

Species Distribution Modeling of the Pallas's Cat (*Otocolobus manul*) in Iran Using the Maximum Entropy Algorithm

Seyedeh Bahare Hosseini¹ , Elham Yousefi² , Ali Haghani³ , HamidReza Rezaei⁴ 

1. Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand. Iran. E-mail: bahare_hosseini@birjand.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Environment, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand. Iran. E-mail: e_yusefi_31@birjand.ac.ir
3. Department of Environment, Faculty of Fisheries and Environment, Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: alihaghani94@gmail.com
4. Department of Wildlife Management, Faculty of Fisheries and Environment, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: rezaei@gau.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 20 July 2025
Received in revised form: 9 September 2025
Accepted: 12 September 2025
Available online: 21 September 2025

Keywords:

Habitat modeling,
Iran,
Machine learning,
MaxEnt algorithm,
Pallas's cat.

ABSTRACT

Objective: The objective of this study was to model the habitat of the Pallas's cat (*Otocolobus manul*) in Iran and to identify the key environmental and climatic variables influencing its spatial distribution, with the aim of providing scientific strategies for the conservation of this species.

Method: The Maximum Entropy (MaxEnt) algorithm, recognized as a machine learning method with high predictive capacity, was applied in this research. Species occurrence records were obtained from the Department of Environment of Iran, which encompassed the data collected by rangers, specialists, environmental volunteers, and library sources, resulting in a total of 175 occurrence points across the country. The environmental dataset consisted of 18 variables, including climatic, topographic, and land-use factors, which were extracted and prepared from global databases and cartographic maps provided by the National Cartographic Center of Iran. Habitat modeling was performed in MaxEnt using cross-validation procedures, and the predictive accuracy of the model was assessed based on the area under the curve (AUC) criterion.

Results: According to the results, the AUC value of the model was 0.93, representing a very good predictive performance. Distance from the prey (pika) contributed the most (19.5%) to the habitat suitability for the Pallas's cat, followed by elevation (18.2%), terrain ruggedness (14.4 %), and mean annual temperature (14.2%). The habitat suitability maps revealed that although the distribution range of the Pallas's cat in Iran covers a relatively broad geographic extent, it occurred in a patchy pattern within mountainous habitats and areas of moderate to high elevation. The response of the curve analysis demonstrated an increase in the probability of Pallas's cat occurrence with decreasing distance from the prey (pika) and reaches its maximum in higher elevations and more rugged terrains. Moreover, the species exhibited a preference for areas with moderate mean annual temperatures. These patterns highlighted the combined significance of topographic and climatic variables as key determinants of the species' spatial distribution.

Conclusions: According to the findings, the presence of the prey (pika) was a key factor in explaining the distribution pattern of the Pallas's cat, highlighting the species' trophic dependence on this prey. In addition, elevation and terrain ruggedness were recognized as the most influential topographic variables, playing a decisive role in the species' habitat selection. Considering the specific habitat preferences of the Pallas's cat and its patchy distribution across Iran, conservation of primary prey populations, particularly pika and hare, along with the establishment and expansion of protected areas in regions identified as highly suitable habitats should be regarded as priority measures in conservation programs for this species.

Cite this article: Hosseini, S. B., Yousefi, E., Haghani, A. and Rezaei, H. R. (2025). Species Distribution Modeling of the Pallas's Cat (*Otocolobus manul*) in Iran Using the Maximum Entropy Algorithm. Journal of Environmental Studies, 51 (2), 255- 271. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.398248.1008617>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.398248.1008617>

Introduction

Pallas's cat (*Otocolobus manul*) is a small felid species distributed across Central Asia, characterized by its highly specialized habitat requirements and fragmented distribution patterns. Despite the wide geographical distribution, this species is classified as Near Threatened on the IUCN Red List due to ongoing threats such as habitat degradation, prey decline, and climate change. In Iran, Pallas's cat inhabits high-elevation steppes, rocky plateaus, and semi-arid mountainous regions, yet there is a lack of comprehensive studies exploring its habitat preferences and distribution at the national scale.

Historically, research on Pallas's cat has focused primarily on its behavioral ecology and dietary composition at local scales, while regional assessments integrating environmental variables to predict its distribution remain limited. Recent advances in species distribution modeling, particularly machine learning-based approaches such as Maximum Entropy (MaxEnt), have enabled ecologists to predict potential habitats even with presence-only data, thereby providing invaluable information for conservation planning.

The present study aimed to model the potential distribution of Pallas's cat across Iran using the MaxEnt algorithm to identify key environmental determinants shaping its habitat suitability, with two main aims: creating a map showing where Pallas's cat can live in different ecological areas of Iran and finding out how much factors like climate, land shape, and land use affected its presence points.

A review of the existing literature indicated that Pallas's cat was a habitat specialist that primarily preys upon pika species (*Ochotona* spp.) and inhabited rugged terrains with minimal human disturbance. For instance, studies in Mongolia and Tibet had demonstrated the strong trophic dependency of Pallas's cat on pika populations and a preference for high-elevation rocky habitats with sparse vegetation cover. However, in Iran, such ecological insights remain fragmented and geographically limited, highlighting a significant knowledge gap that constrains effective national-scale conservation planning.

The target audience of this study included wildlife ecologists, conservation planners, environmental policymakers, and researchers focusing on carnivore ecology and habitat modeling. This research was built upon the ecological theory of niche modeling, employing an explanatory design to identify environmental determinants of habitat suitability, and aimed to develop an understanding that informs practical conservation interventions.

To achieve these goals, this study applied a quantitative method with the Maximum Entropy model, which works well with data showing only where species are present and is known for its accuracy in predicting where species can be found, even when dealing with complicated environmental information. The rationale for using MaxEnt lay in its proven effectiveness in similar studies on rare and elusive species where absence data were unavailable or unreliable.

Overall, this study aimed to address a significant lack of information about where Pallas's cat habitat in Iran was, helping to guide conservation efforts, manage habitats, and support future research on this mysterious cat species.

Method

This study aimed to model the habitat suitability of Pallas's cat (*Otocolobus manul*) in Iran using the Maximum Entropy (MaxEnt) algorithm, a machine learning-based approach. A total of 175 presence records were compiled from the Atlas of Iranian Mammals and validated field reports by experts and rangers. Environmental variables included 18 predictors categorized into three main groups: climatic variables, such as annual mean temperature and seasonal precipitation (obtained from the WorldClim database with a spatial resolution of 905 meters); topographic variables, including elevation, slope, and surface roughness; and finally, land use and anthropogenic factors, such as distance to roads, cities, villages, agricultural lands, and main prey species (pika and European hare). Data processing was conducted in ArcMap 10.8.2, involving clipping layers to Iran's boundaries, removing highly correlated variables, and calculating Euclidean.

Results

The MaxEnt modeling of Pallas's cat (*Otocolobus manul*) distribution in Iran demonstrated high predictive performance, with an AUC value of 0.93, indicating excellent model accuracy. The response curves showed that habitat suitability increased in areas with proximity to pika populations, moderate annual temperatures,

higher elevations, and greater surface roughness. Analysis of variable contributions revealed that distance to pika (the prey) had the highest contribution to habitat suitability (19.5%), followed by elevation (18.2%), surface roughness (14.4%), and annual mean temperature (14.2%). Other variables such as distance to forests, seasonal temperature, and NDVI also showed minor influences. The habitat suitability map showed a fragmented distribution pattern for Pallas's cat across Iran, with highly suitable habitats concentrated mainly in mountainous regions and semi-arid steppes. These areas had high altitudes, rough landscapes, and were close to pika populations, indicating that Pallas's cat relied heavily on its prey and preferred complex habitats. Overall, these results indicated that the distribution of Pallas's cat in Iran was strongly influenced by prey availability and topographic features, emphasizing its ecological specialization and potential vulnerability to habitat degradation and prey population declines.

Conclusions

This study revealed that the distribution of Pallas's cat (*Otocolobus manul*) in Iran is primarily driven by the presence of pika prey, which had the highest contribution to the habitat suitability model. This finding aligns with previous studies across the species' range, highlighting its strong trophic dependency on pika populations. Research in Mongolia, Tibet, and Nepal has consistently shown that Pallas's cat predominantly preys on pika, often relying almost exclusively on this prey species, and uses abandoned marmot or fox burrows for shelter, further emphasizing its ecological specialization.

In addition to prey availability, elevation, surface roughness, and annual mean temperature were identified as key determinants of habitat suitability. According to the results, this species tended to inhabit high-elevation, rugged terrains with semi-arid climates, preferring rocky steppes, mountain plateaus, and areas with sparse vegetation cover. These findings are consistent with global studies indicating that Pallas's cat typically occupies elevations ranging from 1,000 to 5,000 meters, favoring habitats that provide adequate camouflage and reduced human disturbance.

The modeling results showed a fragmented distribution pattern for Pallas's cat across Iran, reflecting its patchy habitat preferences and low population densities in remote areas. This fragmented distribution, combined with its specialized dietary and habitat requirements, renders the species highly vulnerable to various threats, including habitat degradation, climate change, and prey decline due to poisoning or overgrazing pressures.

Importantly, the study emphasized that conservation strategies must prioritize the protection of pika populations, as their decline can directly threaten the persistence of Pallas's cat. Maintaining healthy pika populations ensures food availability, while conserving structurally complex, high-elevation habitats with minimal human encroachment is critical for providing shelter and hunting grounds for this elusive felid.

Furthermore, the study highlights the need for regionally tailored conservation and management plans that consider local ecological conditions rather than relying solely on continental-scale data. Given the species' ecological vulnerability, continued monitoring, habitat restoration, and public awareness campaigns are essential to mitigate threats and support its long-term survival in Iran. Overall, these findings provide valuable ecological insights that can guide effective conservation planning, habitat management, and policy decisions to protect Pallas's cat populations across their Iranian range.

Author Contributions

Bahareh Hosseini: Modeling, manuscript writing, and analysis and interpretation of data and results.

Elham Yousefi Robiat: Thesis supervisor; oversight of the research process and critical revision of the manuscript.

Ali Haqqani: Thesis advisor; contribution to research design and supervision of the study.

Hamidreza Rezaei: Thesis advisor; contribution to research design and supervision of the study.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants of the present study.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.



University of Tehran Press

نشریه محیط شناسی

دوره ۵۱، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۴

Homepage: <http://Jes.ut.ac.ir>

شاپای چاپی: ۸۶۲۰-۱۰۲۵
شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲-۲۳۴۵

مدلسازی توزیع گونه‌ای گربه پالاس (*Otocolobus manul*) در ایران

با استفاده از الگوریتم بیشینه آنتروپی

سیده بهاره حسینی^۱، الهام یوسفی^۲، علی حقانی^۳، حمیدرضا رضایی^۴

۱. گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: bahare_hosseini@birjand.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: e_yusefi_31@birjand.ac.ir
۳. گروه محیط‌زیست، دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: alihaghani94@gmail.com
۴. گروه مدیریت حیات‌وحش، دانشکده شیلات و محیط‌زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: rezaei@gau.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	هدف: این پژوهش به منظور مدل‌سازی زیستگاه گونه گربه پالاس (<i>Otocolobus manul</i>) در ایران و شناسایی مهم‌ترین متغیرهای محیطی و اقلیمی مؤثر بر توزیع مکانی آن به‌منظور ارائه راهکارهای علمی برای حفاظت این گونه بوده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۹	روش پژوهش: برای دستیابی به هدف، از الگوریتم حداکثر آنتروپی (MaxEnt) به‌عنوان یکی از روش‌های یادگیری ماشین با توان پیش‌بینی بالا استفاده شد. در این مطالعه نقاط حضور گونه از سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران گردآوری شدند که شامل داده‌هایی است که توسط محیط‌بانان، کارشناسان، همیاران محیط‌زیست و منابع کتابخانه‌ای ثبت شدند و شامل ۱۷۵ نقطه حضور در سراسر ایران بود. متغیرهای محیطی مشتمل بر ۱۸ متغیر، شامل متغیرهای اقلیمی، توپوگرافی و کاربری اراضی، از پایگاه داده‌های جهانی و نقشه‌برداری ایران استخراج و آماده‌سازی شد. مدل‌سازی در نرم‌افزار MaxEnt با اعتبارسنجی متقابل انجام و دقت مدل بر اساس شاخص سطح زیر نمودار (AUC) ارزیابی گردید.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۱۸	یافته‌ها: نتایج نشان داد مقدار AUC مدل برابر با ۰/۹۳ بوده که بر اساس طبقه‌بندی این معیار، بیانگر عملکرد پیش‌بینی بسیار خوب مدل است. در بین متغیرهای بررسی شده، فاصله از طعمه پایکا با سهم ۱۹/۵ درصد بیشترین تأثیر را در تعیین زیستگاه مطلوب گربه پالاس داشت. پس از آن، ارتفاع از سطح دریا (۱۸/۲ درصد)، ناهمواری سطح زمین (۱۴/۴ درصد) و دمای متوسط سالانه (۱۴/۲ درصد) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده توزیع گونه شناسایی شدند. نقشه‌های مطلوبیت زیستگاه نشان داد که توزیع گربه پالاس در ایران اگرچه دامنه جغرافیایی نسبتاً وسیعی را پوشش می‌دهد، اما به صورت گسسته (لکه‌ای) در زیستگاه‌های کوهستانی و ارتفاعات متوسط تا بالا مشاهده می‌شود. تحلیل منحنی‌های پاسخ نشان دهنده افزایش احتمال حضور گربه پالاس با کاهش فاصله از طعمه پایکا بوده و در ارتفاعات بالاتر از سطح دریا و سطوح ناهموارتر بیشترین مقدار را دارد. همچنین این گونه بیشترین تمایل را به زیست در نواحی با دمای متوسط سالانه معتدل نشان داد. این الگوها بیانگر اهمیت ترکیبی متغیرهای توپوگرافی و اقلیمی به‌عنوان عوامل کلیدی در تعیین توزیع فضایی گونه هستند.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۶/۳۰	نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج پژوهش، حضور طعمه پایکا به‌عنوان عامل کلیدی در تبیین الگوی توزیع گربه پالاس شناسایی شد که نشان‌دهنده وابستگی تغذیه‌ای این گونه به این طعمه است. همچنین، ارتفاع از سطح دریا و ناهمواری سطح زمین به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای توپوگرافی، نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب زیستگاه این گونه ایفا کردند. با توجه به ترجیح زیستگاهی خاص گربه پالاس و توزیع لکه‌ای آن در ایران، حفاظت از جمعیت‌های طعمه اصلی به‌ویژه پایکا و خرگوش به همراه ایجاد و توسعه مناطق حفاظت شده در نواحی شناسایی شده با مطلوبیت بالای زیستگاهی باید به‌عنوان اقدامات اولویت‌دار در برنامه‌های حفاظتی این گونه اجرا شود.

کلیدواژه‌ها:

ایران،
گربه پالاس،
الگوریتم MaxEnt،
مدلسازی زیستگاه،
یادگیری ماشین.

استناد: حسینی، سیده بهاره؛ یوسفی، الهام؛ حقانی، علی و رضایی، حمیدرضا. (۱۴۰۴). مدلسازی توزیع گونه‌ای گربه پالاس (*Otocolobus manul*) در ایران با استفاده از

الگوریتم بیشینه آنتروپی. نشریه محیط‌شناسی، ۵۱(۲)، ۲۵۵-۲۷۱. <http://doi.org/10.22059/JES.2025.398248.1008617>

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2025.398248.1008617>

۱. مقدمه

پویایی جمعیت جانوران وحشی به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات محیطی در زیستگاه‌های آن‌ها قرار دارد (Naderi et al., 2013). در سطح جهانی، از بین رفتن و تخریب زیستگاه به‌عنوان یکی از تهدیدهای اصلی برای تنوع‌زیستی شناخته می‌شود که می‌تواند به کاهش شدید جمعیت‌ها یا حتی انقراض گونه‌ها منجر شود (Liu et al., 2023). از این‌رو، حفاظت از زیستگاه‌های طبیعی به‌طور گسترده به‌عنوان شرطی اساسی برای حفظ تنوع‌زیستی در نظر گرفته می‌شود (Leite-Banks et al., 2020).

تکه‌تکه شدن زیستگاه‌ها که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است، از جمله مهم‌ترین عوامل نوسانات جمعیت گونه‌های وحشی به شمار می‌آید و اغلب به‌عنوان عامل اصلی در بحران جهانی انقراض شناخته می‌شود. این پدیده ممکن است خطر انقراض گونه‌ها را افزایش دهد؛ چرا که توانایی جمعیت‌ها برای جابه‌جایی در پاسخ به اختلالاتی مانند تخریب زیستگاه و مزاحمت‌های انسانی را محدود می‌کند. این محدودیت‌ها به نوبه خود می‌توانند منجر به کاهش تنوع ژنتیکی شده و پایداری بلندمدت جمعیت‌ها را به خطر اندازند. بنابراین، حفظ پیوستگی زیستگاهی در جمعیت‌های حیات‌وحش، اقدامی ضروری و ابتدایی برای مقابله با تأثیرات فزاینده فعالیت‌های انسانی بر سامانه‌های طبیعی محسوب می‌شود (Zhuo et al., 2022). ارزیابی زیستگاه مناسب برای توزیع جانوران یکی از راه‌های دستیابی به اهداف حفاظت از تنوع‌زیستی است. به‌منظور آگاهی از وضعیت موجود گونه و رفع چالش‌های پدید آمده ارزیابی میزان سطح زیستگاه مطلوب گونه بسیار مهم تلقی می‌شود (Morovati et al., 2019).

مدل‌های توزیع گونه‌ها (SDMs) مدل‌هایی کمی یا تجربی هستند که داده‌های مربوط به وقوع شناخته شده یک گونه را با متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، مدل‌های آماری و الگوریتم‌های رایانه‌ای ترکیب می‌کنند (جعفری و همکاران، ۱۳۹۸). این مدل‌ها با محاسبه مقادیر هر متغیر پیش‌بینی‌کننده و بررسی تأثیر آن بر توزیع گونه موردنظر در مکان‌های ثبت شده، قادرند زیستگاه‌های مناسب را بر اساس این متغیرها شناسایی کنند (Mouafo et al., 2023). طی دو دهه گذشته روش‌های جدید تعیین زیستگاه مناسب بر پایه داده‌های حضور ابداع شده‌اند که الگوریتم بیشینه بی‌نظمی از جمله آن‌هاست. این مدل یکی از الگوریتم‌های رایج ماشینی است که در آن، کاربرد این قاعده توسط قوانین ترمودینامیک فرایندهای بوم‌شناختی حمایت می‌شود (Philips et al., 2006) این الگوریتم از جمله روش‌هایی است که با وجود تعداد کم نقاط حضور، از توان پیش‌بینی بالایی برخوردار است و به دلیل صرفه‌جویی در زمان و کاهش هزینه مطالعه، به گستردگی مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است (Yousefi et al., 2023). مدل بیشینه بی‌نظمی در مدل‌سازی وابستگی‌های غیرخطی پیچیده میان متغیرهای محیطی و اقلیمی و نواحی حضور گونه‌ها در یک فضای چندبعدی دارای انعطاف‌پذیری بالایی است و نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی دارای عملکرد بهتری در پیش‌بینی حضور گونه‌هاست (Eslamloo et al., 2022).

خانواده گربه‌سانان (Felidae)، یکی از مهم‌ترین خانواده‌های راسته گوشت‌خواران، به دلیل ویژگی‌های زیستی و بوم‌شناختی خاص خود اهمیت ویژه‌ای دارد. این خانواده شامل گونه‌هایی با قدرت شکار بالا، رفتارهای اجتماعی پیچیده و گستره توزیع وسیع است و به دلیل قرار گرفتن در بالاترین سطح زنجیره غذایی، نقش اساسی در حفظ پویایی اکوسیستم‌ها ایفا می‌کنند. خانواده گربه‌سانان در ایران شامل یوزپلنگ (*Acinonyx jubatus*)، پلنگ (*Panthera pardus*)، گربه جنگلی (*Felis chaus*)، کاراکال (*Caracal caracal*)، گربه شنی (*Felis margarita*)، گربه وحشی (*Felis silvestris*) و گربه پالاس (*Otocolobus manul*) است. خانواده گربه‌سانان به دلیل تغییرات گسترده در زیستگاه‌های طبیعی خود با تهدیدات قابل توجهی مواجه هستند. تغییر کاربری اراضی، نظیر تبدیل جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی و توسعه شهری، منجر به تخریب و تکه‌تکه شدن زیستگاه‌ها شده‌اند که قابلیت بقای گونه‌ها را کاهش می‌دهد. همچنین، شکار غیرمجاز و رقابت با دام‌های اهلی منابع غذایی را محدود کرده و این گونه‌ها را به مناطق کمتر مطلوب سوق می‌دهد (Matthews et al., 2019). گربه پالاس (*Otocolobus manul*) به‌عنوان یکی از گربه‌سانان با ترجیح زیستگاهی خاص آسیای مرکزی و غربی، در زیستگاه‌هایی با ویژگی‌های خاص اکولوژیکی زندگی می‌کند. این گونه اغلب در مناطق مرتفع، استپی، خشک و سنگلاخ یافت می‌شود و زیستگاه‌هایی مانند دشت‌های نیمه‌خشک، فلات‌های کوهستانی و دامنه‌های با پوشش گیاهی تنک را ترجیح می‌دهد (Lorestani et al., 2022). با وجود گستردگی

جغرافیایی توزیع گربه پالاس (*Otocolobus manul*) در بخش‌هایی از آسیای میانه، اطلاعات بوم‌شناختی درباره این گونه در بسیاری از مناطق، از جمله ایران، همچنان محدود و پراکنده است. مطالعات فیلوژنتیک نشان داده‌اند که جمعیت‌های مختلف گربه پالاس در کلادهای متمایز با ویژگی‌های زیستگاهی متفاوت قرار می‌گیرند؛ به‌ویژه کلاد Ferrugineus که شامل جمعیت‌های ایران نیز می‌شود، در مقایسه با سایر کلادها در زیستگاه‌های خشک‌تر و در ارتفاعات متفاوت مشاهده شده است (Lorestani, 2022). این تفاوت‌ها ضرورت ارزیابی شرایط زیستگاهی در مقیاس منطقه‌ای، به‌ویژه در ایران، را برجسته می‌سازند تا زیستگاه‌های مناسب شناسایی و راهبردهای حفاظتی هدفمند تدوین شوند. در این مطالعه، از مدل بیشینه آنتروپی (MaxEnt)^۱ به‌عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد در مدل‌سازی توزیع گونه‌ها برای پیش‌بینی زیستگاه‌های بالقوه گربه پالاس در ایران استفاده شده است. الگوریتم حداکثر آنتروپی، نوعی رویه مبتنی بر یادگیری ماشین است که به ارزیابی احتمال توزیع مقادیر حداکثر آنتروپی تحت تأثیر محدودیت‌های ناشی از متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر نحوه توزیع مکانی گونه‌ها می‌پردازد. مدل‌سازی بر اساس این رویکرد دارای مزایای قابل‌توجهی است؛ از جمله این مزایا می‌توان به توانایی پیش‌بینی بالا، هزینه اندک، صرفه‌جویی در وقت و همچنین امکان استفاده از داده‌های پیوسته و گسسته اشاره کرد (Phillips et al., 2006; Thorn et al., 2009). همچنین تعیین این که کدام یک از متغیرهای اقلیمی مهم‌ترین عامل در تبیین نحوه توزیع گونه هستند، از مهم‌ترین نقاط قوت این روش محسوب می‌شود (مروتی و همکاران، ۱۳۹۶). نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در برنامه‌ریزی حفاظتی و ارزیابی کارایی مناطق حفاظت‌شده کشور مورد استفاده قرار گیرد.

۲. پیشینه پژوهش

۲-۱. مطالعات داخلی

در سطح ملی پژوهش‌هایی پیرامون مدل‌سازی زیستگاه گربه‌سانان انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات ذیل اشاره نمود: سبزواری و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی، تأثیر تغییرات اقلیمی بر زیستگاه کاراکال در ایران طی دوره ۲۰۶۱ تا ۲۰۸۰ تحت دو سناریوی اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5 را بررسی کردند. از ۳۲ متغیر محیطی برای زمان حال و ۱۴ متغیر برای آینده استفاده گردید. نتایج نشان داد که در زمان حال، فاصله از مناطق حفاظتی، شنزارها و جنگل‌های متراکم بیشترین تأثیر را در انتخاب زیستگاه دارند، در حالی که در آینده، میانگین دمای گرم‌ترین فصل و میانگین ارتفاع از سطح دریا بیشترین تأثیر را خواهند داشت.

اشرف‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از رویکردی تلفیقی مبتنی بر هفت الگوریتم مدل‌سازی، به شناسایی زیستگاه‌های مطلوب پلنگ ایرانی در استان لرستان پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که حدود ۲۱/۸۵ درصد از سطح استان دارای شرایط مناسب برای زیست این گونه است، که متغیرهایی مانند فاصله از مناطق حفاظت‌شده، روستاها و زمین‌های کشاورزی بیشترین تأثیر را داشته‌اند. این مطالعه بر ضرورت تقویت شبکه حفاظتی و حفاظت از لکه‌های زیستگاهی خارج از مناطق تحت حفاظت تأکید دارد.

غفاری‌پور و همکاران (۱۴۰۰) به ارزیابی مطلوبیت زیستگاه گربه شنی در سیستان و بلوچستان با استفاده از روش مدل‌سازی حداکثر آنتروپی پرداختند. نتایج نشان داد پوشش گیاهی مرتعی مهم‌ترین فاکتور تأثیرگذار در انتخاب و استفاده از زیستگاه می‌باشد.

جورابلو و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای با استفاده از الگوریتم مکسنت به بررسی مطلوبیت زیستگاه یوزپلنگ آسیایی و هم‌پوشانی آن با طعمه‌خواران رقیب در پارک ملی کویر طی یک دوره ده‌ساله پرداختند. نتایج نشان داد که متغیرهایی مانند فاصله از منابع آب، پوشش سطح زمین و حضور طعمه‌خواران رقیب بیشترین تأثیر را در تعیین زیستگاه مطلوب داشته‌اند. همچنین مشخص شد که زیستگاه کاراکال بیشترین هم‌پوشانی را با زیستگاه یوز دارد، و مدیریت منابع طعمه در مناطق مطلوب می‌تواند به توسعه پایدار این زیستگاه کمک کند.

لرستانی (۱۳۹۷) با استفاده از چهار الگوریتم مدل‌سازی (Random Forest و MaxEnt، GBM، GLM) در بسته Biomod2 و ۱۱ متغیر محیطی، مطلوبیت و پیوستگی زیستگاه گربه پالاس در ایران را بررسی کرد. نتایج نشان داد Random Forest بهترین عملکرد را دارد و دمای میانگین سالانه و توزیع پایکا مهم‌ترین عوامل مؤثرند. زیستگاه‌های مطلوب عمدتاً در حاشیه شمالی البرز، بخش‌های شمالی و

مرکزی خراسان‌ها و برخی مناطق مرکزی ایران شناسایی شدند. همچنین تحلیل‌ها بیانگر اهمیت بالای کریدورهای شمال‌شرق و غرب کشور و ضعف ارتباط زیستگاهی در یزد و کرمان بود.

۲-۲. مطالعات خارجی

در سطح بین‌المللی نیز مطالعاتی پیرامون مدل‌سازی زیستگاه گربه‌سانان انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات ذیل اشاره نمود:

یانگ و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر توزیع پلنگ شمال چین (*Panthera pardus japonensis*) در منطقه ژیبولینگ^۱ در چین پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل MaxEnt و سناریوهای اقلیمی مختلف (SSP126، SSP245، SSP585) دریافتند که زیستگاه‌های با مطلوبیت بالا کاهش یافته و زیستگاه‌های متوسط و ضعیف گسترش خواهند یافت. نتایج این مطالعه بر لزوم پایش و برنامه‌ریزی حفاظتی تأکید دارد (yang et al., 2025).

گارسا و همکاران (۲۰۲۴) با تحلیل مشاهده بیش از ۳۵۰ گربه وحشی اروپایی (*Felis silvestris*) طی ۱۷ سال در شمال غرب اسپانیا، به مدل‌سازی زیستگاه این گونه با استفاده از مدل MaxEnt پرداختند. نتایج نشان داد که تنها کمتر از یک‌سوم مناطق مناسب زیستگاهی دارای حضور تأیید شده گربه وحشی هستند. ارتفاع از سطح دریا، درصد پوشش جنگلی و تراکم مسیرهای پیاده‌روی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بودند که اولی و دومی اثر مثبت و سومی اثر منفی داشت (García et al., 2024).

جایاسکارا و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی زیستگاه‌های مناسب و الگوهای هم‌زیستی سه گونه گربه‌سانان کوچک و متوسط شامل گربه‌ماهیگیر (*Prionailurus viverrinus*)، گربه جنگلی (*Felis chaus*) و گربه زنگوله‌ای (*Prionailurus rubiginosus*) در پارک ملی مادورو اوپا (سری‌لانکا) پرداختند. در این پژوهش از داده‌های حاصل از دوربین تله‌ای، مشاهدات میدانی و گزارش‌های تلفات جاده‌ای، و مدل‌سازی با الگوریتم MaxEnt استفاده گردید. نتایج نشان داد که متغیرهای اصلی مؤثر در زیستگاه این گونه‌ها شامل فاصله تا منابع آب، میانگین دمای سالانه و نوع پوشش گیاهی بودند. باوجود هم‌پوشانی زمانی در فعالیت‌های شبانه‌روزی، تفاوت‌های مکانی در استفاده از زیستگاه امکان هم‌زیستی این گونه‌ها را فراهم کرده است (Jayasekara et al., 2022).

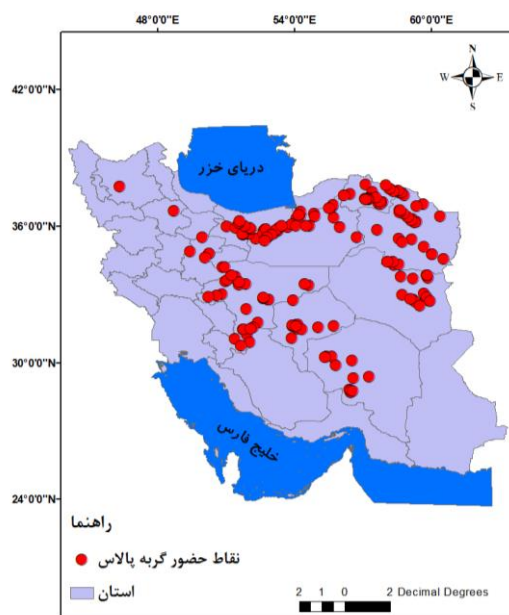
راس و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای در مغولستان مرکزی به بررسی الگوی استفاده زیستگاهی گربه پالاس پرداختند. در این تحقیق، ۱۰۱ محل استراحت متعلق به ۲۱ فرد در دوره‌های تابستان، زمستان و زادآوری ارزیابی شد. نتایج نشان داد که این گونه عمدتاً از شکاف‌های سنگی و لانه‌های مرموت سیبری (*Marmota sibirica*) بهره می‌گیرد؛ مکان‌هایی که نقش مهمی در زادآوری، پرورش توله‌ها، تنظیم دما، تأمین غذا و محافظت در برابر شکارچیان دارند. استفاده از این مکان‌ها به‌طور معناداری با زیستگاه‌های سنگی و دره‌ای مرتبط بود و در زمستان، پرهیز از نواحی دارای فعالیت انسانی مشاهده شد. همچنین بهره‌گیری از نقاط سایه‌دار در تابستان و لانه‌های عایق مرموت‌ها در زمستان نشان داد که ویژگی‌های حرارتی در انتخاب زیستگاه‌های استراحتی اهمیت بالایی دارد. پژوهشگران تأکید کردند که دسترسی به چنین زیستگاه‌های امن و مناسب، عاملی حیاتی برای بقای گربه پالاس است و کاهش جمعیت مرموت‌ها در اثر شکار می‌تواند آینده این گونه را با تهدید جدی مواجه کند (Ross et al., 2010).

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. معرفی منطقه مورد مطالعه

ایران با وسعتی حدود ۱/۶۴۸/۰۰۰ کیلومتر مربع در جنوب غرب آسیا و در عرض‌های ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول‌های ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی واقع شده است. این سرزمین عمدتاً کوهستانی و مرتفع است و میانگین ارتفاع آن بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. رشته‌کوه‌های البرز در شمال و زاگرس در غرب و جنوب غرب، بر الگوی بارش کشور تأثیر می‌گذارند؛ به‌گونه‌ای که مناطق شمالی و غربی

از اقلیم‌های نسبتاً مرطوب‌تر برخوردارند، در حالی که بخش‌های مرکزی و شرقی عمدتاً خشک و بیابانی هستند. میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۴۰ میلی‌متر است و بیشترین بارش در حاشیه دریای خزر و غرب زاگرس و کمترین در فلات مرکزی ثبت می‌شود (Rezazadeh, 2023). بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی، بیش از ۸۵ درصد مساحت کشور در محدوده خشک و نیمه‌خشک قرار دارد (Karaimi & Ghajari, 2022). این شرایط اقلیمی و توپوگرافیک، همراه با توزیع زیستگاه‌های کوهستانی و بیابانی، زمینه‌ساز زیست گونه‌هایی همچون گربه پالاس در ایران است (شکل ۱).



شکل ۱: نقشه توزیع گونه گربه پالاس در ایران (منبع: نگارندگان)

۲-۳. روش پژوهش

در این مطالعه از نرم‌افزار MaxEnt، که مبتنی بر داده‌های حضور گونه و متغیرهای محیطی تأثیرگذار در توزیع گونه‌ها است، برای تهیه مدل مطلوبیت زیستگاه گونه‌های شاخص گربه‌سانان در ایران استفاده شد. همچنین به منظور آماده‌سازی متغیرهای محیطی و اقلیمی از نرم‌افزار Arc Map 10.8.2 بهره گرفته شد.

۳-۲. نقاط حضور گونه

در این مطالعه، داده‌های مربوط به نقاط حضور از سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران گردآوری شد. این داده‌ها شامل اطلاعات ثبت شده توسط محیط‌بانان، کارشناسان، همیاران محیط‌زیست و همچنین منابع کتابخانه‌ای بودند. در مجموع، ۱۷۵ نقطه حضور برای گربه پالاس در سراسر ایران شناسایی شد (شکل ۱). به منظور کاهش خودهمبستگی مکانی^۱ و جلوگیری از تکرار داده‌ها در یک سلول رستری، از گزینه حذف سوابق حضور تکراری^۲ در نرم‌افزار MaxEnt استفاده گردید. در نهایت، فرآیند مدل‌سازی اجرا شد.

۳-۳. اطلاعات محیطی مورد استفاده

به منظور مدل‌سازی زیستگاه گونه گربه پالاس به بررسی برخی عوامل مؤثر در انتشار جغرافیایی این گونه پرداخته شد. به همین جهت از

1. Spatial Autocorrelation
2. Remove duplicate presence records

نرم‌افزار ArcMap10.8.2 برای تولید نقشه‌های متغیرهای محیطی و اقلیمی استفاده شد. بعد از مطالعه بر روی نیازهای زیستی گربه پالاس که از مقالات و کتاب‌ها به دست آمد، عوامل محیطی که در توزیع گونه گربه‌پالاس اهمیت بیشتری داشتند، مشخص شد. دلیل انتخاب این متغیرها، داشتن اثر مستقیم و غیرمستقیم بر توزیع گونه بود. متغیرهای محیط‌زیستی مورد استفاده برای مدل شامل هشت متغیر کاربری اراضی، شش متغیر اقلیمی، چهار متغیر توپوگرافی و دو متغیر مربوط به طعمه‌های گونه است (جدول ۱).

جدول ۱. متغیرهای محیط‌زیستی مورد استفاده در مدل‌سازی گونه گربه پالاس در ایران (منبع: نگارندگان)

ردیف	متغیر (واحد)	منبع	ردیف	متغیر (واحد)	منبع
۱	دمای متوسط سالانه (°C)	WorldClim	۱۱	فاصله از جاده‌ها (m)	سازمان نقشه‌برداری ایران
۲	میانگین دمای روزانه (°C)		۱۲	فاصله از زمین‌های کشاورزی (m)	
۳	دمای فصلی (°C)		۱۳	فاصله از مناطق آبی (m)	
۴	بارش فصلی (mm)		۱۴	فاصله از خطوط آبی (m)	
۵	بارش مرطوب‌ترین فصل (میلی‌متر)		۱۵	فاصله از جنگل‌ها (m)	
۶	بارش گرم‌ترین فصل (mm)		۱۶	شاخص تراکم پوشش گیاهی	NASA's MODIS(.gov)
۷	فاصله از طعمه (پایکا)	سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران	۱۷	جهت جغرافیایی	تهیه شده از مدل رقومی ارتفاع
۸	فاصله از طعمه (خرگوش اروپایی)		۱۸	ارتفاع از سطح دریا (m)	
۹	فاصله از روستا (m)	سازمان نقشه‌برداری ایران	۱۹	شیب	
۱۰	فاصله از شهرها (m)		۲۰	ناهمواری سطح زمین	

برای تهیه متغیرهای اقلیمی، از پایگاه داده WorldClim (قابل دسترس در: www.worldclim.org/current) با تفکیک مکانی حدود ۹۰۵ متر استفاده شد. این پایگاه داده بر اساس درون‌یابی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی در بازه زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۰۰۰ میلادی ایجاد شده است. در فرایند انتخاب متغیرهای اقلیمی، همبستگی میان آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت؛ بدین‌منظور، ضرایب همبستگی پیرسون به‌صورت دوتایی بین متغیرها محاسبه و ماتریس همبستگی در نرم‌افزار Idrisi Selva تحلیل گردید. در ادامه، متغیرهایی که همبستگی بالاتر از ۰/۸ با سایر متغیرها داشتند حذف شدند (سبزواری و فراشی، ۱۴۰۳). نهایتاً شش متغیر اقلیمی مشتق شده از داده‌های دما و بارش به‌عنوان متغیرهای مستقل اقلیمی در این مطالعه به کار گرفته شد.

برای متغیرهای محیطی، نقشه‌های کاربری اراضی بر اساس نقشه‌های تهیه شده توسط سازمان نقشه‌برداری کشور در سال ۱۳۹۰ و نسخه به‌روزرسانی شده آن در سال ۱۳۹۵ مورد استفاده قرار گرفت. همچنین برای استخراج متغیرهای توپوگرافی، مدل رقومی ارتفاع (DEM) از سازمان منابع طبیعی ایران دریافت شد. بر اساس DEM، لایه‌های شیب و جهت جغرافیایی تولید گردید و ناهمواری سطح زمین نیز از طریق محاسبه انحراف معیار ارتفاع استخراج شد. افزون بر متغیرهای اقلیمی و محیطی، متغیر مربوط به طعمه نیز در مدل‌سازی لحاظ گردید. طعمه مورد علاقه این گونه پایکا است و از خرگوش، جوندگان، کبک و بی‌مهرگان نیز تغذیه می‌کند. داده‌های مربوط به توزیع گونه‌های طعمه از جمله پایکا و خرگوش اروپایی که به عنوان مهم‌ترین منابع غذایی گربه پالاس شناخته می‌شوند (کرمی و همکاران، ۱۳۹۵)، از سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران تهیه و به عنوان متغیر مستقل وارد مدل گردید.

۳-۴. آماده‌سازی متغیرها

در این پژوهش، در گام نخست متغیرهای اقلیمی با استفاده از ابزار Extract by Mask در نرم‌افزار ArcMap 10.8.2 در محدوده مرزهای ایران برش داده شدند و مراحل آماده‌سازی آن‌ها انجام گرفت. در این بررسی تمامی متغیرهای محیطی در سیستم مختصات جغرافیایی WGS 1984 و با تفکیک مکانی یک کیلومتر آماده‌سازی شدند. برای برخی از متغیرهای محیطی (کاربری اراضی/ پوشش زمین و طعمه‌ها)، لایه‌های فاصله با استفاده از دستور Distance Euclidean محاسبه گردید. سپس نقشه‌های آماده شده با فرمت ASCII برای مدل‌سازی

زیستگاه به نرم‌افزار MaxEnt نسخه ۳,۴,۴ وارد شدند. در ساخت مدل از روش اعتبارسنجی متقابل (Cross-validation) استفاده شد؛ به‌طوری‌که در هر تکرار، ۷۰ درصد داده‌های حضور گونه به‌طور تصادفی برای آموزش مدل و ۳۰ درصد داده‌ها برای ارزیابی مدل به‌کار رفتند. خروجی نرم‌افزار در هر بار تکرار، نقشه‌ای پیوسته از احتمال حضور گونه در زیستگاه بود و میانگین ۱۰ تکرار به‌عنوان خروجی نهایی در نظر گرفته شد. خروجی نرم‌افزار در سه فرمت خام، تجمعی و لجستیک ارائه می‌شود. این فرمت‌ها از نظر محتوایی مشابه هستند و تنها در شیوه بیان مقادیر تفاوت دارند (Phillips et al., 2006). برای ارزیابی عملکرد مدل از شاخص سطح زیر منحنی (AUC)^۱ استفاده شد. مقدار این شاخص بین صفر تا یک متغیر بوده و بر اساس معیارهای زیر دسته‌بندی می‌شود: مقادیر بین ۰/۹ تا ۱ بیانگر کارایی عالی مدل، بین ۰/۸ تا ۰/۹ خوب، بین ۰/۷ تا ۰/۸ متوسط، بین ۰/۶ تا ۰/۷ ضعیف، و بین ۰/۵ تا ۰/۶ نشان‌دهنده ناکارآمدی مدل هستند (Zhang et al., 2019). به‌طور کلی، هرچه مقدار AUC به عدد یک نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر بوده و قابلیت پیش‌بینی آن بالاتر است.

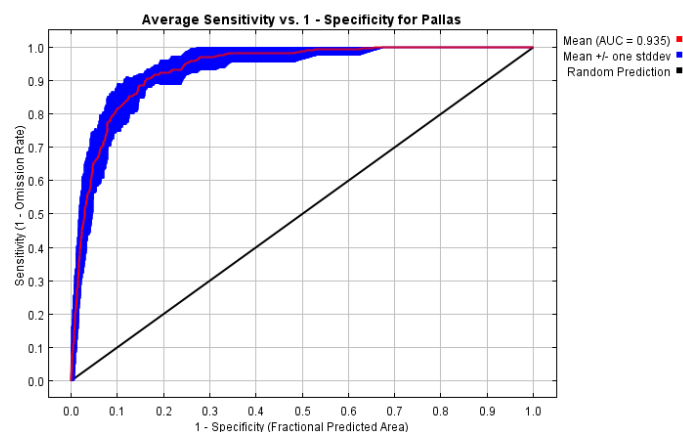
۴. یافته‌های پژوهش

شکل ۲ سطح زیر منحنی (AUC) مدل حاصل از نرم‌افزار بیشینه آنتروپی را نشان می‌دهد. مقدار این شاخص ۰/۹۳ است که نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی مدل است. سهم هر یک از متغیرها در توسعه مدل نیز در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق این جدول مهم‌ترین متغیرهایی که بیشترین سهم را در مدل داشته‌اند به ترتیب فاصله از طعمه پایکا، ارتفاع از سطح دریا، ناهمواری سطح زمین و دمای متوسط سالانه است.

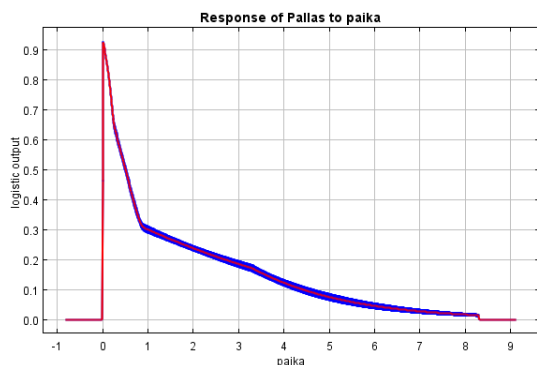
جدول ۲. درصد سهم مشارکت متغیرهای محیطی در توزیع گونه گربه پالاس در ایران (منبع: یافته‌های تحقیق)

ردیف	متغیر (واحد)	درصد سهم متغیر	ردیف	متغیر (واحد)	درصد سهم متغیر
۱	دمای متوسط سالانه	۱۴/۲	۱۱	فاصله از جاده‌ها	۰/۶
۲	میانگین دمای روزانه	۱/۲	۱۲	فاصله از زمین‌های کشاورزی	۲
۳	دمای فصلی	۶/۷	۱۳	فاصله از مناطق آبی	۱/۳
۴	بارش فصلی	۰/۸	۱۴	فاصله از خطوط آبی	۰/۵
۵	بارش مرطوب‌ترین فصل	۳/۴	۱۵	فاصله از جنگل‌ها	۵/۳
۶	بارش گرم‌ترین فصل	۱/۱	۱۶	شاخص تراکم پوشش گیاهی	۳/۶
۷	فاصله از روستا	۱	۱۷	جهت جغرافیایی	۱
۸	فاصله از شهرها	۰/۲	۱۸	ارتفاع از سطح دریا (متر)	۱۸/۲
۹	ناهمواری سطح زمین	۱۴/۴	۱۹	شیب	۲/۱
۱۰	فاصله از طعمه پایکا	۱۹/۵	۲۰	فاصله از طعمه خرگوش اروپایی	۳

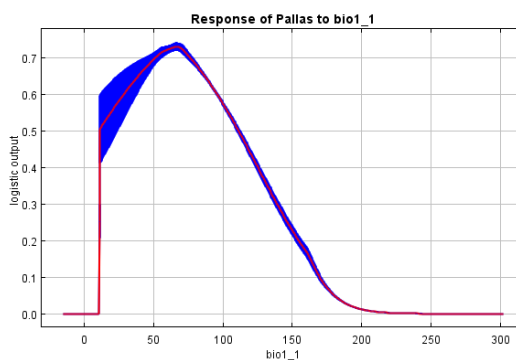
در این مطالعه منحنی‌های پاسخ مربوط به متغیرهای محیطی نیز ترسیم شدند. منحنی‌های پاسخ نشان‌دهنده اثر متغیرها روی احتمال توزیع گونه هستند و این که هر متغیر به چه شیوه‌ای بر توزیع گونه تأثیرگذار بوده است. در شکل ۳ مهم‌ترین منحنی‌های پاسخ مربوط به توزیع گونه گربه پالاس نشان داده شده است.



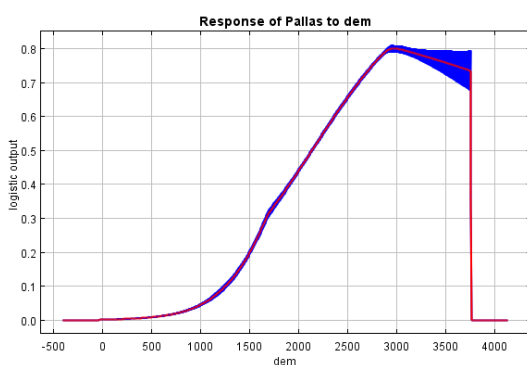
شکل ۲. منحنی ROC و مقدار AUC مدل توزیع گونه پالاس در ایران (منبع: یافته‌های تحقیق)



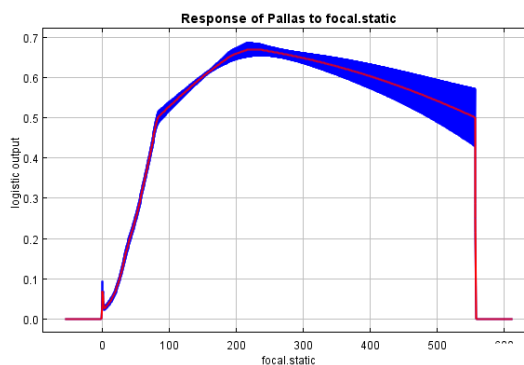
ب



الف



د

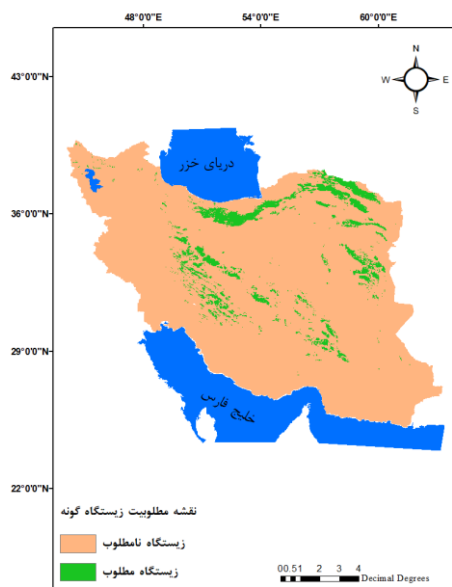


ج

شکل ۳. منحنی‌های پاسخ گونه گربه پالاس نسبت به متغیرهای محیطی (الف. متوسط بارش سالانه، ب. فاصله از طعمه پایکا، ج. ارتفاع از سطح دریا، د. ناهمواری سطح زمین) (منبع: یافته‌های تحقیق)

یکی دیگر از خروجی‌های نرم‌افزار MaxEnt، مربوط می‌شود به نقشه‌های مطلوبیت زیستگاه که به‌صورت نقشه‌هایی در فرمت رستر مقادیر ۰ تا ۱ را در برمی‌گیرد. در این بررسی با استفاده از الگوریتم لجستیک^۱ در نرم‌افزار MaxEnt نقشه‌های مطلوبیت زیستگاه برای گونه

گربه پالاس تهیه و برای تعیین حد آستانه مطلوبیت زیستگاه از روش ۱۰ درصد پایین نقاط حضور آموزش^۱ استفاده شد. سپس نقشه‌ها بر اساس این آستانه در محیط نرم‌افزار ArcGIS مجدداً طبقه‌بندی گردید (شکل ۴).



شکل ۴. نقشه مطلوبیت زیستگاه گربه پالاس در ایران (منبع: یافته‌های تحقیق)

۵. بحث و نتیجه‌گیری

زیستگاه مکانی حیاتی برای بقا و تداوم جمعیت گونه‌هاست و کیفیت آن به‌طور مستقیم بر توزیع آن‌ها اثر می‌گذارد (Block & Brennan, 1993). نتایج این مطالعه نشان داد که زیستگاه گربه پالاس در ایران عمدتاً تحت تأثیر حضور پایکا و شرایط توپوگرافیک خاص (ارتفاع و ناهمواری) است. این یافته‌ها در چارچوب گزارش‌های جهانی (Barrows et al., 2014; Living Planet, 2020) اهمیت ویژه‌ای دارند، زیرا کاهش کیفیت زیستگاه‌ها در اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی می‌تواند جمعیت‌های پایکا را کاهش داده و در نتیجه بقای گربه پالاس را تهدید کند. بنابراین نتایج بدست آمده مؤید این است که پایش تغییرات اقلیمی و حفاظت از زیستگاه‌های مرتفع و استپی برای حفظ جمعیت گربه پالاس در ایران ضروری است.

نتایج این بررسی برای گربه پالاس در سطح زیستگاه در ایران نشان داد متغیر فاصله از طعمه پایکا دارای بالاترین میزان سهم در تعیین زیستگاه مطلوب گربه پالاس است. یافته حاضر با نتایج جوردانو و گرین‌اسپن (۲۰۲۱) همخوانی دارد که با استفاده از مدل MaxEnt در مقیاس قلمرویی نشان دادند که مدل توزیع پایکا مهم‌ترین متغیر مؤثر بر توزیع گربه پالاس بوده و سهم آن در مدل‌سازی بیش از ۳۸ درصد برآورد شده است. همچنین، در منطقه خاورمیانه و جنوب آسیا (شامل ایران)، سهم متغیر پایکا به بیش از ۶۱ درصد افزایش یافته است. این یافته‌ها مؤید آن است که گربه پالاس در مناطقی که با پایکا هم‌زیست است، ممکن است شکارچی تخصصی این گونه باشد. بنابراین، حضور و حفظ جمعیت‌های پایکا می‌تواند نقش کلیدی در حفاظت از زیستگاه‌های مناسب برای گربه پالاس ایفا کند (Greenspan, 2021). مطالعه دهنداپ و همکاران (۲۰۱۹)، نشان داد گربه پالاس شکارگری تخصصی است که در سراسر گستره توزیع خود، عمدتاً از پایکا (*Ochotona spp*) تغذیه می‌کند. این مطالعه نشان می‌دهد که در منطقه تبت و چین، این گربه بیشتر به شکار پایکا‌های کلنی‌نشین مانند *Ochotona curzoniae* وابسته است (Dhendup et al., 2019). همچنین در منطقه دولپو^۲ در نپال، آنالیز ژنتیکی مدفوع

1. 10th percentile training presence

2. Dolpo

یک گربه پالاس نشان داد که محتوای آن صرفاً شامل موهای پایکا و خرگوش صحرایی (*Lepus oiostolus*) بوده و فاقد هرگونه تنوع طعمه‌ای دیگر است. این موضوع، وابستگی بالای گونه به حضور پایکا در زیستگاه را از منظر تغذیه‌ای نشان می‌دهد. علاوه بر این، مقاله اشاره می‌کند که زیستگاه‌های انتخاب شده توسط گربه پالاس معمولاً در نزدیکی زیستگاه‌های پایکا و مارموت قرار دارند و حیوان از لانه‌های خالی مارموت‌ها و روباه‌ها برای پناهگاه استفاده می‌کند. این رابطه نزدیک با زیستگاه و رفتار طعمه، گویای وابستگی اکولوژیکی پیچیده‌ای است که می‌تواند توزیع فضایی گربه پالاس را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. از این رو، کاهش جمعیت پایکا به دلیل مسموم‌سازی یا تخریب زیستگاه، می‌تواند تهدید مستقیمی برای بقای گربه پالاس محسوب شود.

در میان متغیرهای محیطی مؤثر بر پراکنش گربه پالاس (*Otocolobus manul*)، علاوه بر فاصله از طعمه اصلی (پایکا)، عوامل توپوگرافی مانند ارتفاع از سطح دریا و ناهمواری سطح زمین اهمیت زیادی دارند. در مطالعه راس (۲۰۱۲) بر روی گربه پالاس با استفاده از داده‌های رادیوتله‌متری ۹ نر و ۱۶ ماده و مدل‌های خطی تمهیم‌یافته نشان داده شد که افزایش میزان پوشش سنگی در مرکز قلمرو به طور معناداری اندازه قلمرو را کاهش می‌دهد ($p < 0.05$)، در حالی که پیوستگی زیستگاه سنگی در پیرامون موجب افزایش اندازه قلمرو می‌شود. این نتایج به طور کمی نشان می‌دهد که گربه پالاس استفاده بیشتری از زیستگاه‌های ناهموار و سنگی دارد و حضور آن در ارتفاعات و مناطق با ساختار پیچیده زمین بیشتر است (Ross et al., 2012). همچنین، بررسی‌های ارائه شده در فهرست سرخ اتحادیه بین‌المللی حفاظت از طبیعت نشان می‌دهد که در سراسر محدوده پراکنش گربه پالاس، زیستگاه‌های مطلوب آن عمدتاً در ارتفاعات بالا و مناطق کوهستانی قرار دارند (Ross et al., 2016).

با توجه به نقشه مطلوبیت زیستگاه گربه پالاس (شکل ۴)، از لحاظ اکولوژیکی این گونه اغلب در مناطق مرتفع، استپی، خشک و سنگلاخ یافت می‌شود و زیستگاه‌هایی مانند دشت‌های نیمه‌خشک، فلات‌های کوهستانی و دامنه‌های با پوشش گیاهی تنک را ترجیح می‌دهد. توزیع گربه پالاس به صورت لکه‌ای بوده و معمولاً با تراکم جمعیتی پایین در نواحی دورافتاده ثبت شده است (Moore et al., 2018). از سوی دیگر دمای متوسط سالانه نیز به عنوان متغیر کلیدی شناسایی شد که نشان می‌دهد زیستگاه‌های مطلوب عمدتاً در ارتفاعات با اقلیم معتدل قرار دارند. پژوهش لرستانی نیز این موضوع را نشان می‌دهد که تغییر اقلیم آینده تهدید جدی‌تری برای زیرگونه‌های *Otocolobus manul ferrugineus* و *Otocolobus manul nigripsectus* (که شامل جمعیت‌های ایران نیز می‌شود) نسبت به سایر زیرگونه‌ها ایجاد خواهد کرد (Lorestani et al., 2022). بنابراین، گرم شدن اقلیم و کاهش زیستگاه‌های مرتفع می‌تواند زیستگاه‌های گربه پالاس را در ایران، به ویژه در مناطق مرکزی و شرقی، بیش از پیش محدود سازد.

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که گربه پالاس به زیستگاه‌های مرتفع، ناهموار و نزدیک به جمعیت‌های پایکا وابستگی زیادی دارد و توزیع آن به صورت لکه‌ای در ایران مشاهده می‌شود. این ویژگی‌ها موجب می‌شود که گونه در برابر تغییرات اقلیمی و تخریب زیستگاه‌ها آسیب‌پذیر باشد یافته‌های حاضر همچنین نشان می‌دهند که تحلیل دقیق اکولوژی گربه پالاس می‌تواند راهنمای مهمی برای تعیین اولویت‌های حفاظتی در نواحی با مطلوبیت بالای زیستگاهی باشد. راهکارهای حفاظتی پیشنهادی برای گربه پالاس در این مطالعه شامل مواردی چون حفاظت و پایش جمعیت طعمه‌های اصلی گونه مانند پایکا، اجرای برنامه‌های حفاظتی ویژه برای زیستگاه‌های طعمه‌ها در مناطق کوهستانی و استپی، ایجاد و توسعه مناطق حفاظت شده در نواحی شناسایی شده با مطلوبیت بالای زیستگاهی و در نهایت، انجام مطالعات بوم‌شناسی رفتاری برای درک بهتر نیازهای اکولوژیکی گونه می‌باشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

سیده بهاره حسینی: مدلسازی، نگارش مقاله، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج.

الهام یوسفی روییات: استاد راهنمای پایان‌نامه، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بازبینی مقاله، مشارکت در تحلیل و تفسیر نتایج.
 علی حقانی: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش. مشارکت در تحلیل و تفسیر نتایج.
 حمیدرضایایی: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش. مشارکت در تحلیل و تفسیر نتایج.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر حامی مالی ندارد.

سپاسگزاری

از سازمان حفاظت محیط‌زیست جهت حمایت برای دسترسی به داده‌های مورد نیاز پژوهش سپاسگزاری می‌گردد. از دانشگاه بیرجند به خاطر حمایت معنوی پژوهش قدردانی می‌شود. از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ارزشمند علمی سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- ابراهیمی، احمدزاده، نعیمی. (۱۳۹۷). مناطق داغ زیستگاهی خانواده گربه‌سانان تحت اقلیم کنونی در ایران. *فصلنامه محیط‌زیست جانوری*، دوره ۱۰، شماره ۴.
- اشرف‌زاده، محمدرضا؛ نقی‌پور، علی‌اصغر؛ محمدی، علیرضا؛ حیدریان، مریم؛ خوشناموند، هادی. (۱۴۰۲). مدل سازی مطلوبیت زیستگاه پلنگ ایرانی (*Panthera pardus*) در استان لرستان <https://civilica.com/doc/1851998>
- درخشنده، علی؛ خورانی، اسداله؛ رضازاده، مریم. (۱۴۰۲). روندیابی بارش در ایران بر اساس داده‌های MERRA2 فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۳)، ۶۶۹-۶۸۳. doi: 10.22059/jesphys.2023.350125.1007465
- جورابلو، بهناز؛ رضانی، مهدی؛ خراسانی، نعمت‌الله. (۱۳۹۶). بررسی مطلوبیت زیست گاه یوزپلنگ آسیایی (*Acinonyx jubatus*) با زیست گاه های طعمه خواران رقیب در پارک ملی کویر <https://civilica.com/doc/1288868>
- جعفری، علی؛ علیپور، مرضیه؛ عباسی، مژگان؛ سلطانی، علی. (۱۳۹۸). مدلسازی توزیع گونه زالزالک در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از روش تحلیل آنروپی بیشینه. *محیط شناسی*، ۴۵(۲)، ۲۲۳-۲۳۵. doi: 10.22059/jes.2019.280556.1007855
- مروتی، مریم؛ کابلی، محمد؛ پناهنده، مریم؛ سرباز، محمد؛ احمدیان، شادی. (۱۳۹۶). مدل سازی زیستگاه یوزپلنگ آسیای (*Acinonyx jubatus venaticus*) تحت تاثیر تغییرات اقلیمی در ایران با استفاده از نرم افزار MAXENT. *فصلنامه محیط‌زیست جانوری*، ۹(۱)، ۱۳-۲۰.
- غفاری پور، سمیرا؛ نادری، مرتضی؛ هاشم‌زهی، محمد انور. (۱۴۰۰). ارزیابی توزیع و مطلوبیت زیستگاه گربه شنی (*Mammalia: Carnivora: Felidae*) در استان سیستان و بلوچستان، ایران. *فصلنامه علمی زیست‌شناسی جانوری تجربی*، ۱۰(۳)، ۷۵-۷۸. doi: 10.30473/eab.2021.54111.179788
- فقیه سبزواری، نفیسه. و فراشی، آریتا. (۱۴۰۳). بررسی مطلوبیت زیستگاه کاراکال (*Caracal Schreber, 1776*) با استفاده از مدل MaxEnt در اقلیم آینده ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. doi: 10.22034/gp.2022.52676.3030
- کریمی، م.؛ قدیریان، ط.؛ فیض‌اللهی، ک. (۱۳۹۵). اطلس پستانداران ایران، چاپ اول، سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران.

References

- Barrows, C. W., Hoines, J., Fleming, K. D., Vamstad, M. S., Murphy-Mariscal, M., Lalumiere, K., & Harding, M. (2014). Designing a sustainable monitoring framework for assessing impacts of climate change at Joshua Tree National Park, USA. *Biodiversity and Conservation*, 23(13), 3263–3285. <https://doi.org/10.1007/s10531-014-0779-2>
- Block, W. M., & Brennan, L. A. (1993). The habitat concept in ornithology: theory and applications. In *Current ornithology: volume 11* (pp. 35-91). Boston, MA: Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-9912-5_2
- Dhendup, T. A. S. H. I., Shrestha, B. I. K. R. A. M., Mahar, N. E. E. R. A. J., Kolipaka, S. H. E. K. H. A. R., Regmi, G. R., & Jackson, R. O. D. N. E. Y. (2019). Distribution and status of the manul in the Himalayas and China. *Cat News*, 13, 31-36.
- Greenspan, E., & Giordano, A. J. (2021). A rangewide distribution model for the Pallas's cat (*Otocolobus manul*): identifying potential new survey regions for an understudied small cat. *Mammalia*, 85(6), 574-587. <https://doi.org/10.1515/mammalia-2020-0094>
- Jayasekara, E. G. D. P., & Mahaulpatha, D. (2022). Modeling the habitat suitability for sympatric small and medium sized felids and investigating the spatiotemporal niche overlapping in Maduru Oya National Park, Sri Lanka. *Journal of Wildlife and Biodiversity*, 6(1), 31-56. <https://doi.org/10.22120/jwb.2022.542338.1378>
- Jianhui, G. O. N. G., Yibin, L. I., Ruifen, W. A. N. G., Chenxing, Y. U., Jian, F. A. N., & Kun, S. H. I. (2023). MaxEnt modeling for predicting suitable habitats of snow leopard (*Panthera uncia*) in the mid-eastern Tianshan Mountains. *Journal of Resources and Ecology*, 14(5), 1075-1085. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2023.05.018>
- Karimi, A., & Ghajari, Y. E. (2022). Improving land surface temperature prediction using spatiotemporal factors through a genetic-based selection procedure (Case Study: Tehran, Iran). *Advances in Space Research*, 69(9), 3258-3267. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.02.004>
- Khoorani, A., Balaghi, S., & Mohammadi, F. (2024). Projecting drought trends and hot spots across Iran. *Natural Hazards*, 120(11), 9489-9502. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06574-5>
- LoRESTANI, N., Hemami, M. R., Rezvani, A., & Ahmadi, M. (2022). Ecological niche models reveal divergent habitat use of Pallas's cat in the Eurasian cold steppes. *Ecology and Evolution*, 12(12), e9624. <https://doi.org/10.1002/ece3.9624>
- Matthews, T. J., Borregaard, M. K., Gillespie, C. S., Rigal, F., Ugland, K. I., Krüger, R. F., ... & Whittaker, R. J. (2019). Extension of the gambin model to multimodal species abundance distributions. *Methods in Ecology and Evolution*, 10(3), 432-437. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13122>
- Moore, T. E., Bagchi, R., Aiello-Lammens, M. E., & Schlichting, C. D. (2018). Spatial autocorrelation inflates niche breadth–range size relationships. *Global Ecology and Biogeography*, 27(12), 1426–1436. <https://doi.org/10.1111/geb.12818>
- Murdoch, J. D., Munkhzul, T., & Reading, R. P. (2006). Pallas' cat ecology and conservation in the semi-desert steppes of Mongolia. *Cat News*, 45, 18–19. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13122>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3), 231–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Ross, S., Munkhtsog, B., & Harris, S. (2012). Determinants of mesocarnivore range use: relative effects of prey and habitat properties on Pallas's cat home-range size. *J. Mammal.*, 93, 1292–1300. <https://doi.org/10.2307/23321939> <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-1.RLTS>
- Ross, S., Barashkova, Y., Farhadinia, M. S., Appel, A., Riordan, P., Sanderson, J., & Munkhtsog, B. (2016). *Otocolobus manul*. *The IUCN Red List of Threatened Species* 2016: e.T15640A87840229. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2015-2.RLTS.T15640A50657610.en>
- Ross, S., Kamnitzer, R., Munkhtsog, B., & Harris, S. (2010). Den-site selection is critical for Pallas's cats (*Otocolobus manul*). *Canadian Journal of Zoology*, 88(9), 905-913. <https://doi.org/10.1139/Z10-056>
- Thorn, J. S., Nijman, V., Smith, D., & Nekaris, K. A. I. (2009). Ecological niche modelling as a technique for assessing threats and setting conservation priorities for Asian slow lorises (Primates: Nycticebus). *Diversity and Distributions*, 15(2), 289–298. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2008.00535.x>

- Vázquez García, P., Zarzo-Arias, A., Vigón Álvarez, E., Alambiaga, I., & Monrós, J. S. (2024). Modelling the Distribution and Habitat Suitability of the European Wildcat (*Felis silvestris*) in North-Western Spain and Its Conservation Implications. *Animals*, 14(18), 2708. <https://doi.org/10.3390/ani14182708>
- Villero, D., Pla, M., Camps, D., Ruiz-Olmo, J., & Brotons, L. (2017). Integrating species distribution modelling into decision-making to inform conservation actions. *Biodiversity and Conservation*, 26(2), 251-271.
- WWF (2020). Press Release: living planet report 2020, WWF sends sos for nature as scientists warn wildlife is in freefall. www.wwf.org.uk.
- Yang, Y., Gao, W., Han, Y., & Zhou, T. (2025). Predicting the Impact of Climate Change on the Distribution of North China Leopards (*Panthera pardus japonensis*) in Gansu Province Using MaxEnt Modeling. *Biology*, 14(2), 126. <https://doi.org/10.3390/biology14020126>
- Ye, P., Zhang, G., Zhao, X., Chen, H., Si, Q., & Wu, J. (2021). Potential geographical distribution and environmental explanations of rare and endangered plant species through combined modeling: A case study of Northwest Yunnan, China. *Ecology and Evolution*, 11(19), 13052–13067. <https://doi.org/10.1002/ece3.7999>
- Zhang, J. J., Jiang, F., Li, G., Qin, W., Li, S., Gao, H., Cai, Z., Lin, G., & Zhang, T. (2019). Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution*, 9(11), 6643–6654. <https://doi.org/10.1002/ece3.5243>