Urmia University

Forest Research and Development

Vol. 11, Issue 1, 2025, 25-39

Research Paper

Investigating the influence of different environmental variables in modeling the distribution of yew (*Taxus baccata* L.) using the MAXENT model in Hyrcanian forests

Shadi Habibikilak[1], Seyed Jalil Alavi[*,2] and Omid Esmailzadeh[3]

1- PhD Student of Forest Management, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Mazandaran, Nour, I. R. Iran. (shadi_habibikilak@modares.ac.ir)
2,*- (Corresponding author) Associate Professor, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Mazandaran, Nour, I. R. Iran. (j.alavi@modares.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Mazandaran, Nour, I. R. Iran. (o.esmailzadeh@modares.ac.ir)

Received: 08 October 2024 Accepted: 29 December 2024

Extended Abstract

Background and Objective: Mapping species distributions is vital for evaluating regional conservation priorities, informing planning efforts, and guiding management actions. Species Distribution Models (SDMs) are analytical-statistical tools that use field occurrence data and environmental variables to estimate the geographic range of species. The yew tree (*Taxus baccata*), a relict and long-lived species, is among the most ecologically valuable trees in the Hyrcanian forests. Mapping its current distribution and identifying potential suitable habitats—as well as understanding the environmental drivers of its presence—are essential steps toward effective conservation of this endangered species. Among SDMs, the Maximum Entropy (MaxEnt) model is widely regarded as one of the most effective, particularly for presence-only data. It performs well even with a limited number of occurrence records (as few as five points) and is capable of modeling complex, non-linear relationships between predictors and species presence. Its simplicity and ease of use have made MaxEnt the most commonly applied SDM technique in ecological studies. The main goal of this research was to identify which environmental variables most influence the distribution of the yew tree.

Material and Methods: To achieve this, the primary habitats of yew in the Hyrcanian forests across Golestan, Mazandaran, and Gilan provinces were identified, and 1,614 presence points were recorded. Environmental variables included bioclimatic layers from the WorldClim database, soil parameters from SoilGrids, and topographic variables derived from a 1-km resolution Digital Elevation Model (DEM). The MaxEnt model was run under four scenarios: (M1) using only climatic variables; (M2) combining climatic and topographic variables; (M3) combining climatic and soil variables; and (M4) integrating all environmental variables while accounting for multicollinearity. Model tuning involved testing five regularization multipliers (0.5, 1, 2, 3, and 4) in combination with various feature classes (L, LQ, H, LQH, LQHP). Threshold-dependent evaluation metrics—particularly the omission rate—were used to identify the optimal parameter settings that maximized model performance. After selecting the best configuration, modeling was performed using the block method with 5,000 background points. Model accuracy was assessed

using the Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve (AUC), a widely used measure in SDM evaluation.

Results: Model 3 (climatic + soil variables) produced the lowest AUC, while Model 2 (climatic + topographic variables) improved performance slightly, raising the AUC from 0.93 to 0.94. The highest predictive accuracy (AUC = 0.96) was achieved by Model 4, which incorporated all environmental variables after removing multicollinearity—indicating that accounting for variable interdependence enhances model reliability. Among all variables, the most influential predictors of yew distribution were the bioclimatic variables bio2, bio3, bio7, and bio18, along with elevation and slope. Collectively, these six variables explained 90% of the variation in yew presence, while soil variables contributed just 1.02% to the model's predictive power.

Conclusion: This study enhances our understanding of how abiotic factors shape the distribution of the endangered yew tree and underscores the significance of specific environmental predictors. These insights can inform the delineation of potential habitats and support targeted conservation planning in the Hyrcanian forests of northern Iran. Ultimately, the findings provide a scientific foundation for developing prioritized and coordinated conservation strategies to safeguard this valuable species within its native range.

Keywords: environmental variables, habitat suitability, Hyrcanian forests, species distribution modeling.

How to Cite Habibikilak, S., Alavi, S.J. and Esmailzadeh, O. (2025). Investigating the influence of different environmental variables in modeling the distribution of yew (*Taxus baccata* L.) using the MAXENT model in Hyrcanian forests. Forest Research and Development, 11(1), 25-39. DOI: 10.30466/jfrd.2024.55623.1740

Copyright ©2024 Habibikilak et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

پژوهش و توسعه جنگل
جلد ۱۱، شماره ۱، صفحه ۳۹-۲۵، (۱۴۰۴)
DOI: https://doi.org/10.30466/jfrd.2024.55623.1740
DOR:

مقالهٔ پژوهشی

بررسی تأثیرگذاری متغیرهای محیطی مختلف در مدلسازی پراکنش گونه سرخدار (*Taxus baccata* L.) با استفاده از مدل MAXENT در جنگل‌های هیرکانی

شادی حبیبی کیلک[۱]، سیدجلیل علوی*[۲] و امید اسماعیل‌زاده[۳]

۱- دانشجوی دکتری علوم و مدیریت جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. (shadi_habibikilak@modares.ac.ir)
۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. (j.alavi@modares.ac.ir)
۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکدهٔ منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. (oesmailzadeh@modares.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

چکیده

مقدمه و هدف: نقشه پراکنش گونه‌های گیاهی نقش برجسته‌ای در ارزیابی حفاظت منطقه‌ای، توسعه برنامه‌ریزی و اقدامات مدیریتی دارند. مدل‌های پراکنش گونه‌ای (SDM) به‌عنوان الگوریتم تحلیلی-آماری تعریف می‌شوند که با توجه به مشاهدات میدانی و نقشه‌های محیطی می‌توانند دامنه جغرافیایی پراکنش گونه‌های گیاهی را تعیین کنند. از آن‌جا که گونه سرخدار یکی از گونه‌های با ارزش جنگل‌های هیرکانی است و از مهم‌ترین درختان دیرزیست این ناحیه محسوب می‌شود، دستیابی به نقشه پراکنش و مناطق دارای پتانسیل حضور این گونه و مشخص کردن عوامل تاثیرگذار بر حضور این گونه در سطح جنگل‌های هیرکانی با هدف انجام حفاظتی از گونه‌های ذخیره‌گاهی ضرورت دارد. در میان مدل‌های پراکنش گونه، مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) یکی از محبوب‌ترین مدل‌هایی است که مزایایی را در بین این رویکردها نشان می‌دهد. مدل حداکثر آنتروپی یکی از مهم‌ترین روش‌ها بر اساس نقاط صرفاً حضور است و کارایی خوبی را در این زمینه نشان داده است. حساسیت این روش به وجود تعداد کم نقاط حضور نیز کم است و با حداقل پنج نقطه حضور نیز قابلیت استفاده دارد. همچنین قادر به مدلسازی روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیر پاسخ و پیش‌بینی‌کننده‌ها نیز هستند. با این حال، سهولت و سادگی اجرای آن است که آن را به برجسته‌ترین و پرکاربردترین تکنیک SDM در بررسی‌های علمی سوق داده است. هدف از این پژوهش پاسخ به این سؤال است که کدامیک از متغیرهای محیطی بر پراکنش سرخدار تاثیرگذار است؟

مواد و روش‌ها: در این پژوهش ابتدا رویشگاه‌های اصلی سرخدار در جنگل‌های هیرکانی در سه استان گلستان، مازندران و گیلان شناسایی شده و تعداد ۱۶۱۴ حضور گونه سرخدار ثبت شد. سپس متغیرهای محیطی شامل متغیرهای زیست اقلیمی از پایگاه جهانی World Clime، متغیرهای محیطی از پایگاه

SoilGrids و متغیرهای توپوگرافی حاصل از Dem یک کیلومتر برای منطقه مورد نظر آماده شد. برای مدلسازی، از مدل MaxEnt استفاده شد؛ به این صورت که یکبار تنها با استفاده از متغیر اقلیمی (M1)، یکبار با ترکیب متغیر اقلیمی و توپوگرافی (M2)، یکبار در ترکیب متغیرهای اقلیمی و خاکی (M3) و در نهایت با تمام متغیرهای محیطی با درنظر گرفتن همبستگی موجود بین متغیرها مدل MaxEnt اجرا شد. در این پژوهش از MaxEnt بهینه با پنج ضریب منظم‌سازی مختلف (۰.۵، ۱، ۲، ۳ و ٤) در ترکیب با ویژگی‌های مختلف (L، LQ، H، LQH، LQHP) استفاده شد. همچنین، تنظیمات مدل MaxEnt بهینه بر اساس معیارهای ارزیابی وابسته به آستانه (یعنی نرخ حذف) برای یافتن بهترین شاخص‌هایی که میانگین ارزیاب‌ها را در اعتبارسنجی به بیشینه می‌رسانند، استفاده شد. پس از شناسایی تنظیمات مناسب و بهینه MaxEnt، سایر گزینه‌های انتخاب‌شده در این پژوهش شامل روش block با ۵۰۰۰ نقطه پس‌زمینه است. برای ارزیابی عملکرد مدل و بهبود عملکرد از سطح زیر منحنی مشخصه عملیاتی گیرنده (AUC) به عنوان یک معیار مرسوم استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل ۳ که شامل متغیرهای اقلیمی و خاکی بود کمترین مقدار AUC را داشت، درحالی که مدل ۲ متشکل از متغیرهای اقلیمی و توپوگرافی سبب بهبود عملکرد مدل شد و مقدار AUC از ۰/۹۳ به ۰/۹٤ افزایش یافت. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار AUC متعلق به مدل ٤ با مقدار ۰/۹٦ بود که نشان‌دهنده افزایش دقت مدل در پیش‌بینی پس از حذف هم‌خطی بین متغیرها است. همچنین بر اساس درصد سهم از میان متغیرهای زیست اقلیمی، متغیرهای bio2، bio3، bio7، bio18، از متغیرهای توپوگرافی ارتفاع و شیب به ترتیب در مدلسازی پراکنش گونه‌های سرخدار در جنگل‌های هیرکانی مهم‌ترین متغیرها بودند. این شش عامل، در مجموع ۹۰ درصد در پراکنش گونه سرخدار نقش دارند در این میان تمام متغیرهای خاکی با هم ۱/۰۲ درصد در مدلسازی پراکنش سرخدار نقش داشتند.

نتیجه‌گیری: نتایج ما نه تنها درک ما را از نحوه عملکرد این عوامل غیرزیستی در پراکنش گونه سرخدار بهبود می‌بخشد، بلکه اهمیت هرکدام از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بر حضور گونه در معرض خطر انقراض سرخدار را مشخص می‌کند. این پیش‌بینی‌کننده‌ها به تخمین پراکنش بالقوه درختان سرخدار در منطقه جنگلی شمال ایران کمک می‌کنند. این پژوهش یک مبنای علمی برای توسعه و اجرای یک برنامه حفاظتی با اولویت و هماهنگ برای حفاظت از این گونه درختی در محدوده جغرافیایی بومی آن فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های هیرکانی، متغیرهای محیطی، مدلسازی پراکنش گونه، مطلوبیت رویشگاه.

* نویسنده مسئول شمارهٔ تماس: ۰۹۱۱۵۸۰۰۹۷

مقدمه

جنگل‌های هیرکانی یکی از مناطق باقی‌مانده جنگل‌های پهن‌برگ است که بخش بزرگی از اوراسیا را در اواخر نئوژن پوشانده است (Kovar-Eder, 2003; Jafari et al., 2013). این جنگل‌ها به‌صورت یک کمربند سبز در امتداد دامنه‌های شمالی رشته کوه‌های البرز قرار دارند و استان‌های گیلان، مازندران و گلستان با حدود ۸۰۰ کیلومتر در طول (از غرب تا شرق) و ۲۰ تا ۷۰ کیلومتر عرض (از شمال تا جنوب) را دربرمی‌گیرد (Marvi Mohadjer, 2005). این جنگل‌ها تا ارتفاع ۲۸۰۰ متری از سطح دریا امتداد دارند. این جنگل‌ها در سال ۲۰۱۹ به‌عنوان میراث جهانی در یونسکو ثبت جهانی شدند که نشان از باارزش بودن منطقه و گونه‌های نادر آن است.

گونه سرخدار (*Taxus baccata* L.) درختی با برگ سوزنی، همیشه سبز، و کندرشد است که یکی از گونه‌های اصلی جنگل‌های هیرکانی محسوب می‌شود (Dhar et al., 2007). این گونه در مناطق مرطوب در دره‌ها و دامنه‌های شیب‌دار جنگل‌های کوهستانی با ارتفاع ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از سطح دریا حضور دارد (Esmailzadeh and Hosseini, 2007). هرچند در برخی موارد، می‌توان این گونه را در ارتفاعات پایین‌تر یافت (Esmailzadeh et al., 2012). سرخدار بیشتر به‌صورت افراد یا گروه‌های کوچک درختان در زیراشکوب دیده می‌شود، اما توده‌های طبیعی آن را می‌توان در سراسر منطقه جنگل در محدوده اشکوب میانی تا اشکوب پایین یافت (Thomas and Polwart., 2003). این گونه نسبت به یخبندان و سرمای دراز مدت مقاومت نشان می‌دهد، با این حال، سطح تحمل آن بسته به منطقه و فصل متغیر است (Benham et al., 2016).

محدوده جغرافیایی این گونه شامل غرب، مرکزی و اروپای جنوبی (Bolsinger and Llody, 1993) شمال غربی آفریقا (Svenning and Magård, 1999) جنوب غربی آسیا و شمال و شمال غرب ایران است (Karami-Kordalivan et al., 2021). سرخدار در سطح جهانی به‌عنوان کمترین نگرانی (Least Concern) اما در جنگل‌های هیرکانی به دلیل آشفتگی‌های انسانی، دامداری، چرای بی‌رویه و همچنین شرایط اقلیمی که آتش سوزی جنگل را تشدید می‌کند به شدت کاهش یافته است (Hematzadeh et al., 2023) و در فهرست گونه‌های درمعرض‌خطر گنجانده شده است (Jalili and Jamzad, 1999). رویشگاه‌های این گونه در بسیاری از مناطق جهان و ایران به‌تدریج ازبین رفته‌اند و فقط در نواحی معدودی به‌صورت لکه‌هایی در مساحت محدود باقی مانده‌اند. شرایط اصلی رویشگاه‌های موجود نیز به دلیل تخریب و دخالت‌های انسانی به همراه تغییرات اقلیمی در حال از بین رفتن است (Alavi et al., 2020). محدود شدن رویشگاه‌ها و کاهش جمعیت گونه‌ها باعث شده تا بسیاری از پژوهشگران به مدلسازی پراکنش گونه‌ای(Species Distribution Models: SDMs) توجه ویژه‌ای داشته باشند (Habibi Kilak et al., 2020). برای این منظور استفاده از مدل‌های پراکنش گونه درک بسیاری از مسائل بوم‌شناسی را ارتقا داده است و ابزاری کلیدی در پیش‌بینی پاسخ گونه‌ها به تغییرات محیطی است (Norberg et al., 2019). این مدل‌ها بر اساس تئوری آشیان بوم‌شناسی استوار هستند، به این معنی که هر عامل محیطی تأثیرگذار روی پراکنش گونه‌های گیاهی در ترکیب با هم قلمرو گونه‌ها را از هم جدا می‌سازند و یک آشیان بوم‌شناسی را برای یک گونه گیاهی مشخص تشکیل می‌دهند (Moghbel Esfahani et al., 2023). این مدل‌ها ابزاری مؤثر برای پیش‌بینی مطلوبیت رویشگاه گونه‌های هدف هستند که به‌طور گسترده در بررسی‌های حفاظت و احیا برای

ارزیابی روابط بین حضور گونه‌ها و متغیرهای محیطی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدلسازی پراکنش گونه‌ها نه تنها برای آگاهی در مورد تنوع زیستی و پراکنش گونه‌ها، بلکه برای ایجاد رویکردهای جدید پایداری نیز ضروری است (Sinclair et al., 2010). در این روش‌ها محدودیت‌های محیطی مختلف یک گونه در مکان و زمان با الگوریتم‌های مختلف به طور همزمان ارزیابی می‌شوند (Valavi et al, 2022). تنوع زیادی از الگوریتم‌های مدلسازی در انواع مختلف زمینه‌های تخصصی در علم مانند برنامه‌ریزی و حفاظت از محیط زیست انجام می‌شود و استفاده از الگوریتم‌های مدلسازی راهی برای پیش‌بینی دامنه پراکنش گونه‌ها از داده‌های مکانی برای پژوهشگران است (Rather et al., 2020). مدل‌های رایج مورد استفاده در پراکنش گونه‌ها شامل مدل‌های خطی و جمعی تعمیم‌یافته (GLM و GAM) و تکنیک‌های یادگیری ماشین (مانند حداکثر آنتروپی (MaxEnt)، جنگل تصادفی (RF)، درخت رگرسیون تقویت‌شده (BRT) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و غیره است (Yuan et al., 2015). در این میان مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) یکی از محبوب‌ترین مدل‌هایی است که مزایایی را در بین رویکردهای SDM نشان می‌دهد (Norberg et al., 2019). مدل حداکثر آنتروپی یکی از مهم‌ترین روش‌های مدلسازی پراکنش گونه‌ها بر اساس نقاط صرفاً حضور (Presence Only) است و کارایی خـوبی را در این زمینه نشان داده اسـت (Elith et al., 2006). حساسیت این روش به وجود تعداد کم نقاط حضور نیز کم است و با حداقل پنج نقطه حضور نیز قابلیت استفاده دارد (Philips., 2006). رویکرد MaxEnt همچنین قادر به مدلسازی روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیر پاسخ و پیش‌بینی‌کننده‌ها نیز هستند (Elith et al., 2006). با این حال، سهولت و سادگی اجرای آن است که MaxEnt را به برجسته‌ترین و پرکاربردترین تکنیک SDM در پژوهش‌های علمی سوق داده است (Fourcade et al., 2014). MaxEnt به‌عنوان یک رویکرد یادگیری ماشینی ویژگی‌های محیطی در نقاط حضور گونه‌ها را با ویژگی‌های محیطی در نقاط پس‌زمینی مقایسه می‌کند و به‌طور مستقیم یک نقشه پیوسته از مناسب بودن زیستگاه تولید می‌کند (Elith et al., 2011).

مدل MaxEnt علاوه بر داده حضور واقعی به داده‌های محیطی با کیفیت که بتوان بر اساس آن پراکنش گونه را پیش‌بینی کرد نیازمند است، متغیرهای اقلیمی از جمله متغیرهای محیطی است که به تنهایی هم پتانسیل زیادی برای پیش‌بینی پراکنش گونه دارد؛ زیرا شاخص‌های آب‌وهوایی مانند دما و بارش به‌طور مستقیم فرآیندهای فیزیولوژیکی را تنظیم می‌کنند که بر پراکنش جغرافیایی گونه تأثیر گذارند (Kearney and Porter, 2009). استفاده از این متغیرها (به طور جزئی یا کامل) باعث بهبود عملکرد مدل‌های پراکنش گونه‌ها می‌شود (Ahmadi et al, 2020). درپژوهشی Carter et al. (2015) نشان دادند که استفاده از نقشه‌های زیست اقلیمی به تنهایی برای پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها کافی نیست و برای کارآیی بالاتر، متغیرهای محیطی به‌خصوص خاک، می‌تواند دقت این مدل‌ها را افزایش دهد. همچنین استفاده از متغیرهای توپوگرافی برای بهبود مدل‌های پراکنش گونه‌ای نیز ثابت شده است (Sormunen et al., 2011). هرچند متغیرهای توپوگرافی بر پراکنش گونه‌های گیاهی به‌صورت مستقیم تاثیر نمی‌گذارند، اما ناهمگنی توپوگرافی اثرات پیچیده‌ای بر روی میکروکلیما، نور، رطوبت، دما و شرایط مواد مغذی دارد (Moeslund et al., 2013) و در مقیاس‌های بزرگ بر درجه حرارت و بارش تاثیر می‌گذارد (Dobrowski., 2011). با وجود اهمیت این متغیرها (متغیرهای توپوگرافی و خاکی) و شواهدی مبنی بر اینکه باعث

بهبود مدل‌ها می‌شوند، تنها در پژوهش‌های اندکی به‌طور همزمان از این متغیرها استفاده شده است (Mod et al., 2016)، ترکیب عوامل خاک و توپوگرافی در بررسی‌های پراکنش گونه‌های گیاهی می‌تواند درک ما را از تاثیر اقلیم به‌عنوان تنها عامل مشخص‌کننده پراکنش گونه‌های گیاهی تغییر دهد (Bertrand et al., 2012).

هدف از این پژوهش، بررسی عملکرد مدل Maxent با متغیرهای محیطی مختلف برای تعیین محدوده پراکنش فعلی گونه سرخدار و تعیین متغیرهای تاثیرگذار بر حضور این گونه در جنگل‌های هیرکانی است.

مواد و روش

منطقه مورد پژوهش و داده‌های حضور

برای مدلسازی پراکنش فعلی گونه سرخدار مناطق حضور این گونه در جنگل‌های هیرکانی (استان‌های مازندارن، گیلان و گلستان) بر اساس پژوهش‌های قبلی انجام‌شده و اظهارات کارشناسان و متخصصین شناسایی و با استفاده از گیرنده دستی سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS) ثبت شد. در این پژوهش علاوه بر بررسی‌های میدانی از اطلاعات رویشگاه‌های بزرگ سرخدار در جنگل‌های هیرکانی در پژوهش Karami-kordalivand et al. (2021) و Ahmadi et al. (2020) و مجموعه داده‌های نمونه‌برداری موجودی جنگل و برنامه‌ریزی مدیریت جنگلداری که در منطقه مورد بررسی انجام شد، استفاده شد (شکل ۱). این مجموعه داده‌ها دائمی و ملی هستند که تمامی منطقه مورد بررسی در شمال ایران را پوشش می‌دهد و هر ۱۰ سال یکبار اندازه‌گیری می‌شوند. درنهایت براساس مجموعه داده‌های ذکرشده تعداد ۱۶۱۴ نقطه حضور برای گونه سرخدار با استفاده از گیرنده دستی GPS ثبت شد.

متغیرهای محیطی

در این پژوهش از ۱۹ متغیر زیست اقلیمی با اندازه تفکیک یک کیلومتری در پایگاه داده جهانی آب و هوا (www.worldclim.org) استفاده شد (Hijmans et al, 2005).

متغیرهای خاکی مورد استفاده در این پژوهش از پایگاه SoilGrids (https://soilgrids.org/) که شامل هفت لایه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و طبقه‌بندی خاک از جمله درصد شن، درصد رس، درصد سیلت، pH، وزن مخصوص، نیتروزن و کربن آلی در تفکیک مکانی ۲۵۰ متر استخراج شد (Hengl et al., 2017). برای این منظور مقادیر پنج لایه اول (۶۰ – ۰ سانتی متر) در پروفیل استخراج و برای مدلسازی بعدی میانگین‌گیری شدند.

برای متغیرهای توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک مکانی یک کیلومتر داده‌های مدل ارتفاعی (Shuttle Radar Topography Mission :SRTM) استفاده شد. در این پژوهش از متغیرهای اولیه و ثانویه توپوگرافی شامل شیب، جهت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص همگرایی، عمق دره، فاصله عمودی تا آبراهه، عامل طول و تندی شیب (LS)، شاخص موقعیت توپوگرافی استفاده شده است. این متغیرها با استفاده از نرم‌افزار SAGA. Ver4.1.0 از DEM استخراج شدند. در مورد جهت جغرافیایی روش‌های مختلفی برای تبدیل آزیموت به یک متغیر کمی ابداع شده است (Moisen and Frescino., 2002) که با استفاده از آن جهت جغرافیایی به شاخص تابش خورشیدی (Radiation Index) تبدیل شد (رابطهٔ ۱). در این رابطه

θ مقدار آزیموت جهت برحسب درجه است. مقدار شاخص تابش خورشیدی از صفر تا یک متغیر است، عدد یک نشان‌دهنده جهت‌های خشک و گرم (جنوب و جنوب غربی) و عدد صفر نشان دهنده جهت‌های خنک و مرطوب (شمال و شمال شرقی) است (Aertsen et al., 2010).

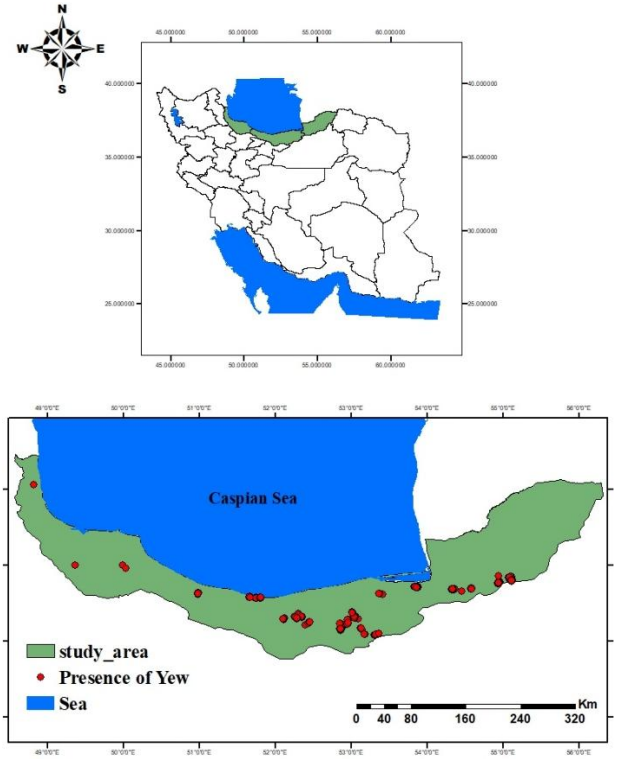
رابطهٔ (۱) $$TRASP=[1-\cos((\pi/180)(\theta-30))]/2$$

شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI: Topographic Wetness Index) توسط Beven و Kirkby(1979) در مدل رواناب TOPMODEL ایجاد شد. TWI را می‌توان با استفاده از معادله استخراج کرد (رابطه ۲):

رابطهٔ (۲) $$TWI=\ln\left(\frac{\alpha}{tan\beta}\right)$$

روش‌های آماری

همانطور که اشاره شد SDMها نیازمند مجموعه‌ای از متغیرهای پیشگوی محیطی هستند تا رویشگاه‌های مناسب و مطلوب، را با دقت بالا شناسایی نمایند. با توجه به ماهیت داده‌های مورد استفاده در این پژوهش که داده‌های صرفاً حضور گونه سرخدار است از مدل MaxEnt در بسته (ENMeval) در نرم‌افزار آماری R استفاده شد (Muscarella et al., 2014).



شکل ۱- منطقه مورد بررسی

Figure 1. Study Area

بهینه‌سازی مدل

کالیبراسیون و بهینه‌سازی SDM یک گام مهم در مدلسازی پراکنش گونه برای پیش‌بینی بهتر و قابل اطمینان‌تر است (Khan et al., 2022). برای SDMهای بهینه، چندین ترکیب مختلف از کلاس‌های ویژگی (Feature Classes: FC) (L = خطی؛ Q = درجه دوم؛ P = محصول؛ H = لولا) و مقادیر ضرب‌کننده منظم (Regularized Multiplier: RM) را می‌توان ارزیابی کرد. برخی بررسی‌ها نشان دادند زمانی که ضریب منظم‌سازی و کلاس‌های ویژگی MaxEnt (یعنی L، Q،

H و P) تنظیم می‌شود عملکرد مدل بهتر می‌شود (Muscarella et al., 2014). این شاخص‌ها می‌توانند پیچیدگی یا تعمیم‌پذیری مدل را کنترل کنند. مقدار پیش‌فرض ضریب منظم‌سازی یک است و هرچه این مقدار کمتر باشد، مدل پیچیده‌تری را می‌توان برازش کرد (Valavi et al., 2022). در این پژوهش از پنج ضریب منظم‌سازی مختلف (۰.۵، ۱، ۲، ۳ و ٤) در ترکیب با ویژگی‌های مختلف (L، LQ، H، LQH، LQHP) همچنین، تنظیمات مدل MaxEnt بهینه بر اساس معیارهای ارزیابی وابسته به آستانه (یعنی نرخ حذف) برای یافتن بهترین شاخص‌هایی که میانگین ارزیاب‌ها (AUC) را در اعتبارسنجی به بیشینه می‌رسانند، استفاده شد. پس از شناسایی تنظیمات مناسب و بهینه MaxEnt، سایر گزینه‌های انتخاب شده در این پژوهش شامل روش block با ۵۰۰۰ نقطه پس زمینه است. روش "block" داده‌ها را بر اساس خطوط طول و عرض جغرافیایی تقسیم می‌کند به این صورت که محل حضور را به چهار بلوک (تا حد امکان) با تعداد مساوی تقسیم می‌کند و نقاط حضور و پس‌زمینه را بر اساس موقعیت آنها نسبت به این خطوط به هر یک از چهار بلوک اختصاص می‌دهد (Muscarella et al., 2014).

مقایسه و ارزیابی مدل

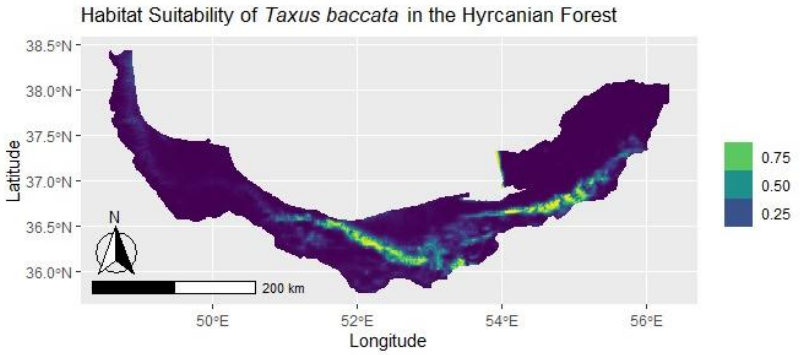
در این پژوهش برای یافتن بهترین ترکیب متغیرهای محیطی و تاثیر متغیرهای مختلف بر پراکنش سرخدار، مدل MaxEnt با متغیرهای مختلف در تفکیک مکانی یک کیلومتر مورد بررسی و مقایسه شد. مدل اول که شامل ۱۹ متغیر زیست اقلیمی بود به عنوان مدل M1 معرفی شد. مدل M2 متشکل از ۱۹ متغیر زیست اقلیمی و نه متغیر توپوگرافی، مدل M3 شامل ۱۹ متغیر زیست اقلیم و هفت متغیر خاک می‌باشند. همچنین مدلی شامل تمامی متغیرها (زیست اقلیمی، خاک و متغیرهای توپوگرافی) با در نظر گرفتن مسئله هم‌خطی به‌عنوان مدل M4 با ۱۸ متغییر تعریف شد. برای تعیین همبستگی میان متغیرهای محیطی از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی با استفاده از همبستگی اسپیرمن مربعی به‌عنوان معیار شباهت استفاده شد (Vincenzi et al, 2011). چنانچه ضریب همبستگی (r) بیشتر از ۰/۷ باشد از بین جفت متغیرهای همبسته، متغیری که اهمیت بالاتری (درصد مشارکت و اهمیت جایگشت بالاتری) در اولین اجرای مدل داشت، انتخاب شد (جدول۱). از سطح زیر منحنی مشخصه عملیاتی گیرنده (AUC) به‌عنوان یک معیار متداول برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد (Phillips et al., 2008). مقدار AUC از ۰/۵ تا یک متغیر است که در آن ۰/۵ نشان می‌دهد که عملکرد مدل بهتر از تصادفی نیست در حالی که مقدار نزدیک به یک عملکرد بهتر را نشان می‌دهد.

نتایج

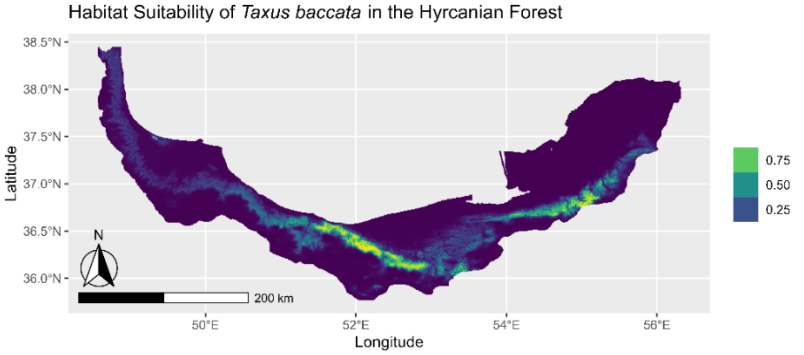
عملکرد مدل

در این پژوهش، مقادیر AUC همه مدل‌ها بیشتر از ۰/۸۵ است که نشان‌دهنده قابلیت پیش‌بینی قابل اعتماد مدل‌ها است. در مقایسه گروه M1 با مدل‌های استفاده شده نتایج نشان‌دهنده بهبود پیش‌بینی پراکنش سرخدار پس از افزودن دیگر متغیرهای محیطی بود، میانگین AUC مدل‌ها از ۰/۹۳ (M1) به ۰/۹٤(M2)، ۰/۹۳ (M3) افزایش یافت. پس از حذف هم‌خطی بین متغیرها، میانگین مقدار AUC در مدل ۰/۹۷ (M4) افزایش یافت که نشان‌دهنده دقت بالاتری در پیش‌بینی مدل است (شکل ۲).

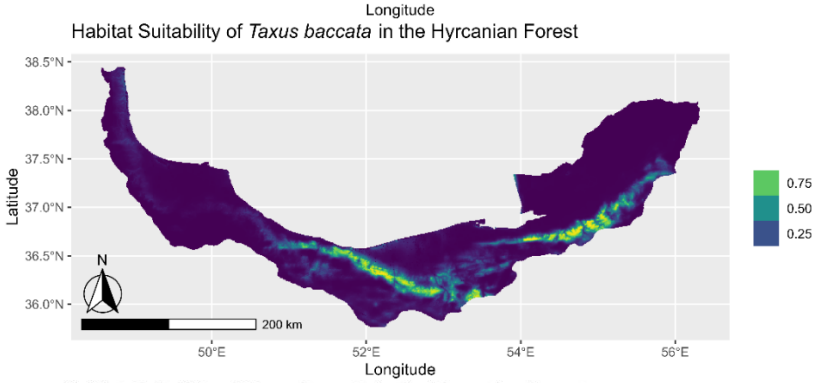
M1



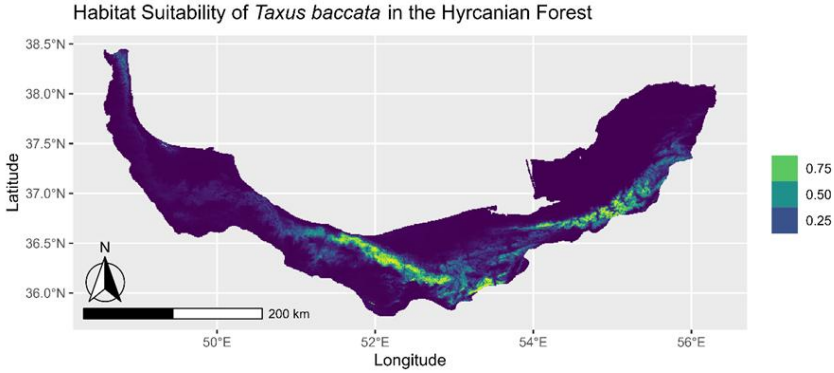
M2



M3



M4



شکل ۲- نقشه پراکنش سرخدار با مدل MAXENT با متغیرهای مختلف (M1: ۱۹ متغیر زیست اقلیمی.M2: ۱۹ متغیر زیست اقلیمی و ۹ متغیر توپوگرافی.M3 : ۱۹ متغیر زیست اقلیم و ۷ متغیر خاک. M4: ترکیب همه متغیرها با حذف همبستگی)

Figure 2: English Yew distribution map in the Hyrcanian generated by the MAXENT model with different variables (M1: 19 bioclimatic variables. M2: 19 bioclimatic variables and 9 topographic variables. M3: 19 bioclimatic variables and 7 soil variables. M4: Combination of all variables with removal of correlation)

اهمیت متغیرها

براساس درصد سهم مشارکت عوامل مهم در بین ۳۵ متغیر محیطی، متغیرهای bio2, bio3, bio7, bio18, Elevation و Slope بودند. این شش عامل به‌طور تجمعی ۹۰ درصد در پراکنش سرخدار نقش دارند. سهم تجمعی متغیرهای اقلیمی، خاک، توپوگرافی به ترتیب ٦٦/٤٨، ۱/۰۲ و ۳۲/۵۰ درصد بود. متغیرهای بااهمیت جابجایی بالا bio2, bio3, bio7, bio12, Slope بودند (جدول ۱). شکل ۳ همبستگی میان متغیرهای محیطی توسط تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی با استفاده از همبستگی اسپیرمن مربعی را نشان می‌دهد که براساس آن متغیرهای همبسته در یک خوشه قرار گرفته‌اند.

جدول ۱- درصد مشارکت و اهمیت جایگشت متغیرهای مورد بررسی در مدلسازی مناسب بودن رویشگاه سرخدار

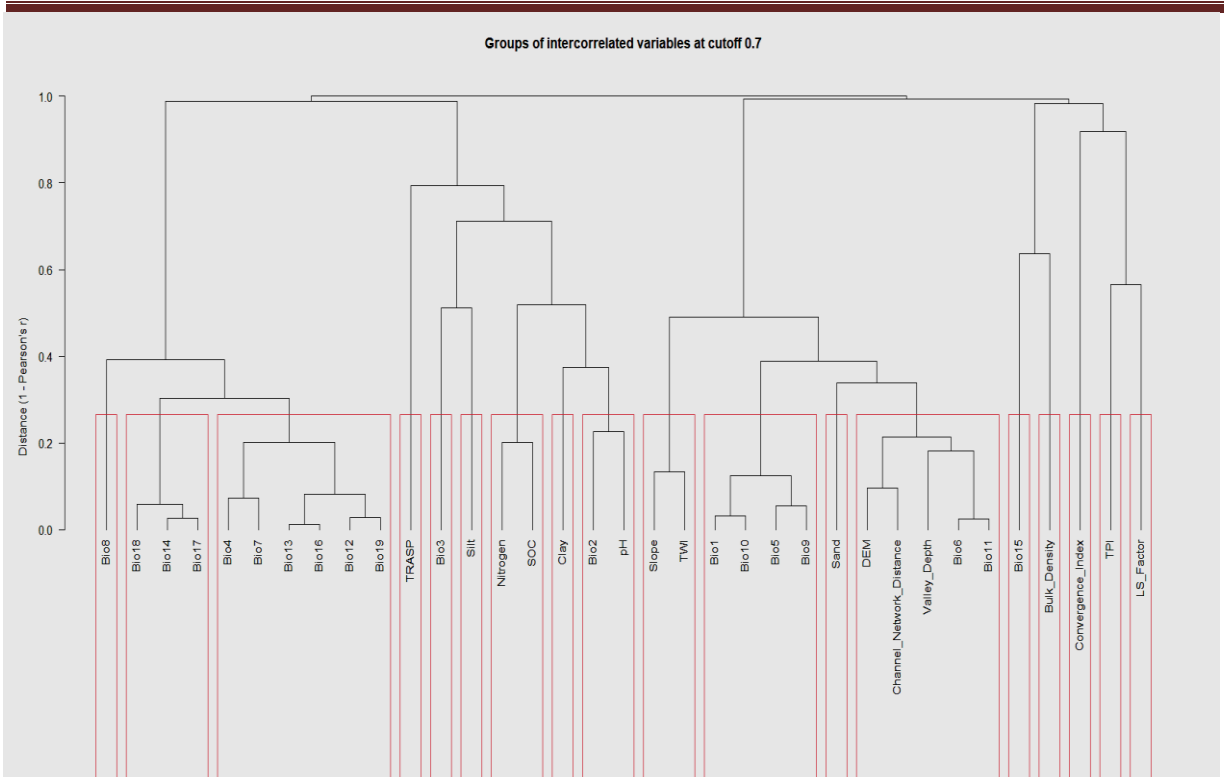
Table 1. The percentage of contribution and the permutation importance of the studied variables in modeling the suitability of the yew habitat.

دسته‌بندی Category	متغیرها Variable	توضیحات Description	واحد Unite	درصد مشارکت Percent Contribution	اهمیت‌جایگشت Permutation Importance
متغیرهای زیست اقلیمی Bio Climate variable	Bio2	میانگین دامنه دمای روزانه Mean Diurnal Range	◦C	27.33	41.30
	Bio3	ایزوترمالیتی Isothermality	-	22.34	11.63
	Bio4	تغییرات فصلی دما Temperature Seasonality	-	1.36	1.03
	Bio5	حداکثر دما در گرم‌ترین ماه Max Temperature of Warmest Month	◦C	0.18	2.96
	Bio7	تغییرات دمای سالانه Temperature Annual Range	◦C	6.52	10.14
	Bio12	مجموع بارندگی سالانه Annual Precipitation	mm	1.80	8.29
	Bio15	تغییرات بارندگی فصلی (ضریب تغییرات) Precipitation Seasonality (Coefficient of variation)	-	0.37	1.26
	Bio16	بارندگی در مرطوب‌ترین فصل سال Precipitation of Wettest Quarter	mm	1.69	2.53
	Bio17	بارندگی در خشک‌ترین فصل سال Precipitation of Driest Quarter	mm	0	0

ادامهٔ جدول ۱.

Continued table 1.

دسته‌بندی Category	متغیرها Variable	توضیحات Description	واحد Unite	درصد مشارکت Percent Contribution	اهمیت‌جایگشت Permutation Importance
متغیرهای زیست اقلیمی Bio Climate variable	Bio18	بارندگی در گرم‌ترین فصل سال Precipitation of Warmest Quarter	mm	4.65	3.85
	Bio19	بارندگی در سردترین فصل سال Precipitation of Coldest Quarter	mm	0.18	0.01
متغیرهای خاک Soil variable	شن Sand	درصد شن Sand content	%	0.27	2.08
	نیتروژن Nitrogen	نیتروژن کل Total nitrogen		0.69	3.40
	کربن آلی SOC	محتوای کربن آلی خاک Soil organic carbon content		0.05	0.11
متغیرهای توپوگرافی Topography variable	ارتفاع Elevation	ارتفاع از سطح دریا	m	10.03	2.28
	شیب Slope	شیب Slope	-	21.56	7.56
	فاصله عمودی تا آبراهه _Channel _Network Distance	فاصله عمودی تا آبراهه Channel Network Distance		0.78	1.29
	شاخص همگرایی Convergence_ Index	شاخص همگرایی Convergence Index		0.02	0.03
	عامل طول و تندی شیب LS_ Factor	عامل طول و تندی شیب Length and Steepness Factor		0.09	0.19



شکل ۳- همبستگی میان متغیرهای محیطی توسط تجزیه و تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی با استفاده از همبستگی اسپیرمن

Figure 3. Correlation between environmental variables by hierarchical cluster analysis using Spearman's correlation

بحث

در سال‌های اخیر مدل‌های پراکنش گونه‌ای به‌طور فزآینده‌ای در بوم‌شناسی گیاهی و توصیف مناطق احتمالی حضور و نیازهای زیستگاهی یک گونه به کار گرفته شده‌اند. اطلاعات حاصل از این مدل‌ها نشان‌دهنده نقش کلیدی آن‌ها در بوم‌شناسی و حفاظت گونه‌های کمیاب یا درحال انقراض است (Watling et al.,2015; Remya et al. 2015). در این پژوهش عملکرد مدل Maxent با متغیرهای محیطی مختلف به منظور تعیین محدوده پراکنش فعلی گونه در معرض خطر انقراض سرخدار، تعیین متغیرهای تاثیرگذار بر حضور این گونه در جنگل‌های هیرکانی مورد بررسی قرار گرفت. مدل حداکثر آنتروپی ثابت کرد که در بحث تعیین مطلوبیت رویشگاه و پراکنش گونه‌ها خیلی مؤثر بود؛ زیرا فقط بر داده‌های حضور متکی است و فاقد بسیاری از عوارض مرتبط با روش‌های تحلیلی حضور –غیلاب است (Baldwin, 2009). نتایج به‌دست آمده از ارزیابی عملکرد مدل حداکثر آنتروپی از طریق آماره سطح زیر منحنی (AUC) بیشتر از ۰/۸۵ بود که نشان می‌دهد مدل از توانایی پیش‌بینی عالی برخوردار است. عملکرد پیش‌بینی روش حداکثر آنتروپی نشان داد که این روش می‌تواند با روش‌هایی که بالاترین دقت پیش‌بینی را دارند رقابت کند و نتایج قابل‌قبولی ارائه کند (Elith et al., 2006; Yang et al., 2013). نتایج ارزیابی آماره سطح زیر منحنی مدل‌ها نشان داد مدلی که تنها شامل متغیرهای اقلیمی بود با (AUC= ۰/۹۳) عملکرد ضعیف‌تری نسبت به مدل‌های ترکیب را نشان داد که این نتیجه اهمیت متغیرهای توپوگرافی را در درک پراکنش گونه‌های گیاهی تقویت می‌کند. در فرایند مدلسازی این که کدام متغیرها و اینکه هر کدام به چه

مقدار در مدلسازی پراکنش گونه نقش دارند اهمیت دارد. بر اساس بررسی که در ارتباط با ارزیابی اهمیت متغیرهای موثر بر پراکنش گونه سرخدار در این پژوهش انجام شد، مشخص شد که متغیرهای مربوط به دما شامل میانگین دامنه دمای روزانه، ایزوترمالیتی و تغییرات دما سالانه (bio2, bio3, bio7) به‌ترتیب در رتبه اول، دوم و پنجم قرار دارند و متغیر bio18 که مربوط به متغیر بارش در گرم‌ترین فصل سال است در رتبه ششم قرار بگیرد. نتایج این پژوهش با پژوهش انجام-شده توسط (Ahmadi et al.,2020) مورد مقایسه قرار گرفت؛ آن‌ها دریافتند که متغیرهای اقلیمی تاثیرگذار بر حضور گونه سرخدار باتوجه به وسعت منطقه مورد پژوهش متفاوت‌اند و پراکنش گونه سرخدار در جنگل‌های هیرکانی در شمال ایران با متغیرهای اقلیمی مرتبط است. نتایج آنها نشان داد که متغیرهای مربوط به دما در وسعت جهانی بیشترین اهمیت را داشتند در حالی که در وسعت محلی بارش اهمیت بیشتری داشت. نتایج نشان داد که استان‌های گلستان و مازندران در مقایسه با استان گیلان جایگاه مناسب‌تری برای گونه سرخدار هستند. پراکنش این گونه در این مناطق نیز این نتایج را تایید می‌کند. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که از میان متغیرهای توپوگرافی، متغیرهای شیب و ارتفاع از عوامل موثر بر حضور گونه سرخدار هستند و در رتبه سوم و چهارم عوامل تاثیرگذار بر حضور گونه سرخدار قرار گرفتند که این نتایج بررسی‌های میدانی و یافته‌های قبلی در مورد حضور گونه سرخدار در مناطق مرتفع و کوهستانی و دامنه‌های تند شمال ایران را تایید می‌کند (Zare, 2005; Ahmadi et al.,2020). نتایج این پژوهش نشان داد که افزودن متغیرهای خاکی تاثیری بر عملکرد مدل ندارد و در بررسی تعیین عوامل موثر بر حضور گونه سرخدار نشان داد که فراوانی تجمعی درصد مشارکت همه متغیرهای خاکی ۱/۰۲ است. در نتیجه تاثیر چندانی بر پراکنش این گونه ندارد و از آنجایی که سرخدار معمولا بر روی خاک‌های هوموسی و غنی تا مناطق حاوی خاک‌های خشک راندزین و خاک‌های شنی با رطوبت کافی حضور دارد (Hageneder, 2011) و همچنین اینکه این گونه قادر است در فشرده‌ترین خاک‌ها نفوذ کند؛ به این معنی که آن‌ها می‌توانند در شرایط شدید مانند زمین‌های سنگی و صخره‌های عمودی زنده بمانند (Larson et al., 2000) بنابراین این نتایج تاییدی بر نتایج سایر پژوهشگران است و در نتیجه تقریباً سرخدار قابلیت رشد در همه انواع خاک با زهکشی مناسب را دارد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که متغیرهای اقلیمی، نقش مهم‌تری در پراکنش این گونه در سه استان مازندران، گلستان و گیلان دارند و کمترین اهمیت را در بین مجموعه داده‌ها، متغیرها خاکی دارا هستند که تا حد زیادی با نتایج (Alavi et al., 2020) مطابقت دارند.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش از مدل Maxent برای تعیین تأثیر متغیرهای مختلف محیطی برای پیش‌بینی پراکنش گونه سرخدار در جنگل‌های شمال ایران استفاده شد. برای این پژوهش، از متغیرهای اقلیمی، توپوگرافی و خاک در ترکیبات مختلف استفاده شد. ابتدا چهار مجموعه داده برای بررسی ترکیب مناسب برای مدلسازی ایجاد شد، سپس با استفاده از ضریب همبستگی و اهمیت متغیرها در اجرای مدل، متغیرهای همبسته حذف و مدل ۵ نیز ایجاد شد. (M5) به‌عنوان بهترین ترکیب بر اساس AUC ارزیابی شد. نتایج AUC تمامی مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد که M5 بهترین نوع متغیر برای پیش‌بینی پراکنش گونه سرخدار در منطقه مورد بررسی است. همچنین نتایج ما نشان می‌دهد که

از بین ۳۵ متغیر، متغیرهای مربوط به دما، شامل میانگین دامنه دمای روزانه، ایزوترمالیتی و تغییرات دما سالانه (bio2, bio3, bio7) به‌ترتیب در رتبه اول، دوم و پنجم قرار دارند و متغیرهای شیب و ارتفاع بر اساس درصد مشارکت در رتبه‌های سوم و چهارم قرار دارند. این پیش‌بینی‌کننده‌ها به تخمین پراکنش بالقوه درختان سرخدار در منطقه جنگلی شمال ایران کمک می‌کنند. این بررسی، یک مبنای علمی برای توسعه و اجرای یک برنامه حفاظتی با اولویت و هماهنگ برای حفاظت از این گونه درختی در محدوده جغرافیایی بومی آن فراهم می‌کند. همچنین، یافته‌های ما می‌تواند ابزاری قدرتمند برای تکمیل تلاش‌های موجود برای حفاظت از این گونه، به‌ویژه برای پروژه‌های مرتبط با تغییرات آب و هوایی باشد. در نهایت، برای تأیید اثربخشی SDMs ترکیب نتایج این بررسی با نظارت دراز مدت محل به منظور درک بهتر فرآیندهای بوم‌شناسی برای ایجاد دستورالعمل‌های معتبرتر برای تصمیم‌گیری حفاظت و احیای این گونه در بازسازی بوم‌سازگان‌های جنگلی پیشنهاد می‌شود و یکی از ضروریات بررسی‌های بوم‌شناختی در جنگل‌های هیرکانی است.

تشکر و قدردانی

از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) که این پژوهش به‌عنوان بخشی از طرح شماره ۴۰۱۴۳۷۵ با عنوان مدلسازی پراکنش گونه در معرض انقراض سرخدار (*Taxus baccata* L.) در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از ادغام داده‌های چند منبعی با حمایت آن انجام گرفته است قدردانی می‌شود.

References

Aertsen, W.; Kint, V.; Van Orshoven, J.; Özkan, K.; Muys, B., Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological modelling* **2010**, *221*(8), 1119-1130.

Ahmadi, K.; Alavi, S.J.; Amiri, G.Z.; Hosseini, S.M.; Serra-Diaz, J.M.; Svenning, J.C., The potential impact of future climate on the distribution of European yew (Taxus baccata L.) in the Hyrcanian Forest region (Iran). *International Journal of Biometeorology* **2020a**, *64*(9), 1451-1462.

Alavi, S.J.; Ahmadi, K.; Hosseini, S.M.; Tabari, M.; Nouri, Z., The importance of climatic, topographic, and edaphic variables in the distribution of yew species (Taxus baccata L.) and prioritization of areas for conservation and restoration in the north of Iran. *Iranian Journal of Forest* **2020**, *11*(4), 477-492. (In Persian).

Baldwin, RA., Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy*. **2009,** *11*(4):854-66.

Benham, S.E.; Houston Durrant, T.; Caudullo, G.; de Rigo, D., Taxus baccata in Europe: distribution, habitat, usage and threats. *In: European Atlas of Forest Tree Species* **2016**, Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. e015921+.

Bertrand, R.; Perez, V.; Gegout, J.C., Disregarding the edaphic dimension in species distribution models leads to the omission of crucial spatial information under limate change: the case of Quercu pubescens in France. *Glob. Change Biol* **2012**, *18*, 2648–2660.

Beven, K.J.; Kirkby, M.J., A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal* **1979**, *24*(1), 43-69.

Bolsinger, C.L.; Lloyd, J.D., Global yew assessment: status and some early result. In: S. Scher and Shimon B. Schwarzschild (Eds), Intern. Yew Resources Conference: Yew (Taxus), *Conservation Biology and Interactions* 1**993**.

Carter, A.; Kearney, M.; Mitchell, N.; Hartley, S.; Porter, W.; Nelson, N., Modelling the soil microclimate: Does the spatial or temporal resolution of input parameters matter? *Frontiers of Biogeography* **2015**, *7*(4).

Dhar, A.; Ruprecht, H.; Klumpp, R.; Vacik, H., Comparison of ecological condition and conservation status of English yew population in two Austrian gene conservation

forests. *Journal of Forestry research* **2007**, *18*(3), 181-186.

Dobrowski, S.Z., A climatic basis for microrefugia: the influence of terrain on climate. *Global change biology* **2011**, *17*(2), 1022-1035.

Elith*, J. H.; Graham*, C.P.; Anderson, R.; Dudík, M.; Ferrier, S.; Guisan, A.J.; Hijmans, R.; Huettmann, F. R.; Leathwick, J.; Lehmann, A.; Li, J., Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* **2006**, *29*(2), 129-151.

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

Esmailzadeh, O.; Hosseini, S.M., A phytosociological study of English Yew (Taxus Baccata L.) In Afratakhteh reserve. *Pajouhesh Sazandegi* **2007**, *20*, 17–24.

Esmailzadeh, O.; Hosseini, S.M.; Asadi, H.; Ghadiripour, P.; Ahmadi, A., Plant biodiversity in relation to physiographical factors in Afratakhteh Yew (Taxus baccata L.) Habitat, NE Iran. I*ranian Journal of Plant Biology* **2012**, *4*, 1–12.

Fourcade, Y.; Engler, J.O.; Rödder, D.; Secondi, J., Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. *PLoS One* **2014**,*9*, e97122.

Habibi Kilak, S.; Alavi, S. J.; Esmailzadeh, O., Analyzing the response curves of box tree (Buxus hyrcana Pojark.) species in relation to environmental variables in Hyrcanian forests. *Forest Research and Development* **2020**, *6*(1): 1-14. doi: 10.30466/jfrd.2020.120837.

Hageneder, F., *Yew: A History*, History Press Series: History Press Limited., 2011

Hematzadeh, A.; Esmailzadeh, O.; Jalali, S. G.; Mirjalili, M. H.; Walas, Ł.; Yousefzadeh, H., Genetic diversity and structure of English yew (Taxus baccata L.) as a tertiary relict and endangered tree in the Hyrcanian forests. *Biodiversity and Conservation* **2023**, *32*(5), 1733-1753.

Hengl, T.; Mendes de Jesus, J.; Heuvelink, G.B.; Ruiperez Gonzalez, M.; Kilibarda, M.; Blagotic, A.; Shangguan, W.; Wright, M.N.; Geng, X.; Bauer-Marschallinger, B.; Guevara, M.A.; Vargas, R.; MacMillan, R.A.; Batjes, N.H.; Leenaars, J.G.; Ribeiro, E.; Wheeler, I.; Mantel, S.; Kempen, B., SoilGrids250m: global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE* **2017** ,*12*, e0169748

Hijmans, R.J.; Cameron, S.E.; Parra, J.L.; Jones, P.G., Very high-resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Int. J. *Climatol* **2005**, *25*, 1965–1978.

Jafari, SM.; Zarre, S.; Alavipanah, SK., Woody species diversity and forest structure from lowland to montane forest in Hyrcanian Forest ecoregion. Journal of Mountain Science 2013, 10:609-620.

Jalili, A.; Jamzad, Z., *Red data book of plant species of Iran,* **1999.**

Karami-Kordalivand, P.; Esmailzadeh, O.; Willner, W.; Noroozi, J.; Alavi, S.J., Classification of forest communities (co-)dominated by Taxus baccata in the Hyrcanian forests (northern Iran) and their comparison with southern Europe. *European Journal of Forest Research* **2021**, *1402*(140), 463–476.

Kearney, M.; Porter, W., Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology letters* **2009**, *12*(4), 334-350.

Khan, A.M.; Li, Q.; Saqib, Z.; Khan, N.; Habib, T.; Khalid, N.; Tariq, A., MaxEnt modelling and impact of climate change on habitat suitability variations of economically important Chilgoza pine (Pinus gerardiana Wall.) in South Asia. *Forests* **2022**, *13*(5), 715.

Kovar-Eder, J., Vegetation dynamics in Europe during the Neogene. *Deinsea* **2003**, *10*:373–392

Larson, D.W.; Matthes, U.; Gerrath, J.A.; Larson, N.W.K.; Gerrath, J.M.; Nekola, J.C.; Walker, G.L.; Porembski, S.; Charlton, A., Evidence for the widespread occurrence of ancient forests on cliffs. *Journal of Biogeography* **2000**, *27*(2), pp.319-331.

Marvi Mohadjer, M.R., Silviculture*,* 1st ed.; *Tehran University Press,* **2005**: p. (In Persian).

Mod, H. K.; Scherrer, D.; Luoto, M.; Guisan, A., What we use is not what we know: environmental predictors in plant distribution models. *Journal of Vegetation Science* **2016**, *27*(6), 1308-1322.

Moghbel Esfahani, F.; Alavi, S. J.; Hosseini, S. M.; Tabari Kochaksarai, M., Determining the habitat suitability of Quercus castaneifolia C.

A. Mey In order to plan restoration using species distribution modeling. *Forest Research and Development* **2023**, *9*(3): 419-436. doi: 10.30466/jfrd.2023.54577.1654

Moisen, G.G.; Frescino, T.S., Comparing five modelling techniques for predicting forest characteristics. *Ecological Modelling* **2002**, *157*(2), 209–225.

Muscarella, R.; Galante, P.J.; Soley-Guardia, M.; Boria, R.A.; Kass, J.; Uriarte, M.; Anderson, R.P., ENMeval: an R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution* **2014**, *5*, 1198–1205.

Norberg, A.; Abrego, N.; Blanchet, F.G.; Adler, F.R.; Anderson, B.J.; Anttila, J.; Araújo, M.B.; Dallas, T.; Dunson, D.; Elith, J.; Foster, S.D., A comprehensive evaluation of predictive performance of 33 species distribution models at species and community levels. *Ecological monographs* **2019**, *89*(3), p.e01370.

Phillips, S. J.; Anderson, R. P.; Schapire, R. E., Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling* **2006**, *190*(3-4), 231-259.

Phillips, S. J.; Dudík, M., Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* **2008**, *31*(2), 161-175.

Rather, Z. A.; Ahmad, R.; Dar, A. R.; Dar, T. U. H.; Khuroo, A. A., Predicting shifts in distribution range and niche breadth of plant species in contrasting arid environments under climate change. *Environmental Monitoring and Assessment* **2020**, *193*(7), 427.

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

Sinclair, S. J.; White, M. D.; Newell, G. R., How useful are species distribution models for managing biodiversity under future climates? *Ecology and Society* **2010**, *15*(1).

Sormunen, H.; Virtanen, R.; Luoto, M., Inclusion of local environmental conditions alters high-latitude vegetation change predictions based on bioclimatic models. *Polar Biology* **2011**, *34*(6), 883-897.

Svenning, J.C.; Magård, E., Population ecology and conservation status of the last natural population of English yew Taxus baccata in Denmark. *Biol Conserv* **1999**, *88*,173–182.

Thomas, P.A.; Polwart, A., *Journal of Ecology* **2003**, *91*, 489.

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

Vincenzi, S.; Zucchetta, M.; Franzoi, P.; Pellizzato, M.; Pranovi, F.; De Leo, G.A.; Torricelli, P., Application of a Random Forest algorithm to predict spatial distribution of the potential yield of Ruditapes philippinarum in the Venice lagoon, Italy. *Ecological Modelling* **2011**, *222*(8), 1471–1478.

Watling, D.P.; Cantarella, G.E., Model representation & decision-making in an ever-changing world: the role of stochastic process models of transportation systems. *Networks and Spatial Economics* **2015**, *15*(3), 843-882.

Yang, X.Q.; Kushwaha, S.P.S.; Saran. S.; Xu, J.; Roy, P.S., Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, Justiciaadhatoda L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering* **2013**, *51*: 83–87.

Yuan, H.S.; Wei, Y.L.; Wang, X.G., Maxent modeling for predicting the potential distribution of Sanghuang, an important group of medicinal fungi in China. *Fungal Ecology* **2015**, *17*, 140–145.

Zare, H., Introduced and native conifers in Iran. *Publication of Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran*, N 271, **2005**; p498. (In Persian).