

ORIGINAL ARTICLE

Modeling the effects of climate change on the geographic distribution of the Striped Hyena (*Hyaena hyaena*) in Fars province

Borhan Yousefi¹, Ali Asghar Naghipour² 

¹Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Iran.

²Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Iran.

Correspondence

Ali asghar Naghipour

Email: aa.naghipour@sku.ac.ir

How to cite

Yousefi, B., & Naghipour, A.A. (2025). Modeling the effects of climate change on the geographic distribution of the Striped Hyena (*Hyaena hyaena*) in Fars province. *Experimental Animal Biology*, 13(51), 75-84.

ABSTRACT

Striped hyena (*Hyaena hyaena*) is one of the important animal species in Fars province, where there is limited information about the effect of climate change on its habitats. In this research, the effects of climate change on the geographical distribution of striped hyenas in Fars province were investigated using the MaxEnt model. Considering the upcoming climate threats, this study has investigated the changes in the distribution of suitable habitats for this species in the current and future time periods (2070) and under the two climate scenarios SSP245 and SSP585 and the general circulation model MRI-ESM2-0. In this research, 4 categories of environmental variables including: climatic variables, human interactions, topography, and land use were used. The results showed that, respectively, the temperature annual range (Bio7), distance to protected areas, precipitation seasonality (Bio15) and land use (in total with 73.4%) have the largest contribution in choosing the optimal habitat for striped hyenas. Also, the results of the evaluation of the level of desirability of striped hyena habitats showed that currently 19.1% of habitats in Fars province are suitable habitats for striped hyenas, of which 21.3% overlap with the network of protected areas. However, projections show that in the future, the level of suitable habitats under the SSP245 and SSP585 scenarios will decrease by 14.27 and 15.56%, respectively. These results emphasize the necessity of developing management plans for the protection of striped hyena habitats in the face of climate change.

KEYWORDS

Climate scenarios, Maximum Entropy model, Protected areas, Species distribution modeling.

نشریه علمی

زیست‌شناسی جانوری تجربی

«مقاله پژوهشی»

مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش جغرافیایی کفتار راه‌راه (*Hyaena hyaena*) در استان فارس

برهان یوسفی^۱، علی اصغر نقی‌پور^۲ 

چکیده

کفتار راه‌راه (*Hyaena hyaena*) یکی از گونه‌های مهم جانوری در استان فارس است که اطلاعات محدودی درباره تأثیر تغییر اقلیم بر زیستگاه‌های آن وجود دارد. در این پژوهش، اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش جغرافیایی کفتار راه‌راه در استان فارس با استفاده از مدل MaxEnt مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تهدیدهای اقلیمی پیش رو، این مطالعه به بررسی تغییرات در توزیع زیستگاه‌های مناسب این گونه در دو دوره زمانی حال حاضر و آینده (۲۰۷۰ میلادی) و تحت دو سناریوی اقلیمی SSP245 و SSP585 و مدل گردش عمومی MRI-ESM2-0 پرداخته است. در این پژوهش از چهار دسته متغیر محیطی شامل متغیرهای اقلیمی، تداخلات انسانی، توپوگرافی، و کاربری اراضی استفاده شد. نتایج نشان داد به‌ترتیب، دامنه سالانه دما، فاصله تا مناطق حفاظت‌شده، تغییرات فصلی بارندگی و کاربری اراضی (در مجموع با ۷۳/۴ درصد) بیش‌ترین سهم را در انتخاب زیستگاه مطلوب برای کفتار راه‌راه دارند. همچنین نتایج حاصل از بررسی سطح مطلوبیت زیستگاه‌های کفتار راه‌راه نشان داد که در حال حاضر ۱۹/۱ درصد از زیستگاه‌های استان فارس به‌عنوان زیستگاه مطلوب کفتار راه‌راه می‌باشد که ۲۱/۳ درصد آن با شبکه مناطق حفاظت‌شده هم‌پوشانی دارد. با این حال، پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که در آینده، سطح زیستگاه‌های مناسب تحت سناریوهای SSP245 و SSP585 به‌ترتیب ۱۴/۲۷ و ۱۵/۵۶ درصد کاهش خواهد یافت. این نتایج بر لزوم تدوین برنامه‌های مدیریتی برای حفاظت از زیستگاه‌های کفتار راه‌راه در مواجهه با تغییرات اقلیمی تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی

سناریوهای اقلیمی، مدل حداکثر آنتروپی، مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای، مناطق حفاظت‌شده.

^۱ علوم و مهندسی محیط زیست، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
^۲ گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

نویسنده مسئول:

علی اصغر نقی‌پور

ایمانامه: aa.naghypour@sku.ac.ir

استناد به این مقاله:

یوسفی، برهان و نقی‌پور، علی اصغر (۱۴۰۳). مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش جغرافیایی کفتار راه‌راه (*Hyaena hyaena*) در استان فارس. فصلنامه زیست‌شناسی جانوری تجربی، ۱۳(۵۱)، ۷۵-۸۴.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تعادل آب‌وهوایی زمین به شدت دستخوش تغییرات شده است، به طوری که تغییرات اقلیمی و افزایش دما به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهانی تبدیل شده است (فقیه سبزواری و فراشی، ۱۴۰۳). تغییر اقلیم شامل هرگونه تغییر معنادار در الگوهای آب‌وهوایی است که طی زمان طولانی در یک منطقه خاص یا در سطح جهانی رخ می‌دهد. از دهه ۱۸۸۰، میانگین دمای سطح زمین حدود ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۱۰۰ این افزایش به ۶ درجه سانتی‌گراد برسد (نونز و همکاران، ۲۰۱۹). کشورهای جنوب غربی آسیا، به‌ویژه ایران، به دلیل شرایط جغرافیایی خاص خود در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر هستند (منصوری و همکاران، ۲۰۱۹). براساس پیش‌بینی‌ها، افزایش دمای ۱/۵ تا ۲/۵ درجه سانتی‌گراد می‌تواند منجر به انقراض تعداد زیادی از گونه‌های گیاهی و جانوری شود (مک‌کارل، ۲۰۰۷). تغییر اقلیم جهانی، نقش اساسی در تغییر مکان‌های جغرافیایی گونه‌ها و حتی انقراض محلی برخی از گونه‌ها، به‌ویژه در لکه‌های زیستگاهی مستقل و کوچک، داشته است (هیلبرت و همکاران، ۲۰۰۷). از این رو، تغییرات محیطی آینده، مانند تغییر در الگوهای بارش و دما، می‌تواند بر مطلوبیت اکوسیستم‌های طبیعی برای گونه‌های مختلف تأثیر بگذارد. درک چگونگی واکنش گونه‌ها به تغییرات اقلیمی آینده برای مدیریت و حفاظت مؤثر از تنوع زیستی بسیار حیاتی است (هانا و همکاران، ۲۰۰۲). تغییرات اقلیمی به‌عنوان محرک اصلی تغییر در محدوده پراکنش، گسترش یا کاهش دامنه پراکنش و انقراض گونه‌ها شناخته می‌شود (لویینسکی و همکاران، ۲۰۰۷). امروزه تخریب زیستگاه و تغییرات اقلیمی، ادامه حیات گونه‌ها را تحت تأثیر قرار داده و به‌عنوان دو عامل اساسی، نقش مهمی در فرایند کاهش تنوع زیستی ایفا می‌کنند (ویلیامز، بولیتو و فاکس، ۲۰۰۳).

برای تدوین راهبردهای حفاظتی و مدیریتی کارآمدتر و شناسایی زیستگاه‌های حساس، لازم است تأثیر تغییر اقلیم بر پراکنش جغرافیایی گونه‌ها بهتر درک شود (اشرف‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹). مدل‌سازی اثرات اقلیمی آینده به‌منظور کاهش و کنترل پیامدهای منفی تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد (اندرسون، ۲۰۱۰). یکی از پرکاربردترین روش‌ها به‌منظور پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌ها، استفاده از مدل‌های پراکنش گونه‌ای (SDM) تحت سناریوهای تغییر اقلیم

می‌باشد (گوتفريد و همکاران، ۲۰۱۹). این مدل‌سازی بر پایه روابط تجربی بین پراکنش فعلی گونه‌ها با متغیرهای اقلیمی انجام می‌شود تا توزیع مکانی گونه‌ها تحت سناریوهای اقلیمی آینده تخمین زده شود (آراجو و گويسان، ۲۰۰۶). جمع‌آوری اطلاعات مربوط به حضور گونه، متغیرهای محیطی و ترکیب این داده‌ها با شرایط محیطی جدید، لازمه پیش‌بینی پراکنش جغرافیایی گونه‌ها در آینده است (رهفلد و همکاران، ۲۰۱۲). این اطلاعات جهت پاسخ به دو سوال کلیدی مهم هستند؛ ۱- گونه مورد مطالعه در حال حاضر در چه نوع شرایط اقلیمی یافت می‌شود؟ ۲- شرایط اقلیمی این گونه در آینده چگونه خواهد بود؟ (اندرسون، ۲۰۱۰).

کفتار جزو راسته گوشتخواران در رأس هرم غذایی قرار دارد و به‌عنوان جز مهمی از اعضای اکوسیستم مورد توجه می‌باشد (مروتی، ابراهیمی و بهادری امجز، ۱۳۹۹). خانواده کفتارها از تعداد چهار گونه تشکیل می‌شوند. یکی از این گونه‌ها، کفتار راه‌راه (*Hyaena hyaena*) است که در مناطق مختلف آفریقا به‌جز قسمت‌های جنوبی یافت می‌شود، در خاورمیانه نیز به‌جز شبه جزیره عربستان، در قفقاز، ترکیه، عراق و ایران پراکنش دارد. کفتار راه‌راه تنها گونه عضو این خانواده در کشور ایران می‌باشد و در رتبه نزدیک به تهدید (NT) فهرست سرخ IUCN قرار گرفته است (احمدزاده و همکاران، ۱۳۹۶). این گونه حیاتی از نظر بوم‌شناختی در بازایی ترکیبات معدنی از مواد آلی مرده و نیز در حفظ و پاک‌سازی تالاب‌ها در مناطق گرمسیری نقش بسیار مهمی دارد (رضایی و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به این‌که این گونه نقش مثبت و مهمی در پاک‌سازی، کنترل آلودگی و جلوگیری از سرایت بیماری‌ها دارد و نیز در ایجاد تعادل بوم‌شناختی اهمیت زیادی دارد، نابودی آن می‌تواند به تأثیرات مخرب و جبران‌ناپذیری بر اکوسیستم منجر شود (میلز، ۱۹۹۸). در سال‌های اخیر عواملی مانند تصادف با اتومبیل، خوردن طعمه مسموم، شکار و تخریب غارها و سکونتگاه‌های این حیوان موجب کاهش چشمگیر جمعیت آن شده است (ضیایی، ۱۳۸۸). موخری و همکاران (۲۰۲۱) نیز با مطالعه زیستگاه کفتار راه‌راه در مناطق نیمه‌خشک ایالت بنگال غربی هند عنوان نمودند که سکونتگاه‌های انسانی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر برای این گونه محسوب می‌شود. هم‌چنین، مطالعات پیش‌بینی می‌کنند که پاسخ کفتار راه‌راه به تغییرات اقلیمی در کشور ما منفی خواهد بود، به طوری که منطقه پراکنش گونه کاهش خواهد یافت (ابراهیمی و همکاران، ۲۰۲۱).

تا ۵۵ درجه و ۳۶ دقیقه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱) این استان به سه بخش کوهپایه‌ای، جلگه‌ای و کوهستانی تقسیم شده و از تنوع آب‌وهوایی کوهستانی، خشک، نیمه‌خشک و معتدل برخوردار است. میانگین بارندگی سالانه در این استان حدود ۳۰۰ میلی‌متر است و متوسط دما در سردترین فصل سال ۷/۶ و در گرم‌ترین فصل سال ۲۷/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (پاک‌نیت و همکاران، ۱۳۹۵).

گردآوری داده‌های حضور

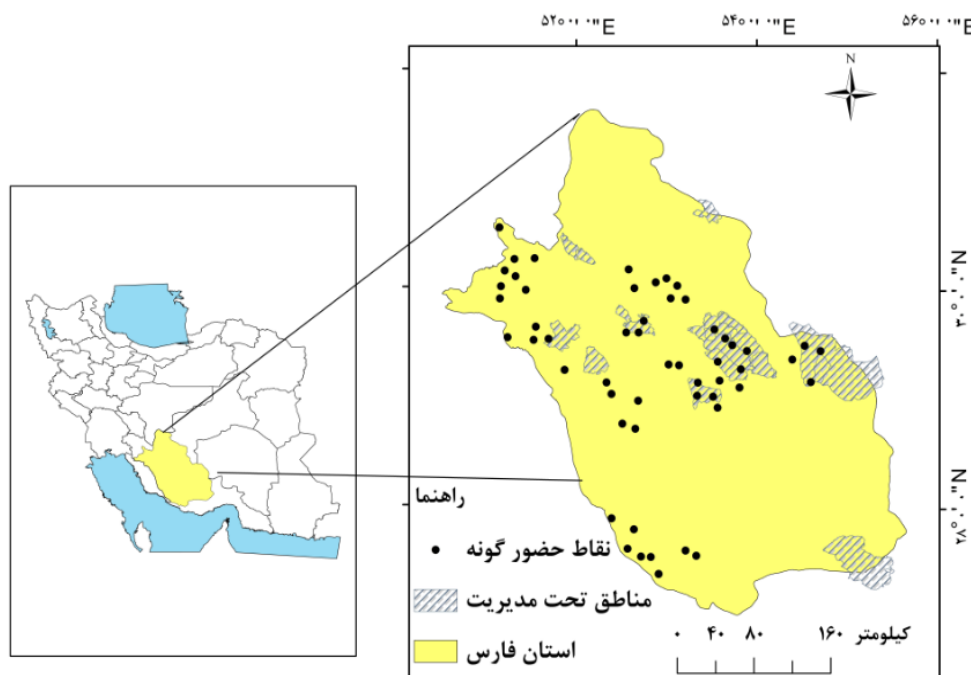
داده‌های حضور این گونه شامل ۱۲۳ نقطه است که از طریق بازدیدهای گسترده میدانی و همچنین از داده‌های به‌دست‌آمده از مشاهدات کارشناسان و محیط‌بانان استان جمع‌آوری شده است. با توجه به این که جثه و ویژگی‌های ظاهری این گونه شاخص‌های آشکاری برای شناسایی دارد، استفاده از مشاهدات محیط‌بانان و کارشناسان می‌تواند صحت بالایی را در تشخیص این گونه فراهم کند. به دلیل این که خوشه‌بندی نقاط حضور ممکن است باعث ایجاد اوربیتی شود، لذا از بین موقعیت‌های حضور نزدیک به هم (در فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتری) تنها یک موقعیت حضور در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. این فاصله با توجه به گستره خانگی تعیین‌شده این گونه در مطالعات قبلی انتخاب شد (موکرجی و همکاران، ۲۰۲۱). بنابراین، در نهایت ۵۴ نقطه حضور در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

کفتار راه‌راه به‌عنوان یکی از گونه‌های کلیدی اکوسیستم‌های طبیعی استان فارس نقش مهمی در تعادل زیستی این منطقه ایفا می‌کند، اما زیستگاه‌های آن به دلیل گسترش فعالیت‌های انسانی به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. این گونه در سراسر محدوده پراکنش خود با تهدیدات متعددی مواجه بوده و تغییرات اقلیمی می‌تواند این شرایط را تشدید کند. پیش‌بینی‌ها حاکی از آن هستند که تغییرات اقلیمی باعث کاهش مطلوبیت زیستگاه کفتار راه‌راه خواهد شد (ابراهیمی و همکاران، ۲۰۲۱؛ بانداری و همکاران، ۲۰۲۲). از این‌رو، مدل‌سازی پراکنش زیستگاه و ارزیابی میزان تأثیر این تغییرات بر گستره جغرافیایی گونه، نقش مهمی در تدوین راه‌کارهای حفاظتی و کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم ایفا می‌کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر پراکنش جغرافیایی این گونه و شناسایی مناطق حساس و آسیب‌پذیر به‌منظور مدیریت کارآمدتر زیستگاه‌های آن در استان فارس انجام شده است.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

استان فارس در جنوب شرقی ایران واقع شده و مساحتی بالغ بر ۱۲۲ هزار کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد. این استان بین ۲۷ درجه و ۲ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۴۲ دقیقه



شکل ۱. نقشه محدوده مورد مطالعه در ایران به‌همراه نقاط حضور گونه

داده‌های محیطی

در این مطالعه، مدل‌سازی برای دوره زمانی حال حاضر (۱۹۷۰-۲۰۰۰ میلادی) و آینده (سال ۲۰۷۰) انجام شد. براساس بوم‌شناسی گونه کفتار راه‌راه و منابع علمی مانند مروتی و همکاران (۱۳۹۹) و رضایی و همکاران (۱۳۹۶)، متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر این گونه انتخاب شدند. داده‌های محیطی مورد استفاده در این پژوهش به‌طور کلی شامل سه دسته اصلی متغیرهای اقلیمی، توپوگرافی و اختلالات انسانی بود. داده‌های اقلیمی شامل ۱۹ متغیر زیست‌اقلیمی مشتق شده از بارش و دمای ماهیانه (Bio1-Bio19) با دقت ۳۰ ثانیه (تقریباً معادل یک کیلومتر مربع) از پایگاه اطلاعاتی WorldClim (www.worldclim.org) دریافت شد. با استفاده از نقشه مدل رقمی ارتفاع (DEM) در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه درصد شیب و شاخص زبری^۱ تولید و به‌همراه ارتفاع به‌عنوان متغیرهای توپوگرافی مورد استفاده قرار گرفتند.

همچنین، متغیرهای مربوط به اختلالات انسانی شامل فاصله از جاده، فاصله از اراضی مسکونی، فاصله از مناطق حفاظت‌شده و لایه کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفتند. نقشه‌های اختلالات انسانی نیز شامل نقشه کاربری اراضی و فاصله‌های اقلیدوسی از مناطق مسکونی، جاده و مناطق حفاظت‌شده موجود در محدوده مورد مطالعه با کمک نرم‌افزار GIS با دستور Euclidean Distance با فرمت مناسب تولید و در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی لایه‌های محیطی از نظر سیستم مختصات جغرافیایی، ابعاد و دقت مکانی در نرم‌افزار ArcGIS10.3 و با استفاده از ابزار Extract by Mask یکسان‌سازی شدند. در ادامه برای بررسی همبستگی و هم‌خطی بین متغیرهای محیطی روش پیرسون استفاده شد و متغیرهای با همبستگی کم‌تر از ۰/۸ انتخاب شدند. در نهایت، پس از حذف لایه‌های دارای همبستگی بالا، تعداد ۱۳ متغیر جهت مدل‌سازی به کار گرفته شد (جدول ۱).

مدل‌سازی

به‌منظور پیش‌بینی پراکنش زیستگاه‌های مطلوب کفتار از مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)^۲ (فلیپس و همکاران، ۲۰۰۶) استفاده شد که یکی از روش‌های پرکاربرد در مدل‌سازی توزیع گونه‌ها است. در این مدل، نقاط حضور گونه کفتار به‌عنوان متغیر وابسته و

لایه‌های محیطی نیز به‌عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. ۸۰ درصد نقاط حضور گونه به‌عنوان داده‌های تعلیمی و ۲۰ درصد باقیمانده جهت ارزیابی پیش‌بینی مدل‌ها استفاده شدند. برای اجرای مدل، از ۱۰۰۰۰ نقطه به‌عنوان پس‌زمینه و حداکثر ۱۵ تکرار استفاده شد. در پژوهش حاضر از شاخص مساحت زیر منحنی ROC^۳ (AUC) برای بررسی اعتبار نتایج مدل‌سازی استفاده شد که این روش یکی از رایج‌ترین روش‌های ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی است (فرانکلین، ۲۰۰۹). اگر مقدار AUC کم‌تر از ۰/۷ باشد، نشان‌دهنده توانایی ضعیف مدل در پیش‌بینی است. مقادیر بین ۰/۷ تا ۰/۸ بیانگر پیش‌بینی قابل قبول، مقادیر بین ۰/۸ تا ۰/۹ نشان‌دهنده پیش‌بینی خوب و مقادیر بالاتر از ۰/۹ نشان‌دهنده توانایی پیش‌بینی عالی مدل است (اسکیلدن و همکاران، ۲۰۰۳).

در این پژوهش، برای پیش‌بینی پیامدهای تغییر اقلیم بر توزیع کفتار راه‌راه در سال ۲۰۷۰، از مدل گردش عمومی MRI-ESM2-0 (یوکیومتو و همکاران، ۲۰۱۹) استفاده شد. این مدل براساس بررسی‌های انجام شده (عباسیان، مقیمی و ابریشمچی، ۲۰۱۹)، تطابق بالایی با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی ایران دارد و از دقت مناسبی در شبیه‌سازی الگوهای اقلیمی منطقه برخوردار است. به همین دلیل، این مدل برای ارزیابی تغییرات زیستگاهی گونه تحت دو سناریوی اقلیمی آینده SSP245 و SSP585 انتخاب شد. این سناریوها به‌ترتیب بیانگر تغییرات متوسط و شدید اقلیمی هستند و امکان بررسی تأثیرات احتمالی تغییر اقلیم بر پراکنش زیستگاه‌های مطلوب کفتار راه‌راه را فراهم می‌کنند.

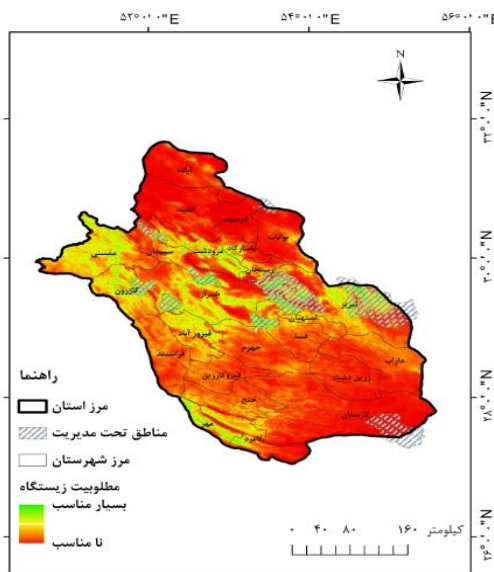
یافته‌های پژوهش

معیار AUC برای مدل مکسنت برابر با حدود ۰/۸۷ محاسبه شد و بنابراین در طبقه خوب قرار می‌گیرد (شکل ۲). براساس نتایج حاصل از مدل حداکثر آنتروپی، در حدود ۱۹/۱ درصد (۲۳۴۵۸/۵۶ کیلومتر مربع) از گستره استان فارس می‌تواند به‌عنوان رویشگاه مطلوب کفتار راه‌راه در نظر گرفته شود (شکل ۳). این مناطق بیش‌تر محدوده مرکزی و غرب استان را تشکیل می‌دهند که طبق نقشه مطلوبیت زیستگاه، عمدتاً لکه‌های زیستگاهی بزرگ و نسبتاً یکپارچه در گستره زیستگاهی شهرستان‌های پاسارگاد، مرودشت، ارسنجان، شیراز، کازرون، ممسنی، نیریز، استهبان،

1. Topographic roughness

2. MaxEnt

3. Area Under the Curve



شکل ۳. زیستگاه‌های مطلوب حال حاضر کفتار راه‌راه در استان فارس حاصل از مدل حداکثر آنتروپی

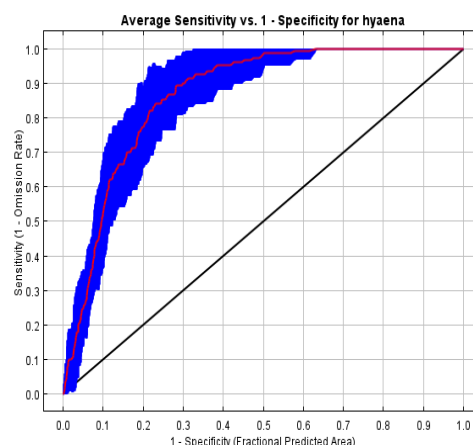
در این مطالعه، نقشه‌های مطلوبیت زیستگاه کفتار راه‌راه در استان با توجه به سناریوهای SSP245 و SSP585 برای سال ۲۰۷۰ مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۴). براساس سناریوی SSP245، در سال ۲۰۷۰ پیش‌بینی می‌شود که ۱۴/۲۷ درصد از مساحت زیستگاه‌های مطلوب کفتار راه‌راه (معادل ۳۳۴۸/۲۱ کیلومتر مربع) کاهش یابد و ۹/۹۸ درصد (معادل ۲۳۴۲/۳۱ کیلومتر مربع) به مساحت آن افزوده شود. این تغییرات منجر به کاهش خالص ۴/۲۹ درصدی در مساحت زیستگاه‌های مطلوب در استان خواهد شد (جدول ۲).

در سناریوی SSP585، کاهش بیش‌تری در زیستگاه‌های مطلوب پیش‌بینی می‌شود. براساس این سناریو، ۱۵/۵۶ درصد از زیستگاه‌های مطلوب (۳۶۵۱/۶۳ کیلومتر مربع) کاهش و ۵/۶۵ درصد (۱۳۲۵/۸۸ کیلومتر مربع) افزایش خواهد داشت که به‌طور کلی به کاهش ۹/۹۱ درصدی زیستگاه‌های مطلوب در استان منجر می‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که سناریوی SSP585 اثرات شدیدتری بر زیستگاه کفتار راه‌راه در آینده خواهد داشت (جدول ۲).

در بررسی مناطق حفاظت‌شده استان، تغییرات قابل‌توجهی در زیستگاه‌های مطلوب کفتار راه‌راه مشاهده می‌شود. براساس سناریوی SSP245، پیش‌بینی می‌شود که ۸/۷۷ درصد از مساحت این زیستگاه‌ها (معادل ۴۳۸/۹۴ کیلومتر مربع) کاهش یابد و ۲/۵۴ درصد (معادل ۱۲۷/۲۴ کیلومتر مربع) به مساحت آن‌ها افزوده شود، که در نهایت به کاهش ۶/۲۳ درصدی کل زیستگاه‌های مطلوب در مناطق حفاظت‌شده استان منجر خواهد شد. در سناریوی SSP585 نیز،

فیروزآباد و هم‌چنین مهر و لامرد مشاهده می‌شوند. از کل مساحت زیستگاه‌های مطلوب کفتار راه‌راه در حدود ۲۱/۳۳ درصد (۵۰۰۵/۳۷ کیلومتر مربع) با مناطق چهارگانه تحت مدیریت حفاظت محیط زیست هم‌پوشی دارد (شکل ۳).

سهم نسبی (اهمیت) هر کدام از متغیرهای به‌کار رفته در مدل جهت پیش‌بینی مناطق مطلوب برای حضور کفتار راه‌راه در جدول (۱) آورده شده است. نتایج نشان داد که به‌ترتیب، دامنه سالانه دما، فاصله تا مناطق حفاظت‌شده، تغییرات فصلی بارندگی و کاربری اراضی بیش‌ترین سهم (در مجموع در حدود ۷۳/۴ درصد) را در تعیین مطلوبیت زیستگاه کفتار راه‌راه داشتند (جدول ۱). احتمال حضور کفتار راه‌راه در دامنه سالانه دمای ۳۵ تا ۳۸/۵ درجه سانتی‌گراد و تغییرات فصلی بارندگی ۹۰ تا ۱۱۰ میلی‌متر برآورد شد.



شکل ۲. منحنی ROC محاسبه‌شده توسط مدل حداکثر آنتروپی برای گونه کفتار راه‌راه

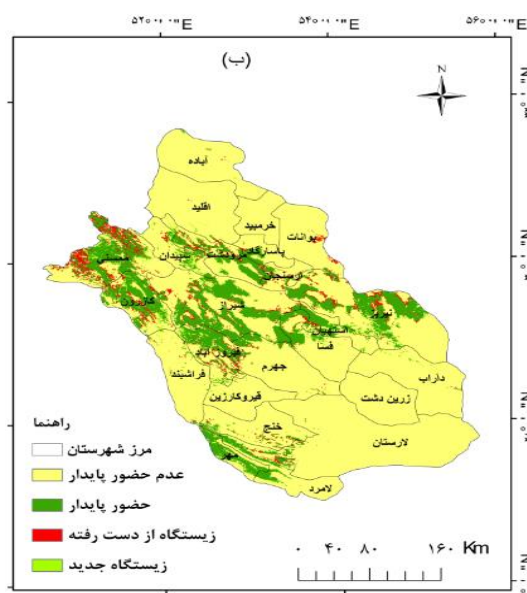
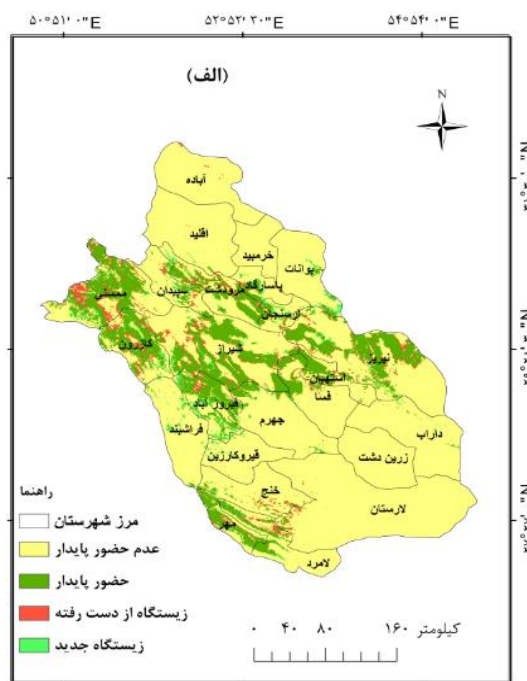
جدول ۱. متغیرهای مورد استفاده در مدل‌سازی پراکنش کفتار و اهمیت

نسبی آن‌ها براساس مدل مکسنت	متغیرهای محیطی	اهمیت نسبی
۲۸/۱	Bio7: دامنه سالانه دما (BIO5-BIO6)	
۲۳	فاصله تا مناطق حفاظت‌شده	
۱۲/۹	Bio15: تغییرات فصلی بارندگی (ضریب تغییرات)	
۹/۴	کاربری اراضی	
۸/۶	درصد شیب	
۷/۱	فاصله تا مناطق مسکونی	
۳	Bio18: مجموع بارندگی گرم‌ترین فصل سال	
۲/۹	شاخص زیری زمین	
۱/۸	Bio9: میانگین دمای خشک‌ترین فصل سال	
۱/۶	فاصله تا جاده	
۱	Bio1: میانگین دمای سالیانه	
۰/۵	Bio3: شاخص هم‌دمایی x100 (BIO2/BIO7)	
۰/۲	Bio12: مجموع بارندگی سالانه	

کاهش ۹/۸۹ درصدی مساحت زیستگاه‌های مطلوب (۴۹۵/۴۱) پیش‌بینی می‌شود، که در مجموع منجر به کاهش ۸/۱۲ درصدی (کیلومتر مربع) و افزایش ۱/۷۷ درصدی (۸۸/۸۴ کیلومتر مربع)

جدول ۲. تغییر در وسعت زیستگاه‌های مطلوب (کیلومتر مربع) کفتار راه‌راه تا سال ۲۰۷۰ تحت سناریوهای اقلیمی مختلف

سناریو	حضور پایدار	عدم حضور پایدار	رویشگاه از دست رفته		رویشگاه جدید		تغییرات خالص در رویشگاه
			درصد	مساحت	درصد	مساحت	
سناریو SSP245	۲۰۱۱۰/۳۵	۹۶۹۷۸/۴۴	۱۴/۲۷	۳۳۴۸/۲۱	۹/۹۸	۲۳۴۲/۳۱	-۴/۲۹
سناریو SSP585	۱۹۸۰۶/۹۳	۹۷۹۹۴/۸۸	۱۵/۵۶	۳۶۵۱/۶۳	۵/۶۵	۱۳۲۵/۸۸	-۹/۹۱



شکل ۴. نقشه‌های مطلوبیت زیستگاه کفتار راه‌راه براساس سناریوهای (الف) SSP245 و (ب) SSP585 و مدل گردش عمومی MRI-ESM2-0 برای سال ۲۰۷۰ در استان فارس

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر، تأثیرات گسترده‌ای بر گونه‌ها و اکوسیستم‌های طبیعی دارد. کفتار راه‌راه، به‌عنوان یکی از گونه‌های پستاندار در معرض تهدید، نیز از این تغییرات مصون نخواهد ماند. مدل‌سازی زیستگاه این گونه تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم می‌تواند به درک بهتر تأثیرات آینده تغییرات اقلیمی بر پراکنش جغرافیایی آن کمک کند (جتز و همکاران، ۲۰۰۷) و مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریتی در سطوح مختلف زیست‌محیطی فراهم نماید (مروتی و همکاران، ۱۳۹۹). در این پژوهش، به بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر زیستگاه کفتار راه‌راه در استان فارس پرداخته شد و با استفاده از سناریوهای SSP245 و SSP585 تا سال ۲۰۷۰، نتایج قابل‌توجهی در خصوص کاهش مساحت زیستگاه‌های مطلوب به‌دست آمد.

براساس نتایج مدل‌سازی، مناطق مرکزی، غربی و جنوب غربی استان فارس در شرایط کنونی زیستگاه‌های مطلوبی برای کفتار راه‌راه محسوب می‌شوند. در این میان، دامنه دمای سالانه (BIO7) به‌عنوان مهم‌ترین متغیر زیست‌محیطی تأثیرگذار بر توزیع این گونه شناسایی شد. این یافته نشان می‌دهد که عوامل حرارتی نقشی کلیدی در زیستگاه این گونه دارند و تغییرات دمایی ناشی از تغییر اقلیم می‌تواند به‌طور جدی بر پراکنش آن تأثیر بگذارد. کاهش کیفیت و مساحت زیستگاه‌ها در سناریوهای تغییر اقلیم نشان‌دهنده آن است که این گونه در آینده با چالش‌های جدی در تأمین زیستگاه مناسب مواجه خواهد بود. ابراهیمی و همکاران، (۲۰۲۱) نیز در مطالعه خود، متغیرهای اقلیمی دما و بارش را به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای مؤثر در توزیع گونه‌ای کفتار راه‌راه معرفی نمودند. هم‌چنین ایشان عنوان نمودند که مناطق مرکزی و غربی کشور دارای مطلوب بالایی جهت گونه کفتار راه‌راه است.

متغیر فاصله از مناطق حفاظت‌شده نیز به‌عنوان دومین عامل بر توزیع کفتار تعیین شد. اهمیت متغیر فاصله از مناطق حفاظت‌شده در مطلوبیت زیستگاه کفتار راه‌راه به‌دلیل نقش این مناطق در کاهش تداخلات انسانی، تأمین منابع غذایی و حفاظت از زیستگاه‌های طبیعی است. مناطق حفاظت‌شده با محدودکردن فعالیت‌های انسانی، امنیت بیش‌تری برای گونه‌های جانوری ایجاد می‌کنند و به حفظ زیستگاه‌های با کیفیت کمک می‌نمایند، بنابراین نزدیکی به این مناطق تأثیر مثبتی بر مطلوبیت زیستگاه کفتار دارد. همراه با مطالعه حاضر، در پژوهش کیلیا (۲۰۲۰) نیز متغیر فاصله از مناطق

حفاظت‌شده به‌عنوان مهم‌ترین متغیر جهت مطلوبیت زیستگاه کفتار قهوه‌ای (*Brown Hyaena*) تعیین شد.

نتایج سناریوهای تغییر اقلیم نشان داد که هر دو سناریوی SSP245 و SSP585 کاهش مساحت زیستگاه‌های کفتار راه‌راه تا سال ۲۰۷۰ را پیش‌بینی می‌کنند، اما تأثیرات سناریوی SSP585 به مراتب شدیدتر است. این یافته با پیش‌بینی‌های جهانی مبنی بر شدت بیش‌تر تغییرات اقلیمی تحت این سناریو مطابقت دارد. کاهش بیش از دو برابری مساحت زیستگاه‌های مطلوب در سناریوی SSP585 نسبت به SSP245، بیانگر آن است که شدت تغییرات اقلیمی می‌تواند تهدیدی جدی برای بقای گونه‌های پستاندار در این منطقه باشد. لازم به ذکر است با توجه به این که در مدل‌سازی آینده، متغیرهای غیر اقلیمی به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده‌اند، لازم است در تحلیل نتایج، این محدودیت مدنظر قرار گیرد. در واقع، تغییرات در کاربری اراضی، توسعه انسانی، و سایر مداخلات اکولوژیکی می‌توانند به‌طور مستقل یا در تعامل با تغییرات اقلیمی، بر پراکنش گونه اثر بگذارند. ازاین‌رو، ترکیب رویکردهای مدل‌سازی اقلیمی با ارزیابی سناریوهای کاربری اراضی و مدیریت زیستگاه می‌تواند در تحقیقات آینده مفید باشد.

هم‌چنین، این پژوهش نشان داد که مناطق حفاظت‌شده استان فارس، که در حال حاضر زیستگاه‌های مهمی برای کفتار راه‌راه هستند، نیز تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار خواهند گرفت. پیش‌بینی می‌شود که در هر دو سناریوی اقلیمی، مساحت مطلوب زیستگاه‌های حفاظت‌شده برای این گونه به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد. کاهش مساحت زیستگاه در این مطالعه برای گونه مذکور با پژوهش ابراهیمی و همکاران (۲۰۲۱) که به بررسی پویایی پراکنش پستانداران در معرض تهدید در مناطق حفاظت‌شده تحت تغییرات اقلیمی پرداختند، هم‌راستا می‌باشد. در مطالعه ایشان که هم‌زمان بر روی تعدادی از پستانداران مناطق حفاظت‌شده کشور از جمله کفتار راه‌راه تحت سناریوهای اقلیمی آینده انجام گرفته، مشخص شد که این گونه در آینده با کاهش مساحت مطلوبیت در مناطق حفاظت‌شده مواجه خواهد گشت و به عبارتی تغییرات اقلیمی بر پستانداران در معرض تهدید ایران تأثیر منفی خواهد گذاشت. این مسأله نشان می‌دهد که تنها ایجاد مناطق حفاظت‌شده کافی نیست و لازم است برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی تطبیق‌پذیری بیش‌تری با تغییرات اقلیمی آینده داشته باشند. ارتقای سطح حفاظتی و افزایش تعداد و وسعت مناطق

حفاظت از گونه‌های در معرض تهدید مانند کفتار راه‌راه، لازم است برنامه‌های جامع حفاظتی که به مدیریت تطبیقی و بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی توجه دارند، در دستور کار قرار گیرد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

References

- Abbasian, M., Moghim, S., & Abrishamchi, A. (2019). Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135, 1465-1483.
- Ahmadzadeh, F., Ebrahimi, E., & Naimi, B. (2017). Species distribution potential of striped hyaena (*Hyaena hyaena*) in response to climate change in Iran. *Environmental Sciences*, 15(4), 215-232. (in Persian)
- Anderson, M. G., & Ferree, C. E. (2010). Conserving the stage: climate change and the geophysical underpinnings of species diversity. *PloSone*, 5(7), e11554.
- Araújo, M. B., & Guisan, A. (2006). Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of biogeography*, 33(10), 1677-1688.
- Ashrafzadeh, M. R., Naghipour, A. A., Haidarian, M., & Mirzaei, R. (2020). Modeling the effects of climate change on the geographic distribution of the wild sheep in Lorestan Province, Iran. *Journal of Animal Environment*, 12(3), 59-68. (in Persian)
- Bhandari, S., Adhikari, B., Baral, K., Panthi, S., Kunwar, R. M., Thapamagar, T., Szydlowski, M., Psaralexi, M., Bhusal, D. R., & Youlatos, D. (2022). Climate change threatens striped hyena (*Hyaena hyaena*) distribution in Nepal. *Mammal Research*, 67(4), 433-443.
- Ebrahimi, E., Sayahnia, R., Ranjbaran, Y., Vaissi, S., & Ahmadzadeh, F. (2021). Dynamics of threatened mammalian distribution in Iran's protected areas under climate change. *Mammalian Biology*, 101(6), 759-774.
- Eskildsen, A., le Roux, P. C., Heikkinen, R. K., Høye, T. T., Kissling, W. D., Pöyry, J., ... & Luoto, M. (2013). Testing species distribution models across space and time: high latitude butterflies and recent warming. *Global Ecology and Biogeography*, 22(12), 1293-1303.
- Faghih Sabzevari, N., & Farashi, A. (2024). Modeling the suitability of Caracal habitat (Caracal caracal, Schreber, 1776) using MaxEnt model in the future climate of Iran. *Journal of Geography and Planning*, 28(87), 370-348. (in Persian)
- Franklin, J. (2009). Mapping species distributions: spatial inference and prediction. Cambridge University Press. 340 pages.
- Gottfried, M., Pauli, H., Reiter, K., & Grabherr, G. (2019). Potential effects of climate change on alpine and nival plants in the Alps. In *Mountain biodiversity* (pp. 213-223). Routledge.
- Hannah, L., Midgley, G. F., Lovejoy, T., Bond, W. J., Bush, M. L. J. C., Lovett, J. C., ... & Woodward, F. I. (2002). Conservation of biodiversity in a changing climate. *Conservation Biology*, 16(1), 264-268.
- Hilbert, D. W., Hughes, L., Johnson, J., Lough, J. M., Low, T., Pearson, R. G., ... & Whittaker, S. (2007). Biodiversity conservation research in a changing climate: workshop report: research needs and information gaps for the implementation of the key objectives of the National Biodiversity and Climate Change Action Plan.
- Jetz, W., Wilcove, D. S., & Dobson, A. P. (2007). Projected impacts of climate and land-use change on the global diversity of birds. *PLoS biology*, 5(6), e157.
- Killea, A. (2020). Brown Hyena (*Hyaena brunnea*) Distribution: Nuances in Modeling a Generalist Species (Doctoral dissertation, Master's thesis, Duke University).
- Levinsky, I., Skov, F., Svenning, J. C., & Rahbek, C. (2007). Potential impacts of climate change on the distributions and diversity patterns of European mammals. *Biodiversity and Conservation*, 16, 3803-3816.
- Mansouri Daneshvar, M. R., Ebrahimi, M., & Nejadsoleymani, H. (2019). An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *Environmental Systems Research*, 8(1), 1-10. (in Persian)
- McCarl, B. A. (2007). Adaptation options for agriculture, forestry and fisheries. A Report to the UNFCCC Secretariat Financial and Technical Support Division. In United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Mills, M. G. (1998). *Hyaenas: status survey and conservation action plan* (Vol. 41). World Conservation Union.
- Morovati, M., Ebrahimi, M., & Bahadori Amjas, F. (2020). Evaluation of *Hyaena hyaena* habitat suitability using Maximum Entropy Method (Study Area: Bagh Shadi Protected Area in Yazd province), *Journal of Animal Environment*, 12(4), 1-8. (in Persian)
- Mukherjee, T., Chongder, I., Ghosh, S., Dutta, A., Singh, A., Dutta, R., ... & Chandra, K. (2021). Indian Grey Wolf and Striped Hyaena sharing from the same bowl: high niche overlap between top predators in a human-dominated landscape. *Global Ecology and Conservation*, 28, e01682.

حفاظت شده می‌تواند راه‌کاری برای کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر گونه‌های در معرض تهدید همچون کفتار راه‌راه باشد. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که تغییر اقلیم به‌طور کلی بر پستانداران بزرگ‌جثه و در رأس هرم غذایی، تأثیر منفی می‌گذارد (یوسفی و همکاران، ۲۰۱۹) و کاهش زیستگاه‌های مطلوب آن‌ها می‌تواند زنجیره غذایی و اکولوژیکی اکوسیستم‌ها را به خطر بیندازد. بنابراین، در مواجهه با تغییرات اقلیمی و برای

- Nunez, S., Arets, E., Alkemade, R., Verwer, C., & Leemans, R. (2019). Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2°C enough?. *Climatic Change*, 154, 351-365.
- Rehfeldt, G. E., Crookston, N. L., Sáenz-Romero, C., & Campbell, E. M. (2012). North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: A solution to large classification problems. *Ecological Applications*, 22(1), 119-141.
- Rezaei, S., Naderi, S., & Karami, P. (2017). The ecological study of Striped hyena (*Hyaena hyaena*) denning regions in Haftadgholeh protected area using Maximum Entropy method. *Journal of Natural Environment*, 70(2), 351-362. (in persian)
- Pakniat, D., Hemami, M. R., Maleki, S., Tohidi, M., & Julaie, L. (2016). Habitat suitability modeling for wintering populations of Asian Houbara (*Chlamydotis macqueenii*) in Fars Province. *Journal of Animal Environment*, 8(3), 19-28. (in Persian)
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Williams, S. E., Bolitho, E. E., & Fox, S. (2003). Climate change in Australian tropical rainforests: an impending environmental catastrophe. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 270(1527), 1887-1892.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., & Yabu, S. (2019). The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2. 0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 97(5), 931-965.
- Yusefi, G. H., Faizolahi, K., Darvish, J., Safi, K., & Brito, J. C. (2019). The species diversity, distribution, and conservation status of the terrestrial mammals of Iran. *Journal of Mammalogy*, 100(1), 55-71.
- Ziaie, H. (1996). A field guide to the mammals of Iran. Department of the Environment. 290p.