

Research Paper

Current and future distribution modeling of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in Hyrcanian forests

Sara Hedayati Kaliji¹, Seyed Mohsen Hosseini^{*2}, Seyed Jalil Alavi³ and Mohadese Amiri⁴

1- Ph.D. Student of Forest Biology, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, I. R. Iran. (sara_hedayati88@yahoo.com)

2,*- (Corresponding author) Professor, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, I. R. Iran. (hosseini@modares.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Forest Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, I. R. Iran. (j.alavi@modares.ac.ir)

4- Ph.D. of Rangeland Sciences, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, I. R. Iran, and Department of Agricultural Sciences, Technical and Vocational University, Tehran, I. R. Iran. (mohaddeseh.amiri@na.iut.ac.ir)

Received: 25 October 2023

Accepted: 30 November 2023

Extended Abstract

Background and Objective: Beech forests, spanning from Europe's largest woodlands to the mountainous regions of southern Europe and the Caspian Sea coasts, provide a crucial habitat for the Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky), the dominant species in these ecosystems. These forests play a vital role in carbon sequestration and climate change mitigation. Predicting the impacts of climate change on ecosystems and species is a fundamental objective of ecological research. Understanding how climate influences plant distribution is essential for sustainable forest management. Species Distribution Models (SDMs) are powerful tools for identifying suitable habitats and informing conservation strategies in response to climate change.

Material and Methods: This study assessed the distribution of Oriental beech in the Hyrcanian forests under present and future climate conditions using multiple modeling algorithms, including Artificial Neural Networks, Generalized Linear Models, Multivariate Adaptive Regression Splines, Maximum Entropy, and Random Forest. A Digital Elevation Model (DEM) was used to generate slope, aspect, and elevation layers, while 19 bioclimatic variables with a spatial resolution of one kilometer were obtained from the CHELSA database. A total of 1,068 occurrence points, each spaced at least one kilometer apart, were used as the dependent variable. Eight physiographic and bioclimatic variables, selected through Pearson correlation analysis ($|r| < 0.8$), served as independent variables. Models were trained on 75% of the data and evaluated with the remaining 25% using performance metrics such as the Area Under the ROC Curve (AUC), sensitivity, specificity, and the True Skill Statistic (TSS).

Results: All individual models successfully identified the distribution range of Oriental beech, with the ensemble model and Random Forest performing the best. The ensemble approach reduced prediction uncertainty. Variable importance analysis revealed that elevation, seasonal temperature variation, and slope were the most influential factors, with elevation alone

explaining approximately 40% of the variation. In contrast, isothermality had the least impact. The species was primarily distributed from Astara to Gorgan, with a higher probability of occurrence in Gilan and Mazandaran provinces compared to Golestan. According to the ensemble model, 31.05% of the study area (6,030.6 km²) was classified as suitable habitat, though this is projected to decline under future climate scenarios. Response curves indicated that optimal conditions included elevations of 1,300–2,000 meters and slopes of approximately 30%. Under the SSP5-8.5 scenario, habitat loss was more pronounced than under SSP1-2.6, with greater reductions projected for 2071–2100 compared to 2041–2070. Based on the GFDL-ESM4 model, Oriental beech distribution is expected to decline by 7.65% under the optimistic scenario (2041–2070) and by 34.8% under the pessimistic scenario (2071–2100).

Conclusion: The ensemble model provided a more precise prediction of species distribution by integrating common patterns across multiple models. Given the high accuracy of the models used, these approaches offer valuable insights into the potential effects of climate change on the distribution of Oriental beech in the Hyrcanian forests. The findings provide a scientific foundation for developing conservation strategies, implementing sustainable management practices, and guiding habitat restoration efforts.

Keywords: Climate change, CMIP6, Ecological niche, Ensemble modeling, Oriental beech.

How to Cite This Article: Hedayati Kaliji, S., Hosseini, S. M., Alavi, S. J., and Amiri, M. (2025). Current and future distribution modeling of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in Hyrcanian forests. *Forest Research and Development*, 10(4), 527-543. DOI: [10.30466/jfrd.2023.54968.1698](https://doi.org/10.30466/jfrd.2023.54968.1698)



Copyright ©2024 Hedayati Kaliji et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), 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.

مدلسازی پراکنش فعلی و آینده راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky) در جنگل‌های هیرکانیسارا هدایتی کلیچی^۱، سیدمحسن حسینی*^۲، سیدجلیل علوی^۳ و محدثه امیری^۴

۱- دانشجوی دکتری علوم زیستی جنگل، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. (sara_hedayati88@yahoo.com)

۲- استاد، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. (hosseini@modares.ac.ir)

۳- دانشیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران. (j.alavi@modares.ac.ir)

۴- دکتری علوم مرتع، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران و مدرس گروه علوم کشاورزی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران. (mohaddeseh.amiri@na.iut.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۳

چکیده

مقدمه و هدف: جنگل‌های راش، از بزرگ‌ترین جنگل‌های اروپا تا مناطق کوهستانی جنوب اروپا و سواحل دریای خزر، زیستگاه راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky) به‌عنوان گونه غالب هستند. این جنگل‌ها نقش مهمی در کاهش دی‌اکسیدکربن و مقابله با تغییرات اقلیمی دارند. پیش‌بینی اثر تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌ها و گونه‌ها از اهداف اساسی بوم‌شناسی است. برای مدیریت پایدار، شناخت تأثیر اقلیم بر پراکنش گیاهان ضروری است. مدل‌های پراکنش گونه‌ای (SDMs) ابزارهای کلیدی در شناسایی زیستگاه‌های مطلوب و تدوین راهکارهای حفاظتی در برابر تغییر اقلیم هستند.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، پراکنش راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی تحت شرایط اقلیمی فعلی و آینده با استفاده از الگوریتم‌های مدل‌سازی شامل شبکه عصبی مصنوعی، مدل خطی تعمیم‌یافته، رگرسیون تطبیقی چندمتغیره، حداکثر آنتروپی و جنگل تصادفی بررسی شد. مدل رقومی ارتفاع (DEM) برای تولید لایه‌های شیب، جهت شیب و ارتفاع به‌کار رفت و ۱۹ متغیر زیست‌اقلیمی با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر از پایگاه داده CHELSA استخراج شد. تعداد ۱۰۶۸ نقطه رخداد گونه با حداقل فاصله یک کیلومتری از یکدیگر به‌عنوان متغیر وابسته، و هشت متغیر فیزیوگرافی و زیست‌اقلیمی با آزمون همبستگی پیرسون ($-0.18 < r < 0.18$) به‌عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. مدل‌ها با تخصیص ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد برای ارزیابی، از طریق شاخص‌هایی مانند سطح زیر منحنی ROC، حساسیت، ویژه‌انگاری و TSS ارزیابی شدند.

یافته‌ها: تمامی مدل‌های مجزا توانایی شناسایی محدوده پراکنش راش شرقی را داشتند، اما مدل اجماعی و سپس جنگل تصادفی بهترین عملکرد را نشان دادند. رویکرد اجماعی عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها را کاهش داد. بررسی اهمیت متغیرها نشان داد که ارتفاع، تغییرات فصلی دما و شیب، تأثیرگذارترین عوامل در پراکنش گونه بودند، به طوری که ارتفاع حدود ۴۰ درصد از تغییرات را توضیح داد. همچنین، ایزوترمالمیتی کمترین تأثیر را داشت. پراکنش گونه عمدتاً از آستارا تا گرگان امتداد داشت، با احتمال رخداد بیشتر در استان‌های گیلان و مازندران نسبت به گلستان. مطابق مدل اجماعی، ۳۱.۰۵ درصد از منطقه مطالعه (۶۰۳۰.۶ کیلومترمربع) زیستگاه مطلوبی برای گونه بود که تحت اقلیم آینده کاهش خواهد یافت. منحنی‌های پاسخ، ارتفاع ۱۳۰۰ تا ۲۰۰۰ متر و شیب ۳۰ درصد را به عنوان شرایط بهینه نشان دادند. در سناریوی SSP5-8.5، کاهش پراکنش در مقایسه با SSP1-2.6 و در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ نسبت به ۲۰۷۰-۲۰۴۱ بیشتر بود. تحت سناریوی خوش‌بینانه (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و بدبینانه (۲۱۰۰-۲۰۷۱) بر اساس مدل GFDL-ESM4، پراکنش راش شرقی به ترتیب ۷.۶۵ و ۳۴.۸ درصد کاهش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری: استفاده از مدل اجماعی، به دلیل تأکید بر نواحی مشترک بین مدل‌های مختلف، شبیه‌سازی دقیق‌تری از پراکنش گونه ارائه داد. با توجه به دقت بالای مدل‌ها، این روش‌ها می‌توانند ابزاری ارزشمند در پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر پراکنش راش شرقی در جنگل‌های هیرکانی باشند. یافته‌ها می‌توانند مبنای علمی برای تدوین راهکارهای حفاظتی، مدیریت پایدار و احیای زیستگاه‌های مستعد باشند.

واژه‌های کلیدی: آشیان بوم‌شناختی، تغییر اقلیم، راش شرقی، مدلسازی اجماعی.

جنگل‌های هیرکانی که از مهم‌ترین و باارزش‌ترین بوم-سازگان‌های ثبت‌شده در فهرست میراث جهانی یونسکو هستند، کمتر موردبررسی قرار گرفته است. جنگل‌های راش با غالبیت گونه راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky) یکی از وسیع‌ترین جنگل‌های هیرکانی هستند که بیش از ۳۰ درصد این جنگل‌ها را به خود اختصاص داده‌اند (Khalatbari Limaki et al., 2021; Sagheb-Talebi et al., 2014). جنگل‌های هیرکانی شمال کشور به دلیل تنوع گونه‌های جانوری و گیاهی زیاد از اهمیت بسیار زیادی برخوردار بوده و راشستان‌های موجود در این جنگل‌ها هم از نظر بوم-شناسی و هم از نظر اقتصادی بسیار مهم هستند (Akhavan and Hassani, 2023).

از آنجایی که بوم‌سازگان‌های جنگلی نقش مهمی در چرخه گاز دی‌اکسیدکربن ایفا می‌کنند و یکی از مهم‌ترین محل‌های ذخیره و ترسیب کربن هستند (Hojjati et al., 2022) و با بیشترین ذخیره کربن در جهان، سهم فزاینده‌ای در تعدیل اقلیم جهانی دارند و به دلیل وابستگی این بوم‌سازگان‌ها به شاخص‌های اقلیمی به‌ویژه درجه حرارت که در بُعد زمان و مکان متغیرند (Haghdoust et al., 2012)، برای جلوگیری از تخریب عرصه‌های جنگلی در نتیجه تغییرات اقلیمی، بایستی بررسی‌های مختلفی انجام داد و تصمیمات مناسب مدیریتی اتخاذ کرد. از پژوهش‌های انجام‌شده پیرامون مدلسازی پراکنش گونه‌های درختی تحت تغییر اقلیم می‌توان به بررسی پراکنش مکانی راش شرقی تحت اقلیم فعلی و آینده در جنگل‌های هیرکانی (Taleshi et al., 2018) و ارزیابی الگوهای پراکنش راش مکزیک (*Fagus mexicana*) در دوره‌های گذشته، حال و ۵۰ سال آینده در شرق مکزیک (Ames-Martínez et al., 2022) اشاره کرد.

تغییر اقلیم با تغییر فصل رشد یا تغییر در الگوهای دمایی که محرک تغییر چرخه زندگی موجودات زنده است، بر بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری تأثیر می‌گذارد (Hosseini et al., 2022). فعالیت‌های انسانی شامل تغییرات کاربری اراضی و مصرف روزافزون سوخت-های فسیلی بر وقوع تغییرات اقلیمی و در نتیجه محدوده پراکنش گونه‌ها مؤثر بوده و منجر به از بین رفتن پایداری بوم‌سازگان‌های طبیعی (Haghdoust et al., 2012)، کاهش سطح مناسب پراکنش برخی گیاهان، پراکنش لکه‌ای و جابجایی آنها در امتداد گرادیان‌های ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی می‌شوند (Engler et al., 2011; Taleshi et al., 2018; Ames-Martínez et al., 2022). رویکرد معمول برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر دامنه پراکنش گیاهان، استفاده از مدل‌های پراکنش گونه‌ای (Species Distribution Models: SDMs) است. در این مدل‌ها، آشیان بوم‌شناختی گونه-ها از روی ارتباط آماری بین داده‌های رخداد و متغیرهای محیطی و با پیش‌بینی الگوی کلی جابجایی آنها که اغلب با روندهای زیستی مشاهده‌شده منطبق است، به دست می‌آید. مدل‌ها سپس تحت دامنه‌ای از سناریوهای اقلیمی، پراکنش بالقوه گونه‌ها در آینده را تشریح می‌کنند (Hannah, 2014).

اگرچه دما، متغیر بسیار مهمی در رشد درختان در بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌شمار می‌رود، اما روند افزایشی درجه حرارت جهانی می‌تواند اثرهای قابل توجه و شدیدی بر بوم‌سازگان‌های طبیعی داشته باشد (Hamidi et al., 2021). پیش‌بینی می‌شود که تا پایان قرن حاضر، میانگین دمای هوا در ایران افزایش یابد که با کاهش نه درصدی بارندگی در سراسر کشور همراه خواهد بود. با وجود نگرانی‌هایی در مورد تأثیر تغییرات اقلیمی، تأثیر این موضوع بر روی گونه‌های درختی

روش‌های مختلف مدل‌سازی را ادغام می‌کند (Cheng et al., 2022).

در این پژوهش، تغییرات محدوده پراکنش راش شرقی به‌عنوان اصلی‌ترین گونه درختی با بیشترین پراکنش در جنگل‌های هیرکانی با مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)، رگرسیون تطبیقی چندمتغیره جداکننده (MARS)، حداکثر آنتروپی (MaxEnt) و جنگل تصادفی (RF) در یک چارچوب اجماعی بررسی می‌شود. بر همین اساس، بررسی اهمیت متغیرهای محیطی به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر پراکنش جغرافیایی گونه؛ مقایسه کارایی مدل‌های انفرادی و اجماعی پراکنش گونه‌ای برای کشف روابط بوم‌شناختی موجود بین گونه و شرایط اقلیمی و فیزیوگرافی حاکم بر آن؛ و نیز تعیین اندازه تغییرات سطح رویشگاه‌های مناسب این گونه درختی در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در سال‌های مشخص شده از اهداف این پژوهش هستند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

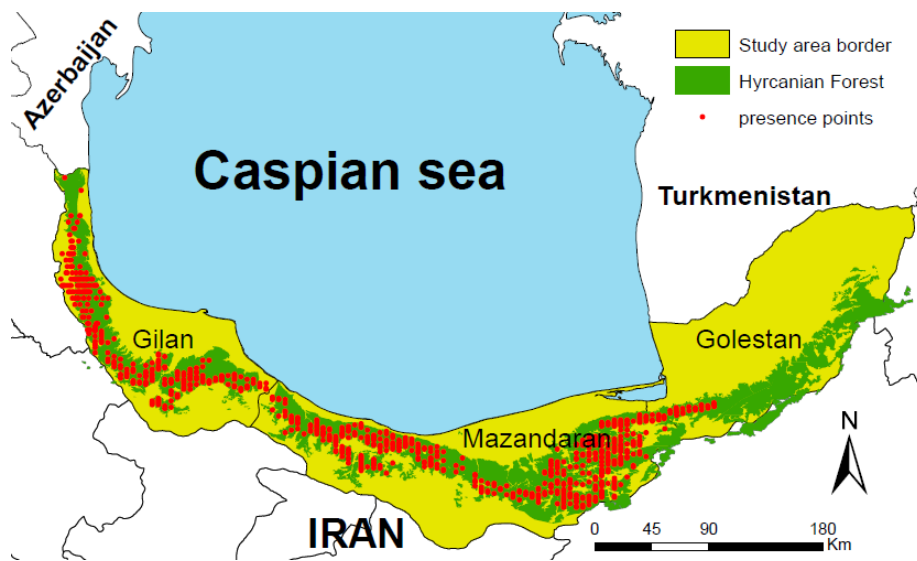
منطقه مورد بررسی، جنگل‌های هیرکانی واقع در محدوده جغرافیایی 36° تا 38° عرض شمالی و 48° تا 56° طول شرقی واقع است (شکل ۱). این جنگل‌ها به طول تقریبی ۸۰۰ کیلومتر و وسعت حدود ۱/۹ میلیون هکتار به‌صورت نوار باریکی از آستارا تا گلیداغی در بجنورد دیده می‌شوند که با وسعت حدود ۱۸۵۰۰۰۰ هکتار، ۰/۷ درصد از کل مساحت ایران را در برمی‌گیرد (IUCN, 2019). ارتفاع منطقه از ۲۷۵۰-۰ متر و بارندگی سالانه آن از ۲۰۰۰-۵۳۰ میلی‌متر متغیر است که به‌تدریج به سمت شرق از مقدار بارندگی کاسته شده، به‌طوری‌که در گرگان حتی به نصف این مقدار باران کاهش می‌یابد. جنگل‌های راش واقع در ارتفاعات

بررسی‌های اقلیمی در حوزه جنگل‌های هیرکانی نشان داده‌اند که طی بیست سال گذشته، میانگین دمای این منطقه، ۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد و مقدار تبخیر و تعرق مرجع نیز به‌طور متوسط ۰/۴ میلی‌متر در روز افزایش یافته است (Attarod et al., 2017). منطقه رویشی هیرکانی یکی از نواحی رویشی پنج‌گانه ایران است که به‌دلیل تنوع ژنتیکی و تنوع گونه‌ای ویژه، ارزشمندترین بوم‌سازگان جنگلی دنیا به‌شمار می‌رود (Sagheb-Talebi et al., 2014). جنگل‌های هیرکانی شمال ایران حد نهایی پراکنش راش شرقی در شرق منطقه رویشی ایران-آناتولی هستند که از شرق اروپا شروع شده و قفقاز، شمال ترکیه و شمال ایران را دربرمی‌گیرند. در واقع، موقعیت اکوتونی این جنگل‌ها را می‌توان یکی از دلایل حساسیت آن‌ها به تغییر اقلیم دانست (Taleshi et al., 2018). بنابراین، آگاهی از نحوه پاسخ این بوم‌سازگان‌ها به تغییرات اقلیمی دارای اهمیت بسیاری است. راش، یکی از گونه‌های اقتصادی تولیدکننده چوب و با ارزش بوم‌شناختی در این منطقه است که به‌عنوان یک گونه اوج، در ارتفاعات ۲۰۰۰-۷۰۰ متری از سطح دریا ظاهر می‌شود و شرایط اقلیمی در توسعه و گسترش آن اثر مستقیم دارد (Meyer et al., 2020).

در سال‌های اخیر، کاربرد مدل‌های پراکنش گونه‌ای در پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها، ارزیابی تنوع زیستی، حفاظت از گونه‌های نادر و غیره، با توسعه فناوری‌های سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی افزایش یافته است. اما از آنجایی که اصول و الگوریتم‌های مدل‌ها متفاوت هستند، انتخاب مدل مناسب برای پیش‌بینی دقیق پراکنش مناسب گونه‌ها دشوار است. برای حل این نوع عدم قطعیت، بررسی‌های بسیاری از رویکرد مدل‌سازی اجماعی استفاده کرده‌اند که پیش‌بینی‌های

راش در جنگل‌های هیرکانی به صورت جامعه خالص راشستان یا آمیخته با درختان ممرز یا درختان دیگر وجود دارد. راش درختی بلند قامت، یک پایه و به ارتفاع ۳۵ متر است ولی در شرایط مناسب رویشگاهی به ۵۰ متر نیز می‌رسد. راش سایه‌پسند است ولی به یخبندان مقاوم نیست و یخبندان‌های اوایل فصل بهار را تحمل نمی‌کند (Jafari, 2008).

۶۰۰-۲۲۰۰ متری یکی از بزرگترین جنگل‌های کوهستانی جنوب اروپا و بخش‌هایی از دریای خزر هستند. راش شرقی، درختی خزان‌کننده با اندازه متوسط است که در مقایسه با راش اروپایی در مناطق گرم‌تر و خشک‌تر پراکنده است. جنگل‌های راش اسالم در غربی‌ترین بخش جنگل هیرکانی، جزء پرباران‌ترین جنگل‌های راش کشور محسوب می‌شوند (Sagheb- Talebi et al., 2014).



شکل ۱- منطقه مورد بررسی، پراکنش جنگل‌های هیرکانی و نقاط حضور گونه

Figure 1. Study area, the distribution of Hyrcanian forests and species presence points

تعداد ۱۰۶۸ نقطه حضور و ۱۶۱۶ نقطه غیاب گونه در گستره مورد بررسی در نظر گرفته شد. نقاط حضور برداشت شده به طور تقریبی همه قسمت‌های استان‌های گیلان و مازندران و بخش کوچکی از غرب استان گلستان را پوشش می‌دهند (شکل ۱).

متغیرهای محیطی و تحلیل هم‌خطی

۱۹ متغیر زیست‌اقليمی مربوط به سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۷۹ از پایگاه داده‌ای چلسا با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ ثانیه انتخاب شدند (<https://chelsa-climate.org>). متغیرهای زیست‌اقليمی معنی‌داری زیستی بیشتری نسبت به بقیه متغیرهای اقلیمی داشته و در بررسی

داده‌های بیولوژیکی

برای تعیین داده‌های حضور و غیاب گونه راش شرقی، از داده‌های آماربرداری شده و نقشه تیپ‌بندی کتابچه‌ها و بانک‌های اطلاعاتی منطقه که در سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۸۵ توسط ادارات منابع طبیعی تهیه شده بودند، استفاده شد. مبنای ثبت نقاط حضور گونه، قطر تنه بالاتر از ۷/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. برای اجتناب از خودهمبستگی و با هدف کاهش آریبی نمونه‌برداری، در هر پیکسل ۳۰ ثانیه‌ای (حدود یک کیلومتر مربعی) تنها یک نقطه حضور برای گونه انتخاب شد و نقاط حضور همسان تا شعاع یک کیلومتری حذف شدند. در مجموع،

که در آن، r نشان‌دهنده ضریب همبستگی و r_1^2 ضریب تعیین برای رگرسیون آمین متغیر مستقل روی بقیه متغیرهاست.

مدلسازی و سنجش کارایی مدل‌ها

پس از تنظیم شاخص‌های الگوریتم‌ها، چندین مدل با کاربرد وسیع در پراکنش‌های گونه‌ای که دامنه وسیعی از رویکردهای تحلیلی را نشان می‌دهند، شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)، رگرسیون تطبیقی چندمتغیره جداکننده (MARS)، حداکثر آنتروپی (MaxEnt) و جنگل تصادفی (RF) با ده تکرار تقسیم‌بندی تصادفی اجرا شدند. در هر بار تقسیم تصادفی، ۷۵ درصد از داده‌های رخداد (۸۰۱ نقطه) برای مدل‌سازی و ۲۵ درصد باقیمانده (۲۶۷ نقطه) برای ارزیابی صحت مدل‌ها به کار رفتند. مراحل مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار R 4.3.1، انجام شد. از بسته biomod2 به‌عنوان اصلی‌ترین بسته در مدل‌سازی پراکنش و ارزیابی صحت استفاده شد.

ارزیابی مدل‌ها با استفاده از معیارهای کاپا، آماره مهارت واقعی (TSS) و مقدار سطح زیر منحنی (AUC) تحلیل ویژگی عملیاتی پذیرنده (ROC) که نرخ مثبت واقعی (TPR) یا حساسیت (Sensitivity) را در مقابل نرخ مثبت کاذب (FPR) یا اختصاصیت (Specificity) قرار می‌دهد، انجام شد که معادلات آنها به شرح زیر است:

$$\text{Kappa} = \frac{\frac{TP+TN}{n} - \frac{(TP+FP)(TP+FN)+(FN+TN)(TN+FP)}{n^2}}{1 - \frac{(TP+FP)(TP+FN)+(FN+TN)(TN+FP)}{n^2}} \quad (2)$$

$$\text{TSS} = \left(\frac{TP}{FP+FN} + \frac{TN}{FP+TN} \right) - 1 = (\text{Sensitivity} + \text{Specificity}) - 1 \quad (3)$$

$$\text{AUC} = \int_0^1 f(FP) dFP = 1 - \int_0^1 f(TP) dTP \quad (4)$$

در روابط فوق، TP، FP، FN و TN چهار نتیجه احتمالی پیش‌بینی‌های جفتی مدل‌ها (رویکرد حساسیت و اختصاصیت برابر) در یک ماتریس خطای ۲×۲

پراکنش گونه‌ها کاربرد وسیعی دارند (Amiri et al., 2023). با استفاده از متغیرهای بارندگی ماهانه و بیشینه و کمینه درجه حرارت ماهانه موجود در این پایگاه داده، متغیرهای زیست‌اقليمی مربوط به سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۱۴ در نرم‌افزار Idrisi TerrSet 18.31 تولید شدند. سپس، میانگین وزنی این دو سری متغیر زیست‌اقليمی (۱۹۷۹-۲۰۱۹) در فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه فیزیوگرافی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده ویژگی‌های رویشگاه‌های جنگلی و مؤثر بر حضور/عدم حضور گونه‌ها و جریان مواد و انرژی است، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک ۹۰ متری مستخرج از پایگاه USGS با تکنیک نزدیک-ترین همسایه در نرم‌افزار ArcMap 10.5 به اندازه پیکسل یک کیلومتر مربعی بزرگ مقیاس شد و متغیرهای شیب، جهت شیب و ارتفاع از سطح دریا از آن تهیه شدند. از آنجایی که وجود هم‌خطی یا همبستگی خطی بین متغیرهای مستقل یکی از دلایل افزایش خطای استاندارد برآورد ضرایب رگرسیونی، کاهش کارایی مدل و پیش‌بینی‌های خارج از دامنه انتظار است، برای تحلیل هم‌خطی بودن از یک فرآیند گام به گام و عامل تورم واریانس (VIF) طبق رابطه (۱) استفاده شد و متغیرهای با VIF بزرگتر از ۱۰ حذف شدند (Naimi et al., 2014). بر این اساس، شش متغیر زیست‌اقليمی Bio1: میانگین دمای سالانه، Bio3: ایزوترمالمیتی، Bio4: تغییرات فصلی دما، Bio14: بارندگی کم‌بارش - ترین ماه؛ Bio17: بارندگی خشک‌ترین فصل و Bio18: بارندگی گرم‌ترین فصل) و دو متغیر توپوگرافی (ارتفاع و شیب) برای پیش‌بینی پراکنش گونه و بررسی اثر تغییر اقلیم بر پراکنش آن به مدل‌ها وارد شدند.

$$\text{VIF} = \frac{1}{1 - r_1^2} \quad (1)$$

احتمال رخداد گونه به رویشگاه‌های نامناسب (۰/۲۵-۰)، با تناسب کم (۰/۲۵-۰/۵)، متوسط (۰/۷۵-۰/۵) و زیاد (۰/۷۵-۱) طبقه‌بندی شدند.

ارزیابی اهمیت متغیرها و ترسیم منحنی‌های پاسخ گونه به مهم‌ترین متغیرها

تعیین اهمیت نسبی متغیرها در ارزیابی پراکنش گونه‌ها، یکی از ویژگی‌های مدل‌های پراکنش گونه‌ای است. پس از تعیین مقدار اهمیت متغیرهای مشارکت‌کننده در مدلسازی با تابع VarImpor در نرم‌افزار R، منحنی‌های پاسخ گونه نسبت به مهم‌ترین متغیرها بر اساس مدل انفرادی با بیشترین کارایی ترسیم شد. در منحنی‌های پاسخ، ارتباط عوامل محیطی و احتمال رخداد گونه، ترجیحات رویشگاهی و تحمل زیستی گونه را نشان می‌دهد. این منحنی‌ها، پاسخ گونه را در امتداد گرادیان بوم‌شناختی ارزیابی می‌کنند. اما به دلیل اینکه مقدار بهینه گونه ممکن است در اثر رقابت جابجا شود، آشیان بوم-شناختی از شکل متقارن و زنگوله‌ای خارج شده و دارای چولگی به راست یا چپ می‌شود (et al., 2015; Ardestani).

پراکنش گونه تحت اقلیم آینده

برای شبیه‌سازی اقلیم آینده از مدل‌های گردش عمومی (GCM) که شبیه‌سازهایی برای پیش‌بینی اقلیم با استفاده از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای هستند، استفاده می‌شود. سناریوهای ارائه‌شده در گزارش ششم که به نام خط سیر اجتماعی-اقتصادی (SSP) معرفی شده‌اند، بر شاخص‌های کمی جمعیت، شهرنشینی، برنامه انرژی، تغییرات کاربری اراضی، توسعه اقتصادی منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای و سناریوهای تعمیم‌یافته تأکید می‌کنند (Niroumandfard et al., 2023). در این پژوهش، از سناریوهای اصلی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 مدل گردش عمومی GFDL-ESM4 مربوط به ششمین گزارش

هستند. در این ماتریس، TP) تعداد نقاطی است که گونه هم در دنیای واقعی و هم در پیش‌بینی مدل وجود دارد؛ FP) تعداد نقاطی است که گونه توسط مدل پیش‌بینی شده، اما در در واقعیت مشاهده نشده است؛ FN) تعداد نقاطی است که گونه در دنیای واقعی مشاهده شده، اما مدل آن را پیش‌بینی نکرده است؛ و TN) تعداد نقاطی است که گونه در حالت واقعی مشاهده نشده، توسط مدل نیز پیش‌بینی نشده است.

دامنه تغییرات ضریب کاپا و شاخص TSS از ۱- تا ۱+ است که مقادیر بالای آن‌ها نشان‌دهنده توافق کامل بین مناطق پیش‌بینی شده و نقاط حضور است. در مقابل، مقادیر صفر یا منفی دقت کمتر مدل و حالت پیش‌بینی تصادفی را نشان می‌دهند (Cohen, 1960; Allouche et al., 2006). مقدار شاخص AUC نیز که نشان‌دهنده نحوه تمایز یک مدل بین مکان‌های حضور و غیاب گونه است، از صفر تا یک متغیر است. این شاخص با مقدار ۰/۷-۰/۹ بیانگر یک مدل متوسط، ۰/۷-۰/۹ یک مدل خوب، و بیش از ۰/۹ بیانگر پیش‌بینی عالی مدل است (Swets, 1988).

ایجاد مدل اجماعی

با توجه به اینکه یکی از راه‌های کاهش عدم اطمینان و خطا در مدل‌ها، خلاصه‌سازی نتایج چندین مدل در یک رویکرد مدلسازی اجماعی است، نتایج الگوریتم‌های مدلسازی با استفاده از رویکرد میانگین وزنی مقادیر AUC در یک مدل اجماعی آشیان بوم‌شناختی با هم ترکیب شدند:

$$HS_i = \frac{\sum_j (AUC_{mj} \times m_{ji})}{\sum_j AUC_{mj}} \quad (5) \text{ رابطه}$$

که در آن، HS_i مطلوبیت رویشگاه در i امین سلول شبکه و m_{ji} احتمال حضور گونه در سلول i پیش‌بینی توسط مدل j است (Zare Chahouki et al., 2022). پس از ایجاد مدل‌های انفرادی و اجماعی، نقشه‌های

نتایج

به دلیل تفاوت در ماهیت الگوریتم‌های مختلف مدل‌سازی، پیش‌بینی‌های منتج از آنها با هم تفاوت دارند. در جدول ۱، همه مدل‌ها دارای $AUC \leq 0.8$ و TSS ≤ 0.5 بودند که با توجه به حدود آستانه ارائه شده، حاکی از پیش‌بینی قابل قبول است و برای ایجاد مدل اجماعی ارزیابی پراکنش گونه در نظر گرفته شدند. نتیجه ارزیابی صحت مدل‌های انفرادی نشان داد که مدل RF و سپس MARS بیشترین و مدل GLM کمترین کارایی را نشان دادند. صحت پیش‌بینی مابقی الگوریتم‌ها تا حدودی مشابه و خوب بود.

ارزیابی IPCC، برای تصویرسازی تغییرات دما و بارش در بازه‌های زمانی ۲۰۷۰-۲۰۸۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ میلادی استفاده شد. با تحلیل این سناریوها، امکان بررسی آسیب‌پذیری منتج از تغییرات اقلیمی از خوش‌بینانه‌ترین تا بدبینانه‌ترین حالت فراهم می‌شود. نقشه‌های اجماعی حال حاضر و آینده با استفاده از یک سطح بحرانی بر اساس شاخص AUC به دو طبقه مطلوب و نامطلوب تقسیم شدند. سپس، با مقایسه نقشه فازی حال حاضر و نقشه فازی مربوط به سناریوهای بازه‌های مذکور، مقدار تغییر در رویشگاه‌های مناسب گونه در آینده به صورت مناسب باقی مانده، نامناسب باقی مانده، مناسب شده و نامناسب شده تعیین شد.

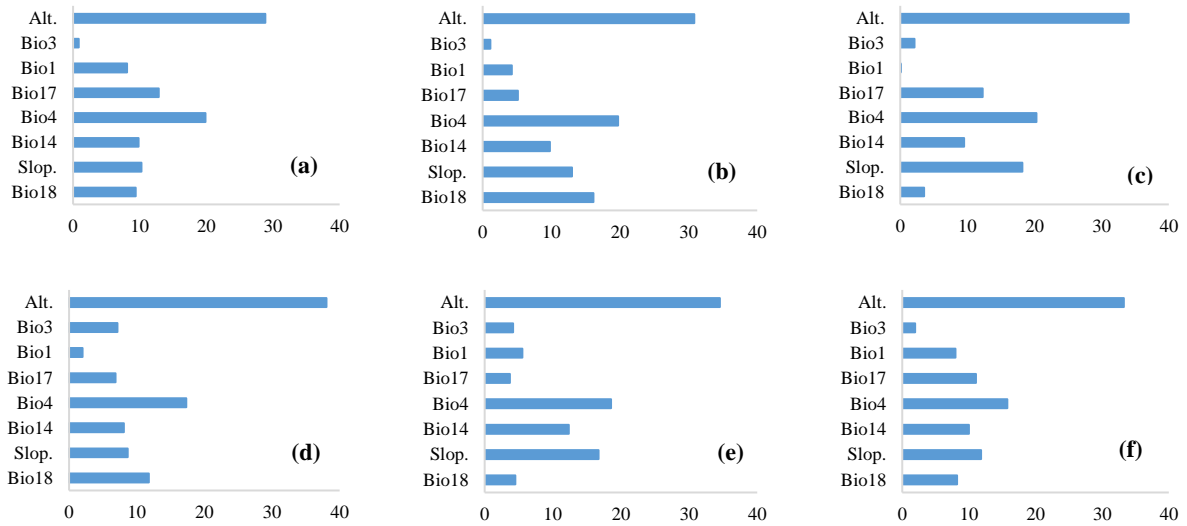
جدول ۱- صحت به دست آمده از میانگین مقادیر شاخص‌های ارزیابی در مقابل داده‌های مستقل در مدل‌سازی

Table 1. Accuracy obtained from the average values of evaluation indices versus independent data in modeling

مدل اجماعی Ensemble	RF	MaxEnt	MARS	GLM	ANN	شاخص‌های ارزیابی Evaluation indices
0.69	0.59	0.56	0.58	0.50	0.56	آماره مهارت واقعی TSS
0.93	0.87	0.84	0.85	0.80	0.84	سطح زیر منحنی AUC
0.59	0.56	0.53	0.54	0.46	0.52	کاپا Kappa
86.69	80.80	83.93	84.98	81.04	83.58	حساسیت Sensitivity
82.75	77.88	70.81	72.86	68.89	72.88	ویژه‌نگاری Specificity

است متفاوت باشد. با توجه به شکل، ارتفاع، تغییرات فصلی دما (Bio4) و شیب، بیشترین اهمیت و ایزوترمالتی (Bio3) و میانگین دمای سالانه (Bio1) کمترین اهمیت را در پراکنش گونه داشتند.

مقدار اهمیت نسبی متغیرهای مؤثر بر پراکنش گونه تحت مدل‌های مختلف در شکل ۲ آمده است. ترتیب اهمیت متغیرها در تمام مدل‌ها یکسان نیست، زیرا مدل‌های مورد بررسی، از نوع هم‌بسته هستند و به واسطه نوع الگوریتم، درجه اهمیت متغیرها در آنها ممکن

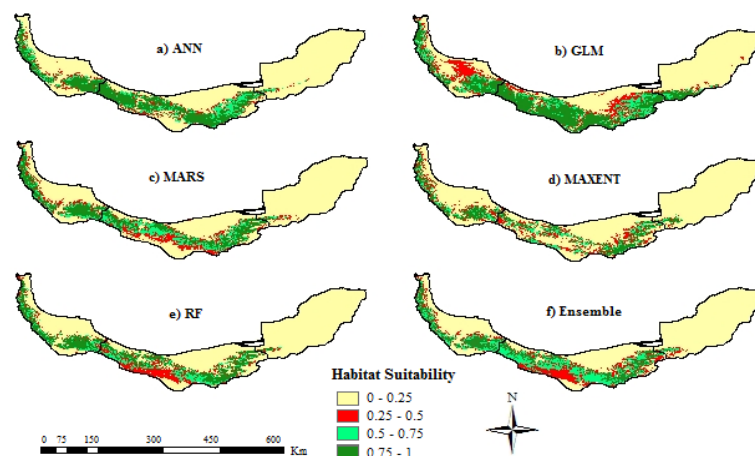


شکل ۲- اهمیت نسبی (درصد مشارکت) متغیرهای مؤثر در مدل‌سازی محاسبه شده توسط مدل‌های (a) ANN، (b) GLM، (c) MARS، (d) MaxEnt، (e) RF و (f) مدل اجماعی

Figure 2. Relative importance of the effective factors in modeling calculated by: a) ANN, b) GLM, c) MARS, d) MaxEnt, e) RF, and f) Ensemble models

ایجادشده، گونه از آستارا تا حوالی گرگان حضور دارد و احتمال رخداد آن در شرایط آب‌وهوایی فعلی در مرکز (استان مازندران) و غرب (استان گیلان) منطقه موردبررسی نسبت به شرق آن (استان گلستان) بیشتر است. بر اساس مدل اجماعی، گونه در ۶/۶۰۳۰ کیلومترمربع از منطقه موردبررسی حضور دارد.

همانگونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، نقشه‌های حاصل از مدل‌های مختلف متفاوت هستند، ولی انطباق زیادی با هم دارند به‌خصوص در مورد مدل‌های RF، MARS و مدل اجماعی. با اجماع نتایج حاصل از مدل‌های انفرادی، یک نقشه از مناطق مناسب پراکنش راش شرقی در حال حاضر به‌دست آمد. در نقشه‌های پراکنش

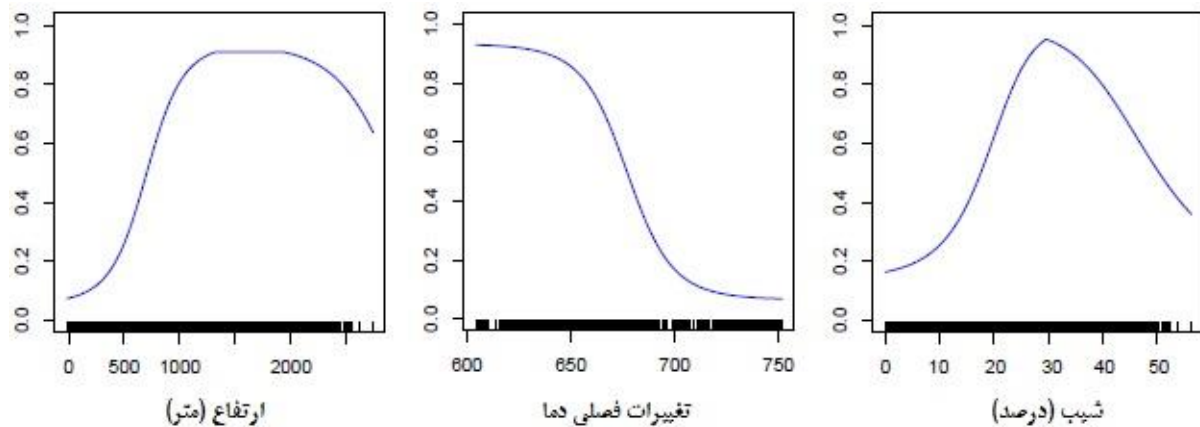


شکل ۳- نقشه‌های پتانسیل رویشگاه گونه تحت اقلیم فعلی در جنگل‌های هیرکانی پیش‌بینی شده با مدل‌های انفرادی (a-e) و مدل اجماعی (f)

Figure 3. The species habitat potential maps under the current climate in Hyrcanian forests predicted by single models (a-e) and ensemble model (f)

راش نسبت به افزایش تغییرات فصلی دما از ۶۵۰ به بعد به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. زمانی که شیب حدود ۳۰ درصد باشد، حضور گونه بیشینه است و در کمتر و فراتر از آن کاهش می‌یابد.

منحنی‌های عکس‌العمل گونه نسبت به متغیرهایی که بیشترین سهم را در پراکنش به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴)، نمایانگر آن است که مناطقی با دامنه ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۳۰۰ متر از سطح دریا شرایط مطلوب برای حضور گونه را دارند. منحنی عکس‌العمل گونه

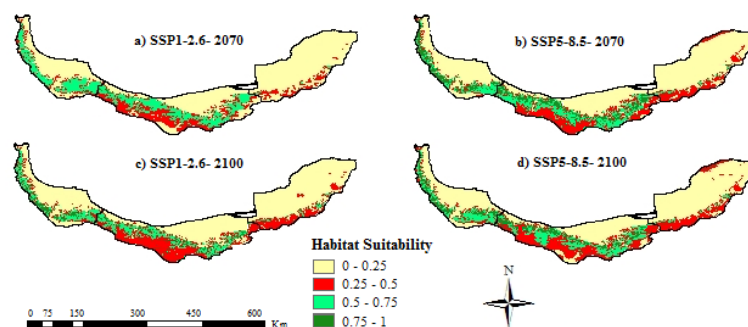


شکل ۴- پاسخ گونه به مهم‌ترین متغیرهای محیطی مؤثر بر پراکنش بر اساس مدل با بیشترین کارایی (RF)

Figure 4. Species response to the most important effective environmental variables in distribution based on the model with the best performance (RF)

و بدینانه (شکل ۵) مشخص است که مساحت زیادی از پراکنش گونه در قسمت مرکزی استان مازندران و غرب استان گلستان کاهش یافته و لکه‌هایی از آن در سمت شرق استان گلستان مشاهده می‌شود.

با استفاده از تکنیک اجماع و جمع‌بندی نتایج حاصل از تمامی مدل‌ها، نقشه پراکنش گونه در آینده تهیه شد. مساحت رویشگاه مطلوب گونه در شرایط اقلیم فعلی و آینده نیز بر اساس مدل اجماعی محاسبه شد. از نقشه پراکنش گونه تحت سناریوهای خوش‌بینانه



شکل ۵- نقشه‌های پتانسیل رویشگاه گونه متأثر از تغییر اقلیم در جنگل‌های هیرکانی تحت سناریوهای خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) مدل اقلیمی GFDL-ESM4 در بازه‌های زمانی مورد بررسی

Figure 5. The species habitat potential maps affected by climate change in Hyrcanian forests under the optimistic (SSP1-2.6) and pessimistic (SSP5-8.5) scenarios of the GFDL-ESM4 model in studied time periods

با تحلیل تغییرات دامنه پراکنش گونه راش (جدول ۲)، طبق سناریوهای تغییر اقلیم در سال‌های ۲۰۷۱ تا ۲۱۰۰ نسبت به سال‌های ۲۰۴۱ تا ۲۰۷۰، رویشگاه گونه به مقدار بیشتری کاهش خواهد یافت. همچنین، از آنجایی که سناریوی SSP1-2.6 خوش‌بینانه است، شرایط آتی منطقه را با کاهش کمتر سطح رویشگاه مناسب گونه نسبت به حال حاضر پیش‌بینی کرده است.

پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۷۰ میلادی تحت سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۷/۶۵ و ۲۹/۲۷ درصد از سطح رویشگاه‌های مطلوب فعلی گونه کاسته شود. در پایان سال ۲۱۰۰ میلادی نیز درصد رویشگاه‌های نامناسب‌شده تحت سناریوی خوش‌بینانه برابر با ۱۳/۲۳ و تحت سناریوی بدبینانه معادل ۳۵/۵۱ خواهد بود.

جدول ۲- مساحت (کیلومتر مربع) و درصد تغییرات رویشگاه‌های مناسب و نامناسب گونه تحت سناریوهای خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) مدل اقلیمی GFDL-ESM4 در بازه‌های زمانی موردبررسی

Table 2. The area (km²) and the percentage of changes in species suitable and unsuitable habitats under the optimistic (SSP1-2.6) and pessimistic (SSP5-8.5) scenarios of the GFDL-ESM4 model in two time periods

2071-2100		2041-2070		
SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	
6030.6				مساحت رویشگاه فعلی Current habitat area
1186.6	955.2	1179.8	1476.9	رویشگاه مناسب باقی‌مانده Remained suitable habitat
10932.4	15371.4	12076	15853.2	رویشگاه نامناسب باقی‌مانده Remained unsuitable habitat
135	159	92.3	108.5	رویشگاه مناسب‌شده Turned to suitable habitat
6746	2514.4	5651.9	1561.4	رویشگاه نامناسب‌شده Turned to unsuitable habitat
1321.6	1111.2	1272.1	1585.4	حضور آینده Future presence
17678.4	17885.8	17727.9	17414.6	غیاب آینده Future absence
0.71	0.83	0.48	0.57	رویشگاه‌های مناسب‌شده (درصد) Gain area (%)
35.51	13.23	29.75	8.22	رویشگاه‌های نامناسب‌شده (درصد) Loss area (%)
-34.8	-13.29	-29.27	-7.65	تغییرات رویشگاه‌های گونه (درصد) Species habitat changes (%)

al. (2022) و Amiri et al. (2023) مطابقت داشت.

دلیل کاهش عدم قطعیت مدل اجماعی و ارائه نتایج قابل اعتمادتر آن تلفیق صحیح نتایج الگوریتم‌های مدلسازی

بحث

مدل اجماعی عملکرد بیشتری نسبت به مدل‌های انفرادی نشان داد که با یافته‌های Zare Chahouki et

و بارندگی همزمان افزایش می‌یابد. در پژوهشی Ames- (2022) Martínez et al. دریافتند که رویشگاه‌های باقی‌مانده راش مکزیک و ویژگی‌های مناسبی از نظر دما، رطوبت بالا و شیب‌های رو به بالا دارند. شیب زمین تعیین‌کننده عمق خاک و تا حدودی بافت و ساختمان آن است. بر روی شیب‌های تند، عمق و تحول‌یافتگی خاک کمتر و خاکدانه‌ها درشت هستند. بنابراین، بسته به عمق ریشه‌دوانی و نیاز غذایی گیاه، شیب زمین نقش مهمی در پراکنش آن ایفا می‌کند (Makhdoom, 1995).

منحنی‌های پاسخ گونه راش نسبت به این متغیرها و بر اساس مدل جنگل تصادفی، مناطقی با دامنه ارتفاعی ۲۰۰۰-۱۳۰۰ متر از سطح دریا، شیب ۳۰ درصد و تغییرات فصلی دما حدود ۶-۶/۵ درجه سانتی‌گراد را رویشگاه‌های مطلوب نشان دادند. بر اساس بررسی‌های پایه‌ای که توسط Sagheb-Talebi et al. (2014) و Marvi Mohajer (2005) انجام شد، گونه راش مختص ارتفاعات میانی البرز دانسته شده و ارتفاع رویشگاه‌های طبیعی و انبوه آن ۱۰۰۰ متر به بالا ذکر شد، ولی بسته به شرایط محلی و میکروکلیمایی نمونه‌هایی از آن به صورت جامعه تا ارتفاع حدود ۶۰۰ متری دیده شده و تا ارتفاع ۵۰۰ متری به صورت دسته‌ها و گروه‌های کوچک و در ارتفاع ۱۱۰ متری از سطح دریا به صورت تک‌درخت مشاهده می‌شود. (Taleshi et al. 2018). تحت شرایط اقلیم فعلی، میانگین ارتفاع مطلوب این گونه را ۱۳۷۸ متر بیان کردند. راش همچنین به‌عنوان گونه مقاوم به سایه و نم‌پسند اغلب در دامنه‌های رو به شمال و شیب‌های کم تا متوسط انتشار دارد. در اراضی پرشیب، فرصت نفوذ آب کم است و نزولات جوی به شکل هرزآب حرکت می‌کنند، در نتیجه در درازمدت، پدیده خاکسازي کمتر اتفاق می‌افتد. همچنین، در اثر آبشویی خاک، مواد غذایی کمتری در

انفرادی است. پس از مدل اجماعی، جنگل تصادفی دارای بالاترین صحت بود که صحت بالای آن در بررسی‌های Khalatbari و Dagtekin et al. (2020) و Limaki et al. (2021) نیز تأیید شد. مزیت جنگل تصادفی نسبت به مدل‌های درختی دیگر در ایجاد یک گروه بزرگ (یعنی جنگل) این است که نمونه‌برداری از داده‌ها را به صورت تکراری و تصادفی انجام می‌دهد. همچنین، با مدیریت داده‌های پرت موجود در نمونه‌های تعلیمی، از مشکلات احتمالی ناشی از برازش بیش از حد جلوگیری می‌کند (Breiman, 2001). به علاوه، این مدل قادر به تشخیص روابط غیرخطی بین متغیر وابسته و متغیرهای مستقل است که آن را نسبت به الگوریتم‌های خطی قوی‌تر می‌سازد. این یک ویژگی بسیار مهم مدل‌هایی است که برای مدیریت پدیده‌های طبیعی به کار می‌روند. زیرا عوامل توپوگرافی، اقلیمی و زمینی اغلب پیچیده و غیرخطی هستند (Catani et al., 2013). یک فرض کلیدی در مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای با متغیرهای زیست‌اقلیمی این است که محدوده گونه‌های مدل‌سازی شده در تعادل با اقلیم هستند (Dagtekin et al., 2020).

متغیرهای ارتفاع از سطح دریا، تغییرات فصلی دما (Bio4) و شیب به ترتیب بیشترین تغییرات را در پراکنش گونه توجیه کردند. (Amiri et al. 2023) نیز اذعان داشتند که عامل ارتفاع از سطح دریا به دلیل تأثیر بر دما و رطوبت از عوامل مهم و مؤثر بر پراکنش گونه‌های گیاهی است. (Engler et al. 2011) در بررسی اثرهای تغییر اقلیم بر روی گونه‌های درختی در عرض دامنه‌های کوهستانی اروپا به این نتیجه رسیدند که در مناطقی مانند کوه‌های پیرنه و آلپ در شرق اتریش که پیش‌بینی می‌شود گیاهان متحمل افزایش گرمایش همراه با کاهش بارندگی می‌شوند، تأثیر روی گیاهان به احتمال زیاد، بیشتر از مناطقی است که افزایش دما کمتر است

کمتر بودن فضا برای جابجایی رو به بالای گیاهان در اثر تغییر اقلیم، درصد رویشگاه‌های مطلوب از بین رفته در مناطق کوهستانی مانند پیرنه و بخش‌های شرقی آلپ بسیار بیشتر از دیگر مناطق بود. کمترین و بیشترین کاهش سطح رویشگاه گونه ۷/۶۵ درصد و ۳۴/۸ درصد پیش‌بینی شد که به ترتیب مربوط به سناریوی SSP1-2.6 بازه زمانی ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و سناریوی SSP5-8.5 بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۷۱ خواهد بود. در واقع، به دنبال تغییر اقلیم و یافتن شرایط رویشگاهی مناسب، پراکنش گونه در منطقه تغییر می‌یابد و دامنه جغرافیایی پراکنش آن در آینده باریک‌تر خواهد شد که دلیل آن کاهش بارندگی و افزایش میانگین درجه حرارت سالانه تحت سناریوهاست. بدیهی بودن از بین رفتن رویشگاه‌های مطلوب این گونه ارزشمند در شمال ایران در پژوهش Khalatbari Limaki et al. (2021) نیز ثابت شد. در اثر تغییر اقلیم، پراکنش گونه در قسمت مرکزی استان مازندران و غرب استان گلستان کاهش می‌یابد. پژوهش Taleshi et al. (2018) نیز نشان داد که این گونه در شرایط اقلیمی گرم‌تر، بخش‌های وسیعی از رویشگاه‌های مطلوب خود را در بخش‌های شرقی و مرکزی جنگل‌های هیرکانی از دست خواهد داد. بخش‌های شرقی و مرکزی هیرکانی از نظر رژیم بارندگی با بخش غربی آن به‌طور کامل تفاوت دارند. در جنگل‌های هیرکانی از غرب به شرق، میانگین بارندگی سالانه کاهش و میانگین دمای سالانه افزایش می‌یابد. به همین دلیل، رویشگاه‌های راش در بخش‌های مرکزی و شرقی هیرکانی شکننده‌تر بوده و تغییر اقلیم تأثیر نامطلوب شدیدتری بر رویشگاه‌های این نواحی خواهد داشت. با وجود اینکه در حال حاضر ارتفاعات بالاتر (بیش از ۲۴۰۰ متر) به دلیل کاهش دما و سرمای پایدار در بهار برای رشد بسیاری از گونه‌های درختی مناسب نیستند

اختیار گیاه قرار می‌گیرد. در پژوهش Shabani (2019) نیز بیشترین و کمترین تعداد پایه‌های گونه راش در ارتباط با شرایط فیزیوگرافی رویشگاه و شکل زمین به ترتیب در شیب‌های ۲۰-۴۰ و ۸۰-۱۰۰ درصد عنوان شد. همچنین با افزایش ارتفاع از سطح دریا، فراوانی پایه‌های راش تا ارتفاع ۱۴۰۰ متری حفظ شد. به عبارتی، شیب زمین در این رابطه یک عامل تعیین‌کننده بوده و نقش اساسی در پراکنش دارد.

مدلسازی پراکنش گونه تحت شرایط اقلیمی فعلی، پراکنش گونه راش را از آستارا تا گرگان نشان داد که با محدوده پراکنش ذکر شده توسط Sagheb-Talebi et al. (2014) مطابقت دارد. بیش از یک چهارم سطح منطقه مطلوبیت بالایی برای استقرار گونه داشت که در مرکز و غرب منطقه نسبت به شرق آن بیشتر بود. در پژوهش Dagtekin et al. (2020) نیز پراکنش این گونه در جنوب دریای خزر و امتداد سواحل جنوب‌غربی آن مشخص شد. پراکنش گونه در آینده به سمت شرق منطقه هیرکانی پیش می‌رود. پیش‌بینی پراکنش گونه تحت اقلیم آینده، بیانگر کاهش رخداد گونه در منطقه به دلیل کاهش بارندگی سالانه و افزایش دما است. از میان بوم‌سازگان‌های جنگلی جهان، جنگل‌های کوهستانی به وضوح به تغییرات اقلیمی حساس هستند و کاهش شدید دامنه پراکنش، مشخصه بوم‌سازگان‌های کوهستانی است که فضاها را کوچک‌تر برای حرکت بیشتر به ارتفاعات بالاتر دارند. به دلیل اینکه جنگل‌های هیرکانی به‌صورت نوار باریکی هستند، بسیاری از زیستگاه‌های مطلوب راش شرقی در نتیجه تغییر اقلیم از بین خواهند رفت (Khalatbari Limaki et al., 2021). در پژوهشی که توسط Engler et al. (2011) با هدف بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر گیاهان مناطق کوهستانی اروپا انجام شد نیز مشخص شد که به دلیل

دستاوردهای کاربردی این پژوهش به حساب می آید. با توجه به نقش حیاتی جنگل‌های راش در تنوع زیستی منطقه هیرکانی و ارزش اقتصادی و بوم‌شناختی آن‌ها، تدوین طرح‌های حفاظتی با هدف کاهش تأثیر تغییر اقلیم بر این گونه با ارزش ضروری به نظر می‌رسد. به‌عنوان مثال، گونه‌های حساس به تغییر اقلیم مانند راش بایستی طوری نشانه‌گذاری شوند که در آینده به‌طور کامل از بین نروند. همچنین، علاوه بر حفاظت از پایه‌های مستقر، راهکارهایی مانند اصلاح زیستگاه در قالب برنامه‌های احیای جنگل در مکان‌های مناسب پیش‌بینی شده پیشنهاد می‌شود. برای بهبود نتایج و حصول پیش‌نمایی‌های صحیح‌تر از مطلوبیت رویشگاه این گونه پیشنهاد می‌شود که متغیرهای محیطی دیگری مانند خاک، رقابت، فعالیت‌های انسانی و اطلاعات اقتصادی-اجتماعی در پژوهش‌های آینده مورد ارزیابی قرار گیرند.

References

- Ahmadi, K.; Alavi, S. J.; Tabari Kouchaksaraei, M., Constructing site quality curves and productivity assessment for uneven-aged and mixed stands of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in Hyrcanian forest, Iran. *Forest Science and Technology* **2017**, *13* (1), 41-46.
- Akhavan, R.; Hassani, M.; Quantifying the structure of pure beech forests using spatial structural indices (case study: Hyrcanian forests of Mazandaran province, Iran). *Forest Research and Development* **2023**, *9* (2), 221-235.
- Allouche, O.; Tsoar, A.; Kadmon, R., Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa, and the true skill statistics (TSS). *Journal of Applied Ecology* **2006**, *43* (6), 1223-1232.
- Ames-Martínez, F. N.; Luna-Vega, I.; Dieringer, G.; Rodríguez-Ramírez, E. C., The effect of climate change on Arcto-Tertiary Mexican beech forests: Exploring their past, present, and future distribution. *Ecology and Evolution* **2022**, *12* (8), e9228.
- Amiri, M.; Shafiezadeh, M.; Tarkesh, M.; Moslemi, S. M., Ensemble modelling of the

(Ahmadi et al., 2017)، بررسی‌های مذکور تغییر رویشگاه گونه به سمت ارتفاعات را بیان کردند. Mátyás et al. (2010) نیز دریافتند که هر درجه سانتی-گراد افزایش درجه حرارت، سبب جابجایی راش به اندازه ۱۷۰ متر در امتداد دامنه‌های کوهستانی می‌شود.

نتیجه‌گیری

نظر به اینکه تغییرات اقلیمی یکی از عوامل مهم در رشد درختان محسوب می‌شوند، بررسی تأثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌ای برای مقابله با اثرهای مخرب این پدیده در جنگل‌های هیرکانی و ارائه راهکارهای مناسب مدیریتی سودمند جلوه می‌کند. به‌کارگیری شیوه‌های جنگل‌شناسی سازگار با تغییر اقلیم و نیز طرح‌های حفاظتی گونه منطبق بر تأثیر تغییر اقلیم، به‌عنوان مثال، استفاده از شیوه‌های جنگل‌شناسی که به افزایش تنوع ژنتیکی درختان و افزایش مقاومت آن‌ها به تنش‌های زیستی و غیرزیستی منجر می‌شود، از

- potential invasion of *Prosopis juliflora* (SW.) DC in Makuran region. *Environmental Sciences* **2023**, *21* (1), 205-224. (In Persian)
- Ardestani, E. G.; Tarkesh, M.; Bassiri, M.; Vahabi, M.R., Potential habitat modeling for reintroduction of three native plant species in central Iran. *Arid Land* **2015**, *7*, 381-390.
- Attarod, P.; Kheirkhah, F.; Khalighi Sigaroodi, Sh.; Sadeghi, M.; Bayramzadeh, V., Trend analysis of meteorological parameters and reference evapotranspiration in the Caspian region. *Iranian Journal of Forest* **2017**, *9* (2), 171-185. (In Persian)
- Breiman, L. 2001. Random Forests. *Machine Learning* **2001**, *45* (1), 5-32.
- Catani, F.; Lagomarsino, D.; Segoni, S.; Tofani, V., Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards Earth System Science* **2013**, *13*, 2815-2831.
- Cheng, R.; Wang, X.; Zhang, J.; Zhao, J.; Ge, Z.; Zhang, Z., Predicting the potential suitable distribution of *Larix principis-rupprechtii* Mayr under climate change scenarios. *Forests* **2022**, *13*, 1428.

- Cohen, J. A coefficient of agreement of nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* **1960**, *20* (1), 37-46.
- Dagtekin, D.; Şahan, E. A.; Denk, T.; Köse, N.; Dalfes, H. N., Past, present and future distributions of Oriental beech (*Fagus orientalis*) under climate change projections. *PLoS One* **2020**, *15*(11), e0242280.
- Engler, R.; Randin, C. F.; Thuiller, W.; Dullinger, S.; Zimmermann, N. E.; Araújo, M. B.; Pearman, P. B., et al., 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology* **2011**, *17* (7), 2330-2341.
- Haghdoust, N.; Akbarinia, M.; Hoseini, S. M.; Varamesh, S., Effects of Substitution of Degraded Natural forests with Plantations on Soil Carbon Sequestration and Fertility in North of Iran. *Environmental Studies* **2012**, *38* (3), 135-146. (In Persian)
- Hamidi, S. K.; Fallah, A.; Bayat, M.; de Luis, M.; The effects of climate variables (temperature and precipitation) on growth characteristics of trees (case study: Farim forest). *Forest Research and Development* **2021**, *6* (4), 593-607.
- Hannah, L. *Climate Change Biology*. 2nd Edition. Academic Press, Elsevier, 2014; 470 p.
- Hojjati, S. M.; Tafazoli, M.; Asadiyan, M.; Baluee, A., Estimation of carbon sequestration and forest soil respiration using machine learning models in Eastern Forests of Mazandaran Province. *Forest Research and Development* **2022**, *8* (4), 371-388.
- Hosseini, S. S.; Tavili, A.; Naghipoor Borj, A. A.; Khalighi Sigaroodi; Sh., Potential effects of climate change on the geographic distribution of the *Hordeum bulbosum* L. in the central Zagros region. *Journal of Natural Environment* **2022**, *74* (4), 747-758. (In Persian)
- IUCN (Evaluation Report), Islamic Republic of Iran- Hyrcanian Forests. May **2019**, 19-27.
- Jafari, M., Investigation and analysis of climate change factors in Caspian Zone forests for last fifty years. *Forest and Poplar Research* **2008**, *16* (2), 314-326. (In Persian)
- Khalatbari Limaki, M.; Es-hagh Nimvari, M.; Alavi, S. J.; Mataji, A.; Kazemnezhad, F., Potential elevation shift of oriental beech (*Fagus orientalis* L.) in Hyrcanian mixed forest ecoregion under future global warming. *Ecological Modelling* **2021**, *455*, 109637.
- Makhdoom, M., The Foundation of Land Use Planning. University of Tehran Press: Tehran, 1995; 295 p. (In Persian)
- Marvi Mohajer, M. R., Silviculture. University of Tehran Press: Tehran, 2005; 410 p.
- Mátyás, C.; Berki, I.; Czúcz, B.; Gálos, B., Móricz, N.; Rasztoivts, E., Future of beech in southeast Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* **2010**, *6*, 91-110.
- Meyer, B. F.; Buras, A.; Rammig, A.; Zang, C. S., Higher susceptibility of beech to drought in comparison to oak. *Dendrochronologia* **2020**, *64*, 125780.
- Naimi, B.; Hamm, N. A.; Groen, T. A.; Skidmore, A. K.; Toxopeus, A. G., Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? *Ecography* **2014**, *37* (2), 191-203.
- Niroumandfard, F.; khashei, A.; Hashemi, R.; Ghorbani, Kh., Investigation of Climate Change Projection on Temperature and Precipitation Parameters Using CMIP6 Models (Case Study: Birjand Station). *Soil and Water Research* **2023**, *53* (9), 2009-2026. (In Persian)
- Sagheb-Talebi, K.; Sajedi, T.; Pourhashemi, M., Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future. Netherlands: Springer Dordrecht Press, **2014**, 152 p.
- Shabani, S.; Ahmadi, A.; Varamesh, S., Distribution of *Fagus* sp. and *Acer velutinum* species in relation to habitat physiographic conditions and landform in Lalis forests, Chalus. *Protection and Exploitation of Hyrcanian Forests* **2019**, *1* (2), 39-46. (In Persian)
- Swets, J. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* **1988**, *240* (4857), 1285-1293.
- Taleshi, H.; Jalali, S. Gh.; Alavi, S. J.; Hosseini, S. M.; Naimi, B., Climate change impacts on the distribution of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Hyrcanian forests of Iran. *Iranian Journal of Forest* **2018**, *10* (2), 251-266. (In Persian)
- Zare Chahouki, M. A.; Karami, P.; Piri Sahragard, H., Ensemble modeling approach to predict the potential distribution of *Artemisia sieberi* in desert rangelands of Yazd province, central Iran. *Journal of Rangeland Science* **2022**, *12* (4), 326-340.

