

## Research Article

# Predicting the impact of climate change on the distribution of *Acer velutinum* Boiss. using species distribution models in the Hyrcanian forests, Iran

Khadijeh Asghari <sup>1</sup>, Hamed Asadi <sup>2\*</sup>, Hamid Jalilvand <sup>3</sup>, Seyed Mohamm Hojjati <sup>3</sup> and Mahya Tafazoli <sup>4</sup>

1- Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2\* - Corresponding author, Assistant Prof., Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: [h.asadi@sanru.ac.ir](mailto:h.asadi@sanru.ac.ir)

3- Prof., Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

4- Assistant Prof., Department of Forest Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: 13.07.2025

Revised: 04.10.2025

Accepted: 16.10.2025

## Abstract

**Background and Objectives:** To reduce deforestation and the degradation of natural forests, reforestation and afforestation projects are rapidly expanding worldwide. In northern Iran, the use of native species has been suggested as an effective approach for restoring degraded forests. *Acer velutinum* Boiss., one of the tallest and most abundant maple species in the Hyrcanian forests, plays an important ecological role in terms of both quantity and quality. It has been widely applied in afforestation programs, either as pure stands or in mixture with other native species. Understanding its current and future suitable habitats is therefore essential for the success of restoration projects, especially under the increasing pressure of climate change. The present study aimed to model and identify suitable habitats for *A. velutinum* in the Hyrcanian forests.

**Methodology:** The study was conducted across the entire Hyrcanian forest region in Iran, covering Gilan, Mazandaran, and Golestan provinces. Three species distribution modeling approaches were employed: Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), and Maximum Entropy (MaxEnt). Bioclimatic variables at 1 km spatial resolution were obtained from the WorldClim database. Future climate variables were derived from the MPI-ESM1-2-HR general circulation model under four scenarios (SSP 126, SSP 245, SSP 370 and SSP 585) up to the year 2100. Modeling algorithms and variable importance were implemented in the *caret* package in R. Model performance was evaluated using Kappa statistics, area under the curve (AUC), and accuracy.

**Results:** The RF model outperformed the others, achieving the highest accuracy in predicting suitable habitats for *A. velutinum* (AUC = 0.9). Variable importance analysis indicated that isothermality and temperature seasonality were the most influential predictors in the RF and MaxEnt models, while precipitation of the driest month and temperature seasonality were the most important variables in the SVM model. According to RF projections, under the most optimistic scenario (SSP 126), suitable habitats in the central parts of the Hyrcanian forests will remain largely stable, but the species is expected to lose about 43% of its suitable habitat in the eastern and western regions. Under the most pessimistic scenario (SSP 585), only limited areas in central and western Mazandaran province will remain suitable, with 33% habitat loss by 2100.



Furthermore, the MaxEnt model predicted that under SSP 370 and SSP 585 scenarios, no suitable habitat will remain for the species by 2100.

**Conclusion:** The RF model provided the most reliable predictions of *A. velutinum* distribution under future climate change. Overall, all models and scenarios indicated substantial habitat loss, especially in the eastern and western regions of the Hyrcanian forests. The habitat suitability maps generated in this study provide a valuable basis for forest restoration planning, particularly in highly degraded areas. The RF model highlights the importance of this species in restoration efforts and supports its use in sustainable forest ecosystem management, offering a reliable reference for managers in conservation and reforestation planning.

**Keywords:** Climate change scenarios, Hyrcanian forests, maximum entropy model, random forest model, suitable habitat.

## پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر پراکنش پلت (*Acer velutinum* Boiss.) با استفاده از مدل‌های پراکنش گونه‌ای در جنگل‌های هیرکانی

خدیجه اصغری<sup>۱</sup>، حامد اسدی<sup>۲\*</sup>، حمید جلیوند<sup>۳</sup>، سید محمد حجتی<sup>۳</sup> و محیا تفضلی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. پست الکترونیک: [h.asadi@sanru.ac.ir](mailto:h.asadi@sanru.ac.ir)

۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۴- استادیار، گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲ تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۴

### چکیده

سابقه و هدف: به‌منظور کاهش جنگل‌زدایی و تخریب جنگل‌های طبیعی، احیا و توسعه جنگل‌ها از طریق جنگل‌کاری در جهان به‌سرعت در حال افزایش است. به‌نظر می‌رسد که یکی از راه‌حل‌های احیای جنگل‌های مخروبه هیرکانی در ایران استفاده از گونه‌های بومی باشد. پلت (*Acer velutinum* Boiss.) به‌عنوان یکی از گونه‌های بومی در این جنگل‌ها، از فراوان‌ترین و بلندترین افراهای ایران محسوب می‌شود. این گونه از نظر کمی و کیفی، نقش مهمی در جنگل‌های هیرکانی ایفا می‌کند و در برنامه‌های جنگل‌کاری به‌طور خالص یا آمیخته با گونه‌های بومی دیگر در این منطقه، مورد توجه قرار گرفته است. کسب اطلاعات در خصوص رویشگاه‌های مناسب فعلی و آینده آن به‌منظور اطمینان از موفقیت جنگل‌کاری به‌ویژه تحت تأثیر تغییر اقلیم، لازم و ضروری است. از این‌رو، پژوهش پیش‌رو به‌منظور مدل‌سازی و شناسایی مناسب رویشگاه پلت در جنگل‌های هیرکانی انجام شد.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در کل سطح جنگل‌های هیرکانی در سه استان گیلان، مازندران و گلستان و با هدف تعیین رویشگاه مطلوب پلت برای احیای جنگل با استفاده از سه روش مختلف مدل‌سازی شامل: جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و بیشینه آنترپی (MaxEnt) انجام گرفت. برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر پراکنش پلت، متغیرهای زیست‌اقلیمی با تفکیک فضایی یک کیلومتر موجود در پایگاه داده‌های Worldclim تا سال ۲۱۰۰ استفاده شد. متغیرهای زیست‌اقلیمی آینده با استفاده از مدل گردش عمومی جو (MPI-ESM1-2-HR) تحت چهار سناریوی SSP 126، SSP 245، SSP 370 و SSP 585 تا سال ۲۱۰۰ میلادی استخراج شد. الگوریتم‌های مدل‌سازی و اهمیت نسبی متغیرها در بسته caret در نرم‌افزار R پیاده‌سازی و محاسبه شدند. همچنین برای پیش‌بینی حضور/غیاب به‌منظور ارزیابی دقت در هریک از روش‌های مدل‌سازی مورد استفاده در برآورد حضور گونه از آماره‌های کاپا، سطح زیر منحنی و صحت استفاده شد.

نتایج: مدل RF به‌علت مقادیر زیاد شاخص‌های ارزیابی در پیش‌بینی رویشگاه مطلوب پلت، بهترین عملکرد را نسبت به مدل‌های دیگر داشت (مقدار سطح زیر منحنی ۰/۹). نتایج ارزیابی اهمیت نسبی متغیرها با استفاده از مدل RF و MaxEnt نشان داد که متغیرهای ایزوترمالیتی و تغییرات فصلی دما به‌ترتیب بیشترین تأثیر را بر پراکنندگی پلت داشتند. براساس مدل SVM نیز بیشترین تأثیر متعلق به متغیرهای بارندگی در خشک‌ترین ماه و تغییرات فصلی دما بود. پیش‌بینی تغییرات رویشگاه مطلوب پلت با استفاده از مدل RF در جنگل‌های هیرکانی تحت سناریوهای تغییر اقلیم آینده تا سال ۲۱۰۰ نشان داد که در خوش‌بینانه‌ترین حالت (SSP 126)، رویشگاه مناسب پلت در بخش مرکزی جنگل‌های هیرکانی، تغییر معنی‌داری نخواهد کرد، اما این گونه ۴۳ درصد از رویشگاه مطلوب خود را در قسمت‌های شرق و غرب جنگل‌های مذکور از دست خواهد داد. همچنین، در بدبینانه‌ترین حالت (SSP 585) فقط بخش اندکی از استان مازندران در مرکز این جنگل‌ها و قسمت‌هایی در غرب این استان، رویشگاه مناسب این گونه باقی خواهد ماند و ۳۳ درصد از رویشگاه

مطلوب این گونه تا سال ۲۱۰۰ میلادی از بین خواهد رفت. از آنجایی که سناریو SSP 126 خوش‌بینانه‌ترین حالت است، شرایط آینده منطقه را با کاهش کمتر سطح رویشگاه مناسب گونه نسبت به حال حاضر پیش‌بینی کرده است. نتایج مدل MaxEnt نشان داد که در سناریوهای SSP 370 و SSP 585 هیچ منطقه‌ای برای حضور پلت تا سال ۲۱۰۰ مناسب نخواهد بود. نتیجه‌گیری کلی: طبق نتایج این پژوهش، مدل RF پیش‌بینی بهتری از حضور پلت در جنگل‌های هیرکانی در آینده ارائه داد. به‌طور کلی براساس همه مدل‌ها و سناریوهای مورد مطالعه، سطح وسیعی از رویشگاه مطلوب پلت از بین خواهد رفت. بیشترین آن‌ها در مناطق شرقی و غربی جنگل‌های هیرکانی متمرکز است. به‌علاوه، نقشه‌های ترسیمی مطلوبیت رویشگاه می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طرح‌های احیایی جنگل‌ها به‌ویژه در مناطق با تخریب بیشتر استفاده شود. مدل RF نقش مهمی در پیشنهاد این گونه برای عملیات احیا و توسعه پایدار بوم‌سازگان‌های جنگلی دارد و می‌تواند منبعی برای مدیران در امر برنامه‌ریزی حفاظت و احیای جنگل‌های تخریب‌شده در منطقه مورد بررسی باشد.

واژگان کلیدی: جنگل‌های هیرکانی، رویشگاه مطلوب، سناریوهای تغییر اقلیم، مدل پیشینه آنتروپی، مدل جنگل تصادفی.

## مقدمه

است (Guo *et al.*, 2023).  
 براساس تئوری آشیان بوم‌شناختی، جوامع گیاهی با متغیرهای محیطی متعددی در ارتباط هستند و گونه‌ها در پاسخ به ویژگی‌های اقلیمی و خاکی ظاهر می‌شوند (Iturrate-Garcia *et al.*, 2016). پراکنش گونه‌ها در بوم‌سازگان تصادفی نیست و تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند اقلیم، فیزیوگرافی، خاک و فعالیت‌های انسانی قرار دارد (Damaneh *et al.*, 2022). هر گونه در برابر چندین عامل محیطی، واکنش متفاوت نشان می‌دهد (Bakhshi & Mohammadi, 2012). از این رو، درک روابط بین گونه‌ها و شرایط محیطی به‌ویژه اقلیم، مبنای اصلی بسیاری از پژوهش‌های بوم‌شناختی است و برای توضیح الگوهای پراکنش پوشش گیاهی در جهان به‌کار رفته است (Xie *et al.*, 2023). در این راستا، مدل‌های پراکنش گونه‌ای (SDMs: Species Distribution Models) ابزاری کمی برای بررسی این روابط و شناسایی رویشگاه‌های مطلوب گونه‌ها هستند (Zurell *et al.*, 2020). این مدل‌ها براساس ارتباط بین حضور گونه‌ها و عوامل محیطی تعریف می‌شوند و امکان پیش‌بینی احتمال حضور یک گونه در مناطق مختلف را فراهم می‌کنند (Guisan *et al.*, 2017). SDM علاوه بر دقت زیاد در تعیین رویشگاه مناسب، مزیت‌هایی مانند سهولت اجرا،

یکی از چالش‌های اساسی در جهان است که اثرات منفی زیادی بر بوم‌سازگان‌های خشکی و دریایی دارد (Haghdoust *et al.*, 2012). بررسی‌های اقلیمی نشان می‌دهد که در قرن بیستم میلادی، دمای کره زمین ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. طبق پیش‌بینی‌های بدبینانه IPCC در قرن ۲۱ میلادی به میانگین دمای زمین، سه درجه سانتی‌گراد افزوده خواهد یافت. براساس گزارش جدید IPCC، دمای زمین از سال ۱۸۵۰ تا پایان قرن بیستم حدود ۱/۱ درجه سانتی‌گراد زیاد شد. در بدبینانه‌ترین سناریو نیز ممکن است تا ۴/۴ درجه تا پایان قرن ۲۱ گرم‌تر شود. این مسئله با افزایش شدید حوادث اقلیمی و تغییر الگوهای بارش همراه خواهد بود (Lee *et al.*, 2023). از جمله اثرات گرمایش زمین می‌توان به تغییر رویشگاه‌های گیاهی و کاهش زیستگاه‌های مطلوب آن‌ها اشاره کرد که می‌تواند برخی از گونه‌ها را در معرض خطر انقراض قرار دهد (Xie *et al.*, 2023). تغییر اقلیم از طریق تأثیر بر توزان درون بوم‌سازگان‌ها می‌تواند در آینده به تغییرات، جابه‌جایی در پراکنش و فراوانی گونه‌ها و انقراض جمعیت گونه‌ها منجر شود (Wang *et al.*, 2018)، بنابراین درک اثرات احتمالی این پدیده بر پراکنش گونه‌های درختی برای کاهش پیامدهای منفی آن در بوم‌سازگان‌های طبیعی و جوامع انسانی ضروری

بخش‌های شرقی و مرکزی جنگل‌ها، پتانسیل بیشتری داشتند. بررسی پراکنش *Pinus koraiensis* Siebold & Zucc. در آسیا-اقیانوسیه با مدل RF نشان داد که باران مهم‌ترین عامل مؤثر است و اغلب رویشگاه مطلوب، خارج از محدوده پراکنش فعلی قرار دارد (Petrenko et al., 2022). همچنین، کمبود بارش و خشک‌سالی‌های آینده می‌تواند پراکنش و رشد گونه مذکور را محدود کند. کاربرد مدل BioClim در پیش‌بینی رویشگاه گونه در معرض خطر *Tapiscia sinensis* Oliv. در چین نشان داد که این گونه در اقلیم نیمه‌گرمسیری و ارتفاعات کم تا متوسط حضور دارد، درحالی‌که دما، بحرانی‌ترین عامل محدودکننده گزارش شد (Xie et al., 2023). طبق سناریوی افزایش دوبرابری CO<sub>2</sub> تا سال ۲۱۰۰، نتایج حاکی از کاهش شدید و تکه‌تکه شدن رویشگاه مطلوب گونه مذکور بود.

به‌منظور مقابله با کاهش سطح و کیفیت جنگل‌های هیرکانی، عملیات جنگل‌کاری با گونه‌های مختلف سالانه صورت می‌گیرد. پلت (*Acer velutinum* Boiss.) درصد چشمگیری از این جنگل‌کاری‌ها را به‌خود اختصاص داده است. پلت به‌عنوان گونه مورد مطالعه در پژوهش پیش‌رو متعلق به تیره Sapindaceae از فراوان‌ترین و بلندترین افراهای ایران است که در جنگل‌های جلگه‌ای هیرکانی کشور از آستارا در غرب تا گلستان در شرق گسترش دارد. گونه‌های مختلف افزا به‌صورت درختی یا درختچه‌ای در جنگل‌های شمال و غرب ایران می‌رویند. آن‌ها اغلب به‌صورت پراکنده و انفرادی رویش دارند و کمتر به‌صورت اجتماع‌های انبوه‌تر یا توده‌ای مشاهده می‌شوند. ارتفاع این گونه می‌تواند به بیشتر از ۲۵ متر برسد و قطر آن بسته به شرایط رویشگاهی از یک متر هم فراتر می‌رود (Monfaredi et al., 2022). پلت اغلب در آشکوب بالا و طبقه‌های سرور، چیره و چیره‌نما قرار دارد و تنه‌های بلند و بدون شاخه دارد. رشد سریع، تکثیر آسان و بذردهی مطلوب سالانه و از همه مهم‌تر، نورپسندی این گونه باعث می‌شود که بتوان از آن به‌عنوان گونه پیشاهنگ در نهال‌کاری استفاده کرد (Sabeti, 2008)، بنابراین

صرفه‌جویی در زمان و قابلیت تعمیم نتایج به مناطق فاقد آماربرداری را دارد (Wisz et al., 2013). از این ابزار می‌توان به‌عنوان روشی کارآمد و کم‌هزینه در مدیریت و حفاظت جنگل بهره برد. زیرا با تمرکز بر مناطق دارای پتانسیل زیادتر، از صرف هزینه‌های زیاد در رویشگاه‌های کم‌پتانسیل جلوگیری می‌شود و شانس موفقیت طرح‌های احیایی افزایش می‌یابد (Vorpahl et al., 2012).

روش‌های یادگیری ماشین برای مدل‌سازی داده‌های پیچیده و غیرخطی به‌سرعت در حال توسعه هستند. این روش‌ها نسبت به روش‌های سنتی، توانایی بیشتری در شناسایی روابط چندبعدی و غیرخطی دارند (Greener et al., 2022). در این زمینه، مدل‌هایی مانند بیشینه آنروپی (MaxEnt)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF)، کاربرد گسترده‌ای دارند (Kamer Aksoy, 2022). الگوریتم MaxEnt انعطاف‌پذیری زیادی در مدل‌سازی وابستگی‌های پیچیده بین حضور گونه و متغیرهای محیطی دارد (Qin et al., 2017) و احتمال پراکنش گونه‌ها را تحت تأثیر محدودیت‌های محیطی براساس داده‌های حضور پیش‌بینی می‌کند (Elith et al., 2011). در مقابل، SVM و RF از قدرتمندترین الگوریتم‌ها برای پیش‌بینی حضور گونه‌ها محسوب می‌شوند (Mi et al., 2017). الگوریتم SVM علاوه بر دقت زیاد هم در طبقه‌بندی و هم در رگرسیون استفاده می‌شود (Ly et al., 2020). کاربرد روش‌های دقیق مانند RF و SVM برای مدیریت جنگل‌های هیرکانی ایران با اهمیت بوم‌شناختی زیاد، ضروری است.

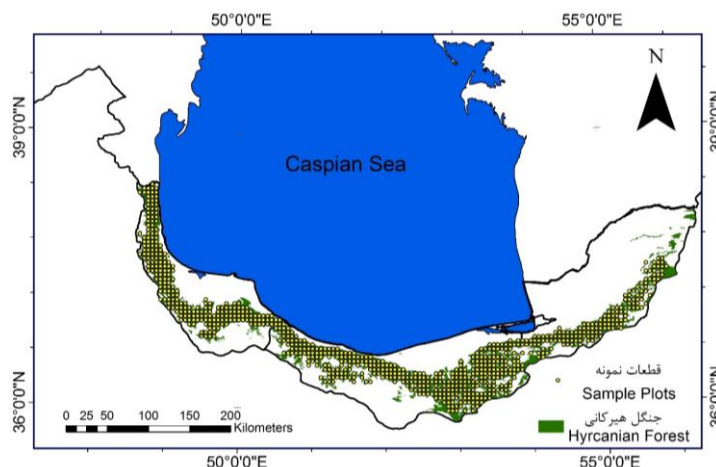
پژوهش‌های متعددی به بررسی قابلیت مدل‌سازی مطلوبیت رویشگاه با استفاده از SDM پرداخته‌اند. برای نمونه، بررسی پراکنش و رویشگاه بالقوه سرخ‌دار (*Taxus baccata* L. در جنگل‌های هیرکانی ایران با چهار روش مدل‌سازی (مدل خطی تعمیم‌یافته، مدل جمعی تعمیم‌یافته، درخت طبقه‌بندی و RF) و متغیرهای زیست‌اقلیمی و توپوگرافی نشان داد که حضور سرخ‌دار از شیب ۳۰ درصد به بعد افزایش می‌یابد و پایدار می‌ماند (Alavi et al., 2019). به‌طوری‌که حدود ۱۰ درصد منطقه، رویشگاه مطلوب بود و

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، کل جنگل‌های هیرکانی با عرض جغرافیایی ۳۶ تا ۳۸ درجه شمالی و طول ۴۸ تا ۵۶ درجه شرقی است که در امتداد سه استان شمالی ایران یعنی گیلان، مازندران و گلستان قرار دارد (Sagheb Talebi *et al.*, 2014). این جنگل‌ها به صورت کمربند سبز باریک جزء جنگل‌های معتدل خزان‌کننده هستند که در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز و در مرزهای جنوبی دریای خزر به طول حدود ۸۰۰ کیلومتر و عرضی بین ۲۰ تا ۷۰ کیلومتر امتداد یافته‌اند (Sagheb Talebi *et al.*, 2014). جنگل‌های هیرکانی، بازمانده دوران سوم زمین‌شناسی هستند و از نظر تعداد گونه درختی و درختچه‌ای جزء جنگل‌های غنی از گونه محسوب می‌شوند. چنانچه این بوم‌سازگان به دلیل تنوع گیاهی غنی به عنوان میراث جهانی توسط یونسکو به ثبت رسیده است. اقلیم این جنگل‌ها، نیمه‌مدیترانه‌ای است که آب و هوای معتدل و مرطوب دارد. میزان بارش سالانه به طور متوسط ۶۰۰ میلی‌متر است. بارش از غرب (منطقه انزلی حدود ۲۰۰۰ میلی‌متر) به سمت شرق (منطقه گرگان حدود ۶۰۰ میلی‌متر) کاهش می‌یابد. از نظر درجه حرارت نیز متوسط سالانه بین ۱۵ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. خاک‌های بوم‌سازگان هیرکانی کشور اغلب تحول‌یافته به شمار می‌آیند. از نظر تیپ خاک نیز راندزین و قهوه‌ای جنگلی هستند (Marvie Mohadjer *et al.*, 2011) (شکل ۱).

جنگل‌کاری با پلت در سطح وسیعی از عرصه‌های جنگلی مخروطه انجام شده است (Ravanbakhsh *et al.*, 2022). باتوجه به اهمیت پلت و نقش مؤثر پلت در احیای اراضی مخروطه و توسعه توده‌های جنگل‌کاری در جنگل‌های هیرکانی، ضرورت بررسی عوامل اقلیمی مؤثر بر پراکنش این گونه بیش‌ازپیش احساس می‌شود. تاکنون پژوهش‌های موجود بیشتر بر مقیاس‌های محلی و عوامل محیطی محدود متمرکز بوده‌اند. چنانچه پژوهش جامعی که اثر تغییر اقلیم را بر پراکنش این گونه ارزشمند ارزیابی کند، صورت نگرفته است. در پژوهش پیش‌رو، با بهره‌گیری از مدل‌های پراکنش گونه‌ای تلاش شده است تا مهم‌ترین عوامل اقلیمی و زیستگاهی تعیین و رویشگاه‌های بالقوه پلت شناسایی شوند. این اقدام ضمن صرفه‌جویی در هزینه و زمان می‌تواند راهنمایی علمی برای برنامه‌های احیا، حفاظت و مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی فراهم کند. همچنین، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آیا تغییر اقلیم می‌تواند بر الگوی پراکنش پلت اثرگذار باشد و به تبع آن، کارایی این گونه به عنوان گزینه‌ای مناسب برای جنگل‌کاری و احیا در آینده، تأیید یا تضعیف خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه



شکل ۱- موقعیت قطعه‌نمونه‌ها در سراسر سطح جنگل‌های هیرکانی در ایران

Figure 1. The location of sampling plots across the entire Hyrcanian Forest, Iran

## تهیه داده‌های پوشش درختی

به منظور انجام این پژوهش از بانک داده‌های آماربرداری سراسری جنگل‌های هیرکانی کشور استفاده شد. این داده‌ها طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۶ توسط سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور که اکنون با عنوان سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور شناخته می‌شود و براساس دستورالعمل‌های استاندارد نمونه‌برداری تهیه شده است (شکل ۱). این پایگاه شامل ۲۷۰۰ قطعه نمونه دایره‌ای با مساحت ۱۰۰۰ متر مربع و در ابعاد شبکه ۱ × ۵ کیلومتر مربع در کل سطح جنگل‌های شمال کشور است. در هر قطعه نمونه، قطر برابر سینه و نوع گونه‌های درختی، ارتفاع قطورترین و نزدیک‌ترین درخت به مرکز قطعه و نیز موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت ثبت شده است. داده‌ها توسط کارشناسان مجرب و تحت نظارت سازمان مذکور گردآوری شدند که کیفیت و دقت آن‌ها را تضمین می‌کند. در این پژوهش، از کل داده‌ها، ۲۳۹۶ قطعه نمونه پس از کنترل کیفیت و انطباق با لایه‌های اقلیمی WorldClim انتخاب شد. دلیل کاهش تعداد نسبت به

۲۷۰۰ قطعه نمونه اولیه، حذف تقاطعی بود که فاقد داده‌های اقلیمی کامل در پایگاه WorldClim بودند. در نهایت، این قطعه نمونه‌ها براساس حضور (۵۸۹ قطعه نمونه) و عدم حضور (۱۸۰۷ قطعه نمونه) پلت تفکیک شدند.

## تهیه داده‌های اقلیمی

برای تعیین دوره پایه اقلیمی و ساخت مدل پراکنش گونه، داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش از پایگاه WorldClim استخراج شد. این پایگاه شامل ۱۹ متغیر زیست‌اقلیمی است (جدول ۱) که به صورت لایه‌های رستری با دقت مکانی یک کیلومتر ارائه شده‌اند. این داده‌ها به عنوان مبنای اقلیمی فعلی برای مدل‌سازی پراکنش پلت استفاده شدند (Sparks, 2018). همچنین، متغیرهای زیست‌اقلیمی آینده با استفاده از مدل گردش عمومی جو (MPI-ESM1-2-HR) تحت چهار سناریوی مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP 126, SSP 245, SSP 370 و SSP 585) تا سال ۲۱۰۰ میلادی استخراج شدند (Gunaratne et al., 2022).

## جدول ۱- متغیرهای زیست‌اقلیمی استفاده شده در این پژوهش

Table 1. Bioclimatic variables used in this research

Bioclimatic variables	Abbreviation	Bioclimatic variables	Abbreviation
Annual Mean Temperature	Bio <sub>1</sub>	Mean Temperature of Coldest Quarter	Bio <sub>11</sub>
Mean Diurnal Range	Bio <sub>2</sub>	Annual Precipitation	Bio <sub>12</sub>
Isothermality (BIO2/BIO7) (×100)	Bio <sub>3</sub>	Precipitation of Wettest Month	Bio <sub>13</sub>
Temperature Seasonality (standard deviation ×100)	Bio <sub>4</sub>	Precipitation of Driest Month	Bio <sub>14</sub>
Max Temperature of Warmest Month	Bio <sub>5</sub>	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)	Bio <sub>15</sub>
Min Temperature of Coldest Month	Bio <sub>6</sub>	Precipitation of Wettest Quarter	Bio <sub>16</sub>
Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)	Bio <sub>7</sub>	Precipitation of Driest Quarter	Bio <sub>17</sub>
Mean Temperature of Wettest Quarter	Bio <sub>8</sub>	Precipitation of Warmest Quarter	Bio <sub>18</sub>
Mean Temperature of Driest Quarter	Bio <sub>9</sub>	Precipitation of Coldest Quarter	Bio <sub>19</sub>
Mean Temperature of Warmest Quarter	Bio <sub>10</sub>		

## تحلیل مدل‌ها

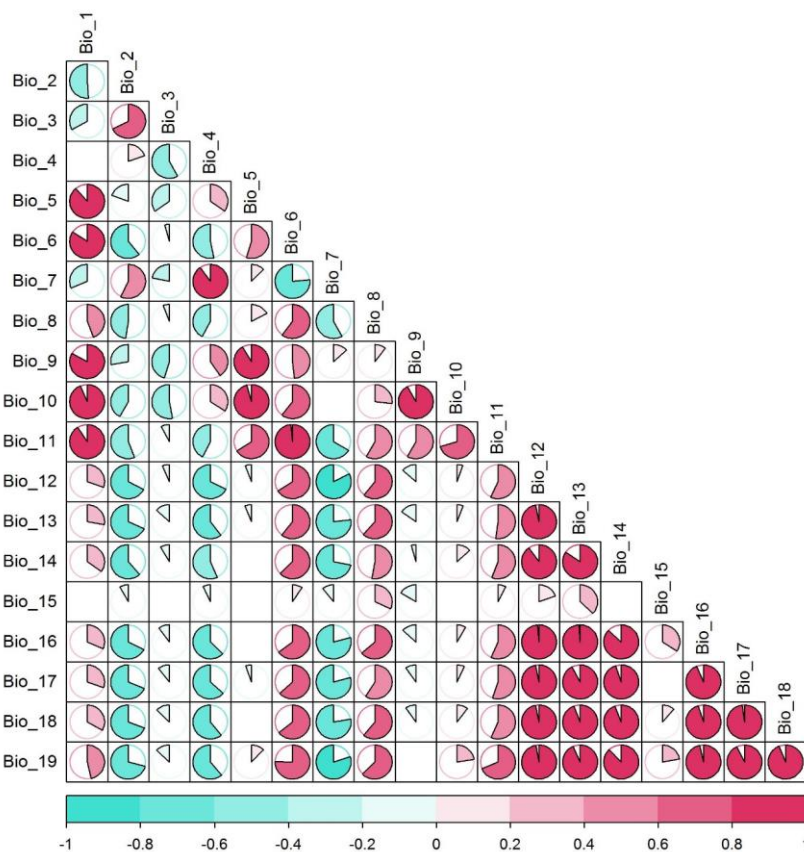
به عنوان متغیر مستقل استفاده شد (Falk & Mellert, 2011; Xie et al., 2023; Li et al., 2024). برای حذف خطا در مدل‌سازی از همبستگی متغیرهای مستقل با استفاده از

برای مدل‌سازی پراکنش پلت از داده‌های مربوط به حضور و غیاب این گونه به عنوان متغیر وابسته و متغیرهای اقلیمی

نقشه‌های رویشگاه مطلوب فعلی گونه‌های مورد مطالعه و نیز پراکنش آن‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم با بسته raster در نرم‌افزار R نسخه ۴/۱ تهیه شد. به منظور بررسی عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها، از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو (Monte Carlo) استفاده شد (Gould *et al.*, 2014; Graham & Kimble, 2019). در این روش، مقادیر متغیرهای مستقل با توجه به انحراف معیار آن‌ها، چندین بار نمونه‌برداری و مدل‌سازی شدند و میانگین و انحراف معیار احتمال حضور پلت محاسبه شد (Graham & Kimble, 2019).

در ادامه، به منظور تهیه نقشه‌های رویشگاه به صورت مناسب و نامناسب از آستانه بیشینه آماره ویژگی به اضافه حساسیت (Maximum sensitivity plus specificity) استفاده شد.

همبستگی پیرسون بررسی شد. اگر بین دو متغیر، همبستگی بیشتر از ۰/۸ بود، یکی حذف شد (Shrestha, 2020; Chen *et al.*, 2024). در این پژوهش، پراکنش گونه مورد مطالعه با استفاده از مدل‌های MaxEnt، SVM و RF با استفاده از بسته‌های نرم‌افزاری caret و dismo در نرم‌افزار R و با مقادیر پارامترهای پیش‌فرض برنامه‌ریزی و برآورد شد. به این منظور از روش 10-Fold Cross Validation استفاده شد (Adjuik & Davis, 2022). همچنین، برای پیش‌بینی حضور/غیاب به منظور ارزیابی دقت در هر یک از روش‌های مدل‌سازی مورد استفاده در برآورد حضور گونه، آماره‌های کاپا، سطح زیر منحنی و صحت به کار برده شد. اهمیت نسبی متغیرهای مورد مطالعه نیز با استفاده از بسته caret محاسبه شد. در نهایت، پس از تهیه مدل‌های پراکنش گونه‌ای،



شکل ۲- نتایج همبستگی پیرسون متغیرهای محیطی مورد مطالعه

رنگ‌های قرمز و آبی به ترتیب بیانگر همبستگی معنی‌دار مثبت و منفی هستند. مربع‌های خالی نیز عدم معنی‌داری همبستگی را نشان می‌دهند.

**Figure 2. Pearson correlation results of the environmental variables studied**

Red and blue colors indicate significant positive and negative correlation, respectively, and blank squares show no significant correlation.

فصل سال (Bio<sub>8</sub>)، بیشینه دما در گرم‌ترین ماه (Bio<sub>5</sub>) و بارندگی در خشک‌ترین ماه سال (Bio<sub>14</sub>) باقی ماندند. عملکرد مدل‌ها

به منظور بررسی عملکرد مدل‌های مورد مطالعه برای پیش‌بینی زیستگاه مطلوب پلت از شاخص‌های ارزیابی مختلفی استفاده شد. در شکل ۳ مقادیر ارزیابی برای مدل‌های مورد مطالعه با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل آورده شده است. شکل‌ها و اندازه‌های ویولن‌های مختلف نشان می‌دهند که مدل RF مطابقت خوبی با اندازه‌گیری‌های واقعی دارند. این نتایج بیانگر توانایی مدل RF در بررسی دقیق الگوهای موجود در مجموعه داده‌ها برای پیش‌بینی مقادیر است (شکل ۲). مقادیر میانگین شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها در جدول ۲ آورده شد. براساس نتایج به دست آمده، دقت پیش‌بینی پراکنش پلت با استفاده از آماره سطح زیر منحنی (AUC) برای مدل RF عالی و برای بقیه مدل‌ها، خوب ارزیابی شد. همچنین، روش مدل‌سازی MaxEnt با میانگین مقدار AUC برابر با ۰/۷ کمترین موفقیت را در پیش‌بینی پراکنش پلت داشت. در مجموع، RF بهترین مدل با کم‌ترین خطا و در مقابل MaxEnt ضعیف‌ترین مدل با بیشترین خطا و کمترین تغییرات توضیح داده شده است.

این آستانه، تعادل بین حساسیت و ویژگی را با داده‌های آموزشی بهینه می‌کند و دقت بیشتری را در پیش‌بینی در مقایسه با روش‌های دیگر ارائه می‌دهد (Zhong et al., 2021). در نهایت، مقادیر بیشتر از آستانه به عنوان رویشگاه مناسب و مقادیر کمتر از آن به عنوان رویشگاه نامناسب در نظر گرفته شد.

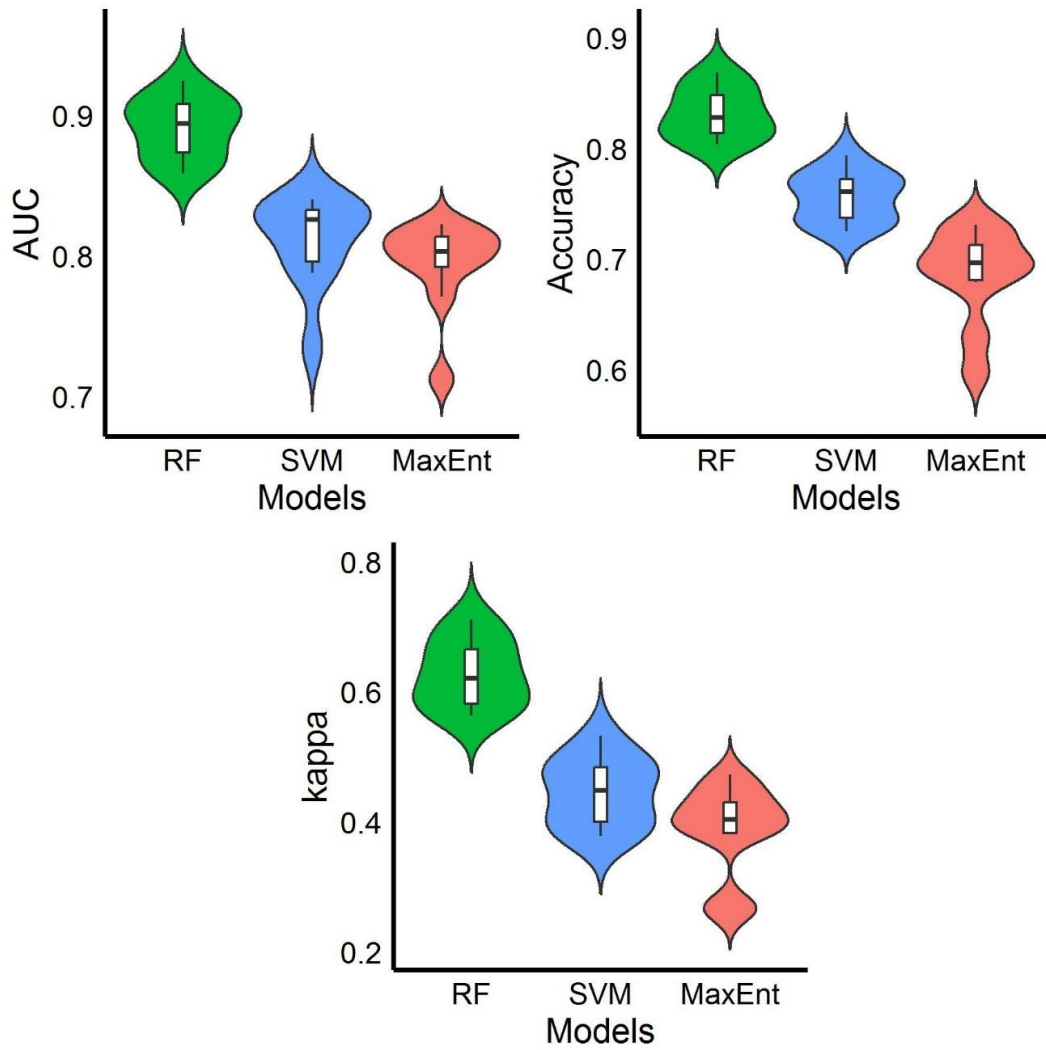
## نتایج

نتایج تحلیل همبستگی پیرسون برای ارزیابی روابط بین متغیرهای محیطی مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شد. به منظور افزایش دقت مدل‌سازی، متغیرهایی که مقدار همبستگی آن‌ها بیشتر از ۰/۸ بود (میانگین دمای سالانه، میانگین دما در روزانه، کمینه دما در سردترین ماه، تغییرات دمای سالانه، میانگین دما در خشک‌ترین فصل سال، میانگین دما در گرم‌ترین فصل سال، میانگین دما در سردترین فصل سال، مجموع بارندگی سالانه، بارندگی در مرطوب‌ترین ماه سال، بارندگی در مرطوب‌ترین فصل سال، بارندگی در خشک‌ترین فصل سال، بارندگی در گرم‌ترین فصل سال و بارندگی در سردترین فصل سال)، از ادامه فرایند حذف شدند. متغیرهای ایزوترمالیتی (Bio<sub>3</sub>)، تغییرات فصلی دما (Bio<sub>4</sub>)، تغییرات بارندگی فصلی (Bio<sub>15</sub>)، میانگین دما در مرطوب‌ترین

جدول ۲- میانگین مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل‌های مورد مطالعه برای پیش‌بینی حضور/غیاب پلت

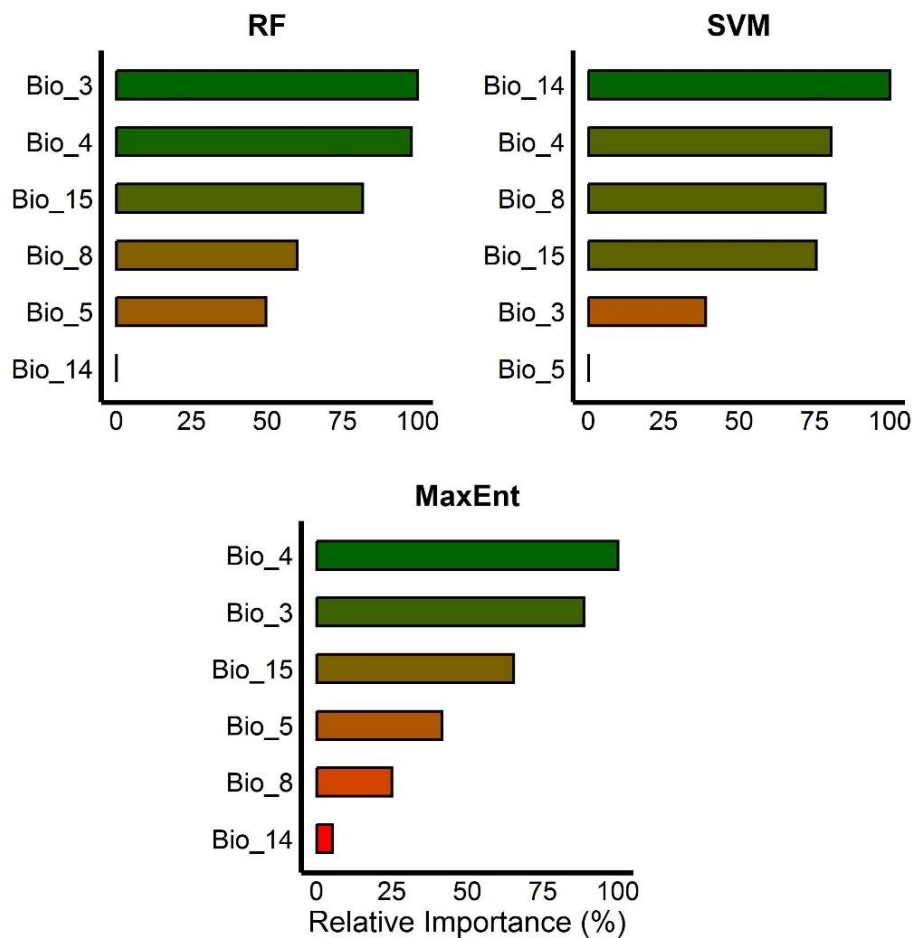
**Table 2. Mean evaluation metrics of the applied models for predicting the presence/absence of *Acer velutinum* Boiss.**

Model	AUC	Accuracy	Kappa
RF	0.9	0.83	0.62
SVM	0.81	0.75	0.44
MaxEnt	0.7	0.68	0.38



شکل ۳ - مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های مورد مطالعه با استفاده از روش اعتبارسنجی متقاطع

Figure 3. Evaluation metrics of the applied models using cross-validation



شکل ۴- اهمیت نسبی متغیرهای محیطی مورد بررسی برای مدل‌های مختلف

محور X بیانگر اهمیت متغیرها و محور Y نشان‌دهنده متغیرها است.

**Figure 4. Relative importance of the environmental variables under study for different models**  
X-axis represents the importance of the variables and Y-axis shows the variables.

بیشینه دما در گرم‌ترین ماه در مدل SVM و بارندگی در خشک‌ترین ماه و میانگین دما در مرطوب‌ترین فصل سال، کمترین اثر را در پراکنش پلت داشتند.

پراکنش پلت در سطح جنگل‌های هیرکانی تحت شرایط

اقلیمی فعلی

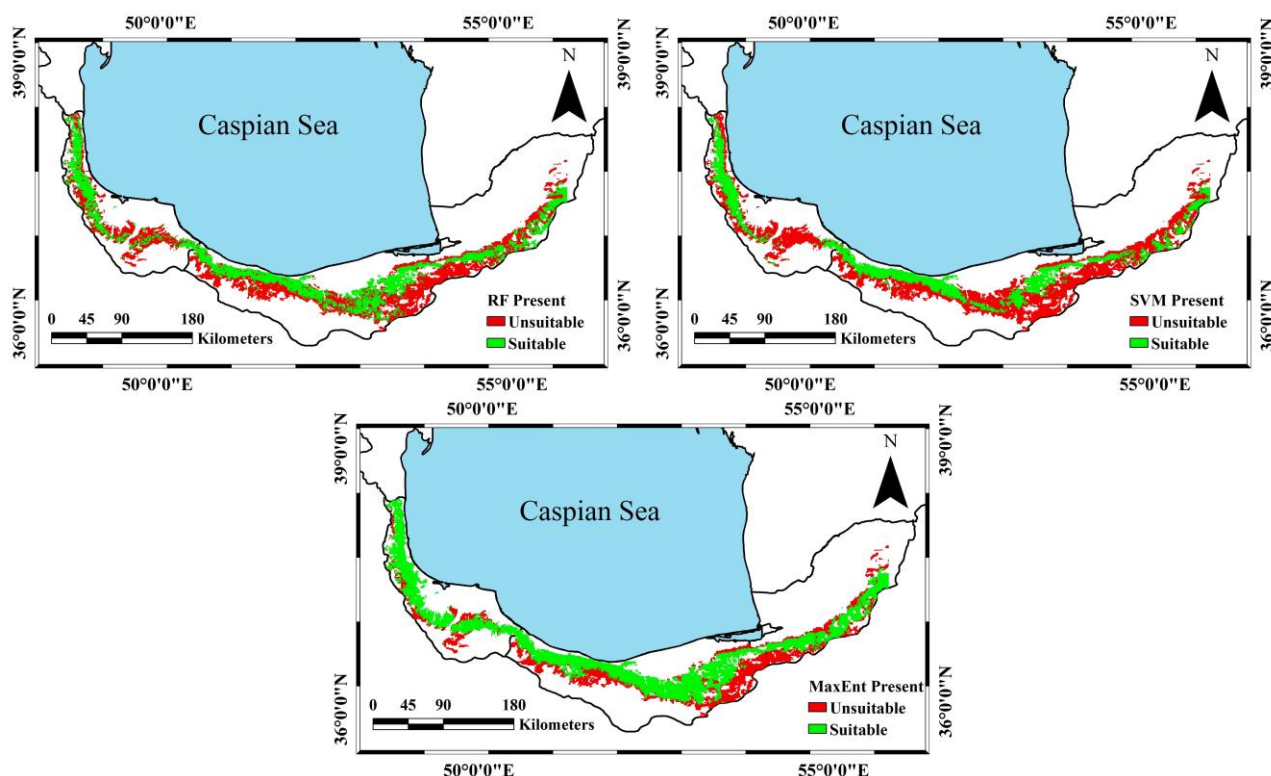
در شکل ۵، نقشه رویشگاه مطلوب پلت برای شرایط اقلیم فعلی در سراسر جنگل‌های هیرکانی تهیه آمده است. رنگ سبز در هر نقشه، نشان‌دهنده رویشگاه مطلوب پلت بود. بیشترین سطح رویشگاه مطلوب اغلب در قسمت غربی و در

تجزیه و تحلیل اهمیت متغیرها

اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای مورد استفاده در فرایند مدل‌سازی و برای هر یک از مدل‌های برازش شده در شکل ۳ گزارش شد. نتایج ارزیابی اهمیت نسبی متغیرها با استفاده از مدل RF و MaxEnt نشان داد که متغیرهای ایزوترمالیته و تغییرات فصلی دما به ترتیب بیشترین تأثیر را بر پراکنش پلت داشتند. طبق مدل SVM نیز پراکنش پلت بیشتر تحت تأثیر متغیرهای بارندگی در خشک‌ترین ماه و تغییرات فصلی دما بود (شکل ۴). از طرفی، متغیرهای بیشینه دما در گرم‌ترین ماه و بارندگی در خشک‌ترین ماه در مدل RF، ایزوترمالیته و

شبه‌سازی مونت‌کارلو و برپایه مدل RF (به‌عنوان بهترین مدل) محاسبه شد (شکل ۶). براساس نتایج به‌دست‌آمده، نواحی مرکزی و غربی جنگل‌های هیرکانی، به‌ویژه در ارتفاعات پایین‌تر، بیشترین احتمال حضور را دارند. همچنین، بیشترین مقادیر انحراف معیار اغلب در بخش‌های مرکزی و غربی مشاهده شد.

ارتفاعات پایین شناسایی شدند. نتایج پیش‌بینی مدل‌های RF، SVM و MaxEnt نشان داد که رویشگاه مطلوب پلت به‌ترتیب ۴۹، ۳۸ و ۶۷ درصد از سطح جنگل‌های هیرکانی را به‌خود اختصاص داده است (جدول ۳). به‌منظور بررسی عدم قطعیت پیش‌بینی مدل، احتمال حضور گونه در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از روش



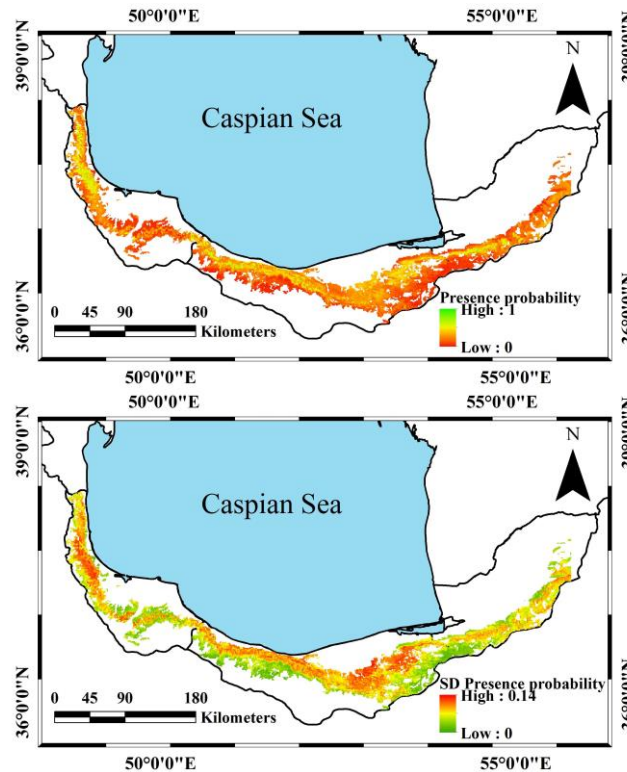
شکل ۵- رویشگاه‌های مطلوب پلت در جنگل‌های هیرکانی پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های مورد مطالعه رنگ سبز بیانگر رویشگاه‌های مطلوب و رنگ قرمز نشان‌دهنده رویشگاه‌های نامطلوب پلت هستند.

Figure 5. Predicted suitable habitats of *Acer velutinum* Boiss. in the Hyrcanian forests using the applied models

جدول ۳- درصد رویشگاه مطلوب پلت در کل سطح جنگل‌های هیرکانی

Table 3. Percentage of suitable habitat of *Acer velutinum* Boiss. across the entire Hyrcanian forests

Model	RF	SVM	MaxEnt
Percentage of suitable habitat	49	38	67



شکل ۶- نقشه میانگین (بالا) و انحراف معیار (پایین) احتمال حضور پلت در جنگل‌های هیرکانی شبیه‌سازی شده با روش مونت کارلو با

استفاده از مدل RF

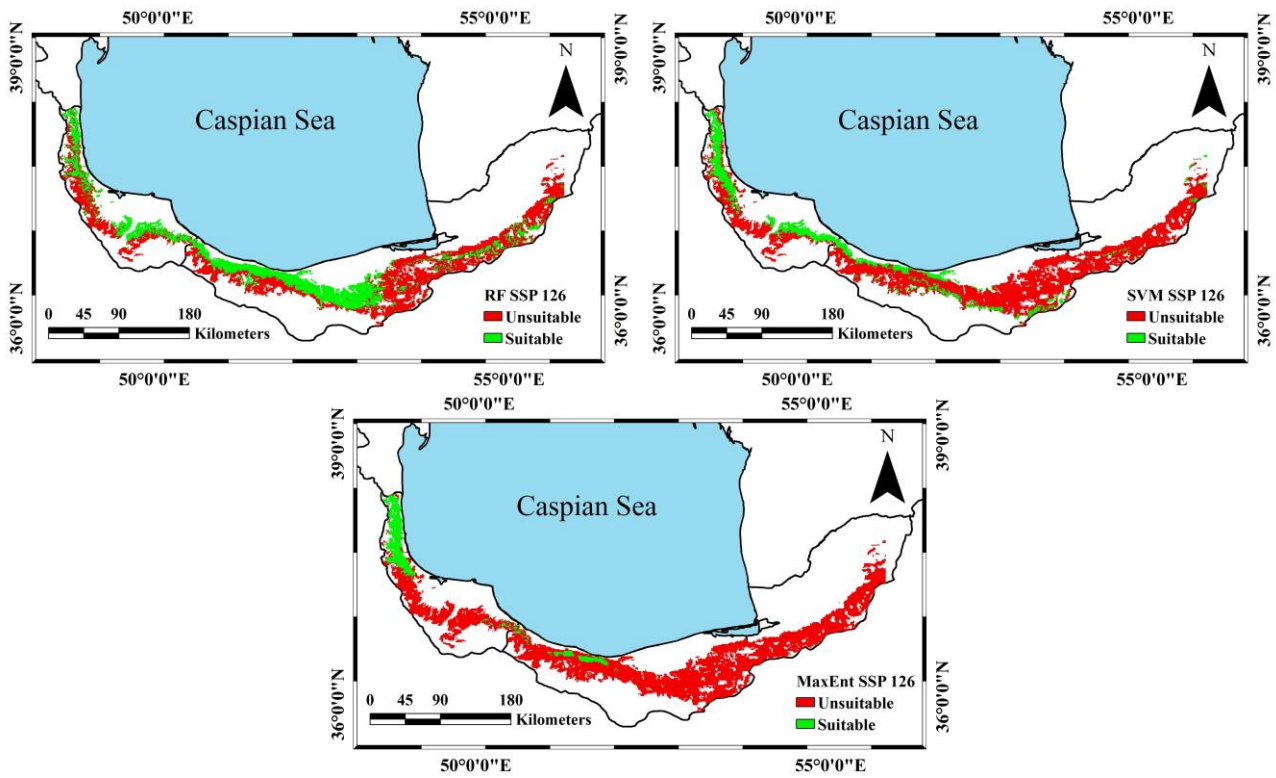
در نقشه میانگین، رنگ سبز و قرمز به ترتیب بیانگر احتمال زیاد و کم حضور گونه هستند، درحالی‌که در نقشه انحراف معیار، رنگ قرمز نشان‌دهنده عدم قطعیت زیاد و رنگ سبز نشان‌دهنده عدم قطعیت کم است.

Figure 6. Mean (top) and standard deviation (bottom) maps of the presence probability of *Acer velutinum* Boiss. in the Hyrcanian forests, simulated using the Monte Carlo method based on the Random Forest (RF) model. In the mean map, green and red colors indicate high and low occurrence probabilities of the species, respectively. In the standard deviation map, red represents high uncertainty, whereas green indicates low uncertainty.

یافت. همچنین، براساس سناریوهای ۱۲۶ و ۲۴۵ و با استفاده از هر سه مدل، رویشگاه‌های مطلوب اغلب در سمت شرق از بین می‌روند. این کاهش توسط مدل MaxEnt خیلی شدید پیش‌بینی شد. به طوری‌که در سناریو ۵۸۵ و طبق مدل MaxEnt هیچ قسمتی از جنگل‌های شمال برای حضور پلت در آینده مناسب نخواهند بود.

پراکنش پلت در سطح جنگل‌های هیرکانی تحت شرایط اقلیمی آینده

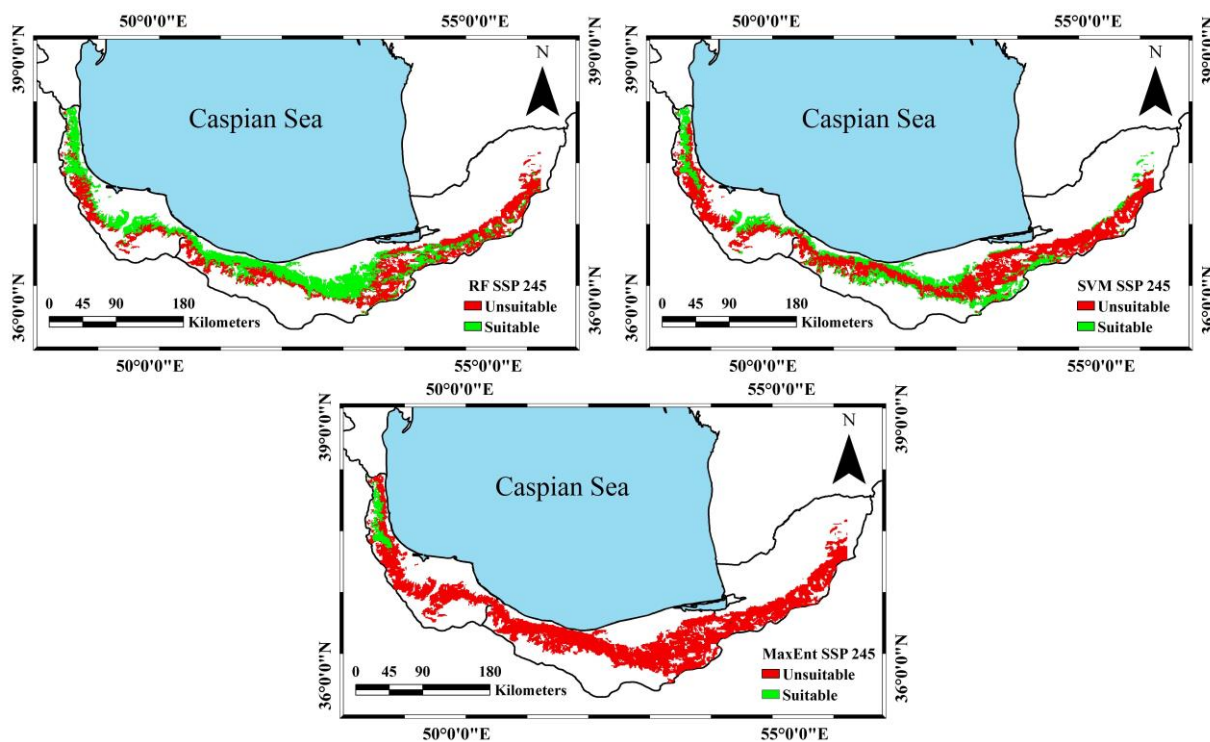
نقشه‌های رویشگاه مطلوب پلت تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در شکل‌های ۷ تا ۱۰ نشان داده شده است. به طور کلی، نتایج مدل‌های RF و SVM براساس سناریوهای مختلف نشان داد که رویشگاه مطلوب پلت کاهش خواهد



شکل ۷- رویشگاه مطلوب پلت با استفاده از مدل‌های مورد مطالعه تحت سناریوی تغییر اقلیمی SSP 126 در سال ۲۱۰۰

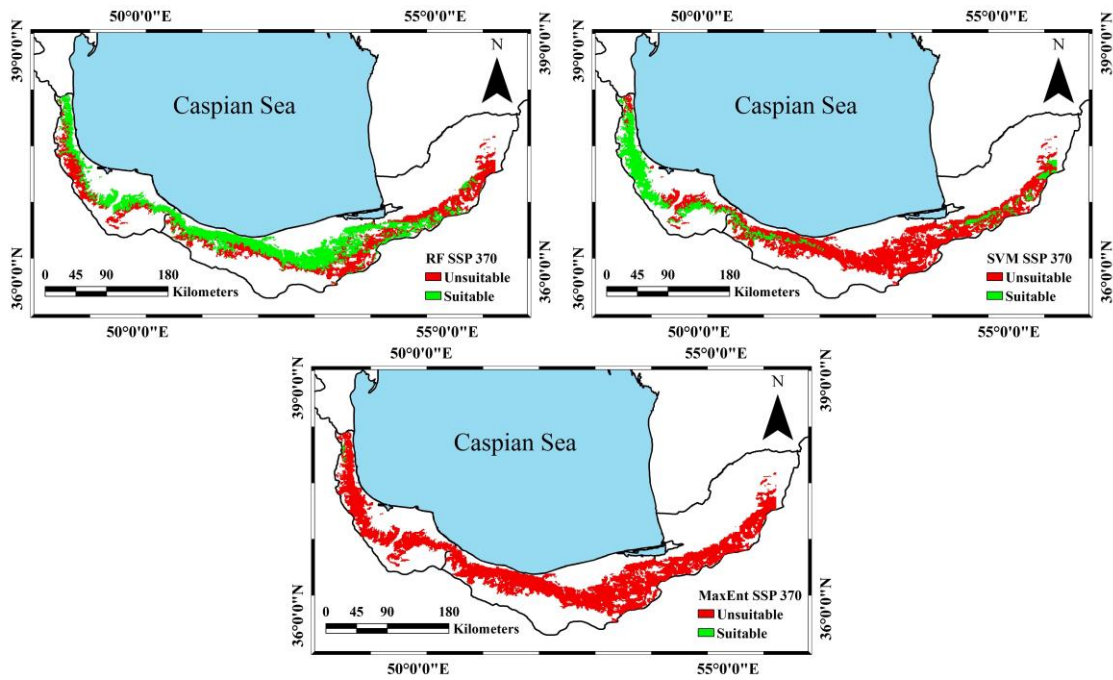
رنگ سبز بیانگر رویشگاه‌های مطلوب و رنگ قرمز نشان‌دهنده رویشگاه‌های نامطلوب پلت هستند.

Figure 7. Suitable habitat of *Acer velutinum* Boiss. predicted by the applied models under the SSP 126 climate change scenario in 2100



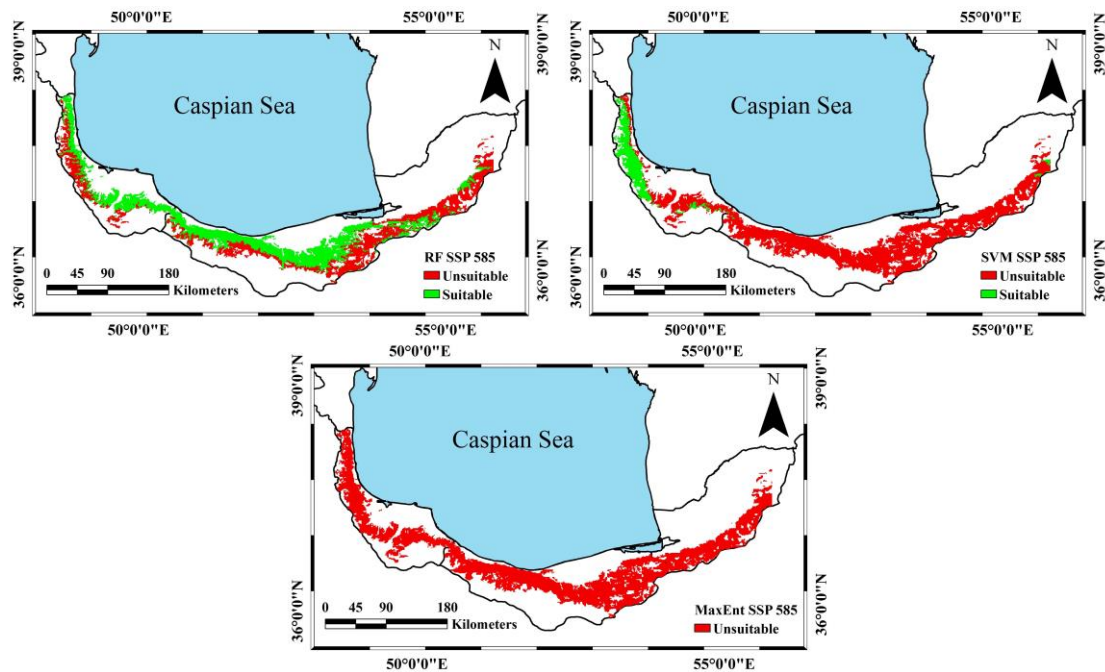
شکل ۸- رویشگاه مطلوب پلت با استفاده از مدل‌های مورد مطالعه تحت سناریوی تغییر اقلیمی SSP 245 در سال ۲۱۰۰ رنگ سبز بیانگر رویشگاه‌های مطلوب و رنگ قرمز نشان‌دهنده رویشگاه‌های نامطلوب پلت هستند.

Figure 8. Suitable habitat of *Acer velutinum* Boiss. predicted by the applied models under the SSP 245 climate change scenario in 2100



شکل ۹- رویشگاه مطلوب پلت با استفاده از مدل‌های مورد مطالعه تحت سناریوی تغییر اقلیمی SSP 370 در سال ۲۱۰۰ رنگ سبز بیانگر رویشگاه‌های مطلوب و رنگ قرمز نشان‌دهنده رویشگاه‌های نامطلوب پلت هستند.

Figure 9. Suitable habitat of *Acer velutinum* Boiss. predicted by the applied models under the SSP 370 climate change scenario in 2100



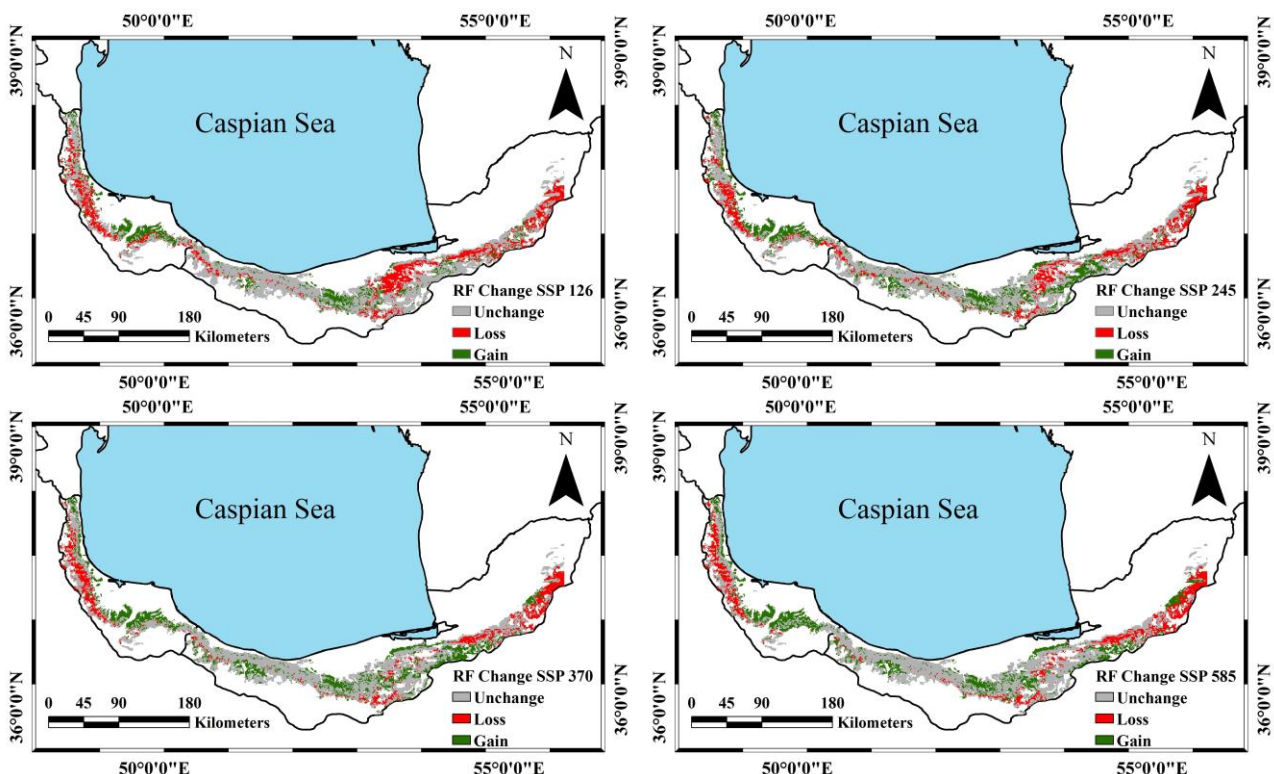
شکل ۱۰- رویشگاه مطلوب پلت با استفاده از مدل‌های مورد مطالعه تحت سناریوی تغییر اقلیمی SSP 585 در سال ۲۱۰۰ رنگ سبز بیانگر رویشگاه‌های مطلوب و رنگ قرمز نشان‌دهنده رویشگاه‌های نامطلوب پلت هستند.

Figure 10. Suitable habitat of *Acer velutinum* Boiss. predicted by the applied models under the SSP 585 climate change scenario in 2100

## بررسی تغییرات رویشگاه مطلوب پلت

طبق نتایج باتوجه به زیاد بودن سناریوها و مدل‌ها، فقط نقشه تغییرات برای مدل RF که بیشترین دقت را به خود اختصاص داد، تهیه شد. سپس، مقایسه بین رویشگاه‌های فعلی و آینده برای هر سناریو انجام شد. طبق شکل ۱۱، پیش‌بینی تغییرات رویشگاه مطلوب پلت با استفاده از مدل RF در جنگل هیرکانی تحت سناریوهای تغییر اقلیمی آینده در سال ۲۱۰۰ نشان داد که در خوش‌بینانه‌ترین حالت (SSP 126) رویشگاه مناسب این گونه در بخش مرکزی این جنگل‌ها تغییر قابل توجهی نخواهد کرد، اما لکه‌هایی از رویشگاه مطلوب در قسمت‌های شرق و غرب آن‌ها از بین خواهد رفت. از طرفی در بدبینانه‌ترین حالت (SSP 585) فقط بخش اندکی از استان

مازندران در مرکز این جنگل‌ها و قسمت‌هایی در غرب این استان به‌عنوان رویشگاه پلت باقی خواهند ماند (شکل ۱۱). اگرچه اهمیت نسبی متغیرهای منفرد در میان مدل‌ها متفاوت بود، اما روند کلی نشان می‌دهد که افزایش دما و کاهش بارندگی، مهم‌ترین عوامل اقلیمی در محدود شدن پراکنش پیش‌بینی شده هستند. پیش‌بینی پراکنش پلت تحت اقلیم آینده بیانگر کاهش حضور گونه در منطقه مورد مطالعه به دلیل کاهش بارندگی سالانه و افزایش دما است. طبق نتایج، براساس همه سناریوها، سطح وسیعی از رویشگاه مطلوب از بین خواهد رفت. به‌طوری‌که بیشترین مقدار کاهش سطح در سناریو SSP 126 (۴۳ درصد) و بیشترین مقدار افزایش سطح در سناریو SSP 370 (۴۴ درصد) مشاهده شد (جدول ۴).



شکل ۱۱- پیش‌بینی تغییرات رویشگاه مطلوب پلت با استفاده از مدل RF در جنگل هیرکانی تحت سناریوهای تغییر اقلیمی آینده در سال ۲۱۰۰

رنگ‌های قرمز و سبز به ترتیب بیانگر کاهش و افزایش سطح رویشگاه مطلوب هستند. رنگ خاکستری نیز عدم تغییرات را نشان می‌دهد.

Figure 11. Predicted changes in the suitable habitat of *Acer velutinum* Boiss. using the Random Forest model in the Hyrcanian forests under future climate change scenarios in 2100

جدول ۴- پیش‌بینی درصد تغییرات سطح رویشگاه مطلوب پلت در آینده نسبت به رویشگاه فعلی با استفاده از مدل RF

**Table 4. Predicted percentage change in the area of suitable habitat of *Acer velutinum* Boiss. in the future compared to the current habitat, based on the Random Forest model**

Model	SSP 126	SSP 245	SSP 370	SSP 585
Loss	43	36	30	33
Gain	27	40	44	43

## بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش از سه مدل شامل RF، SVM و MaxEnt برای پیش‌بینی و تهیه نقشه مطلوبیت رویشگاه پلت در جنگل‌های هیرکانی استفاده شد. نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌ها نشان داد که هر سه مدل، توانایی قابل‌قبولی در پیش‌بینی پراکنش این گونه دارند. با این حال، مدل RF (مقدار سطح زیر منحنی برابر با ۰/۹) نسبت به مدل‌های دیگر، عملکرد بهتری داشت. میانگین مقدار AUC برای مدل‌ها بین ۰/۷ تا ۰/۹ متغیر بود که دقت مناسب مدل‌ها در شناسایی زیستگاه مطلوب پلت در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. عملکرد بهتر مدل RF را می‌توان به توانایی زیاد آن در پردازش داده‌های پیچیده، شناسایی روابط غیرخطی و مدیریت داده‌های پرت نسبت داد. این مدل با تنظیم کمینه پارامترها، پیش‌بینی‌های دقیقی ارائه می‌دهد (Probst et al., 2019) و با نمونه‌برداری تکراری و تصادفی از داده‌ها از برازش بیش‌ازحد جلوگیری می‌کند (Catani et al., 2013). به علاوه، RF قادر است تعاملات پیچیده بین عوامل اقلیمی، محیطی و توپوگرافی را در برازش مدل لحاظ کند و تخمین دقیقی از اهمیت متغیرها ارائه دهد (Pecchi et al., 2019). نتایج پژوهش پیش‌رو نیز توانایی زیاد این مدل در شناسایی تعاملات مؤثر بر پراکنش پلت را تأیید کرد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، مدل RF عملکرد و صحت بیشتری نسبت به مدل‌های MaxEnt و SVM داشت. یافته‌های مشابهی در پژوهش‌های Alavi و همکاران (۲۰۱۹)، Dagtekin و همکاران (۲۰۲۰) و Khalatbari Limaki و همکاران (۲۰۲۳) نیز گزارش شده است. پژوهش‌های متعددی نیز به کارایی زیاد RF در مدل‌سازی پراکنش گونه‌های گیاهی،

به‌ویژه گونه‌های درختی اشاره کرده‌اند (Alavi et al., 2019; Taleshi et al., 2019; Ahmadi et al., 2020). علاوه بر این، RF یک رویکرد رایج در مدل‌سازی و نقشه‌برداری پراکنش گونه‌ها است (Zhang et al., 2019).

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، SVM عملکرد بهتری نسبت به MaxEnt نشان داد، اما دقت کمتری نسبت به مدل RF داشت. این نتایج را می‌توان با ویژگی‌های هر مدل و توانایی آن‌ها در برازش یا تعمیم به مجموعه داده‌های مختلف توضیح داد (Jaafari et al., 2021). بر اساس یافته‌های این پژوهش، مدل MaxEnt که به‌طور معمول در مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها استفاده می‌شود، عملکرد کمتری در مقایسه با مدل RF نشان داد. نتایج مشابهی در پژوهش‌های دیگر گزارش شده است (Qin et al., 2015; Ghareghan et al., 2020; Damaneh et al., 2022). هر دو مدل RF و MaxEnt به‌دلیل پیش‌بینی قوی و پایدارشان، روش‌های با کارایی زیاد برای مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها محسوب می‌شوند (Duan et al., 2014). دقت به‌نسبت کمتر MaxEnt نشان می‌دهد که روابط بین متغیرهای محیطی انتخاب‌شده و پراکنش پلت ممکن است پیچیده‌تر از آن باشد که مدل MaxEnt بتواند به‌طور کامل آن را پیش‌بینی کند.

در پژوهش‌های مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای، بررسی چگونگی تأثیر عوامل محیطی بر پراکنش گونه‌های گیاهی، یکی از مؤلفه‌های مهم به‌شمار می‌آید. متغیرهای اقلیمی اغلب در این پژوهش‌ها استفاده می‌شود. با این وجود، ویژگی‌های محیطی دیگر مانند توپوگرافی نیز بر پراکنش گونه‌ها اثرگذار هستند (Chauvier et al., 2021). نتایج بررسی اهمیت نسبی متغیرها با استفاده از مدل RF نشان داد که متغیرهای مرتبط

مهم‌ترین عامل در پراکنش پلت، عمق دره و دومین عامل اثرگذار، ارتفاع از سطح دریا است (Fathollahzadeh, 2018).

بر اساس نتایج به دست آمده، هر سه مدل مورد استفاده (RF, SVM و MaxEnt) کاهش قابل توجهی را در پراکنش آینده پلت تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم پیش‌بینی کردند. این کاهش در سناریوهای خوش‌بینانه (به ویژه SSP 126) اغلب محدود به نواحی شرقی و غربی خواهد بود. کاهش زیستگاه مطلوب بر اساس سناریو شدیدتر (SSP 585) در کل جنگل‌های هیرکانی چشمگیرتر به دست آمد. به طوری که طبق پیش‌بینی مدل MaxEnt هیچ زیستگاه مناسبی برای پلت باقی نخواهد ماند. این الگو بیانگر آن است که نواحی شرقی جنگل‌های هیرکانی به طور خاص شکننده‌تر هستند. در نتیجه، بیشترین کاهش سطح رویشگاه در این مناطق اتفاق می‌افتد. همچنین، طبق نتایج کمی، بیشترین کاهش سطح رویشگاه در سناریوی SSP 126 معادل ۴۳ درصد و بیشترین افزایش سطح در سناریوی SSP 370 معادل ۴۴ درصد به دست آمد. این یافته‌ها، گویای ناپایداری شرایط زیستی پلت در آینده و لزوم توجه ویژه به مناطق مرکزی و غربی جنگل‌های هیرکانی برای برنامه‌ریزی حفاظتی و احیایی آن هستند. نتایج پژوهش پیش‌رو بیانگر آسیب‌پذیری زیاد پلت نسبت به تغییر اقلیم، به ویژه افزایش دما و کاهش بارندگی هستند و ضرورت اقدام‌های مدیریتی و حفاظتی فوری برای حفظ زیستگاه‌های باقی‌مانده این گونه را برجسته می‌کنند. افزایش دما و کاهش بارندگی در آینده، شرایط زیستی منطقه را به سمت اقلیم خشک سوق می‌دهد که با نیازهای بوم‌شناختی پلت سازگار نیست. خشکی ناشی از تغییر اقلیم می‌تواند به ایجاد تنش‌های فیزیولوژیکی شدید در گیاهان منجر شود و بر رشد، توسعه، فرایندهای فیزیولوژیکی و حتی ساختار جمعیتی آن‌ها اثرگذار باشد (Du et al., 2020). در نتیجه، نه تنها دامنه پراکنش گونه‌هایی مانند پلت کاهش می‌یابد، بلکه ممکن است به طور کامل از برخی نواحی حذف شوند. همچنین، اثر تغییر اقلیم بر پراکنش پلت در بخش‌های شرقی و مرکزی، شدیدتر از بخش‌های غربی جنگل‌های

با دما در کنار بارش از عوامل اصلی مؤثر بر پراکنش پلت بودند. این نتایج با توجه به ماهیت متغیرهای زیست‌اقلیمی مورد استفاده (مشتق شده از دما و بارش) قابل انتظار است. مدل RF به طور ویژه تأکید بیشتری بر متغیر ایزوترمالیتی و تغییرات فصلی دما داشت، در حالی که این مدل، بارندگی در خشک‌ترین ماه را به عنوان یکی از عوامل مهم شناسایی کرد. هم‌راستا با این نتایج، Jafariyan و Karegar (۲۰۱۷) گزارش کردند که متغیرهای اقلیمی به ویژه بارش، نقش تعیین‌کننده‌ای در پراکنش گونه‌های رطوبت‌پسند در مناطق جنگلی دارد. دما، یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده پراکنش گونه‌های گیاهی است که بر میزان تولید زی‌توده توده، محصول‌دهی و توانایی رقابت گیاه در جامعه گیاهی تأثیر می‌گذارد (Asadi et al., 2025). پلت، گونه‌ای نیمه‌رطوبت‌پسند است که اغلب در ارتفاع پایین‌بند تا میان‌بند پراکنش دارد (Sagheb Talebi et al., 2014). یافته‌های پژوهش پیش‌رو نیز با این ویژگی‌های بوم‌شناختی همخوانی دارد. به طوری که زیستگاه‌های مطلوب فعلی این گونه در ارتفاعات پایین استان‌های مازندران، گیلان و بخش‌هایی از گلستان متمرکز هستند. مدل‌سازی پراکنش راش شرقی (*Fagus orientalis*) در جنگل‌های هیرکانی بیانگر عملکرد بهتر مدل اجماعی و RF بود (Hedayati Kaliji et al., 2025). همچنین، متغیرهای ارتفاع از سطح دریا، تغییرات فصلی دما و شیب، بیشترین نقش را در پراکنش گونه مذکور داشتند. کاربرد مدل MaxEnt برای پیش‌بینی پراکنش سرخ‌دار در جنگل‌های هیرکانی نشان داد که ترکیب متغیرهای اقلیمی و توپوگرافی، بهترین عملکرد را دارند (Habibikilak et al., 2025). متغیرهایی مانند Bio18, Bio7, Bio3, Bio2 و نیز ارتفاع و شیب، بیشترین نقش را در پراکنش سرخ‌دار ایفا کردند. در مقابل، متغیرهای خاکی، نقش بسیار کمی داشتند. نتایج دیگر پژوهش مذکور نشان داد که پراکنش سرخ‌دار به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی و توپوگرافی قرار دارد و حفاظت آن باید بر این اساس طراحی شود. همچنین، مدل‌سازی پراکنش تعدادی از گونه‌های درختی در جنگل آموزشی و پژوهشی دانشگاه تربیت مدرس نشان داد که

جنگل‌های هیرکانی نیز به‌عنوان منطقه بحرانی و اولویت‌دار برای حفاظت پیشنهاد شد.

هرچند روند کلی مدل‌ها، کاهش پراکنش پلت را تحت تأثیر تغییر اقلیم نشان می‌دهد، اما افزایش ۴۴ درصدی سطح رویشگاه مطلوب در سناریوی SSP 370 بیانگر پیچیدگی تعاملات اقلیمی است. به‌طوری‌که در شرایط انتشار متوسط تا زیاد ممکن است الگوهای بارش و دما به گونه‌ای تغییر کنند که برخی نواحی برای پلت مناسب‌تر شوند، درحالی‌که کاهش کلی در نواحی شرقی غالب است. این تناقض ظاهری می‌تواند ناشی از حساسیت مدل RF به متغیرهای خاص مانند تغییرات فصلی دما و ایزوترمالیته باشد که در SSP 370 به گسترش محدود زیستگاه در ارتفاعات پایین‌تر منجر می‌شود. در مقابل سناریوهای شدیدتر مانند SSP 585 تنش‌های حرارتی و خشکی را تشدید می‌کنند. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که تغییر اقلیم لزوماً همیشه به کاهش پراکنش گونه‌ها منجر نمی‌شود و در برخی موارد می‌تواند باعث گسترش محدوده رویشگاهی شود. به‌عنوان نمونه، طبق نتایج پژوهش Sękiewicz و همکاران (۲۰۲۴) رویشگاه مطلوب پلت تحت سناریو RCP4.5 افزایش خواهد یافت. همچنین، Thampan و همکاران (۲۰۲۵) در بررسی پراکنش *Tecomella undulata* (Sm.) Seem. گزارش کردند که شرایط آینده می‌تواند به دلیل افزایش بارش و تغییرات دمایی به گسترش رویشگاه این گونه منجر شود. به‌طور مشابه، Mahmoud و همکاران (۲۰۲۵) با مدل‌سازی پراکنش سه گونه مدیترانه‌ای نشان دادند که دو گونه *Thymelaea hirsute* (L.) Endl. و *Ononis vaginalis* Vahl در سناریوهای اقلیمی آینده، پراکنش خود را گسترش خواهند داد، درحالی‌که فقط یک گونه، محدودیت زیستگاهی را تجربه می‌کند.

اگرچه نتایج این پژوهش و نقشه‌های تولیدشده، دقت قابل‌قبولی را نشان دادند، اما باید به محدودیت‌ها و چالش‌های موجود در یافته‌ها توجه کرد. این پژوهش با بهره‌گیری از مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی به پیش‌بینی زیستگاه‌های مناسب برای پلت پرداخته است. با این حال، هرگونه تغییر یا عدم قطعیت در داده‌های ورودی می‌تواند به نتایج نادرست یا

هیرکانی خواهد بود. این دو ناحیه از نظر رژیم‌های بارندگی به‌طور کامل باهم تفاوت دارند (Akhani *et al.*, 2010; Sagheb Talebi *et al.*, 2014). چنانچه در جنگل‌های هیرکانی از غرب به شرق، میانگین دمای سالانه افزایش و میانگین بارندگی سالانه کاهش می‌یابد (Sagheb Talebi *et al.*, 2014; Ahmadi *et al.*, 2020; Homami Totmaj *et al.*, 2021). این موضوع نشان می‌دهد که رویشگاه‌های مناسب در مناطق شرقی و مرکزی جنگل‌های هیرکانی، بیشتر از بخش‌های دیگر تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار خواهند گرفت و شکننده‌تر خواهند شد (به‌ویژه در استان گلستان در شرق و استان گیلان در غرب).

کاهش زیستگاه مطلوب برای گونه‌های مختلف در جنگل‌های هیرکانی در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است. به‌عنوان مثال نتایج پژوهش Taleshi و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که تغییر اقلیم طی ۵۰ سال گذشته باعث گرمایش جنگل‌های هیرکانی شده است و رویشگاه بالقوه راش شرقی در آینده (۲۰۷۰) به شدت کاهش می‌یابد. در خوش‌بینانه‌ترین سناریو (RCP 2.6) حدود ۷۲/۷۹ درصد و در بدبینانه‌ترین سناریو (RCP 8.5) حدود ۸۹/۸۵ درصد از رویشگاه‌های مطلوب از دست خواهد رفت. طبق نتایج پژوهشی دیگر، راش شرقی تحت سناریوهای بدبینانه (SSP 585) تا ۳۴/۸ درصد از رویشگاه‌های مطلوب خود را از دست خواهد داد (Hedayati Kaliji *et al.*, 2025). همچنین، مدل‌سازی پراکنش بلوط بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey. نشان داد که تحت سناریوی RCP 4.5 حدود ۱۶/۸ درصد افزایش رویشگاه و تحت سناریوی RCP 8.5 حدود ۲۹/۸ درصد کاهش رخ خواهد داد (Taleshi *et al.*, 2020). درصد مناطق پایدار و بدون تغییر در دو سناریوی مذکور به ترتیب ۵۴/۱۲ و ۲۳/۸۵ درصد گزارش شد. براساس پیش‌بینی‌های Alipour و همکاران (۲۰۲۳)، تغییر اقلیم آینده سبب کاهش ۶۳/۴۶ درصدی رویشگاه‌های مطلوب صنوبر (*Populus caspica* (Bornm.) Bornm.) خواهد شد و فقط ۳۶/۵۴ درصد از زیستگاه‌های کنونی پایدار خواهند ماند. بخش شرقی

دقت مدل‌ها به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این یافته‌ها، اهمیت توجه به منابع عدم قطعیت داده‌های ورودی در SDM را برجسته می‌کند. برآورد زی‌توده روی زمینی جنگل‌های چین با استفاده از ترکیب RF و شبیه‌سازی مونت‌کارلو نشان داد که استفاده از روش ترکیب RF و شبیه‌سازی مونت‌کارلو می‌تواند عدم قطعیت مرتبط با تغییر متغیرهای مدل‌سازی را به‌طور مؤثری کمی کند و نسبت به مدل‌های صرفاً مبتنی بر RF دقت بیشتری ارائه دهد (Li *et al.*, 2022). این پژوهش بر اهمیت توجه به منابع عدم قطعیت در برآورد زیست‌توده و مدل‌های بوم‌شناختی تأکید دارد و نشان می‌دهد که عدم قطعیت باید بخشی جدایی‌ناپذیر از فرایند مدل‌سازی باشد. پژوهش پیش‌رو با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، پراکنش پلت در جنگل‌های هیرکانی را مدل‌سازی کرد. نتایج نشان داد که مدل RF نسبت به SVM و MaxEnt دقت بیشتری در پیش‌بینی حضور و عدم حضور گونه مذکور داشت. بیشترین احتمال حضور پلت نیز در بخش‌های غربی جنگل‌های هیرکانی به‌دست آمد. این یافته‌ها می‌تواند راهنمایی کاربردی برای شناسایی رویشگاه‌های مناسب، تعیین اولویت‌های مکانی در احیای جنگل‌های تخریب‌شده و برنامه‌ریزی حفاظت بلندمدت باشد. به‌طور خاص در مداخلات مدیریتی باید به ملاحظات بوم‌شناختی، محدوده پراکنش طبیعی گونه‌ها و ویژگی‌های فیزیوگرافی منطقه، توجه ویژه شود. استفاده از مدل‌های پراکنش علاوه بر شناسایی مناطق مناسب برای استقرار گونه‌های حساس مانند پلت می‌تواند مبنایی برای طراحی برنامه‌های احیای مبتنی بر شواهد، کاهش ریسک ناشی از تغییر اقلیم و تضمین پایداری تنوع زیستی و بوم‌سازگان جنگلی هیرکانی را فراهم کند. بر این اساس، یافته‌های پژوهش پیش‌رو می‌تواند به‌طور مستقیم در سیاست‌گذاری، مدیریت عملی جنگل و تصمیم‌گیری‌های حفاظتی استفاده شود.

غیرقابل‌تعمیم منجر شود. برای مدیریت این چالش، بررسی عدم قطعیت ضروری است. در پژوهش‌های پیشین، رویکردهای مدل‌سازی اجماعی یا میانگین‌گیری از خروجی چندین مدل برای ارزیابی عدم قطعیت مدل به‌کار گرفته شده است (Araújo & New, 2007; Thuiller *et al.*, 2009). با این حال، این روش‌ها اغلب عدم قطعیت ناشی از انتخاب مدل را پوشش می‌دهند و توانایی محدودی در ارزیابی عدم قطعیت ذاتی داده‌های ورودی دارند. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از روش ارزیابی متقابل (cross-validation) بهترین مدل (RF) شناسایی شد. سپس، با شبیه‌سازی مونت‌کارلو براساس داده‌های اقلیمی ورودی، عدم قطعیت آن بررسی شد (Gould *et al.*, 2014; Graham & Kimble, 2019; Niamir *et al.*, 2019). روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به‌عنوان یکی از کارآمدترین ابزارها برای بررسی عدم قطعیت در داده‌ها و فرض‌های مدل به‌کار می‌رود. در این روش، نمونه‌های تصادفی از توزیع‌های احتمالی پارامترها استخراج می‌شود و مدل برای هر مجموعه از این مقادیر اجرا می‌شود. استفاده از این روش، امکان ارزیابی عدم قطعیت در مدل‌های پیچیده را فراهم می‌کند. با وجود این، کاربردهای آن در حوزه علوم جنگل و بررسی رویشگاه مطلوب محدود است که ممکن است به‌دلیل پیچیده‌گی زیاد محاسبه این تحلیل‌ها باشد. با این حال، در برخی پژوهش‌های مرتبط با بخش جنگل از شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای برآورد اثر عدم قطعیت بر ذخیره و مخزن کربن جنگل (Peltoniemi *et al.*, 2006; Monni *et al.*, 2007)، پیش‌بینی عملکرد (Kangas, 1999) و برنامه‌ریزی مدیریت جنگل (Kangas & Kangas, 1999) استفاده شده است.

طبق نتایج Naimi و همکاران (۲۰۱۱)، عدم قطعیت مکانی در داده‌های حضور گونه‌ها می‌تواند دقت مدل‌های پراکنش گونه را کاهش دهد، اما میزان این اثر به درجه همبستگی مکانی متغیرهای مستقل وابسته است. به‌طور خاص، وقتی همبستگی مکانی متغیرهای مستقل کمتر یا مساوی با سه برابر انحراف معیار خطای مکانی باشد، اثر خطا بر دقت مدل کمتر است، اما در شرایط همبستگی مکانی زیاد،

## Reference

- Adjuik, T.A. and Davis, S.C., 2022. Machine learning approach to simulate soil CO<sub>2</sub> fluxes under cropping systems. *Agronomy*, 12(1): 197.
- Ahmadi, K., Alavi, S.J., Amiri, G.Z., Hosseini, S.M., Serra-Diaz, J.M. and Svenning, J.C., 2020. 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*, 64(9): 1451-1462.
- Akhiani, H., Djamali, M., Ghorbanalizadeh, A. and Ramezani, E., 2010. Plant biodiversity of Hyrcanian relict forests, N Iran: an overview of the flora, vegetation, palaeoecology and conservation. *Pakistan Journal of Botany* 42: 231-258.
- Alavi, S.J., Ahmadi, K., Hosseini, S.M., Tabari, M. and Nouri, Z., 2019. The response of English yew (*Taxus baccata* L.) to climate change in the Caspian Hyrcanian Mixed Forest ecoregion. *Regional Environmental Change*, 19(1): 1495-1506.
- Alipour, Sh., Badehian, Z., Yousefzadeh, H., Asadi, F., Espahbodi, K. and Walas, L., 2023. Predicting past, current and future suitable habitat for endemic Hyrcanian species *Populus caspica* Bornm. *New Forests*, 54(2): 325-342.
- Araújo, M.B. and New, M., 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(1): 42-47.
- Asadi, H., Jalilvand, H., Tafazoli, M. and Hosseini, S.F., 2025. Modeling suitable habitats of *Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey. in the Hyrcanian Forests, Iran using environmental factors. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 33(1): 50-68 (In Persian with English summary).
- Bakhshi Khaniki, Gh. and Mohammadi, B., 2012. Ecological study of some species of the genus *Salsola* (Chenopodiaceae) in Golestan Province. *New Cellular and Molecular Biotechnology Journal*, 2(6): 45-52 (In Persian with English summary).
- Catani, F., Lagomarsino, D., Segoni, S. and Tofani, V., 2013. Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11): 2815-2831.
- Chauvier, Y., Thuiller, W., Brun, P., Lavergne, S., Descombes, P., Karger, D.N., ... and Zimmermann, N.E., 2021. Influence of climate, soil, and land cover on plant species distribution in the European Alps. *Ecological Monographs*, 91(2): e01433.
- Chen, X., Liang, Y. and Feng, X., 2024. Influence of model complexity, training collinearity, collinearity shift, predictor novelty and their interactions on ecological forecasting. *Global Ecology and Biogeography*, 33(3): 371-384.
- Damaneh, J.M., Ahmadi, J., Rahmanian, S., Sadeghi, S.M.M., Nasiri, V. and Borz, S.A., 2022. Prediction of wild pistachio ecological niche using machine learning models. *Ecological Informatics*, 72: 101907.
- Du, Q., Rossi, S., Lu, X., Wang, Y., Zhu, H., Liang, E. and Camarero, J.J., 2020. Negative growth responses to temperature of sympatric species converge under warming conditions on the southeastern Tibetan Plateau. *Trees*, 34(2): 395-404.
- Duan, R.Y., Kong, X.Q., Huang, M.Y., Fan, W.Y. and Wang, Z.G., 2014. The predictive performance and stability of six species distribution models. *PLoS ONE*, 9(11): e112764.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E. and Yates, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17: 43-57.
- Falk, W. and Mellert, K.H., 2011. Species distribution models as a tool for forest management planning under climate change: risk evaluation of *Abies alba* in Bavaria. *Journal of Vegetation Science*, 22: 621-634.
- Fathollahzadeh, A., 2018. Response curve and species distribution model of beech, basswood, ironwood, maple and alder in Educational and Research Forest of Tarbiat Modares University. M.Sc. thesis, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, 85p (In Persian with English summary).
- Ghareghan, F., Ghanbarian, G., Pourghasemi, H.R. and Safaeian, R., 2020. Prediction of habitat suitability of *Morina persica* L. species using artificial intelligence techniques. *Ecological Indicators*, 112: 106096.
- Gould, S.F., Beeton, N.J., Harris, R.M.B., Hutchinson, M.F., Lechner, A.M., Porfirio, L.L. and Mackey, B.G., 2014. A tool for simulating and communicating uncertainty when modelling species distributions under future climates. *Ecology and Evolution*, 4(24): 4798-4811.
- Graham, J. and Kimble, M., 2019. Visualizing uncertainty in habitat suitability models with the hyper-envelope modeling interface, version 2. *Ecology and Evolution*, 9(1): 251-264.
- Greener, J.G., Kandathil, S.M., Moffat, L. and Jones, D.T., 2022. A guide to machine learning for biologists. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 23(1): 40-55.
- Guisan, A., Thuiller, W. and Zimmermann, N.E., 2017. *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 462p.
- Gunaratne, M.D.N., De Silva, S.H.N.P. and Amarasinghe, R.K., 2022. Can NASA power climatic data fill the gap of climatic data required for agriculture and forest ecosystems modeling?

- Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Forestry and Environment Symposium. Jayewardeneperura, Sri Lanka, 20-21 Jan. 2022: 141-141.
- Guo, Y., Lu, C., Gu, W., Zhao, Z. and Yang, D., 2023. The potential impacts of climate change on the distribution of tree species. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6: 1301579.
  - 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 (In Persian with English summary).
  - Haghdoost, N., Akbarinia, M., Hoseini, S.M. and Varamesh, S., 2012. Effects of substitution of degraded natural forests with plantations on soil carbon sequestration and fertility in north of Iran. *Journal of Environmental Studies*, 38(3): 135-146 (In Persian with English summary).
  - 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 (In Persian with English summary).
  - Homami Totmaj, L., Ramezani, E., Alizadeh, K. and Behling, H., 2021. Four millennia of vegetation and environmental history above the Hyrcanian forest, northern Iran. *Vegetation History and Archaeobotany*, 30: 611-621.
  - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. Summary for Policymakers: 1-34. In: Lee, H. and Romero, J. (Eds.). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland.
  - Iturrate-Garcia, M., O'Brien, M.J., Khitun, O., Abiven, S., Niklaus, P.A. and Schaeppman-Strub, G., 2016. Interactive effects between plant functional types and soil factors on tundra species diversity and community composition. *Ecology and Evolution*, 6(22): 8126-8137.
  - Jaafari, A., Pazhouhan, I. and Bettinger, P., 2021. Machine learning modeling of forest road construction costs. *Forests*, 12(9): 1169.
  - Jafarian, Z. and Kargar, M., 2017. Distribution modeling of protective and valuable plant species in the tourist area of Polour using generalized linear model (GLM) and generalized additive model (GAM). *Geography and Development*, 46: 117-132 (In Persian with English summary).
  - Kamer Aksoy, Ö., 2022. Predicting the potential distribution area of the *Platanus orientalis* L. in Turkey today and in the future. *Sustainability*, 14(18): 11706.
  - Kangas, A.S. and Kangas, J., 1999. Optimization bias in forest management planning solutions due to errors in forest variables. *Silva Fennica*, 33(4): 303-315.
  - Kangas, A.S., 1999. Methods for assessing uncertainty of growth and yield predictions. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(9): 1357-1364.
  - Khalatbari Limaki, M., Eshagh Nimvari, M., Alavi, S.J., Mataji, A. and Kazemnezhad, F., 2023. Elevational shift of *Carpinus betulus* L. under the future climate change in northern Iran. *Journal of Renewable Natural Resources Research*, 13(2): 71-85.
  - Li, X., Zhang, G., Xie, C., Qiu, J. and Liu, X., 2024. Prediction of the potential distribution area of *Jacaranda mimosifolia* in China under climate change using the MaxEnt model. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7: 1377689.
  - Li, Z., Bi, S., Hao, S. and Cui, Y., 2022. Aboveground biomass estimation in forests with random forest and Monte Carlo-based uncertainty analysis. *Ecological Indicators*, 142: 109246.
  - Ly, H.B., Asteris, P.G. and Pham, T.B., 2021. Accuracy assessment of extreme learning machine in predicting soil compression coefficient. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 42(3): 228-336.
  - Mahmoud, A.R., Farahat, E.A., Hassan, L.M. and Halmy, M.W.A., 2025. Predicting the future impact of climate change on the distribution of species in Egypt's Mediterranean ecosystems. *BMC Plant Biology*, 25(1): 644.
  - Marvie Mohadjer, M.R., 2011. *Silviculture*. University of Tehran Press, Tehran, Iran, 418p (In Persian).
  - Mi, C., Huettmann, F., Guo, Y., Han, X. and Wen, L., 2017. Why choose Random Forest to predict rare species distribution with few samples in large undersampled areas? Three Asian crane species models provide supporting evidence. *PeerJ*, 5: e2849.
  - Monfaredi, H., Jahdi, R. and Taheri Abkenar, K., 2022. Qualitative and quantitative traits and regeneration status in maple plantation and natural forests. *Journal of Plant Research*, 35(4): 806-817 (In Persian with English summary).
  - Monni, S., Peltoniemi, M., Palosuo, T., Lehtonen, A., Mäkipää, R. and Savolainen, I., 2007. Uncertainty of forest carbon stock changes – implications to the total uncertainty of GHG inventory of Finland. *Climatic Change*, 81(3): 391-413.
  - Naimi, B., Skidmore, A.K., Groen, T.A. and Hamm, N.A., 2011. Spatial autocorrelation in predictors reduces the impact of positional uncertainty in occurrence data on species distribution modelling. *Journal of biogeography*, 38(8): 1497-1509.
  - Niamir, A., Skidmore, A.K., Munoz, A.R., Toxopeus, A.G. and Real, R., 2019. Incorporating knowledge uncertainty into species distribution modelling. *Biodiversity and Conservation*, 28(3): 571-588.

- Pecchi, M., Marchi, M., Burton, V., Giannetti, F., Moriondo, M., Bernetti, I. and Chirici, G., 2019. Species distribution modelling to support forest management. A literature review. *Ecological Modelling*, 411: 108817.
- Peltoniemi, M., Palosuo, T., Monni, S. and Mäkipää, R., 2006. Factors affecting the uncertainty of sinks and stocks of carbon in Finnish forests soils and vegetation. *Forest Ecology and Management*, 232(1-3): 75-85.
- Petrenko, T.Y., Korznikov, K.A., Kislov, D.E., Belyaeva, N.G. and Krestov, P.V., 2022. Modeling of cold-temperate tree *Pinus koraiensis* (Pinaceae) distribution in the Asia-Pacific region: Climate change impact. *Forest Ecosystems*, 9: 100015.
- Probst, P., Boulesteix, A.L. and Bischl, B., 2019. Tunability: Importance of hyperparameters of machine learning algorithms. *Journal of Machine Learning Research*, 20(53): 1-32.
- Qin, A., Liu, B., Guo, Q., Bussmann, R.W., Ma, F., Jian, Z., ... and 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: 139-146.
- Qin, Z., Zhang, J.E., DiTommaso, A., Wang, R.L. and Wu, R.S., 2015. Predicting invasions of *Wedelia trilobata* (L.) Hitchc. with Maxent and GARP models. *Journal of Plant Research*, 128: 763-775.
- Ravanbakhsh, M., Babakhani, B., Ghasemnezhad, M., Serpooshan, F. and Biglouie, M.H., 2022. Morphophysiological responses in *Alnus subcordata* and *Acer velutinum* seedlings to drought stress. *Plant Process and Function*, 11(51): 241-259 (In Persian with English summary).
- Sabeti, H., 2008. *Forests, Trees and Shrubs of Iran*. Published by Yazd University, Yazd, Iran, 886p (In Persian).
- Sagheb Talebi, Kh., Sajedi, T. and Pourhashemi, M., 2014. *Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 152p.
- Sękiewicz, K., Salvà-Catarineu, M., Walas, Ł., Romo, A., Gholizadeh, H., Naqinezhad, A., ... and Boratyński, A., 2024. Consequence of habitat specificity: a rising risk of habitat loss for endemic and sub-endemic woody species under climate change in the Hyrcanian ecoregion. *Regional Environmental Change*, 24(2): 68.
- Shrestha, N., 2020. Detecting multicollinearity in regression analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 8(2): 39-42.
- Sparks, A.H., 2018. nasapower: A NASA POWER global meteorology, surface solar energy and climatology data client for R. *Journal of Open Source Software*, 3(30): 1035.
- Taleshi, H., Jalali, S.G., Alavi, S.J., Hosseini, S.M., Naimi, B. and Zimmermann, N.E., 2019. Climate change impacts on the distribution and diversity of major tree species in the temperate forests of Northern Iran. *Regional Environmental Change*, 19(8): 2711-2728.
- Taleshi, H., Jalali, S.Gh., Alavi, S.J., Hosseini, S.M. and Naimi, B., 2018. Impacts of climate change on the distribution of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in the Hyrcanian Forests, Iran. *Iranian Journal of Forest*, 10(2): 251-266 (In Persian with English summary).
- Taleshi, H., Jalali, S.Gh., Alavi, S.J., Hosseini, S.M. and Naimi, B., 2020. Projection of climate change impacts on potential distribution of chestnut-leaved oak (*Quercus castaneifolia* C.A.M.) using ensemble modeling in the Hyrcanian forests of Iran. *Ecology of Iranian Forests*, 8(15): 10-21 (In Persian with English summary).
- Thampan, J., Srivastava, J., Saraf, P.N. and Samal, P., 2025. Habitat distribution modelling to identify areas of high conservation value under climate change for an endangered arid land tree *Tecomella undulata*. *Journal of Arid Environments*, 227: 105317.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R. and Araújo, M.B., 2009. BIOMOD – a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32(3): 369-373.
- Vorpahl, P., Elsenbeer, H., Märker, M. and Schröder, B., 2012. How can statistical models help to determine driving factors of landslides? *Ecological Modelling*, 239: 27-39.
- Wang, W.J., He, H.S., Thompson, F.R.III, Spetich, M.A. and Fraser, J.S., 2018. Effects of species biological traits and environmental heterogeneity on simulated tree species distribution shifts under climate change. *Science of The Total Environment*, 634: 1214-1221.
- Wisz, M.S., Pottier, J., Kissling, W.D., Pellissier, L., Lenoir, J., Damgaard, C.F., ... and Svenning, J.C., 2013. The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: implications for species distribution modelling. *Biological Reviews*, 88(1): 15-30.
- Xie, C., Chen, L., Li, M., Jim, C.Y. and Liu, D., 2023. Bioclim modeling for predicting suitable habitat for endangered tree *Tapiscia sinensis* (Tapisciaceae) in China. *Forests*, 14(11): 2275.
- Zhang, L., Huettmann, F., Liu, S., Sun, P., Yu, Z., Zhang, X. and Mi, C., 2019. Classification and regression with random forests as a standard method for presence-only data SDMs: a future conservation example using China tree species. *Ecological Informatics*, 52: 46-56.

- Zhong, Y., Xue, Z., Jiang, M., Liu, B. and Wang, G., 2021. The application of species distribution modeling in wetland restoration: A case study in the Songnen Plain, Northeast China. *Ecological Indicators*, 121: 107137.
- Zurell, D., Franklin, J., König, C., Bouchet, P.J., Dormann, C.F., Elith, J., ... and Merow, C., 2020. A standard protocol for reporting species distribution models. *Ecography*, 43(9): 1261-1277.