University of Tehran Press

Journal of Natural Environment

Online ISSN: 2423-7817

Homepage: https://jne.ut.ac.ir/

Comparison of Bioclim, MaxNet and MaxEnt algorithms in predicting the distribution of Caspian snowcock (*Tetraogallus caspius*) in Iran

Marzieh Moradi[1] | **Mohammad Reza Ashrafzadeh**[2✉] | **Ali Asghar Naghipour**[3]

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: mmarzieh529@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: mrashrafzadeh@sku.ac.ir
3. Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: aa.naghipour@sku.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 19 December 2023

Received in revised form 21 April 2024

Accepted 26 April 2024

Published online 22 July 2024

Keywords:

Ecological niche,

Species distribution modeling,

Tetraogallus caspius,

Wallace.

ABSTRACT

Understanding the patterns of spatial presence of species and their environmental dependence is one of the basic goals in ecology and evolution. Currently, there are several software packages for ecological niche modeling of species. The Wallace software package is designed as an accessible tool for researchers and conservation professionals and it has been introduced as an ideal resource for education. In the current study, a dataset comprising 262 records on the occurrence of Caspian snowcock, along with 12 environmental and human predictors, was used. Within the context of a comparative analysis using three models—Bioclim, MaxNet, and MaxEnt—under the Wallace software package, we conducted a modeling exercise to depict the geographical distribution of the Caspian snowcock in Iran. In all three models, the high AUC values (>0.96) suggesting excellent model fit with data. Based on the results of three models, about 4.6 to 5.5 % of the study area can be considered as the suitable habitat of the Caspian snowcock. Accordingly, Alborz, Zagros Koppeh Dagh, Azerbaijan and Caucasus Mountains are of great importance as suitable habitats for the Caspian snowcock. The variables of topographical roughness (36.8 %), elevation (20.9 %), isothermality (18.6 %) and annual precipitation (9.1 %) showed the most participation in modeling. The present study emphasizes the necessity of using different algorithms in species distribution modeling and the importance of using different variables including topography, vegetation, food resources, climate, coexist species, competition and human factors in modeling the distribution of the Caspian snowcock.

Cite this article: Moradi, M., Ashrafzadeh, M.R., & Naghipour, A.A. (2024). Comparison of Bioclim, MaxNet and MaxEnt algorithms in predicting the distribution of Caspian snowcock (*Tetraogallus caspius*) in Iran. *Journal of Natural Environment*, 77 (Special Issue), 163-174. DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2024.369895.2630

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2024.369895.2630

محیط زیست طبیعی
شاپای الکترونیکی: ۷۸۱۷-۲۴۲۳
Homepage: https://jne.ut.ac.ir/
انتشارات دانشگاه تهران

مقایسهٔ الگوریتم‌های Bioclim، MaxNet و MaxEnt در پیش‌بینی پراکنش کبک دری خزری (*Tetraogallus caspius*) در ایران

مرضیه مرادی[۱] | محمدرضا اشرف‌زاده[۲]✉ | علی اصغر نقی‌پور[۳]

۱. گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mmarzieh529@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: mrashrafzadeh@sku.ac.ir
۳. گروه مهندسی طبیعت، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: aa.naghipour@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱

کلیدواژه‌ها:
آشیان بوم‌شناختی،
مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای،
والاس،
Tetraogallus caspius.

چکیده

شناخت الگوهای حضور مکانی گونه‌ها و وابستگی محیطی آنها یکی از اهداف اساسی در بوم‌شناسی و تکامل است. در حال حاضر، بسته‌های نرم‌افزاری متعددی برای مدل‌سازی آشیان بوم‌شناختی گونه‌ها وجود دارد. بستهٔ نرم‌افزاری والاس، به‌عنوان ابزاری در دسترس برای محققان و متخصصان حفاظت طراحی شده است و به‌عنوان یک منبع ایده‌آل برای آموزش معرفی شده است. در پژوهش حاضر، با استفاده از ۲۶۲ دادهٔ حضور کبک دری خزری و ۱۲ متغیر محیطی و انسانی و در چهارچوب یک رویکرد مقایسه‌ای سه مدل Bioclim، MaxNet و MaxEnt، تحت بستهٔ نرم‌افزاری والاس، پراکنش جغرافیایی کبک دری خزری در ایران مدل‌سازی شد. در هر سه مدل، مقدار عددی AUC عالی (>۰/۹۶) برآورد شد. بر اساس نتایج حاصل از سه مدل، حدود ۴/۶ تا ۵/۵ درصد از سطح کشور می تواند به‌عنوان زیستگاه مطلوب کبک دری خزری در نظر گرفته شود. بر این اساس، ارتفاعات کپه‌داغ، البرز، زاگرس، آذربایجان و قفقاز از اهمیت زیستگاهی بالایی برای کبک دری خزری برخوردار هستند. متغیرهای ناهمواری سطح زمین (۳۶/۸ درصد)، ارتفاع (۲۰/۹ درصد)، هم‌دمایی (۱۸/۶ درصد) و بارش سالیانه (۹/۱ درصد) بیشترین اهمیت را در مدل‌سازی نشان دادند. بررسی‌های پژوهش حاضر، علاوه بر اهمیت استفاده از الگوریتم‌های مختلف در مدل‌سازی‌های پراکنش گونه‌ای، بر اهمیت استفاده از طیفی از متغیرها شامل توپوگرافی، پوشش گیاهی، منابع غذایی، اقلیم، گونه‌های هم‌زیست، رقابت و عوامل انسانی در مدل‌سازی پراکنش کبک دری خزری تأکید دارد.

استناد: مرادی، مرضیه؛ اشرف‌زاده، محمدرضا؛ و نقی‌پور، علی‌اصغر (۱۴۰۳). مقایسهٔ الگوریتم‌های Bioclim، MaxNet و MaxEnt در پیش‌بینی پراکنش کبک دری خزری (*Tetraogallus caspius*) در ایران. *محیط زیست طبیعی*، ۷۷ (ویژه نامه)، ۱۷۴-۱۶۳.
DOI: http//doi.org/10.22059/jne.2024.369895.2630

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.

مقدمه

کبک‌های دری در جنس *Tetraogallus*، خانوادهٔ قرقاول (Phasianidae) و راستهٔ ماکیان (Galliformes) قرار می‌گیرند. جنس *Tetraogallus*، در جهان دارای پنج گونه به شرح زیر است: کبک دری هیمالیایی (*T. himalayensis*)، کبک دری خزری (*T. caspius*)، کبک دری آلتای (*T. altaicus*)، کبک دری تبتی (*T. tibetanus*) و کبک دری قفقازی (*T. caucasicus*). به‌طور عمده، کبک‌های دری در گسترهٔ اصلی کوهستانی آسیای مرکزی پراکنش دارند (Zheng *et al*., 2002). کبک دری خزری از گونه‌های معرف مناطق کوهستانی و بومی کشورهای ایران، ترکمنستان، آذربایجان، ارمنستان، گرجستان، عراق و ترکیه است (Bird Life International, 2016). کبک‌های دری به‌خوبی با شرایط اقلیمی سازگار شده و ماه‌های سخت زمستان را در دره‌ها می‌گذرانند و در تابستان برای تولیدمثل به‌سمت ارتفاعات بالاتر مهاجرت می‌کنند (An *et al*., 2020). در برخی مناطق حتی در مواقع بارش سنگین برف به ارتفاع پایین‌تر مهاجرت نمی‌کنند (Bird Life International, 2016). این گونه به‌ندرت تا حد رویش درختان پایین می‌آید (Porter and Aspinall, 2013) و بیشتر در شیب‌های تند، دره‌ها و پرتگاه‌های همراه با لکه‌هایی از برف و پوشش علفی حضور دارد (McGowan, 1994; Porter and Aspinall, 2013). آشیانه‌ها در شیب‌های تند در زیر صخره‌ها، لبهٔ صخره‌های مرتفع، در بین سنگ‌ها یا در بین توده‌ای از پوشش علفی مشاهده می‌شوند. رفتارهای دورهٔ تولیدمثلی اغلب در فروردین ماه آغاز شده و تخم‌گذاری در اردیبهشت‌ماه انجام می‌شود. این گونه به‌طور انحصاری از مواد گیاهی به‌ویژه حبوبات و از پیازها، گل‌ها، میوه‌ها و دانه‌ها تغذیه می‌کند (Bird Life International, 2016). جمعیت جهانی کبک دری خزری در حدود ۱۶۵۰۰ تا ۳۹۵۰۰ فرد بالغ برآورد می شود. این گونه در فهرست قرمز اتحادیهٔ بین‌المللی حفاظت از طبیعت (IUCN) در ردهٔ کمترین نگرانی، و در ضمیمهٔ یک کنوانسیون منع تجارت بین‌المللی گونه‌های در معرض انقراض (CITES) قرار دارد (Bird Life International, 2016). روند رشد جمعیت جهانی کبک دری خزری کاهشی است که عواملی مانند تخریب زیستگاه، چرای بیش از حد، شکار غیرقانونی و استفاده از سلاح‌های دوربرد برای شکار گونه از مهمترین عوامل کاهش جمعیت این پرنده هستند. تغییر اقلیم، حضور سگ‌های گله، برداشت گیاهان داروئی و معطر و برداشت چوب و ذغال از دیگر عوامل تهدید کبک دری خزری هستند (Bird Life International, 2016; Ashrafzadeh and Nazarian, 2018; Ashrafzadeh *et al*., 2018).

در حال حاضر، دانش اندکی در زمینهٔ پراکنش جغرافیایی و وضعیت زیستگاهی کبک دری خزری وجود دارد (Ashrafzadeh and Nazarian, 2018; Ashrafzadeh *et al*., 2018; Yousefi Qaleh *et al*., 2024). Ashrafzadeh و Nazarian (۲۰۱۸) با استفاده از الگوریتم بی‌نظمی بیشینه به مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه کبک دری خزری در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. براساس یافته‌های این مطالعه، حدود ۱۹/۴ درصد از وسعت محدودهٔ مورد مطالعه به‌عنوان زیستگاه‌های مطلوب کبک دری شناسایی شد. زیستگاه‌های کبک دری در استان چهارمحال و بختیاری به‌طور عمده در مناطق کوهستانی مرتفع و ارتفاعات بالاتر از ۱۹۰۰ متر در گسترهٔ شمال غربی–جنوب شرقی استان واقع شده است (Ashrafzadeh and Nazarian, 2018). Ashrafzadeh و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی دیگر به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش جغرافیایی کبک دری خزری در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. این مطالعه پیش‌بینی می‌کند که حدود ۱۲/۲۹ تا ۳۲/۲۸ درصد از گسترهٔ زیستگاه‌های مطلوب کبک دری در این استان تا ۲۰۵۰ از دست خواهد رفت، که بر این اساس مطلوبیت زیستگاه‌های مناطق کم‌ارتفاع‌تر (با ارتفاع پایین‌تر از ۲۱۲۴ متر از سطح دریا) با سرعت بیشتری از دست خواهد رفت (Ashrafzadeh *et al*., 2018). Yousefi Qaleh و همکاران (۲۰۲۴) به مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه کبک دری در منطقهٔ حفاظت شده البرز مرکزی شمالی پرداختند. این مطالعه نشان داد که مناطق کوهستانی مرتفع واقع در جنوب شرق و مرکز منطقهٔ مورد مطالعه دارای مطلوبیت بیشتری برای کبک‌های دری خزری هستند.

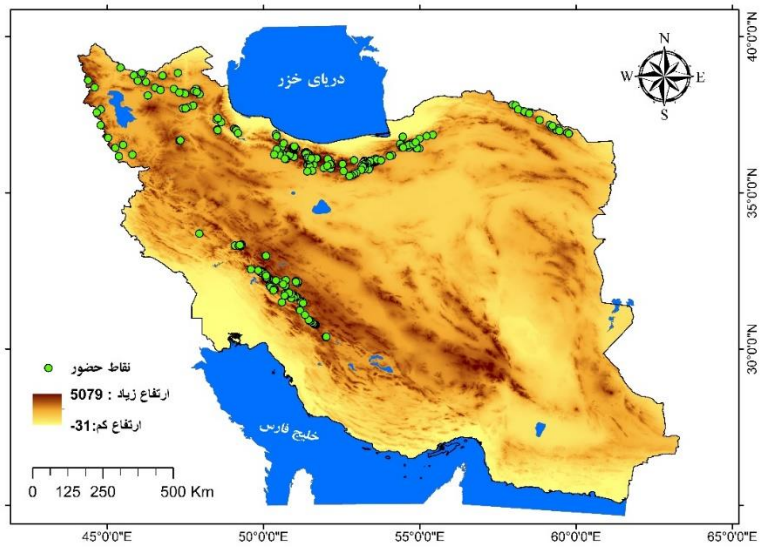
همان‌طور که اشاره شد پژوهش‌های اندکی در زمینهٔ وضعیت زیستی کبک دری خزری به انجام رسیده است. دلایل متعددی وجود دارد که چرا پژوهش‌های چندانی در زمینهٔ پرندگان حمایت شده و در معرض تهدید وجود ندارد. اندازهٔ جمعیت یکی از مهم‌ترین عوامل در پیش‌بینی تلاش‌های تحقیقاتی است. بسیاری از پرندگان در معرض تهدید به‌واسطهٔ جمعیت‌های با اندازهٔ کوچک، گسترهٔ زیستگاهی محدود و تیپ‌های زیستگاهی معین و محدود کمتر مورد پژوهش قرار گرفته‌اند (Murray *et al*., 2015). پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهند که کبک‌های دری عمدتاً پراکنش جغرافیایی محدودی دارند و گسترهٔ زیستگاهی آنها

به‌طور جدی توسط عواملی مانند ارتفاع و نوع زیستگاه محدود می‌شود (Regmi and Sharma, 2023). کوچک بودن اندازهٔ جمعیت کبک‌های دری خزری و وابستگی آنها به مناطق صخره‌ای و کوهستان‌های مرتفع از دیگر عواملی هستند که بر انجام پژوهش در زمینه این گونه اثرگذار بوده است (Ashrafzadeh and Nazarian, 2018; Ashrafzadeh *et al*., 2018).

دسترسی به اطلاعات مناسب در زمینهٔ پراکنش گونه‌ها که می‌تواند با استفاده از مدل‌های پراکنش گونه‌ای حاصل شوند اهمیت زیادی در اتخاذ تصمیم‌های مدیریتی و حفاظتی دارند (Guisan *et al*., 2013). نقشه‌های پراکنش تولید شده می‌توانند به شناسایی مکان‌های حضور گونه‌های پرندگان در معرض تهدید و انقراض، شناسایی نقاط داغ غنای زیستی پرندگان و بهبود تلاش‌های حفاظتی در راستای حفاظت از زیستگاه‌ها و جمعیت‌های پرندگان کمک کنند (Amini Tehrani *et al*., 2020). مدل‌های پراکنش گونه‌ای (SDMs)[1] کاربردهای وسیعی از جمله بررسی فرضیه‌های بوم‌شناختی و تکاملی، کمک در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی گونه‌های بومی و مهاجم، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و برنامه‌ریزی ذخیره‌گاه‌ها دارند (Guillera-Arroita *et al*., 2015; Franklin, 2023). امروزه، روش‌ها و الگوریتم‌های بسیاری برای مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای معرفی شده‌اند (Guisan *et al*., 2017; Valavi *et al*., 2022). از طرفی، روش‌های مختلف مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای، نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهند. بنابراین، انتخاب روش مدل‌سازی، می‌تواند اثر قابل توجهی بر عملکرد پیش‌بینی مدل داشته باشد. با این حال، هیچ یک از این روش‌ها به‌طور مداوم در عملکرد و در بین گونه‌ها، مناطق و برنامه‌های کاربردی برتر نیستند (Hallgren *et al*., 2019; Muscatello *et al*., 2021). در مطالعهٔ حاضر، با استفاده از سه مدل پراکنش گونه‌ای موجود در برنامهٔ والاس شامل BIOCLIM، MaxEnt و MaxNet، مدل‌سازی پراکنش جغرافیایی کبک دری خزری در ایران انجام شد.

روش‌شناسی پژوهش

محدودهٔ مطالعاتی: محدودهٔ مورد مطالعه، در برگیرندهٔ کشور ایران به‌وسعت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع می‌باشد (شکل ۱). ایران، به‌عنوان یک کشور کوهستانی و نیمه‌کوهستانی شناخته می‌شود (Babaeian *et al*., 2015) و بخش قابل توجهی از پراکنش جهانی کبک دری خزری را پوشش می‌دهد (Bird Life International, 2016; Ashrafzadeh and Nazarian, 2018). این گونه در گسترهٔ کشور ایران در رشته‌کوه‌های زاگرس، البرز، کپه‌داغ، آذربایجان و قفقاز پراکنش دارد (Bird Life International, 2016; Ashrafzadeh and Nazarian, 2018; Ashrafzadeh *et al*., 2018). این گونه در طبقهٔ گونه‌های در خطر انقراض سازمان حفاظت محیط‌زیست طبقه‌بندی شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نقاط حضور کبک دری خزری (*T. caspius*) در ایران

[1]Species Distribution Models

جمع‌آوری داده‌های حضور: تعداد ۳۱۴ دادهٔ حضور کبک دری خزری با استفاده از منابع مختلف شامل بررسی‌های میدانی، بررسی پیشینه و مستندات موجود در ادارهٔ کل حفاظت محیط‌زیست استان‌های مختلف و مستندات و داده‌های منتشر شده در پژوهش‌های معتبر پیشین گردآوری شد. بازدیدهای میدانی در بخشی از مناطق حضور کبک دری در استان‌های مختلف توسط اعضای تیم مطالعهٔ حاضر به انجام رسیده است. در این پژوهش، تنها داده‌هایی مورد استفاده قرار گرفتند که دارای مختصات جغرافیایی معین بوده و توسط تیم پژوهشی مطالعهٔ حاضر، پرنده‌شناسان و متخصصان حیات وحش به تأیید رسیدند. بنابراین، داده‌هایی که در ارزیابی‌ها مورد تأیید قرار نگرفتند از تحلیل‌ها حذف شدند. به‌منظور بررسی خودهمبستگی مکانی نقاط حضور گونه از اطلاعات مربوط به گسترهٔ خانگی گونه‌های مشابه استفاده شد. برای گونه‌های مختلف ماکیان‌سانان، یک گسترهٔ خانگی با اندازهٔ دو کیلومتر مربع در نظر گرفته شده است (Bagaria *et al*., 2021). بنابراین، موقعیت‌های حضور در فاصلهٔ کمتر از دو کیلومتر با استفاده از شیوهٔ ترقیق مکانی داده‌های حضور در جعبهٔ ابزار SDM (Brown, 2014) حذف شدند. در نهایت، تعداد ۲۶۲ نقطه حضور کبک دری خزری به‌منظور مدل‌سازی استفاده شد (شکل ۱).

متغیرهای محیطی: به‌منظور شناسایی مهمترین متغیرهای محیطی مورد استفاده در مدل‌سازی پراکنش کبک دری خزری، پژوهش های پیشین مرتبط مورد بررسی قرار گرفت (Wang *et al*., 2008; Linshan *et al*., 2017; Yao *et al*., 2017; Ashrafzadeh and Nazarian, 2018; Bellis, 2018; Ashrafzadeh *et al*., 2018; Hof and Allen, 2019; Li, 2019; Hu *et al*., 2021; Habibzadeh *et al*., 2021; Bagaria *et al*., 2021; Yildizbaş, 2022). تعداد ۱۹ متغیر اقلیمی با توان تفکیک ۳۰ ثانیه (تقریباً یک کیلومتر مربع) و برای مقطع زمانی حال حاضر (۲۰۰۰-۱۹۷۰) از پایگاه داده‌ای اقلیم جهانی (https://www.worldclim.org) استخراج شد. لایهٔ ناهمواری زمین یا زبری سطح زمین، ردپای انسان، ارتفاع، جهت شیب و NDVI از دیگر متغیرهای مورد استفاده بودند. متغیر ناهمواری زمین، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر ناهمگونی توپوگرافی، بر مبنای انحراف معیار لایهٔ رقومی ارتفاع محاسبه شد. لایهٔ ردپای انسان نیز به‌عنوان یک معیار از تأثیرگذاری انسان بر زیستگاه‌ها استفاده شد (Venter *et al*., 2016). این لایه با استفاده از داده‌های تراکم جمعیت انسانی، دسترسی‌پذیری انسان و وجود زیرساخت‌هایی مانند جاده‌ها و تغییر کاربری سرزمین تهیه شده است. لایهٔ رقومی ارتفاع (DEM)، با توان تفکیک ۳۰ ثانیه از پایگاه داده‌ای اقلیم جهانی استخراج شد. لایهٔ جهت شیب نیز با استفاده از مدل رقومی ارتفاع تولید شد. تمامی لایه‌های محیطی تهیه‌شده، از نظر تعداد پیکسل، محدوده و سیستم تصویر در محیط سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی یکسان‌سازی شدند. به‌منظور بررسی همبستگی بین متغیرها، از ضریب همبستگی پیرسون در محیط R استفاده و متغیرهای با همبستگی بیش از ۰/۷ از تحلیل‌های بعدی حذف شدند. در نهایت، تعداد ۱۲ متغیر شامل میانگین دمای سالیانه (Bio1)، میانگین دامنهٔ دمای روزانه (Bio2)، شاخص هم‌دمایی (Bio3)، دامنهٔ سالیانه دما (Bio7)، بارش سالیانه (Bio12)، تغییرات فصلی بارندگی (Bio15)، مجموع بارندگی کم‌بارش ترین سه‌ماههٔ متوالی سال (Bio17)، ارتفاع، ناهمواری زمین، ردپای انسان، جهت شیب و NDVI در مدل‌سازی استفاده شدند (جدول ۱).

اجرای مدل: مدل‌های پراکنش گونه‌ای را می‌توان با نرم‌افزارهای آماری (مانند SPSS، Statistica)، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (مانند ArcGIS، QGIS، DIVA-GIS) یا با نرم‌افزارهای رابط کاربری گرافیکی اختصاصی (GUI[2]) (مانند OpenModeller، ShinyBiomod، ModEco، MaxEnt، Biomapper و Wallace) محاسبه کرد. زبان R، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای متن باز محسوب می‌شود که اغلب برنامه‌های کاربردی (بسته‌ها) را در حال حاضر برای مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای در دسترس قرار داده است. در حال حاضر، بسته‌های متعددی برای محاسبهٔ مدل‌های پراکنش گونه‌ای با الگوریتم‌های مختلف، مقایسهٔ آشیان گونه‌ها و مدل‌های آشیان، دریافت و آماده‌سازی نقاط حضور گونه‌ها و داده‌های محیطی مرتبط و ارزیابی مدل‌ها وجود دارد. از جمله بسته‌های جدید در این خصوص، بستهٔ والاس (Wallace) است (Sillero *et al*., 2023)، که به زبان R نوشته شده و یک رابط کاربری گرافیکی (GUI) ارائه می‌کند (Kass *et al*., 2023). والاس، یک پلتفرم است که کاربر را از طریق یک فرآیند مدل‌سازی کامل راهنمایی نموده، انتخاب پارامترها را ساده و شفاف می‌کند و از دریافت داده تا ترسیم پیش‌بینی‌های مدل بر روی یک نقشهٔ تعاملی را میسر می‌کند (Sillero *et al*., 2023).

[2]Graphical User Interface

جدول ۱- توصیف متغیرهای محیطی مورد استفاده در مدل‌سازی

نمایه متغیر	توصیف	منبع
Bio1	میانگین دمای سالیانه	https://www.worldclim.org
Bio2	میانگین دامنهٔ دمای روزانه	https://www.worldclim.org
Bio3	شاخص هم‌دمایی	https://www.worldclim.org
Bio7	دامنهٔ سالانه دما	https://www.worldclim.org
Bio12	مجموع بارندگی سالانه	https://www.worldclim.org
Bio15	تغییرات فصلی بارندگی	https://www.worldclim.org
Bio17	مجموع بارندگی کم‌بارش‌ترین سه‌ماهه متوالی سال	https://www.worldclim.org
Dem	دامنهٔ ارتفاعی	https://www.worldclim.org
Topographic roughness	ناهمواری زمین	Dem
Human footprint	ردپای انسان	http://sedac.ciesin.columbia.edu/wildareas
Aspect	جهت شیب	Dem
NDVI	شاخص تفاضل نرمال‌شده بازتابش سطحی	https://modis.gsfc.nasa.gov

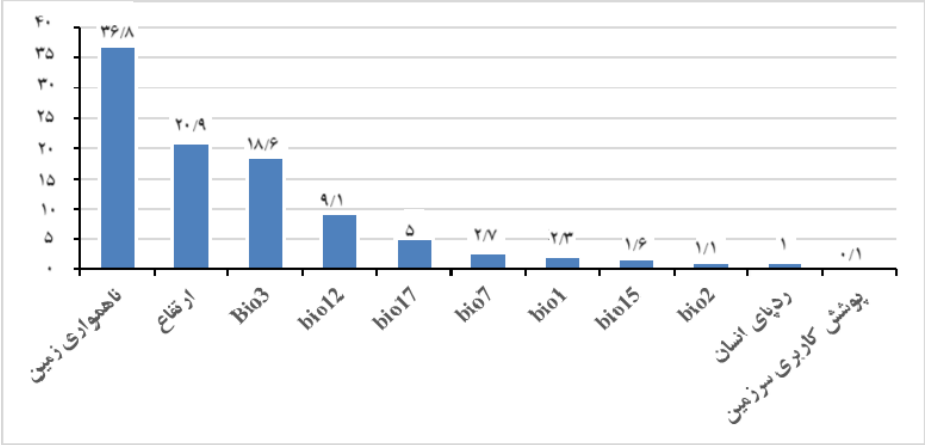
از ویژگی‌های والاس می‌توان به قابلیت دسترسی آزاد، بسط‌پذیری، تحلیل‌های وسیع، انعطاف‌پذیری، تعاملی بودن و تکرارپذیری آن اشاره نمود. همچنین، با توجه به ویژگی‌های اشاره شده، والاس به‌عنوان یک منبع ایده‌آل برای آموزش نیز محسوب می‌شود. لازم به ذکر است که از زمان انتشار والاس، این برنامه در سطح جهانی به‌طور گسترده در پژوهش‌های علمی، دوره‌های دانشگاهی و توسط متخصصان در بخش‌های دولتی و سازمان‌های خصوصی استفاده شده است (Kass *et al*., 2023).

به‌منظور مدل‌سازی پراکنش کبک دری خزری از رویکرد مقایسهٔ سه مدل MaxEnt، MaxNet وBioclim توسط بستهٔ مدل سازی بوم‌شناختی والاس (Wallace v2.0) (Kass *et al*., 2023) در محیط R نسخهٔ 4.3.1 (R Development Core Team, 2014) استفاده شد. لازم به توضیح است که MaxNet رویکرد جدیدی از روش MaxEnt است. این روش با انگیزه درک جدیدی از پیوند بین MaxEnt و فرآیند نقطه‌ای پوآسون ایجاد شده و از رگرسیون لجستیک وزنی بی‌نهایت (infinitely-weighted logistic regression) استفاده می‌کند. MaxNet یک بستهٔ نرم‌افزاری در محیط R است که برای برازش مدل‌های پراکنش گونه‌ای MaxEnt به‌جای برون‌سپاری به برنامهٔ Maxent java از بستهٔ R glmnet استفاده می‌کند. هر دو مدل MaxEnt و MaxNet از روش منظم‌سازی (Regularization) نوع L1 استفاده می‌کنند (Valavi *et al*., 2022). داده‌های حضور گونه به‌صورت فایل با فرمت CSV وارد مدل شدند. همچنین لایه‌های محیطی منتخب با فرمت ASCII وارد مدل‌ها شدند. تعداد نقاط پس‌زمینه، جهت دو مدل MaxEnt و MaxNet روی ۱۰۰۰۰ تنظیم شد. سه مدل MaxEnt، MaxNet وBioclim با پارامترهای L، LQ و H و ضریب تنظیم ۰/۵ اجرا شدند. جهت واسنجی مدل‌ها، ۸۰ درصد نقاط حضور به‌عنـوان داده‌های تعلیمی و ۲۰ درصد نقاط باقیمانده برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شدند. بستهٔ مدل‌سازی بوم‌شناختی والاس این قابلیت را دارد که برای هر مدل، نقشهٔ پیوسته و نقشهٔ باینری جهت تعیین زیستگاه مناسب و نامناسب گونه را با توجه به مناسب‌ترین عدد شاخص AUC، تولید نماید (Kass *et al*., 2023). برای ارزیابی مدل‌ها نیز از معیار سطح زیر منحنی (AUC) و آمارهٔ TSS[3] استفاده شد. مقادیر AUC، عددی بین ۰ تا ۱ است، که اعداد نزدیک‌تر به ۱ نشان‌دهندهٔ عملکرد بهتر مدل هستند (Hijmans *et al*., 2005). شاخص آمارهٔ TSS نیز دامنه‌ای بین ۱+ تا ۱− دارد و هرچه عدد حاصل به ۱+ نزدیک‌تر، توانایی مدل مناسب‌تر و هرچه به صفر یا کمتر از آن میل پیدا کند، دقت مدل کاهش می‌یابد. بنابراین، مقادیر TSS کمتر از ۰/۴، نشان‌دهندهٔ توانایی ضعیف مدل در پیش‌بینی، ۰/۸− ۰/۴ خوب و بالای ۰/۸، عالی می‌باشد (Allouche *et al*., 2006).

[3]The true skill statistic

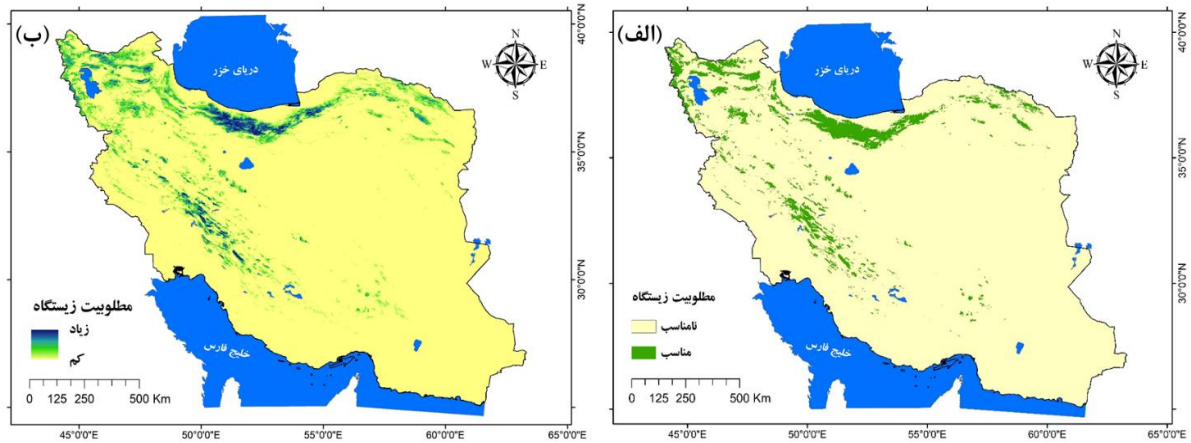
یافته‌های پژوهش

به‌منظور ارزیابی مدل پیش‌بینی حاصل، از روش تحلیل سطح زیر منحنی (AUC) و آمارهٔ TSS استفاده شد. براساس یافته‌ها، مقادیر AUC (>۰/۹۶) برای هر سه مدل عالی به‌دست آمد. مدل‌های MaxEnt و MaxNet هر دو با عدد ۰/۹۸ دارای بالاترین ارزش بودند. همچنین، ارزش معیار TSS برای مدل‌های مورد بررسی بالاتر از ۰/۸۰۳ محاسبه شد. دو مدل MaxEnt و MaxNet هر دو با عدد ۰/۸۱۱ دارای بالاترین ارزش بودند. چهار متغیر ناهمواری سطح زمین (۳۶/۸ درصد)، ارتفاع از سطح دریا (۲۰/۹ درصد)، Bio3 (۱۸/۶ درصد) و Bio12 (۹/۱ درصد)، در مجموع با ۸۵/۴ درصد به‌ترتیب بیشترین اهمیت را در فراهم نمودن شرایط زیستی جهت حضور کبک دری خزری در سطح کشور داشتند (شکل ۲). همچنین، متغیرهای پوشش کاربری سرزمین، ردپای انسان و Bio2 به‌ترتیب کمترین اهمیت را در مدل‌سازی این گونه داشتند.

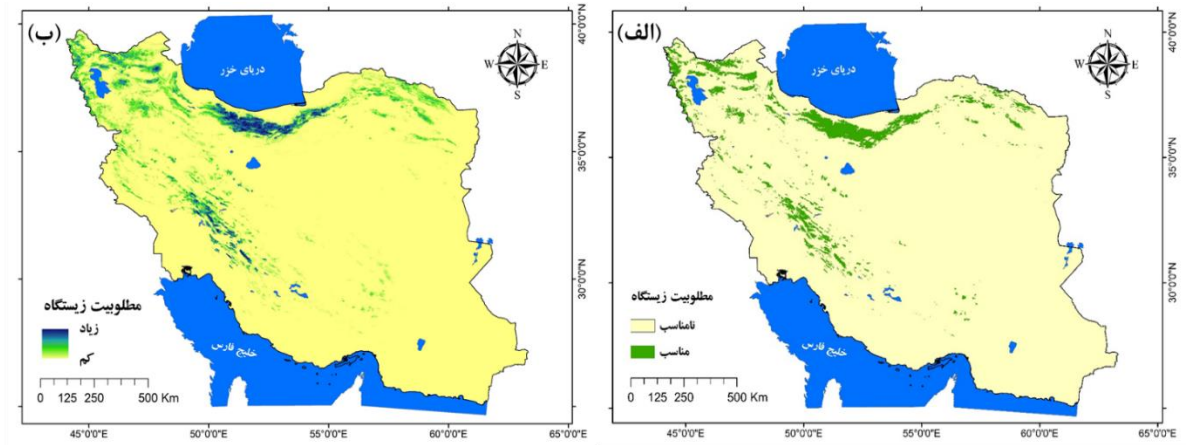


شکل ۲- درصد اهمیت متغیرها در مدل‌سازی

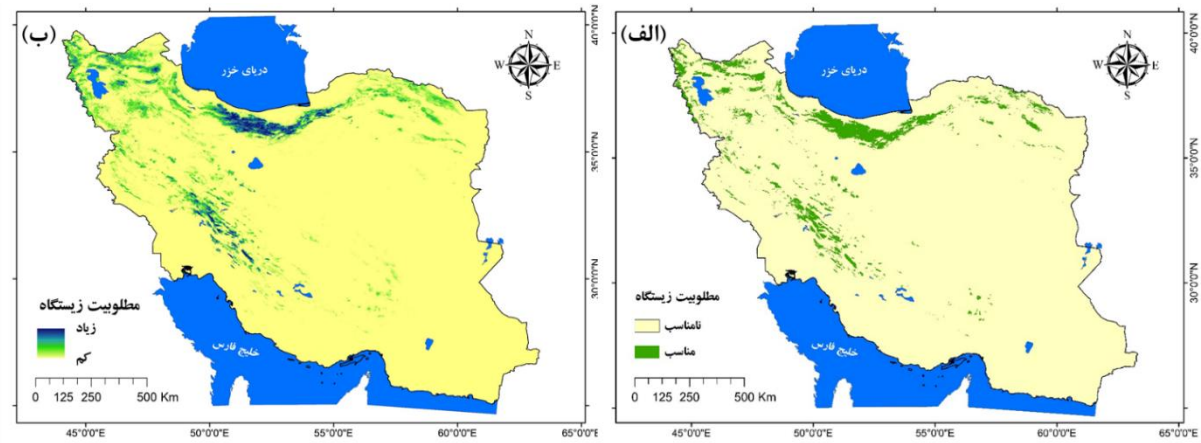
با توجه به یافته‌های حاصل از مدل‌های Bioclim، MaxNet و MaxEnt به‌ترتیب برابر ۹۱۱۴۱/۵۱ کیلـومتر مربع (حدود ۵/۵ درصد)، ۸۰۱۱۰/۹۶ کیلـومتر مربع (حدود ۴/۸ درصد) و ۷۶۵۸۱/۸۹ کیلـومتر مربع (حدود ۴/۶ درصد) از گسترهٔ جغرافیایی کشور به‌عنوان زیستگاه مطلوب کبک دری خزری شناسایی شـد (شکل‌های ۳ تا ۵). بر این اساس، گسترهٔ زیستگاهی کبک دری خزری از رشته‌کوه‌های کپه‌داغ در شمال شرق کشور تا رشته‌کوه‌های البرز در شمال، رشته‌کوه‌های آذربایجان و قفقاز در شمال غرب و رشته‌کوه‌های زاگرس در غرب کشور قابل مشاهده است. براساس یافته‌های حاصل از سه مدل، بزرگترین لکهٔ زیستگاهی یکپارچهٔ کبک دری در رشته‌کوه‌های البرز با مساحت متوسط حدود ۲۶۲۳۵ کیلومتر مربع محاسبه شد، که در برگیرندهٔ بخش‌هایی از استان‌های گیلان، قزوین، البرز، تهران، سمنان، مازندران و گلستان است. همچنین، بزرگترین لکهٔ زیستگاهی یکپارچه در گسترهٔ زاگرس مرکزی، با مساحت متوسط حدود ۳۶۶۷ کیلومتر مربع برآورد شد. علاوه بر این، بزرگترین لکهٔ زیستگاهی یکپارچه در شمال غربی کشور با مساحتی برابر ۳۱۵۱ کیلومتر مربع پیش‌بینی شد.



شکل ۳- زیستگاه‌های مطلوب کبک دری خزری (*T. caspius*) براساس مدل Bioclim. الف) نقشهٔ باینری و ب) نقشهٔ پیوسته



شکل ٤- زیستگاه‌های مطلوب کبک دری خزری (*T. caspius*) براساس مدل MaxNet. الف) نقشهٔ باینری و ب) نقشهٔ پیوسته



شکل ٥- زیستگاه‌های مطلوب کبک دری خزری (*T. caspius*) براساس مدل MaxEnt. الف) نقشهٔ باینری و ب) نقشهٔ پیوسته

بحث و نتیجه‌گیری

پیش‌بینی مطلوبیت زیستگاه براساس اطلاعات مربوط به نقاط حضور گونه‌ها و داده‌های محیطی، ابزار جدیدی را در راستای مدیریت و حفاظت از گونه‌های بومی شاخص در سطح کلان فراهم می‌سازد (Guisan *et al*., 2013). در پژوهش حاضر، زیستگاه‌های مطلوب کبک دری خزری در گسترهٔ کشور ایران با استفاده از سه مدل Bioclim، MaxEnt و MaxNet با بهره‌گیری از بستهٔ والاس در محیط R شناسایی شد. براساس نتایج حاصل از سه مدل، در حدود ۴/۶ تا ۵/۵ درصد از سطح کشور می‌تواند به‌عنوان زیستگاه مطلوب کبک دری خزری در نظر گرفته شود. محدودهٔ تعیین شده به‌عنوان آشیان بوم‌شناختی پتانسیل گونه محسوب می شود که بزرگ‌تر از آشیان بوم‌شناختی واقعی گونه است. در پژوهش حاضر، مناطقی با شرایط زیر به‌عنوان زیستگاه بالقوهٔ گونه پیش‌بینی شدند: ۱) مناطقی که برای کبک دری خزری مطلوب هستند و این گونه نیز در آنجا حضور دارد؛ ۲) مناطقی که برای کبک دری خزری مطلوب هستند، اما در اثر عوامل مختلفی، این گونه در این مناطق حذف شده است و ۳) مناطق مطلوبی که کبک دری خزری توانایی حضور و انتشار در آنجا نداشته است (Peterson *et al*., 2012). این گونه از کوه‌های کپه‌داغ در شمال شرق کشور تا کوه‌های البرز در شمال، آذربایجان و قفقاز در شمال غرب و زاگرس در غرب پراکنش دارد. محدودهٔ زیستگاهی مطلوب کبک دری به نسبت گسترده است، اما عدم پیوستگی یا تکه‌تکه بودن زیستگاه‌ها می‌تواند به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی در حفاظت از کبک‌های دری در نظر گرفته شود. بررسی درجهٔ ارتباط بین لکه‌های زیستگاهی، یکی از مهمترین زمینه‌هایی است که پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد.

الگوریتم بی‌نظمی بیشینه، مدلی است که به‌طور گسترده برای مطالعهٔ گسترهٔ پراکنش گونه‌های مختلف استفاده شده و دقت پیش‌بینی خوبی را نشان داده است (Kumar and Stohlgren, 2009; Khanum *et al*., 2013; Remya *et al*., 2015).

همچنین، هنگامی که تعداد نقاط حضور گونه جهت ورود به مدل اندک است، مدل MaxEnt به‌علت کارآیی بالای آن توصیه می شود (Radomski *et al*., 2022). در مطالعه‌ای، Valavi و همکاران (۲۰۲۲) عملکرد پیش‌بینی مدل‌های مختلف موجود در خصوص مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای را بررسی نمودند و در مجموع نشان دادند که تکنیک‌های ناپارامتریک با قابلیت کنترل پیچیدگی مدل از روش‌های رگرسیون سنتی بهتر عمل می‌کنند. همچنین، مدل‌های MaxEnt و MaxNet در میان مدل‌های با عملکرد برتر قرار گرفتند.

در پژوهش حاضر متغیرهای ناهمواری سطح زمین (۳۶/۸ درصد)، ارتفاع (۲۰/۹ درصد)، شاخص هم‌دمایی (۱۸/۶ درصد) و میانگین دمای سالیانه (۹/۱ درصد) بیشترین اهمیت را در مدل نشان دادند. پژوهش‌های مختلف تأکید دارند که ارتفاع و ناهمواری زمین از مهمترین متغیرهای محیطی تعیین‌کنندهٔ مطلوبیت زیستگاه گونه‌های مختلف کبک دری هستند (Yao *et al*., 2021). این نتیجه تأکید دارد که زیستگاه‌های مرتفع به‌طور جدی توسط کبک‌های دری ترجیح داده می‌شوند (Yao *et al*., 2021). کبک‌های دری پرندگان شاخص مناطق کوهستانی مرتفع هستند که به‌صورت فصلی تا حدودی در امتداد شیب ارتفاعی جابجا می‌شوند (Yao *et al*., 2021). کبک‌های دری و گونه‌های مشابه در مناطق کوهستانی، در زمستان به ارتفاعات پایین‌تر در نزدیکی خط رویش درخت و در دورهٔ تولیدمثلی تابستان به ارتفاعات بالاتر در علفزارهای آلپی یا نزدیک خط برف حرکت می‌کنند، زیرا منابع غذایی فراوان‌تر است (Zheng, 2016; Yao *et al*., 2017). براساس مشاهدات و نقاط حضور ثبت شده، کبک دری خزری در گسترهٔ ارتفاعی حدود ۱۷۰۰ متر تا بیش از ۴۰۰۰ متر مشاهده شده است. این پرنده در توندرای آلپی و مناطق پیرامون آن، در گسترهٔ ارتفاعی ۲۴۰۰ تا ۴۰۰۰ متر و گاهی مواقع تا ارتفاع ۱۸۰۰ متر مشاهده می‌شود (Tucker and Heath, 1994). براساس پژوهش‌های مختلف، آشیانه‌های کبک دری خزری در شیب‌های تند در زیر صخره‌ها، لبهٔ صخره‌های مرتفع، در بین سنگ‌ها یا دره‌ها و پرتگاه‌های همراه با لکه‌هایی از برف و پوشش علفی مشاهده می‌شود (McGowan, 1994; Porter and Aspinall, 2013, Bird Life International, 2016). در این پژوهش، ناهمواری زمین با بیشترین اهمیت جایگشت نشان می‌دهد که این گونه وابستگی بسیار زیادی به مناطق ناهموار و کوهستانی دارد و به‌ندرت تا حد رویش درختان پایین می‌آید (Porter and Aspinall, 2013). براساس Yao و همکاران (۲۰۲۱)، ارتفاع، پوشش گیاهی، جهت و شیب در شناسایی زیستگاه‌های مطلوب کبک دری تبتی مؤثر هستند. کبک‌های دری از گیاهان، عمدتاً ریشه‌ها، غده‌ها و ساقه‌های زیرزمینی، و برخی بی‌مهرگان کوچک تغذیه می‌کنند (Yao *et al*., 2017). علفزارهای آلپی منابع غذایی مناسبی را فراهم می‌کنند و دامنه‌های آفتاب‌گیر در مقایسه با دامنه‌های سایه‌دار دارای پوشش گیاهی فراوان‌تری هستند که در تأمین منابع غذایی کمک بیشتری می‌کنند (Pu *et al*., 2011; Yao *et al*., 2017). پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی مدل‌سازی زیستگاه‌های مطلوب کبک دری، متغیرهای ذکر شده مورد توجه قرار گیرند. در مطالعهٔ Yao و همکاران (۲۰۲۱) به این نکته اشاره شده است که کبک دری تبتی جثهٔ بزرگتری نسبت به کبک برفی (*Lerwa lerwa*) دارد، که در مقایسه می‌تواند منجر به جابجایی کبک دری تبتی در گستره‌های بزرگتری شود. برخی مطالعات اخیر پیشنهاد داشته‌اند که تفاوت‌ها در اندازهٔ بدن در میان گونه‌های پرندگان هم‌جا[4] می‌تواند حضور هم‌زیست آنها را تسهیل کند (Leyequién *et al*., 2007). پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی به موضوع بررسی ارتباط زیستگاهی بین کبک دری خزری با گونه‌های پرندگان هم‌زیست پرداخته شود. An و همکاران (۲۰۰۹) پیشنهاد داده‌اند که گسترهٔ جغرافیایی حال حاضر کبک دری تبتی تحت تأثیر آخرین یخبندان‌های بزرگ–مقیاس در فلات تبت در پلیستوسن و پیش از آن بوده است. گسترش جمعیت از کوه‌های کیلیان (Qilian)، منطقه‌ای که جمعیت کبک دری تبتی دارای تنوع ژنتیکی بالایی است، رخ داده است (An *et al*., 2009). یک پژوهش اخیر اشاره دارد که جنس *Tetraogallus* یکی از خوشه‌های دربرگیرنده جنس‌های مرتبط است که ممکن است در آفریقا یا به‌طور گسترده در سراسر توده‌های خشکی اوراسیا و آفریقا به‌وجود آمده باشد. پنج عضو دگرجای[5] این جنس در حال حاضر در پالئارکتیک از قفقاز و خزر گرفته تا مغولستان و سیبری پراکنش دارند (Yao *et al*., 2021). بررسی اثرات آخرین یخبندان‌های بزرگ بر پراکنش جغرافیایی کبک دری خزری و مطالعهٔ تنوع ژنتیکی جمعیت‌های این گونه از اهمیت بالایی در حفاظت از این گونه شاخص برخوردارند.

[4]Sympatric

[5]Allopatric

پژوهش‌ها نشان می‌دهد گونه‌هایی که با شرایط زندگی در ارتفاعات بالا سازگار شده‌اند با تغییر دما و رژیم‌های بارشی در خطر تهدید قرار می‌گیرند (Bellis, 2018). در مقیاس کلان، تغییرات در بارش و دما به‌طور عمده مطلوبیت زیستگاه کبک‌های دری را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Yao *et al*., 2021). پژوهش‌های مختلف دریافتند که کبک‌های دری با شرایط سرد و سخت توندرای آلپی سازش یافته‌اند (An *et al*., 2009; Yao *et al*., 2021). براساس پژوهش‌های پیشین (Bellis, 2018; Habibzadeh *et al*., 2021; Yildizbaş, 2022)، متغیرهای میانگین دمای سالیانه (Bio1)، تغییرات فصلی دما (Bio4)، حداکثر دمای گرم‌ترین ماه (Bio5)، حداقل دمای سردترین ماه (Bio6)، دامنهٔ سالیانهٔ دما (Bio7)، میانگین دمای پربارش‌ترین سه ماههٔ متوالی سال (Bio8)، میانگین دمای سردترین سه ماههٔ متوالی سال (Bio11)، مجموع بارندگی پربارش‌ترین ماه (Bio13)، مجموع بارندگی پربارش‌ترین سه ماههٔ متوالی سال (Bio16)، در میان مهم‌ترین متغیرهای اقلیمی مؤثر بر انتخاب زیستگاه کبک‌های دری و گونه های مشابه معرفی شده‌اند. براساس مطالعهٔ Ashrafzadeh و همکاران (۲۰۱۸)، بارش سالیانه (Bio12)، گسترهٔ دمای سالیانه (Bio7)، رد پای انسان، شیب و کاربری سرزمین به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای مشارکت‌کننده در مدل‌سازی زیستگاه‌های کبک دری خزری معرفی شدند.

یافته‌های پژوهش‌های مختلف تأکید دارند که در مدل‌سازی‌های پراکنش گونه‌ای به نیازمندهای حیاتی گونهٔ هدف و طیفی از مهمترین متغیرها توجه شود. به‌عنوان مثال، رقابت یکی از متغیرهای پیش‌بینی کنندهٔ مهم در تعیین پراکنش گونه‌ها به‌شمار می‌رود (Mpakairi *et al*., 2017). یافته‌های این پژوهش و مطالعات اخیر (Ashrafzadeh and Nazarian, 2018; Yao *et al*., 2021; Habibzadeh *et al*., 2021) نشان می‌دهند که استفاده از طیفی از متغیرها از جمله توپوگرافی، پوشش گیاهی، منابع غذایی، اقلیم، گونه‌های هم‌زیست و عوامل انسانی نقش مهمی در مدل‌سازی پراکنش کبک دری خزری و گونه‌های مشابه دارد.

References

Allouche, O., Tsoar, A., Kadmon, R., 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). Journal of Applied Ecology 43(6), 1223-1232.

Amini Tehrani, N., Naimi, B., Jaboyedoff, M., 2020. Toward community predictions: Multi-scale modelling of mountain breeding birds' habitat suitability, landscape preferences, and environmental drivers. Ecology and Evolution 10(12), 5544-5557.

An, B., Zhang, L., Browne, S., Liu, N., Ruan, L., Song, S., 2009. Phylogeography of Tibetan snowcock (*Tetraogallus tibetanus*) in Qinghai–Tibetan Plateau. Molecular Phylogenetics and Evolution 50(3), 526-533.

Ashrafzadeh, M. R., Habibzadeh, N., Ashrafi, S., 2018. Effects of climatic change on the geographical distribution of Caspian Snowcock (*Tetraogallus caspius* Gmelin, 1784) in Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran. Iranian Journal of Applied Ecology 7(3), 39-50. (In Persian)

Ashrafzadeh, M.R., Nazarian, A.R., 2018. Habitat suitability modelling for the Caspian Snowcock (*Tetraogallus caspius*), as a typical high-montane species. Journal of Natural Environment 70(4), 745-756. (In Persian)

Babaeian, I., Modirian, R., Karimian, M. and Zarghami, M., 2015. Simulation of climate change in Iran during 2071-2100 using PRECIS regional climate modelling system. Desert 20, 123-134.

Bagaria, P., Thapa, A., Sharma, L. K., Joshi, B. D., Singh, H., Sharma, C. M., Thakur, M., Chandra, K., 2021. Distribution modelling and climate change risk assessment strategy for rare Himalayan Galliformes species using archetypal data abundant cohorts for adaptation planning. Climate Risk Management 31, 100264.

Bellis, J.M., 2018. Conserving temperate montane birds under climate change: an assessment of potential management options (Doctoral dissertation, Liverpool John Moores University (United Kingdom).

Bird Life International. 2016. Bird species distribution maps of the word. Version 6.0. Available at http://dataxone.birdlife.org/species/requestdis.

Brown, J.L., 2014. SDMtoolbox: a python-based GIS toolkit for landscape genetic, biogeographic and species distribution model analyses. Methods in Ecology and Evolution 5(7), 694-700.

Esfanjani, J., Ghorbani, A., Chahouki, M.A.Z., 2018. MaxEnt Modeling for Predicting Impacts of Environmental Factors on the Potential Distribution of *Artemisia aucheri* and *Bromus tomentellus-Festuca ovina* in Iran. Polish Journal of Environmental Studies 27(3), 1041-1047.

Franklin, J., 2023. Species distribution modelling supports the study of past, present and future biogeographies. Journal of Biogeography 50(9), 1533-1545.
Guillera-Arroita, G., Lahoz-Monfort, J.J., Elith, J., Gordon, A., Kujala, H., Lentini, P.E., McCarthy, M.A., Tingley, R., Wintle, B.A., 2015. Is my species distribution model fit for purpose? Matching data and models to applications. Global Ecology and Biogeography 24(3), 276-292.
Guisan, A., Thuiller, W., Zimmermann, N.E., 2017. Habitat suitability and distribution models: with applications in R. Cambridge University Press.
Guisan, A., Tingley, R., Baumgartner, J.B., Naujokaitis-Lewis, I., Sutcliffe, P.R., Tulloch, A.I., Regan, T.J., Brotons, L., McDonald-Madden, E., Mantyka-Pringle, C., Martin, T.G., 2013. Predicting species distributions for conservation decisions. Ecology Letters 16(12), 1424-1435.
Habibzadeh, N., Ghoddousi, A., Bleyhl, B., Kuemmerle, T., 2021. Rear-edge populations are important for understanding climate change risk and adaptation potential of threatened species. Conservation Science and Practice 3(5), e375.
Hallgren, W., Santana, F., Low-Choy, S., Zhao, Y., Mackey, B., 2019. Species distribution models can be highly sensitive to algorithm configuration. Ecological Modelling 408(1), 108719.
Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society 25(15), 1965-1978.
Hof, A.R., Allen, A.M., 2019. An uncertain future for the endemic Galliformes of the Caucasus. Science of the Total Environment 651(1), 725-735.
Hu, H., Wei, Y., Wang, W., Wang, C., 2021. The Influence of climate change on three dominant alpine species under different scenarios on the Qinghai–Tibetan Plateau. Diversity 13(12), 682.
Kass, J.M., Pinilla-Buitrago, G.E., Paz, A., Johnson, B.A., Grisales-Betancur, V., Meenan, S.I., Attali, D., Broennimann, O., Galante, P.J., Maitner, B.S., Owens, H.L., 2023. Wallace 2: a shiny app for modeling species niches and distributions redesigned to facilitate expansion via module contributions. Ecography 2023(3), e06547.
Khanum, R., Mumtaz, A.S., Kumar, S., 2013. Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using Maxent modeling. Acta Oecologica 49(1), 23-31.
Kumar, S., Stohlgren, T.J., 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. Journal of Ecology and natural Environment 1(4), 94-98.
Lamsal, P., Kumar, L., Aryal, A., Atreya, K., 2018. Invasive alien plant species dynamics in the Himalayan region under climate change. Ambio 47(6), 697-710.
Leyequién, E., de Boer, W.F., Cleef, A., 2007. Influence of body size on coexistence of bird species. Ecological Research 22(1), 735-741.
Li, R., 2019. Protecting rare and endangered species under climate change on the Qinghai Plateau, China. Ecology and Evolution 9(1), 427-436.
Linshan, L., Zhilong, Z., Yili, Z., Xue, W., 2017. Using maxent model to predict suitable habitat changes for key protected species in Koshi Basin, Central Himalayas. Journal of Resources and Ecology 8(1), 77-87.
Marmion, M., Parviainen, M., Luoto, M., Heikkinen, R.K., Thuiller, W., 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. Diversity and Distributions 15(1), 59-69.
McCullagh, P., 1984. Generalized linear models. European Journal of Operational Research 16(3), 285-292.
McGowan, P.J.K., 1994. Caspian Snowcock (*Tetraogallus caspius*). In: del Hoyo, J., Elliott, A., Sargatal, J., Christie, D.A., de Juana, E. (Eds), Handbook of the Birds of the World Alive. Lynx Edicions, Barcelona
Mpakairi, K.S., Ndaimani, H., Tagwireyi, P., Gara, T.W., Zvidzai, M., Madhlamoto, D., 2017. Missing in action: Species competition is a neglected predictor variable in species distribution modelling. PLoS One 12(7), e0181088.
Murray, H.J., Green, E.J., Williams, D.R., Burfield, I.J., Brooke, M.D.L., 2015. Is research effort associated with the conservation status of European bird species?. Endangered Species Research, 27(3), 193-206.
Muscatello, A., Elith, J., Kujala. H., 2021. How decisions about fitting species distribution models affect conservation outcomes. Conservation Biology 35(4), 1309-1320.
Peterson A.T. Soberón J. Pearson R.G. Anderson R.P. Martínez-Meyer E. Nakamura M. and Araújo M.B., 2012. Ecological Niches and Geographic Distributions (MPB-49), Princeton: Princeton University Press. https://doi.org/10.1515/9781400840670.
Porter, R., Aspinall, S., 2013. Birds of the Middle East. Bloomsbury Publishing.
Pu, B., Zhaxi, L., La, D., Sang, B., 2011. Study on behavior and feeding site selection of Tibetan Snowcock (*Tetraogallus tibetanus*) during the winter. Journal of Tibet University 26(1), 1-6.

Qin, A., Liu, B., Guo, Q., Bussmann, R. W., Ma, F., Jian, Z., Xu, G., 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 and Conservation 10(1), 139-146.

R Development Core Team, 2014. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.

Radomski, T., Beamer, D., Babineau, A., Wilson, C., Pechmann, J., Kozak, K.H., 2022. Finding what you don't know: Testing SDM methods for poorly known species. Diversity and Distributions 28(9), 1769-1780.

Regmi, S., Sharma, H.P., 2023. Himalayan Snowcock (*Tetraogallus himalayensis*) in Dhorpatan Hunting Reserve, Nepal. Banko Janakari 33(1), 60-64.

Remya, K., Ramachandran, A., Jayakumar, A.S., 2015. Predicting the current and future suitable habitat distribution of *Myristica dactyloides* Gaertn. using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India. Ecological Engineering 82(1), 184-188.

Sillero, N., Campos, J.C., Arenas-Castro, S., Barbosa, A.M., 2023. A curated list of R packages for ecological niche modelling. Ecological Modelling 476(1), 110242.

Tucker, G.M., Heath, M.F., 1994. Birds in Europe: their conservation statusø Cambridge. UK: BirdLife International (BirdLife Conservation Series No. 30).

Valavi, R., Guillera-Arroita, G., Lahoz-Monfort, J.J., Elith, J., 2022. Predictive performance of presence only species distribution models: a benchmark study with reproducible code. Ecological Monographs 92(1), p.e01486.

Venter, O., Sanderson, E.W., Magrach, A., Allan, J.R., Beher, J., Jones, K.R., Possingham, H.P., Laurance, W.F., Wood, P., Fekete, B.M., Levy, M.A., 2016. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. Nature Communications 7(1), 12558.

Wang, W., Ren, G., He, Y., Zhu, J., 2008. Habitat degradation and conservation status assessment of Gallinaceous birds in the Trans-Himalayas, China. The Journal of Wildlife Management 72(6), 1335-1341.

Yao, H., Davison, G., Wang, N., Ding, C., Wang, Y., 2017. Post-breeding habitat association and occurrence of the Snow Partridge (*Lerwa lerwa*) on the Qinghai-Tibetan Plateau, west central China. Avian Research 8(1), 1-14.

Yao, H., Wang, P., Davison, G., Wang, Y., McGowan, P.J., Wang, N., Xu, J., 2021. How do Snow Partridge (*Lerwa lerwa*) and Tibetan Snowcock (*Tetraogallus tibetanus*) coexist in sympatry under high-elevation conditions on the Qinghai–Tibetan Plateau?. Ecology and Evolution 11(24), 18331-18341.

Yıldızbas, M., 2022. Investigating the responses of alpine species Caspian Snowcock (Tetraogallus caspius gmelin, 1784), Caucasian grouse (*Lyrurus mlokosiewiczi* taczanowski, 1875) and caucasian snowcock (*Tetraogallus caucasicus* pallas, 1811) to climate change by using Ecological niche modelling. Master of Science, 53 p.

Yousefi Qaleh Salimi, S., Gholamalifard, M., Ghasempouri, S.M. and Rahbarizadeh, A., 2024. Habitat Suitability Modeling of Wild Goat (*Capra Aegagrus*) and Caspian Snowcock (*Tetraogallus Caspius*) in the Central Northern Alborz Protected Area Based on the Multi-Criteria Evaluation Procedure (MCE). Environment and Interdisciplinary Development 8(82), 1-16.

Zheng, G.M., 2016. Chinese pheasant. Beijing Science Press.

Zheng, G.M., Zhang, Z.W., Ding, P., Ding, C.Q., Lu, X., Zhang, Y.Y., 2002. A Checklist on the Classification and Distribution of the Birds of the World.