذف شدند. شاخص VIF

علاوه بر شناسایی همبستگی دو به دو میان متغیرها، همبستگی‌های پنهان چند متغیره یا به اصطلاح هم‌خطی (Multi-collinearity) بین متغیرها را نیز مورد توجه قرار می‌دهد (Guisan و همکاران، ۲۰۱۷؛ ۲۰۱۳).به‌منظور محاسبه هم‌خطی بین متغیرها براساس شاخص VIF ابتدا مقادیر ۱۹ متغیر اقلیمی در نقاط حضور استخراج شد. سپس با لحاظ نمودن حد آستانه همبستگی ۰/۷ متغیرهایی که دارای کم‌ترین میزان هم‌خطی بودند شناسایی شده و در ادامه تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۱: متغیرهای اقلیمی استخراج شده از سایت WorldClim، متغیرهایی که پررنگ شده‌اند، دارای کم‌ترین میزان هم‌خطی بوده و از آن‌ها در مدل‌سازی آشیان بوم‌شناختی پلیکان پاخاکستری استفاده شد.

میانگین دمای سالیانه	**Annual Mean Temperature**	**BIO۱**
میانگین مقادیر روزانه حرارت	**Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))**	**BIO۲**
هم‌دمایی	**Isothermality (BIO۲/BIO۷) (* ۱۰۰)**	**BIO۳**
تغییرات فصلی دما	**Temperature Seasonality (standard deviation *۱۰۰)**	**BIO۴**
حداکثر دما در گرم‌ترین ماه سال	Max Temperature of Warmest Month	BIO۵
حداقل دما در سردترین ماه سال	Min Temperature of Coldest Month	BIO۶
تغییرات دمای سالیانه	Temperature Annual Range (BIO۵-BIO۶)	BIO۷
میانگین دما در خشک‌ترین فصل سال	Mean Temperature of Wettest Quarter	BIO۸
میانگین دما در خشک‌ترین فصل سال	Mean Temperature of Driest Quarter	BIO۹
میانگین دما در گرم‌ترین فصل سال	Mean Temperature of Warmest Quarter	BIO۱۰
میانگین دما در سردترین فصل سال	Mean Temperature of Coldest Quarter	BIO۱۱
بارش سالیانه	**Annual Precipitation**	**BIO۱۲**
مقدار بارش در مرطوب‌ترین ماه سال	Precipitation of Wettest Month	BIO۱۳
مقدار بارش در خشک‌ترین ماه سال	Precipitation of Driest Month	BIO۱۴
تغییرات فصلی بارش	**Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)**	**BIO۱۵**
میانگین بارش در مرطوب‌ترین فصل سال	Precipitation of Wettest Quarter	BIO۱۶
میانگین بارش در خشک‌ترین فصل سال	**Precipitation of Driest Quarter**	**BIO۱۷**
میانگین بارش در گرم‌ترین فصل سال	Precipitation of Warmest Quarter	BIO۱۸
میانگین بارش در سردترین فصل سال	Precipitation of Coldest Quarter	BIO۱۹

منطقه مورد مطالعه: ایران در منطقه معتدل شمالی از عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه و طول جغرافیایی ۴۳ تا ۶۴ درجه و مساحت متوسط ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع در جنوب‌غرب آسیا واقع شده است. شکل ۱ نمایش‌دهنده نقاط حضور پلیکان پاخاکستری در ایران است. این اطلاعات براساس مکاتبات انجام شده و داده‌های به‌دست آمده از سازمان حفاظت محیط زیست مناطق حضور، این پرنده در ۵ سال گذشته (۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸) در ۱۳۰ سایت گزارش شده است که در این میان، در ۱۲ سایت در هر شش سال به‌طور مداوم این گونه دیده شده است. پس استخراج اطلاعات مربوط به نقاط حضور گونه از پایگاه اطلاعاتی فوق‌الذکر، پیش پردازش‌های اولیه صورت گرفته و شیپ فایل نقاط حضور گونه در محیط ArcGIS تهیه شد. در جدول ۱ پیوست موقعیت مکانی هر یک از نقاط حضور نمایش داده شده است.



شکل ۱: نقشه نقاط حضور پلیکان پاخاکستری در منطقه مورد بررسی

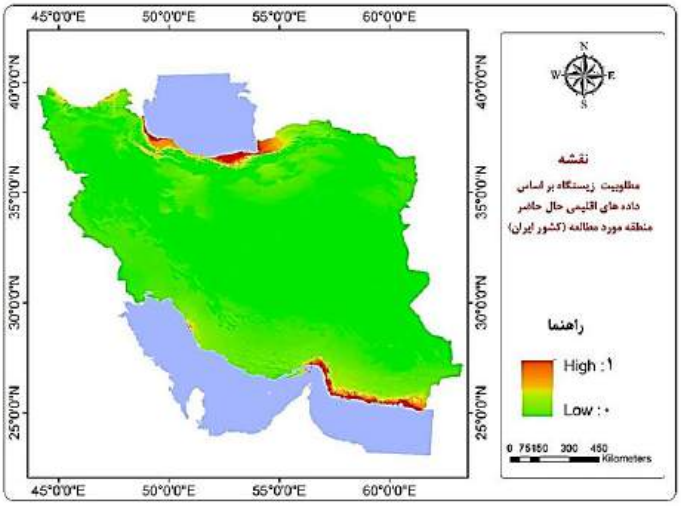
(منبع: نگارنده بر حسب اطلاعات کسب شده از سازمان حفاظت محیط زیست در سال ۱۳۹۶)

روش حداکثر آنتروپی (MAXENT): در پژوهش حاضر از روش مدل‌سازی بیشینه بی‌نظمی (MaxEnt) برای مدل‌سازی پراکنش پلیکان پاخاکستری استفاده شد. الگوریتم حداکثر آنتروپی در مدل‌سازی وابستگی‌های غیرخطی پیچیده میان نواحی حضور گونه‌ها و متغیرهای محیطی، در یک فضای چند بعدی، دارای انعطاف‌پذیری بالایی است و از این‌رو با ابرحجم n بعدی هاچینسون در تعریف آشیان اکولوژیک گونه‌ها انطباق بسیار زیادی دارند (Qin و همکاران، ۲۰۱۷). در روش مکسنت به ارزیابی احتمال توزیع مقادیر حداکثر بی‌نظمی متأثر از محدودیت‌های (Constraints) ناشی از متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر نحوه توزیع مکانی گونه پرداخته می‌شود (Young، ۲۰۱۱؛ Elith وهمکاران، ۲۰۱۱؛Phillipsوهمکاران، ۲۰۰۶).بدین‌منظور مدل‌سازی با ۱۰۰۰ تکرار و انتخاب ۱۰۰۰۰ نقطه تصادفی به‌عنوان نقاط زمینه انجام می‌گیرد. در این روش برخلاف بسیاری از مدل‌های وابسته به نقاط حضور و عدم حضور، تنها نیازمند نقاط حضور بوده و از نقاط

زمینه برای برازش مدل خود استفاده می‌کند (Phillips و همکاران، ۲۰۰۶). بدین‌ترتیب مدل مکسنت این فرض را که نقاط زمینه فاقد امکان حضور برای گونه هستند درنظر نمی‌گیرد، فرضی که برای نقاط عدم‌حضور در سایر روش‌های مدل‌سازی لحاظ می‌گردد(Yi و همکاران، ۲۰۱۶). داده‌های خروجی حاصل از تحلیل مکسنت به سه فرمت خام (Raw) تجمعی (Cumulative) و منطقی (Logistic) است (Phillips و Dudík، ۲۰۰۸). در این مقاله از قالب تجمعی برای محاسبه مقادیر مطلوبیت استفاده شد که در این حالت تفاوت در خروجی محاسبه شده به‌نحو مطلوب‌تری معرف تفاوت در مطلوبیت زیستگاه است. قالب تجمعی بین ۰ تا ۱ متغیر است(Young و همکاران، ۲۰۱۳).هم‌چنین از رویکرد جکنایف(Jackknife) برای ارزیابی اهمیت متغیرها و درصد تأثیر هریک در مدل نهایی مکسنت محاسبه شد. بدین‌منظور در هر تکرار الگوریتم ایجاد مدل، میزان افزایش یا کاهش در میزان نزدیکی پیش‌بینی‌های مدل به نقاط حضور با وارد شدن هر متغیر اندازه‌گیری شد. با استفاده از این روش میزان افزایش کارآیی مدل به‌ازای هر متغیر مشخص می‌شود(Phillips و همکاران، ۲۰۰۶). نقشه مطلوبیت مکسنت مقادیر پیوسته‌ای از مطلوبیت زیستگاه را ارائه می‌کند. از این‌رو لازم است با استفاده از آستانه مطلوبیت (Suitability threshold) نقشه طبقه‌بندی‌شده مطلوب و نامطلوب تهیه گردد. نرم‌افزار MAXENT آستانه‌های مطلوبیت متفاوتی ارائه می‌کند که براساس مقادیر مطلوبیت محاسبه شده برای نقاط حضور و زمینه تعیین می‌گردد (Liu و همکاران، ۲۰۰۵). نقشه‌های مورد نظر براساس حد آستانه بیش‌ترین میزان صحت طبقه‌بندی نقاط حضور (Sensitivity) به‌علاوه صحت طبقه‌بندی نقاط عدم حضور(Specificity)، و یا به‌عبارتی Maximum training sensitivity plus specificity، به دو طبقه مطلوب/نامطلوب کلاسه‌بندی شد. در پژوهش حاضر از حد آستانه ۱۰ درصد مطلوبیت در نقاط حضور به‌عنوان آستانه مطلوبیت استفاده شد. حد آستانه مطلوبیت ۱۰ درصد بدین معناست که براساس ۱۰ درصد پایین مقادیر مطلوبیت در نقاط حضور (کم‌ترین ۱۰ درصد مطلوبیت در نقاط حضور) طبقه‌بندی انجام گیرد. به‌طورکلی در جمع‌آوری نقاط حضور همواره مقادیری از خطای مکانی دیده می‌شود، خصوصاً در داده‌هایی که از منابع مختلفی گردآوری شده باشند به‌دلیل شدت و دقت متفاوت در نمونه‌برداری احتمال بروز خطاهای مکانی بیش‌تر خواهدبود(Franklin، ۲۰۱۰).استفاده از حد آستانه ۱۰ درصد موجب می‌گردد ۱۰ درصد از نقاط که دارای کم‌ترین میزان مطلوبیت هستند به‌عنوان نرخ حذف شدگی یا Omission rate درنظر گرفته شوند. بدین‌ترتیب به نوعی این فرض لحاظ شده است داده‌های دارای خطای مکانی در شناسایی مناطق مطلوب مورد استفاده قرار نگیرند (Liu و همکاران، ۲۰۰۵). به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل از سطح زیر نمودار (AUC) به‌دست آمده از منحنی ROC (Reciever operating characteristic) استفاده شد. سطح زیر نمودار این منحنی به‌عنوان معیاری از قدرت تشخیص نقاط حضور از نقاط عدم حضور توسط مدل عمل نموده و مستقل از تعریف آستانه‌های مطلوبیت می‌باشد. مقادیر عددی AUC به‌طور معمول بین ۰/۵ تا ۱ می‌باشد. مقادیر نزدیک به ۰/۵ نشان‌دهنده این است که برازش مدل با داده‌ها بهتر از مدل تصادفی نیست و عدد ۱ نشان‌دهنده برازش کامل است (Fielding، ۱۹۹۵؛ Phillips و همکاران، ۲۰۰۶).

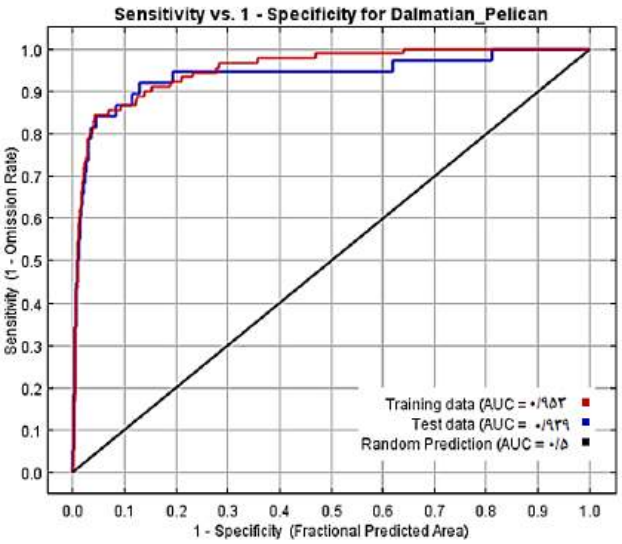
نتایج

شکل ۲ مدل مطلوبیت حاصل از مدل‌سازی نیچ اقلیمی پلیکان پاخاکستری براساس نقاط حضور در ایران را نشان می‌دهد.



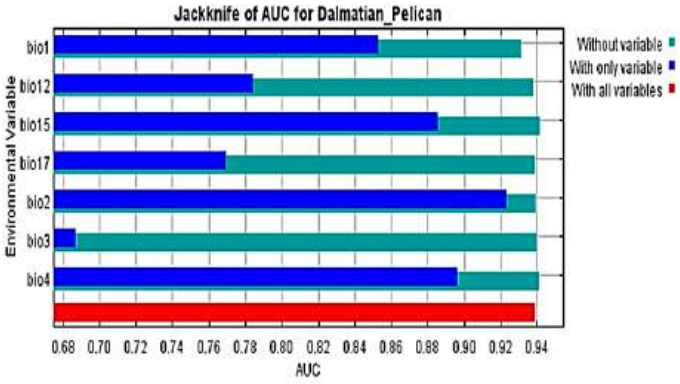
شکل ۲: مدل مطلوبیت زیستگاه گونه پلیکان پاخاکستری براساس داده‌های اقلیم حاضر

همان‌طورکه گفته شد،شاخص AUC برای بررسی Sensitivity در برابر Spectificity استفاده می‌شود. Spectificity به‌معنای این است که مناطق عدم حضور ما با مناطق عدم حضور گونه منطبق باشد. Sensitivity به‌معنای این است که خروجی مدل با نقاط ما تطبیق داشته باشد. هرچه AUC به یک نزدیک‌تر مدل منطبق‌تر و هرچه به ۰/۵ نزدیک‌تر باشد مدل تصادفی‌تر است. شکل ۳ نمودار شاخص AUC را مشاهده می‌کنید. همان‌گونه که مشخص است مدل توانسته‌است درصد بالایی از نقاط حضور را در مناطق مطلوب شناسایی کند. گواه این مدعا بالا بودن شاخص AUC مدل به‌میزان ۰/۹۵۳ برای نقاط تعلیمی و به‌میزان ۰/۹۳۹ برای نقاط برای نقاط آزمون مدل است.



شکل ۳: منحنی ROC جهت بررسی عملکرد مدل مطلوبیت براساس نقاط حضور پلیکان پاخاکستری در ایران

شکل ۴ نمودار جک‌نایف حاصل از اجرای مدل مکسنت را نمایش می‌دهد. هم‌چنین نتایج درصد مشارکت متغیرها در مدل مکسنت براساس نقاط حضور گونه در جدول ۲ ذکر شده است.



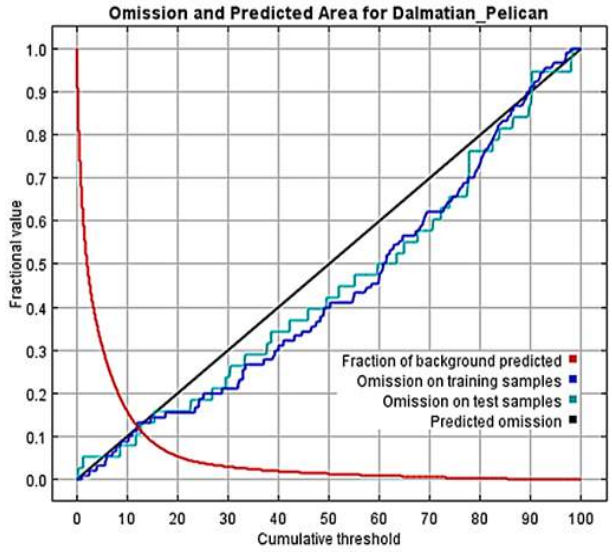
شکل ۴: نمودار Jacknife جهت نمایش درصد مشارکت متغیرهای اقلیمی دراجرای مدل

براساس شکل ۴ مشارکت متغیرها در مدل مکسنت نتایج متفاوتی به‌دست داد. متغیرهای میانگین مقادیر روزانه حرارت (Bio۲) و تغییرات فصلی درجه حرارت (Bio۴) به‌ترتیب بیش‌ترین درصد مشارکت (۷۵/۲ و ۱۱/۸) و از لحاظ درصد اهمیت، متغیر میانگین درجه حرارت سالیانه (Bio1) و میانگین مقادیر روزانه حرارت (Bio۲) بیش‌ترین درصد اهمیت (۳۸/۹ و ۳۲/۴) را در مدل آشیان بوم‌شناختی توسعه یافته بر اساس نقاط حضور گونه در تهیه نقشه مطلوبیت زیستگاه برای زمان حال حاضر داشتند و از طرفی متغیرهای میانگین بارش در خشک‌ترین فصل سال (Bio۱۷) کم‌ترین درصد مشارکت و هم‌دمایی (Bio۳) کم‌ترین درصد اهمیت را در تهیه نقشه مطلوبیت زیستگاه گونه پلیکان پا خاکستری در مدل مکسنت را داشتند ولی به‌طورکلی مدل با اجرای تمام متغیرها پاسخ مطلوبی داده است و بیش‌ترین مشارکت مربوط به اجرای مدل با درنظر گرفتن تمام ۷ متغیرهای اقلیمی مورد نظر می‌باشد.

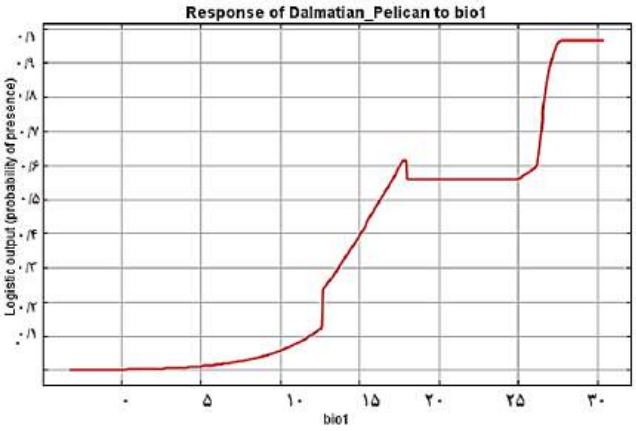
جدول ۲: درصد مشارکت متغیرهای اقلیمی در مدل آشیان بوم‌شناختی Maxent برای گونه پلیکان پاخاکستری

متغیر	نام انگلیسی	درصد مشارکت (٪)	درصد اهمیت (٪)
میانگین درجه حرارت سالیانه	Bio۱	۶/۴	۳۸/۹
میانگین مقادیر روزانه حرارت	Bio۲	۷۵/۲	۳۲/۴
هم‌دمایی	Bio۳	۰/۲	۰/۴
تغییرات فصلی درجه حرارت	Bio۴	۱۱/۸	۹/۳
بارش سالیانه	Bio۱۲	۲/۶	۱۱/۴
تغییرات فصلی بارش	Bio۱۵	۳/۹	۷
میانگین بارش در خشک‌ترین فصل سال	Bio۱۷	۰/۱	۰/۷

منحنی Omission نشان دهنده تطبیق نمونه‌های تعلیمی برای مدل است. هرچه خط اومیژن به خط اصلی نزدیک‌تر باشد مدل بهینه‌تر است. در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود که خطوط آبی به خط سیاه نزدیک بوده و این نشان‌دهنده اجرای بهینه مدل می‌باشد. منحنی Omission حاصل از این پژوهش در شکل ۵ نمایش داده شده است. منحنی پاسخ (response curve) به بررسی پاسخ متغیر به تغییرات نقاط در منطقه می‌پردازد. با توجه به منحنی‌های پاسخ که به‌طور مثال در شکل ۶ آورده شده است، یک جدول رسم‌شده که نتایج بالاترین و ایده‌آل‌ترین منطقه برای حضور پلیکان پاخاکستری می‌باشد (جدول ۳).



شکل ۵: نمودار Omission حاصل از اجرای مدل مکسنت



شکل ۶: منحنی پاسخ (response curve) برای متغیر Bio1

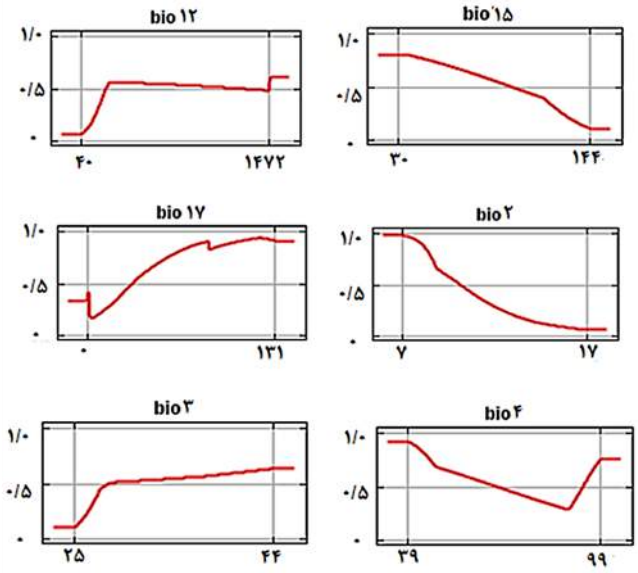
جدول۳: نتایج بالاترین وایده‌آل‌ترین وضعیت پارامترها برای حضور گونه پلیکان پاخاکستری

متغیرهای اقلیمی	نقطه ایده‌آل	نوع واحد
درجهٔ حرارت متوسط سالانه (Bio۱)	۱۸-۱۳	درجه سانتی‌گراد
متوسط ماهانه دما (درجهٔ حرارت حداکثر- درجهٔ حرارت حداقل) (Bio۲)	۱۰-۷	درجه سانتی‌گراد
هم‌دمایی (Bio2/Bio7 * ۱۰۰): (Bio۳)	۴۴-۳۰	درصد (٪)
تغییرات فصلی درجه حرارت (انحراف معیار* ۱۰۰): (Bio۴)	۳۹	درصد (٪)
بارش سالیانه (Bio۱۲)	۵۵۰-۵۰۰	میلی‌متر
تغییرات فصلی بارش (Bio۱۵)	۴۰-۳۰	درصد (٪)
میانگین بارش در خشک‌ترین فصل سال (Bio۱۷)	۱۳۱-۱۲۰	میلی‌متر

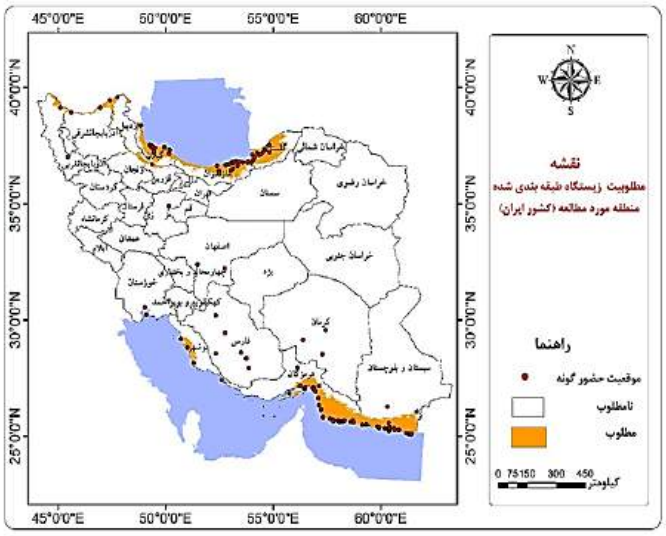
همان‌طورکه در این شکل مشاهده می‌شود بهترین نقطه برای حضور پلیکان پاخاکستری با توجه به نقاط حضور گونه در نقشه Bio1 که نمایش‌دهنده میانگین دمای سالیانه است بین ۱۸ تا ۱۳ درجه سانتی‌گرادمی‌باشد. شکل ۷ سایر نمودارها برای دیگر بیوم‌های اقلیمی را نشان می‌دهد.شکل ۸ نمایش‌دهنده نقشه طبقه‌بندی شده مطلوبیت زیستگاه می‌باشد. همان‌طورکه گفته شد، نقشه مطلوبیت مکسنت مقادیر پیوست‌های از مطلوبیت زیستگاه را ارائه می‌کند (شکل ۲). از این‌رو لازم است با استفاده از آستانه مطلوبیت نقشه طبقه‌بندی شده مطلوب و نامطلوب تهیه گردد.هم‌چنین جدول ۴ میزان درصد و مساحت مطلوبیت زیستگاه پلیکان پاخاکستری در هر طبقه (مطلوب و نامطلوب) در کشور ایران ارائه شده است.

جدول ۴: درصد و مساحت مطلوبیت زیستگاه پلیکان پاخاکستری با روش MAXENT در ایران

نام طبقه	MAXENT	
	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد (٪)
مطلوب	۷۷۸۳۸	۵
نامطلوب	۱۵۳۹۴۲۱	۹۵



شکل ۷: منحنی پاسخ (response curve) برای متغیرهای اقلیمی (بیوم‌های حال حاضر)



شکل ۸: نقشه مطلوبیت زیستگاه طبقه‌بندی شده‌ی پلیکان پاخاکستری بر اساس متغیرهای اقلیمی حاضر

بحث

مطالعات انجام پذیرفته درخصوص پرندگان آبزی و کنار آبچر نشان می‌دهد به‌دلیل وابستگی زیاد این موجودات به بوم سازگان‌های تالابی، پرندگان ازجمله شاخص‌های زیستی مهمی هستند که در تعیین و مشخص نمودن وضعیت محیط‌زیست و سلامت بوم‌سازگان‌های تالابی کاربرد بسیاری دارند (Stolen، ۲۰۱۰). در میان پرندگان تالابی مهم، پلیکان پاخاکستری (*Pelecanus crispus*) یا مرغ سقای پاخاکستری یا مرغ

سقای کاکُلی گونه‌ای پرنده از راسته پلیکان‌سانان و راسته مرغ سقاسانان است که از اهمیت و جذابیت ویژه‌ای در ایران و جهان برخوردار است. پلیکان پاخاکستری در آب دریاچه‌های کم‌عمق شور و شیرین، باتلاق‌ها و کرانه‌ها زندگی می‌کند. این پرنده مهاجر است و به‌تعداد فراوان در سراسر ایران به زندگی و مهاجرت می‌پردازد (گزارش ملی سرشماری زمستانی پرندگان آبزی و کنارآبزی زمستان، ۱۳۹۶). در خلال فصل مهاجرت زمستان ۹۶، در مجموع تعداد ۵۳۱۶۶ پرنده متعلق به فهرست سرخ IUCN شامل پلیکان پاخاکستری، غاز پیشانی سفید کوچک، عروس غاز، اردک مرمری، اردک سرسفید، درنای سیبری و تلیله بزرگ در موقعیت‌های مکانی مختلفی از کشور، مشاهده و گزارش شدند. طی سرشماری زمستان سال ۱۳۹۶ تعداد جمعیت پلیکان پاخاکستری، برابر با ۷۰۷۸ و درصد جمعیت این گونه نسبت به جمعیت کل پرندگان آبزی و کنار آبزی مهاجر فهرست سرخ IUCN در ایران ۱۳/۳۱ درصد می‌باشد. این درحالی است که درصد جمعیت این گونه در سال ۹۵ برابر با ۲۲/۳ درصد و در سال ۹۴ برابر با ۱۱/۷ درصد گزارش شده است. این آمار حاکی از کاهش جمعیت این پرنده در کشور می‌باشد که به‌دلیل وجود عوامل تهدید در یک زیستگاه و به خصوص شکار بی‌رویه پرندگان در فصل مهاجرت، باعث می‌شود. پرندگان مهاجر با رجوع به حافظه تاریخی خود، به‌تدریج مسیر مهاجرت و توقفگاه‌هایشان را تغییر می‌دهند (گزارش ملی سرشماری زمستانی پرندگان آبزی و کنارآبزی زمستان، ۱۳۹۶). براساس گزارش تهیه شده در فوریه ۲۰۱۷ توسط انجمن حفاظت منطقه Prespa، زهکشی نامناسب و تخریب زیستگاه، پلیکان پاخاکستری را در کشور ایران تهدید می‌کند. با این تفاسیر علی‌رغم اهمیت گونه پلیکان پا خاکستری در کشور و آینده در معرض تهدید آن، و گواه بسیاری از تحقیقات مبنی بر وقوع تغییر اقلیم در مناطق مختلف ایران و قرار گرفتن این گونه نادر در معرض خطر انقراض، تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تعیین زیستگاه مطلوب برای آن و بررسی اثر تغییر اقلیم بر جمعیت آن انجام نشده است. بررسی عملکرد مدل مکسنت با استفاده از شاخص سطح زیر نمودار (AUC) منحنی ROC نشان داد که مدل به‌دست آمده با مقدار AUC معادل ۰/۹۵۳ عملکرد بالایی در پیش‌بینی مناطق مطلوب برای گونه دارد. در پژوهشی با رویکرد مشابه Bombi و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی کارایی شش مدل GLM، GAM، ENFA، DOMAIN، BIOCLIM و MAXENT پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که دو مدل GAM و MAXENT بهترین کارایی و دو مدل DOMAIN و GLM کارایی خوب و دو مدل ENFA و BIOCLIM کم‌ترین کارایی نسبی را داشتند. مطالعه دیگری توسط انصاری و همکاران (۱۳۹۴) بر روی درنای معمولی (*Grud grus*) در تالاب میقان با استفاده از مدل مکسنت، AUC برابر با ۰/۸۱۷ را نشان داد که نمایان‌گر عملکرد عالی مدل می‌باشد. متغیرهای مورد استفاده در این تحقیق شامل کاربری اراضی، عمق آب، غذا و فاصله تا مناطق انسان ساخت می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان داد که متغیرهای میانگین مقادیر روزانه حرارت (Bio۲) و تغییرات فصلی درجه حرارت (Bio۴) به‌ترتیب بیش‌ترین درصد مشارکت و از لحاظ درصد اهمیت، متغیر میانگین درجه حرارت سالیانه (Bio1) و میانگین مقادیر روزانه حرارت (Bio۲) بیش‌ترین درصد اهمیت را در مدل آشیان بوم شناختی توسعه یافته براساس نقاط حضور گونه در تهیه نقشه مطلوبیت زیستگاه برای زمان حال حاضر داشتند و از طرفی متغیرهای میانگین بارش در خشک‌ترین فصل سال (Bio۱۷)، کم‌ترین درصد مشارکت و هم‌دمایی (Bio۳) کم‌ترین درصد اهمیت را در تهیه نقشه مطلوبیت زیستگاه گونه پلیکان پاخاکستری در مدل مکسنت را داشتند. مقادیر این متغیرها در منحنی‌های پاسخ (response curve) مشخص گردید. بر اساس نتایج حاصل از منحنی‌های پاسخ (response curve) که به بررسی پاسخ متغیرها به تغییرات نقاط در منطقه می‌پردازد، بهترین نقطه برای حضور پلیکان پاخاکستری با توجه به نقاط حضور گونه در نقشه Bio1 که نمایش‌دهنده میانگین دمای سالیانه است بین ۱۸ تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. متوسط ماهانه دما ۷ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد ایده‌آل‌ترین دما برای حضور این گونه است. هم‌چنین ۳۰ تا ۴۰ درصد هم‌دمایی (ایزوترمالی) و ۳۹/۱۰ درصد تغییرات فصلی درجه حرارت وضعیت مناسبی برای حضور این گونه نشان داده است. از طرفی بارش سالیانه ۵۰ تا ۵۵ میلی‌متر وضعیت مطلوبی برای حضور این گونه فراهم خواهد کرد. براساس نقشه میانگین بارش در خشک‌ترین فصل سال بارش ۱۲۰-۱۳۰ میلی‌متر به‌طور میانگین نقطه ایده‌آل برای حضور این گونه است و بارش کم‌تر از این حد در این فصل باعث می‌شود که شرایط نامناسبی برای آن فراهم کردد. هم‌چنین تغییرات فصلی بارش نباید بیش‌تر از ۳۰ تا ۴۰ درصد باشد وگرنه حضور پلیکان پاخاکستری به مخاطره خواهد افتاد. نتایج مدل‌سازی MAXENT نشان می‌دهد تنها ۷۷۸۳۸ کیلومترمربع (۵درصد از مساحت کل کشور) برای حضور پلیکان پاخاکستری مطلوب می‌باشد. مطالعات کرمی و همکاران (۱۳۸۵) نشان داد که کلیه متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه بهتر است به‌صورت یک نمودار درختی گردآوری گردد که در تحقیق خود نیز نمودار درختی متغیرهای زیستگاهی در مطلوبیت زیستگاه گونه اردک سرسبز (*Anas platyrhynchos*) را نشان دادند. Waltert و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند که متغیرهایی که برتغذیه پرندگان آبزی مؤثرند، شامل مجموعه گیاهان آبزی و نیمه آبزی، مدت زمان و فراوانی سیلاب‌ها و ویژگی خاک است که همان‌طور که می‌تواند بر مطلوبیت زیستگاه مؤثر باشد. در تحقیق انجام شده در زاینده‌رود نیز متغیر گیاهان آبزی به‌عنوان یک عامل کلیدی تغذیه‌ای

مورد بررسی قرار گرفت اما با توجه به این نکته که زیستگاه زاینده‌رود در سال‌های اخیر دستخوش خشکسالی‌های متناوب بوده است لذا متغیر سیلاب در این زیستگاه جوابگو نمی‌باشد (منوچهری، ۱۳۹۰)، بنابراین نیاز است در تحقیقات آینده سایر متغیرهای خرد مقیاس‌تر نیز درنظر گرفته شود. در پژوهش حاضربه منظور بررسی و مدل‌سازی پراکنش پلیکان پاخاکستری در مقیاس‌های خردتر می‌توان متغیرهای توپوگرافی وفاصله تا صنایع و ... می‌توانند را درنظر گرفت. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تحلیل آن‌ها به‌صورت سری‌های زمانی امکان شناسایی مناطقی که تحت حضور گونه قرار گرفته‌اند فراهم می‌آورد که می‌توان مدل‌سازی پراکنش گونه درنظر گرفت. استفاده از سایر روش‌های مدل‌سازی مانند روش‌های مدل تعمیم یافته خطی(GLM)، درخت‌رگرسیونی‌افزایشی(درخت رگرسیونی افزایشی)،جنگل تصادفی (RF) و یا شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و در نهایت مقایسه نتایج آن‌ها با مدل مکسنت.

منابع

۱. **انصاری، م.، ۱۳۹۳.** مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه درنای معمولی (*Grus grus*) در تالاب میقان اراک. فصلنامه اکوبیولوژی تالاب. سال ۷، شماره ۴۲، صفحات ۵۰ تا ۵۷.

۲. **سرباز، م.؛ خانی، ع. و فراشی،آ.، ۱۳۹۷.** پیش‌بینی احتمال حضور گونه زرده بر (*Vormela peregusna*) در استان خراسان رضوی با استفاده از روش MaxEnt.. مجله زیست‌شناسی جانوری تجربی. دوره ۷، شماره ۱، صفحات ۳۵ تا ۴۴.

۳. **شریبی، ز.؛ خلیلی‌پور، ا. و عسگری، م.، ۱۳۹۷.** مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه اردک مرمری (*Marmaronetta angustirostris*) با استفاده از روش حداکثر آنتروپی. فصلنامه محیط زیست جانوری. سال ۱۰، شماره ۲، صفحات ۷۵ تا ۸۲.

۴. **کرمی، م.؛ ریاضی، ب. و کلانی، ن.، ۱۳۸۵.** ارزیابی زیستگاه کفتار ایرانی در پارک ملی خجیر و ارائه مدل مطلوبیت به‌روش HEP. مجله علوم محیطی. دوره ۱۱، صفحات ۷۷ تا ۸۶.

۵. **مشتاقی، م.؛ کابلی، م. و شمسایی، م.، ۱۳۹۲.** تعیین شاخص مطلوبیت زیستگاه رودخانه‌ای اردک سرسبز (*Anas platyrhynchos*) در رودخانه زاینده‌رود.. نشریه اکوبیولوژی تالاب. دوره ۵، شماره ۱۸، صفحات ۱۳ تا ۲۱.

۶. **منوچهری، و.، ۱۳۹۰.** مکان‌یابی و تعیین مطلوبیت زیستگاه گوزن زرد ایرانی با استفاده‌از روش HEP در منطقه حفاظت‌شده قلاجه استان کرمانشاه به‌منظور رهاسازی آن. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، واحد علوم وتحقیقات اهواز.

۷. **Ashrafzadeh, M.R.; Naghipour, A.A.; Haidarian, M. and Khorozyan, I., 2019**. Modeling the response of an endangered flagship predator to climate change in Iran. Mammal Research. Vol. 64, No. 1, pp: 39-51.

۸. **Bombi, P.; Salvi, D.; Vignoli, L. and Bologna, M.A., 2009.** Modelling Bedriaga's rock lizard distribution in Sardinia: an ensemble approach. Amphibia,Reptilia. Vol. 30, No. 3, 413 p.

۹. **Dong, Z.; Wang, Z.; Liu, D.; Li, L.; Ren, C.; Tang, X.; Jia, M. and Liu, C., 2013**. Assessment of habitat suitability for waterbirds in the West Songnen Plain, China, using remote sensing and GIS. Ecological engineering. Vol. 55, pp: 94-100.

۱۰. **Elith, J.; Phillips, S.J.; Hastie, T.; Dudík, M.; Chee, Y.E. and Yates, C.J., 2011**. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and distributions. Vol. 17, pp: 43-57.

۱۱. **Fielding, A.H. and Haworth, P.F., 1995**. Testing the generality of bird-habitat models. Conservation biology. Vol. 9, No. 6, pp: 1466-1481.

۱۲. **Franklin, J., 2010**. Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge University Press.

۱۳. **Guisan, A.; Thuiller, W. and Zimmermann, N.E., 2017**. Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R. Cambridge University Press.

۱۴. **Guisan, A.; Tingley, R.; Baumgartner, J.B.; Naujokaitis Lewis, I.; Sutcliffe, P.R.; Tulloch, A.I.; Regan, T.J.; Brotons, L.; McDonald-Madden, E. and Mantyka Pringle, C., 2013**. Predicting species distributions for conservation decisions. Ecology Letters. Vol. 16, pp: 1424-1435.

۱۵. **Hirzel, A.H.; Helfer, V. and Metral, F., 2001.** Assessing habitat-suitability models with a virtual species. Ecological modelling. Vol. 145, No. 2-3, pp: 111-121.

۱۶. **Hua, Y.; Cui, B. and He, W., 2012**. Changes in water birds habitat suitability following wetland restoration in the Yellow River Delta, China. Clean Soil, Air, Water. Vol. 40, No. 10, pp: 1076-1084.

۱۷. **Mack, E.L.; Firbank, L.G.; Bellamy, P.E.; Hinsley, S.A. and Veitch, N., 1997.** The comparison of remotely sensed and ground-based habitat area data using species-area models. J of Applied Ecology. Vol. 34, No. 5, pp: 1222-1228.

۱۸. **Pearson, R.G.; Raxworthy, C.J.; Nakamura, M. and Townsend, P.A., 2007**. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. J of biogeography. Vol. 34, pp: 102-117.

۱۹. **Phillips, S.J.; Anderson, R.P. and Schapire, R.E., 2006.** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological modelling. Vol. 190, pp: 231-259.

۲۰. **Qin, A.; Liu, B.; Guo, Q.; Bussmann, R.W.; Ma, F.; Jian, Z. and Pei, S., 2017**. Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of Thuja sutchuenensis Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. Global Ecology & Conservation. Vol. 10, pp: 139-146.

۲۱. **Remya, K.; Ramachandran, A. and Jayakumar, S., 2015.** Predicting the current and future suitable habitat distribution of Myristica dactyloides Gaertn. Using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India. Ecologi engineer. Vol. 82, pp: 184-188.

۲۲. **Sebastián-González, E. and Green, A.J., 2014**. Habitat use by waterbirds in relation to pond size, water depth, and isolation: lessons from a restoration in southern Spain. Restoration Ecology. Vol. 22, No. 3, pp: 311-318.

۲۳. **Tian, B.; Zhou, Y.; Zhang, L. and Yuan, L., 2008**. Analyzing the habitat suitability for migratory birds at the Chongming Dongtan Nature Reserve in Shanghai, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science. Vol. 80, pp: 296-302.

۲۴. **Wang, Z.; Song, K.; Zhang, B.; Liu, D.; Ren, C.; Luo, L.; Yang, T.; Huang, N.; Hu, L.; Yang, H. and Liu, Z., 2009.** Shrinkage and fragmentation of grasslands in the West Songnen Plain, China. Agriculture, ecosystems and environment. Vol. 129, No. 1-3, pp: 315-324.

۲۵. **Waltert, M.; Chuwa, M. and Kiffner, C., 2009.** An assessment of the puku (*Kobus vardonii* Livingstone 1857) population at Lake Rukwa, Tanzania. African journal of ecology. Vol. 47, No. 4, pp: 688-692.

۲۶. **Weber, T.C., 2016.** Maximum entropy modeling of mature hardwood forest distribution in four US states. Forest Ecology and Management. Vol. 261, No. 3, pp: 779-788.

۲۷. **Wilson, C.D.; Roberts, D. and Reid, N., 2011**. Applying species distribution modelling to identify areas of high conservation value for endangered species: A case study using *Margaritifera margaritifera* (L.). Biological Conservation. Vol. 144, No. 2, pp: 821-829.

۲۸. **Yang, X.Q.; Kushwaha, S.P.S.; Saran, S.; Xu, J. and Roy, P.S., 2013.** Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, *Justicia adhatoda* L. in Lesser Himalayan foothills. Ecological Engineer. Vol. 51, pp: 83-87.

۲۹. **Yi, Y.; Cheng, X.; Yang, Z. and Zhang, Sh., 2016.** Maxent modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant in Yunnan, China. Echography. Vol. 92, pp: 260-269.

۳۰. **Young, N., 2011**. A MaxEnt Model v3.3.3e Tutorial (ArcGIS v10).

۳۱. **Young, N.; Carter, L. and Evangelista, P., 2013**. A MaxEnt Model v3.3.3e Tutorial (ArcGIS v10).