بررسی تغییرات پراکنش ارتفاعی گونه ممرز تحت تاثیر تغییر اقلیم آینده در شمال ایران

مهدیه خلعتبری‌لیماکی[۱]، مجید اسحق‌نیموری[۲*]، سیدجلیل علوی[۳]، اسداله متاجی[٤] و فرید کاظم‌نژاد[٥]

۱) دانشجوی دکتری رشته جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، مازندران، ایران.

۲) استادیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، مازندران، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: majides-haghi@iauc.ac.ir

۳) دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

٤) استاد گروه علوم محیط زیست و جنگل، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

٥) استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، واحد چالوس، دانشگاه آزاد اسلامی، چالوس، مازندران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۰۷/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱٤۰۱/۱۰/۱۹

چکیده

اگرچه نگرانی‌هایی در مورد تاثیر تغییر اقلیم بر روی جنگل‌ها وجود دارد، اما اثر تغییرات اقلیمی آینده بر گونه‌های درختان در جنگل‌های هیرکانی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. تاثیر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌ها معمولا منجر به جابه‌جایی گونه‌ها به ارتفاعات و عرض‌های جغرافیایی بالاتر می‌شود. گونه ممرز (*Carpinus betulus*) فراوان‌ترین گونه درختی در جنگل‌های هیرکانی است که در بخش زیادی از شمال ایران پراکنش دارد. در این مطالعه، تاثیر تغییر اقلیم بر تغییر ارتفاع از سطح دریای گونه ممرز با استفاده از مدل‌های پراکنش گونه‌ای برای حال حاضر، سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ میلادی تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیمی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های پراکنش گونه‌ای از آماره‌های مختلف شامل TSS، AUC ، KAPPA، Sensitivity و Specificity استفاده شد. بر اساس معیارهای ارزیابی مدل، مدل جنگل تصادفی کارایی بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها در پراکنش گونه ممرز در شمال ایران داشت. پیش‌بینی آینده مدل‌های پراکنش گونه‌ای نشان داد تغییرات آب‌وهوایی تاثیر منفی در پراکنش ممرز خواهد داشت که باعث کاهش چشمگیر مناطق دارای پتانسیل حضور این گونه تحت سناریوهای RCP2.6 (خوش‌بینانه‌ترین سناریو) و RCP8.5 (بدبینانه‌ترین سناریو) در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ میلادی خواهد شد. نتایج نشان داد گونه ممرز در حال حاضر بیشترین پتانسیل حضور تا ارتفاع ۱۰۰۰ متر از سطح دریا را دارد ولی تا ارتفاع ۲۵۰۰ متر هم گسترش دارد و با تغییر اقلیم بیشترین پتانسیل حضور را در ارتفاع بیشتر از ۱۰۰۰ متر از سطح دریا خواهد داشت. اگرچه مکانیزم‌های بسیار پیچیده‌ای پراکنش گونه‌های درختی در مناطق کوهستانی را توجیه می‌کند، اما اقلیم یکی از مهم‌ترین این مکانیزم‌ها است و نتایج این پژوهش می‌تواند معیاری برای برنامه‌ریزی آینده در جنگل‌های هیرکانی باشد.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های کوهستانی، جنگل‌های هیرکانی، مدل پراکنش گونه‌ای، مطلوبیت رویشگاه، ممرز.

مقدمه

تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌های جنگلی در سطح جهان تاثیر گذاشته است و تاثیرات آن در آینده افزایش خواهد یافت (Brandt *et al*., 2016). تغییرات در محدوده پراکنش گونه‌های درختی، انتقال گونه‌های درختی به مناطق شمالی و ارتفاعات بالاتر و همچنین کاهش قابل توجه تنوع زیستی از جمله پیامدهای تغییر آب‌وهوا هستند (Pavlovic *et al*., 2019). با این‌حال، در برخی از مناطق کوهستانی (به‌عنوان مثال منطقه Minas Gerais در جنوب‌شرقی برزیل)، رویش جنگل‌ها در حال افزایش است (Silva *et al*., 2016). اگرچه ایجاد جنگل‌های جدید پیامد مفید تغییرات اقلیمی در برخی مناطق دارد، اما تغییرات آب‌وهوایی می‌تواند منجر به

جنگل‌زدایی و تغییر جغرافیایی یا حتی انقراض گونه‌ها شود (Taleshi *et al*., 2019; Alavi *et al*., 2019).

اساس پیش‌بینی پراکنش گیاهان و جانوران، مدل‌های پراکنش گونه‌ای هستند (Koo *et al*., 2017). مدل‌های پراکنش گونه‌ای به‌طور گسترده‌ای در جغرافیای زیستی به‌منظور مشخص کردن آشیان اکولوژیکی گیاهان و جانوران و نیز پیش‌بینی پراکنش جغرافیایی آنها به‌کار برده شده‌اند. در مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها، معمولا بر اساس تعیین رابطه آماری بین متغیرهای محیطی و حضور یا عدم‌حضور گونه‌ها عمل می‌شود (Hasui *et al*., 2017). مدل‌های پراکنش گونه‌ای یک پیش‌بینی احتمالی از آشیان اکولوژیکی واقعی برای یک گونه مشخص در یک فضای جغرافیایی برای یک دوره زمانی مشخص ارایه می‌کنند (Zurell & Engler, 2019). این مدل‌ها یکی از مهم‌ترین ابزارهای کمی در زیست‌شناسی حفاظت (Watling *et al*., 2015) و ارزیابی خطر گونه‌های مهاجم هستند (Taylor & Kumar, 2013). چندین مثال از کاربرد مدل‌های پراکنش گونه‌ای وجود دارد، از جمله اولویت‌بندی مناطق حفاظتی (Watling *et al*., 2015)، حضور بالقوه گونه‌ها (Alavi *et al*., 2020) و شناسایی زیستگاه‌های بالقوه برای پراکنش گونه‌ها است (Ahmadi *et al*., 2020).

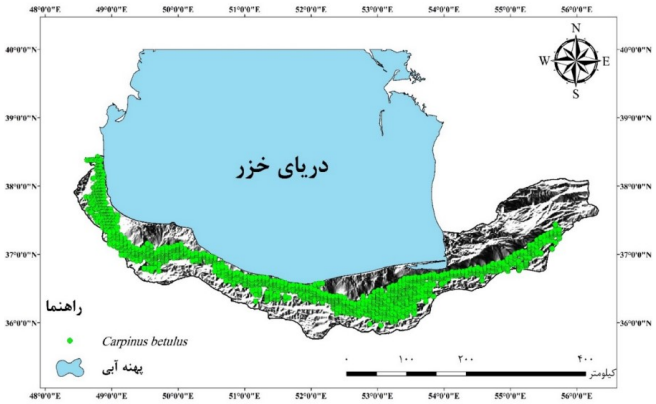
تا کنون در مطالعات زیادی و با استفاده از مدل‌های پراکنش گونه‌ای به اثر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌ها پرداخته شده است. به‌عنوان نمونه می‌توان اشاره کردکه نتایج حاصل از پراکنش گونه راش تحت تاثیر اقلیم نشان داد این گونه در شرایط اقلیمی گرم‌تر بخش‌های وسیعی از رویشگاه‌های مناسب خود را از دست خواهد داد (طالشی و همکاران، ۱۳۹۷). نتایج حاصل از پژوهشی که بر روی گونه سرخدار در Apennines ایتالیا صورت گرفت، نشان داد پراکنش و حضور این گونه عمدتا در جهت‌های مرطوب شمالی و غربی و شیب‌های متوسط ۳۰-۶۰ درصد است (Piovesan *et al*., 2009). نتایج پژوهشی با مطالعه اثر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه *Lobelia rhynchopetalum* نشان داد به شدت در معرض خطر انقراض در شرایط تغییر اقلیم قرار دارد، به‌طوری‌که تنها ۳/٤ درصد از رویشگاه‌های مطلوب آن تا سال ۲۰۸۰ همچنان مطلوبیت خود را حفظ خواهد کرد (Chala *et al*., 2016). در پژوهشی با عنوان اهمیت متغیرهای اقلیمی، توپوگرافی و خاک در پراکنش سرخدار از بین متغیرهای زیست‌اقلیمی، میانگین دما در خشک‌ترین فصل سال و بارندگی در گرم‌ترین فصل سال، بیشترین تاثیر را در پراکنش گونه سرخدار داشته‌اند. متغیرهای کربن آلی خاک، درصد شن، ظرفیت تبادل کاتیونی، ارتفاع از سطح دریا و درصد شیب نیز از دیگر عوامل مهم تاثیرگذار در پراکنش گونه سرخدار بودند (علوی و همکاران، ۱۳۹۸). همچنین در مطالعه‌ای اثر گرمایش جهانی بر کاهش رویشگاه‌های مطلوب گونه‌های مختلف جنس راش گزارش شده است (Matsuiet *et al*., 2009). نتایج پژوهش‌های Claessens و همکاران (۲۰۰٦) و Hidalgo و همکاران (۲۰۰۸) بیانگر اهمیت نقش ویژگی‌های توپوگرافی در مدل‌سازی پراکنش مکانی پوشش گیاهی و مشخصه‌های کمی جنگل است که در این میان برخی از خصوصیات با توجه به شرایط توپوگرافی منطقه، تاثیر بیشتر و برخی تاثیر کمتری دارند. در پژوهشی از MaxEnt برای مدل‌سازی پراکنش بالقوه گونه در معرض خطر *Prunus africana* و ارزیابی خطر تغییر اقلیم در سال ۲۰۵۰ برای این گونه در شرق آفریقا استفاده کردند. نتایج نشان داد این گونه نسبت به تغییرات اقلیمی به شدت آسیب‌پذیر است (Mbatudde *et al*., 2012). در مطالعه‌ای به بررسی اهمیت عوامل اقلیمی و ادافیکی بر پراکنش ۱۲ گونه در جنگل‌های معتدل سوئیس پرداخته شد که بر اساس نتایج مطالعه شش گونه پیش‌بینی‌کننده ادافیکی مهم‌تر از پیش‌بینی‌کننده‌های اقلیمی در شکل‌دهی پراکنش گونه‌ها بود و به‌طور کلی در تمام ۱۲ گونه درختی مورد مطالعه، ویژگی‌های خاک مهم‌تر از متغیرهای آب‌وهوایی در شکل‌دهی پراکنش گونه‌های درختی بودند (Walther & Meier, 2017). همچنین در پژوهشی برخی از عواملی (هوادهی خاک، کمبود آب، در دسترس بودن نیتروژن، اسیدیته و دما) که به شکل‌دهی پراکنش گونه‌های درختی در جنگل‌های معتدل کمک می‌کنند، با استفاده از یک پایگاه داده بزرگ در فرانسه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج پژوهش اهمیت توصیف‌کننده‌های خاک برای شکل‌دهی پراکنش گیاهان را نشان داد تا به هر گونه اجازه دهد مناطقی را که در داخل پوشش اقلیمی با شرایط تغذیه‌ای و رطوبتی مطلوب وجود دارد، مشخص کند (Piedallu *et al*., 2016). مطالعات اخیر از مکان‌های‌مختلف، تغییرات‌مرتبط با آب‌وهوا

در آینده را در رویشگاه‌های گونه‌های گیاهی مهم از نظر اکولوژیکی و اقتصادی پیش‌بینی کرده‌اند (Chakraborty *et al.*, 2016). در جنوب اوراسیا، کاهش قابل توجه زیستگاه برای گونه‌های ممرز معمولی، بلوط، افرا، توسکا و سایر گونه‌های مهم اقتصادی پیش‌بینی شده است (Çoban *et al.*, 2020). در آمریکای شمالی، Garza و همکاران (۲۰۲۰) اثرات منفی قابل توجهی از تغییرات آب‌وهوا بر روی توزیع آینده درختچه در معرض خطر *Manihot walkerae* در جنوب تگزاس و شمال مکزیک یافتند. مطالعه روی درختچه ساحلی جنوب‌شرقی آسیا، *Homonoia riparia*، نشان داد زیستگاه مناسب تحت تمام سناریوهای آب‌وهوایی آینده، با حداکثر RCP 4.5 افزایش یافته است (Yi *et al.*, 2018). در مجموع، این مطالعات نشان‌دهنده تغییرات گسترده، برخی مثبت، اما اغلب منفی در توزیع پوشش گیاهی زمینی در ۵۰ سال آینده است. ممرز (*Carpinus betulus*) از گونه‌های بومی در جنگل‌های هیرکانی است و در رویشگاه‌های آمیخته با بلوط و راش و در بعضی مناطق با انجیلی رشد می‌کند (Sagheb-Talebi *et al.*, 2014). ممرز برای رشد خوب به آب‌وهوای گرم نیاز دارد و در ارتفاعات تا ۱۰۰۰ متر بالاتر از سطح دریا ظاهر می‌شود. این گونه یک درخت متوسط تا بزرگ است که به ارتفاع ۱۵–۲۵ متر و به‌ندرت ۳۰ متر می‌رسد. پیش‌بینی می‌شود میانگین دمای شمال ایران تا پایان قرن کنونی افزایش یابد (Azizi & Roshani, 2008) که با کاهش ۹ درصدی بارش در سراسر کشور همراه خواهد بود (Babaeian *et al.*, 2009). با وجود نگرانی‌های فراوان در مورد تاثیرات تغییرات آب‌وهوایی بر تنوع زیستی، اثرات آن بر برخی گونه‌های گیاهی خاص هنوز ناشناخته است. در مطالعه حاضر بر روی توزیع فعلی و آینده، در محدوده تغییرات آب‌وهوایی گونه ممرز (*Carpinus betulus*)، گونه‌ای با مزایای زیست محیطی و اقتصادی بسیار تمرکز شده است. با توجه به مزایای اکولوژیکی خاص، این مطالعه با استفاده از سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6.5 و RCP 8.5 با هدف پیش‌بینی توزیع بالقوه گونه ممرز صورت گرفته است. همچنین با توجه به قدمت و تنوع زیستی گونه‌های درختی در جنگل‌های هیرکانی دانش اندکی در ارتباط با تاثیر تغییر اقلیم بر تغییر در دامنه پراکنش این‌گونه‌ها وجود دارد. بنابراین، مدل‌سازی اثر تغییرات اقلیمی بر پراکنش گونه‌های درختی مهم در جنگل‌های هیرکانی ضروری است و این مطالعه برای مدل‌سازی پراکنش رویشگاه‌های مناسب برای گونه ممرز در شرایط فعلی و در شرایط تغییر اقلیم آینده در جنگل‌های هیرکانی تلاش خواهد کرد. بدین منظور مطالعه حاضر به‌منظور رسیدن به اهداف زیر در جنگل‌های هیرکانی انجام شد: الف) مدل‌سازی پراکنش گونه ممرز در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از تکنیک‌های آماری مختلف و انتخاب مناسب‌ترین تکنیک برای مدل‌سازی پراکنش این‌گونه؛ ب) تعیین رویشگاه‌های با پتانسیل بالا برای حضور گونه ممرز و شناسایی مهم‌ترین متغیرهای محیطی تاثیرگذار بر پراکنش این‌گونه؛ و ج) شناخت تاثیر تغییر اقلیم بر پراکنش این گونه و شناسایی دامنه تغییرات ارتفاعی تحت تاثیر سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در آینده در جنگل‌های هیرکانی. در نهایت نتایج این مطالعه از نظر ارتباط آن با تحقیق، برنامه‌ریزی و مدیریت برای نقش گونه ممرز در چشم‌انداز آینده مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در جنگل‌های هیرکانی حدود ۸۰ گونه درختی وجود دارد و یکی از مهم‌ترین و فراوان‌ترین گونه درختان ممرز (*Carpinus betulus L.*) است. به‌منظور شناسایی نقاط حضور گونه مورد مطالعه، از داده‌های آماربرداری طرح‌های جنگلداری جنگل‌های شمال کشور استفاده شد (Taleshi *et al.*, 2019). برای اجتناب از اریب ناشی از نمونه‌برداری در مناطق دارای طرح جنگلداری برای هر ۱ کیلومترمربع تنها یک داده حضور برای گونه درختی انتخاب شد (در تفکیک مکانی ۳۰ ثانیه یا ۱ کیلومترمربع) (Zhang *et al.*, 2018). تا حد امکان داده‌ها مربوط به‌صورت تصادفی سیستماتیک انتخاب شد. شکل (۱) نقاط حضور گونه‌های ممرز (۱۹۷۵ نقاط حضور) را نشان می‌دهد. این گونه در سرتاسر جنگل‌های هیرکانی حضور دارد و دامنه پراکنش آن هر سه استان گیلان، مازندران و گرگان است.



شکل ۱. پراکنش گونه ممرز در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران

مدل‌سازی پراکنش گونه ممرز

در پژوهش حاضر به‌منظور مدل‌سازی پراکنش فعلی گونه ممرز، مدل خطی تعمیم‌یافته[1]، مدل جمعی تعمیم‌یافته[2]، تجزیه‌وتحلیل طبقه‌بندی درختی[3]، مدل دامنه سطح پوشش[4]، درخت رگرسیون تقویت‌شده[5] و جنگل‌های تصادفی[6] به‌کار گرفته شد. لازم به ذکر است داده‌های ورودی (حضور و عدم حضور گونه) از کتابچه‌های طرح‌های جنگلداری تهیه شدند که توسط سازمان جنگل‌ها راستی‌آزمایی شده و دارای اعتبار بالایی هستند. به‌منظور تعیین رویشگاه‌های مطلوب و مناطق با پتانسیل بالا برای حضور گونه ممرز از شاخص پتانسیل حضور استفاده شد. در مناطقی که احتمال حضور گونه بزرگ‌تر از ۰/۷ باشد پتانسیل خیلی بالا، ۰/۵ تا ۰/۷ بالا، ۰/۳ تا ۰/۵ متوسط، ۰/۱ تا ۰/۳ پایین و کمتر از ۰/۱ عدم پتانسیل وجود دارد. برای هر یک از مدل‌های پراکنش گونه‌ای با استفاده از مقایسه نقشه‌های حضور/ عدم‌حضور فعلی و سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ میلادی، درصد مساحت‌های افزایش‌یافته، کاهش‌یافته یا حفظ‌شده مشخص شد. کلیه تجزیه‌وتحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری R (R Core Team, 2018) انجام شد. برای ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدل‌های پراکنش گونه‌ای از ۱۰ تکرار تقسیم‌بندی تصادفی برای هر یک از مدل‌های پراکنش استفاده شد. در هر تقسیم تصادفی از ۷۰ درصد داده‌های حضور برای ساخت مدل و ۳۰ درصد باقی‌مانده برای ارزیابی آن استفاده شد. در مطالعه حاضر به‌منظور مقایسه کارایی مدل‌ها از سطح زیرمنحنی مشخصه عملکرد و آماره مهارت درست[7] یا TSS (Nikoo *et al.*, 2016) در نرم‌افزار آماری R استفاده شد. همچنین، برخی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی دقت مدل شامل TSS، ROC ، KAPPA، Sensitivity و Specificity برای بررسی دقت مدل‌های مورد بررسی استفاده شدند.

متغیرهای محیطی

به‌منظور بررسی پراکنش بالقوه گونه‌ها و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، نقشه متغیرهای اقلیمی (۱۹ متغیر زیست‌اقلیمی) تهیه شد. متغیرهای زیست‌اقلیمی یکی از مهم‌ترین متغیرهای محیطی بود کـه در اکثر مطالعات مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها استفاده می‌شـوند. این داده‌های زیست‌اقلیمی، مجموعه‌ای از داده‌های آب‌وهوایی درون‌یابی شده را نشان می‌دهند که مشاهدات ماهانه بارش و دما را بر اساس یک روش رگرسیون خطی وزنی، با استفاده از عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و ارتفاعی به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده منطقه‌ای ترسیم می‌کند. نوزده متغیر زیست‌اقلیمی (جدول ۱) برای شرایط اقلیمی فعلی و آینده (۲۰۵۰ میلادی؛ میانگین سال‌های ۲۰۴۰ تا ۲۰۶۰ میلادی و ۲۰۷۰ میلادی؛ میانگین سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۰۷۰ میلادی) با تفکیک فضایی ۱ کیلومترمربع از پایگاه داده‌های Worldclim[8] به‌دست آمد.

1 GLM
2 GAM
3 CTA
4 SRE
5 BRT
6 RF
7 True Skill Statistic
8 www.worldclim.org

جدول ۱. فهرست متغیرهای زیست‌اقلیمی بر اساس تعاریف سازمان جهانی هواشناسی

کد	عنوان انگلیسی	عنوان
BIO1	Annual Mean Temperature	میانگین دمای سالیانه
BIO2	Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))	دامنه میانگین ماهانه
BIO3	Isothermality (BIO2/BIO7) (× 100)	ایزوترمالیتی
BIO4	Temperature Seasonality (standard deviation *100)	فصلی بودن دما
BIO5	Max Temperature of Warmest Month	حداکثر دمای گرم‌ترین ماه
BIO6	Min Temperature of Coldest Month	حداقل دمای سردترین ماه
BIO7	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)	دامنه تغییرات دمای سالانه
BIO8	Mean Temperature of Wettest Quarter	میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل
BIO9	Mean Temperature of Driest Quarter	میانگین دمای خشک‌ترین فصل
BIO10	Mean Temperature of Warmest Quarter	میانگین دمای گرم‌ترین فصل
BIO11	Mean Temperature of Coldest Quarter	میانگین دمای سردترین فصل
BIO12	Annual Precipitation	بارش سالانه
BIO13	Precipitation of Wettest Month	بارش مرطوب‌ترین ماه
BIO14	Precipitation of Driest Month	بارش خشک‌ترین ماه
BIO15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)	بارش فصلی
BIO16	Precipitation of Wettest Quarter	بارش مرطوب‌ترین فصل
BIO17	Precipitation of Driest Quarter	بارش خشک‌ترین فصل
BIO18	Precipitation of Warmest Quarter	بارش گرم‌ترین فصل
BIO19	Precipitation of Coldest Quarter	بارش سردترین فصل

پیش‌بینی‌های مختلفی در سامانه‌های اقلیمی با استفاده از مدل‌های مختلف انجام شد که این مدل‌ها محدوده‌ای از مدل‌های اقلیمی ساده، مدل‌هایی با پیچیدگی متوسط، مدل‌های اقلیمی جامع و مدل‌های سیستم زمین را دربرمی‌گیرند. این مدل‌ها، تغییرات را بر اساس یک مجموعه از سناریوهای واداشت تابشی[1] ناشی از فعالیت‌های انسانی شبیه‌سازی می‌کنند (IPCC & Core, 2014). سری جدیدی از سناریوها با عنوان نماینده خطوط سیر غلظت[2] برای شبیه‌سازی‌های جدید مدل اقلیمی تحت چارچوب CMIP 5 برنامه تحقیقات اقلیم جهان استفاده شده است (IPCC & Core, 2014). این چهار سناریو یا نماینده برای خطوط سیر غلظت عبارت از RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6.5 و RCP 8.5 که RCP 2.6 خوش‌بینانه‌ترین سناریو و RCP 8.5 بدبینانه‌ترین آن است. توضیحات مربوط به سناریوهای خطوط سیر غلظت در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲. نماینده‌های خطوط سیر غلظت دی‌اکسید کربن و سناریوهای آنها

سناریوها نماینده خطوط سیر غلظت	توضیحات
RCP 2.6	واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ میلادی به میزان حدود ۳ وات‌برمترمربع (تقریبا معادل غلظت دی‌اکسید کربن ٤٩٠) افزایش می‌یابد و سپس در سال ۲۱۰۰ میلادی به ۲/٦ وات‌برمترمربع کاهش می‌یابد.
RCP 4.5	واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای بدون عبور از خط سیر تا ٤/٥ وات‌برمترمربع تقریبا معادل غلظت دی‌اکسید کربن (٦٥٠ppm) تثبیت می‌شود و بعد از سال ۲۱۰۰ میلادی ثابت می‌ماند.
RCP 6.0	واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای بدون عبور از خط سیر تا ٦ وات‌برمترمربع تقریبا معادل غلظت دی‌اکسید کربن (۸۵۰ ppm) تثبیت می‌شود و بعد از سال ۲۱۰۰ میلادی ثابت می‌ماند.
RCP 8.5	واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای تا میزان ۸/٥ وات‌برمترمربع تقریبا معادل غلظت دی‌اکسیدکربن (۱۳۷۰ ppm) تا سال ۲۱۰۰ میلادی افزایش می‌یابد.

منبع: Van Vuuren *et al*., 2011

1 Representative Concentration Pathways
2 RCP

سه متغیر شیب، جهت دامنه و ارتفاع از سطح دریا از مهم‌ترین متغیرهای محیطی هستند که به‌طور رایج در اندازه‌گیری‌ها و تهیه نقشه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند (Gama, 2016) که از این ۳ متغیر ۲ متغیر Dem و slope به‌دلیل مسئله هم‌خطی و همبستگی زیاد با متغیرهای دیگر از فرآیند مدل‌سازی کنار گذاشته شدند اما TRASP (شاخص تابش خورشیدی) به‌عنوان معیار پارامتر توپوگرافی وارد مدل گردید. از مدل رقومی ارتفاع با اندازه تفکیک مکانی ۳۰ متر برای تولید نقشه‌های درصد شیب و جهت جغرافیایی در نرم‌افزار QGIS 3.6 استفاده شد. متغیرهای خاکی مورد استفاده در این پژوهش از داده‌های جهانی SoilGrids با دقت ۲۵۰ متر استخراج شد.

نتایج

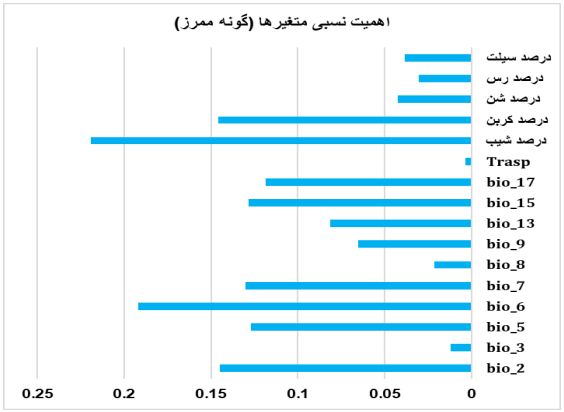
با توجه به معیارهای ارزیابی مدل در جدول (۳) همه مدل‌ها کارایی بالایی در پیش‌بینی پراکنش گونه ممرز در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران داشتند. بر اساس معیار ارزیابی TSS، مدل جنگل تصادفی، شبکه عصبی مصنوعی و به دنبال آن مدل جمعی تعمیم‌یافته نسبت به سایر مدل‌ها کارایی بالاتری داشتند. مدل جنگل تصادفی دارای بالاترین مقدار TSS (۰/۶۸) و مدل خطی تعمیم‌یافته (۰/۶۲) کمترین مقدار را داشتند. بر اساس معیار ارزیابی AUC، مدل جنگل تصادفی و به دنبال آن مدل شبکه عصبی مصنوعی نسبت به سایر مدل‌ها کارایی بالاتری داشتند. مدل جنگل تصادفی بالاترین مقدار AUC (۰/۸۷) و مدل FDA کمترین مقدار AUC (۰/۸۵) را دارا بودند. بر اساس معیار ارزیابی KAPPA، مدل جنگل تصادفی، مدل جمعی تعمیم‌یافته و به دنبال آن مدل درخت رگرسیون تقویت‌شده نسبت به سایر مدل‌ها کارایی بیشتری داشتند. مدل جنگل تصادفی دارای بالاترین مقدار KAPPA (۰/۶۸) و مدل خطی تعمیم‌یافته کمترین مقدار (۰/۶۳) را داشتند. در مجموع همان‌گونه که انتظار می‌رفت مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل‌ها کارایی بالاتری در پراکنش گونه ممرز در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران داشت.

جدول ۳. نتایج معیارهای ارزیابی مدل شامل TSS، ROC، KAPPA، Sensitivity و Specificity برای مدل‌سازی گونه ممرز در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران

مدل‌های پراکنش گونه‌ای	معیارهای ارزیابی مدل				
	TSS	AUC	KAPPA	Sensitivity	Specificity
GLM	۰/۶۲	۰/۸۶	۰/۶۲۸	۸۶/۲۲۴	۷۶/۷۶۲
FDA	۰/۶۴	۰/۸۵	۰/۶۴۶	۸۹/۷۹۶	۷۴/۶۷۴
GAM	۰/۶۵	۰/۸۷	۰/۶۵۶	۹۲/۰۹۲	۷۳/۳۶۸
ANN	۰/۶۵	۰/۸۶	۰/۶۶۱	۹۴/۱۳۳	۷۱/۸۰۲
RF	۰/۶۸	۰/۸۷	۰/۶۸۹	۹۵/۴۰۸	۷۳/۳۶۸
GBM	۰/۶۷	۰/۸۶	۰/۶۷۹	۹۱/۵۸۲	۷۳/۲۴
MARS	۰/۶۵	۰/۸۶	۰/۶۵۴	۹۰/۸۱۶	۷۴/۴۱۳

بررسی اهمیت نسبی متغیرهای تاثیرگذار در پراکنش گونه ممرز

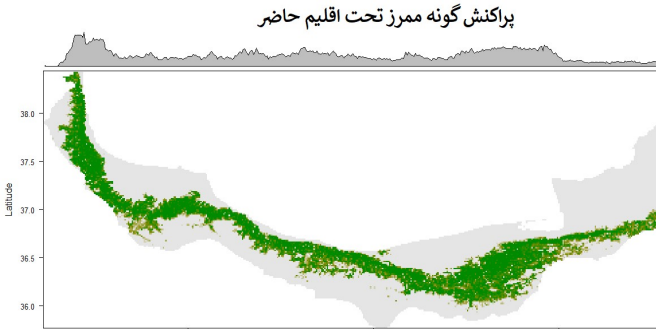
در این مطالعه از متغیرهای مهم خاکی، توپوگرافی و اقلیمی در مدل‌سازی پراکنش مکانی گونه ممرز در شمال ایران استفاده شد. شکل (۲) اهمیت نسبی متغیرهای مستقل در پراکنش گونه ممرز را در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران نشان می‌دهد. از بین متغیرهای مورد بررسی درصد شیب، bio 2، bio 6 و bio 15 بیشترین اهمیت را در پراکنش گونه ممرز داشتند.



شکل ۲. اهمیت نسبی متغیرهای محیطی در پراکنش گونه ممرز در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران

پراکنش گونه ممرز در شمال ایران در حال حاضر

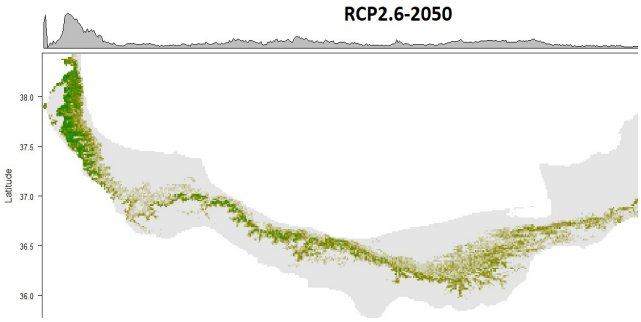
شکل (۳) نقشه پراکنش گونه ممرز به‌دست‌آمده از مدل‌سازی مکانی با استفاده از مدل‌های پراکنش گونه‌ای در شمال ایران در حال حاضر را نشان می‌دهد. همان گونه که نتایج نشان داده است در حال حاضر این گونه در سراسر جنگل‌های هیرکانی وجود دارد که نقاط حضور این‌گونه در مناطق ذکر شده نیز حاکی از این امر است.



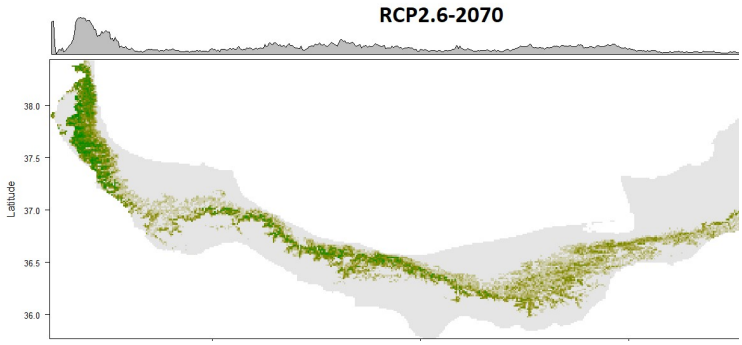
شکل ۳. نقشه پراکنش گونه ممرز در شمال ایران تحت تاثیر اقلیم حال حاضر

پراکنش گونه ممرز در شمال ایران تحت تاثیر تغییرات اقلیمی آینده

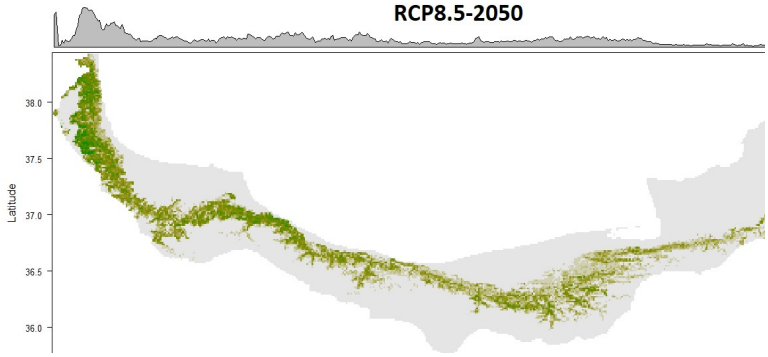
علاوه بر مدل‌سازی پراکنش گونه ممرز در حال حاضر، در این پژوهش اثر تغییر اقلیم در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ میلادی تحت تاثیر سناریوهای انتشار مختلف بررسی شد. شکل‌های (٤) تا (٦) نقشه پراکنش گونه ممرز را تحت تاثیر اقلیم آینده نشان می‌دهد. با توجه به این نتایج، این گونه در آینده بیشتر رویشگاه‌های خود در شمال ایران را از دست می‌دهد و پتانسیل حضور در این مناطق را نخواهد داشت.



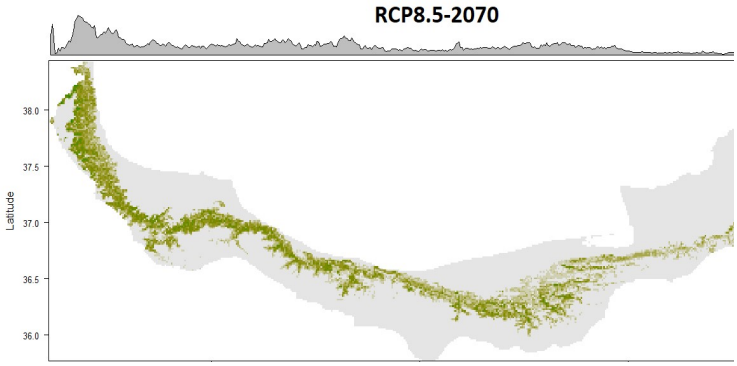
شکل ٤. نقشه پراکنش گونه ممرز در شمال ایران تحت تاثیر تغییرات اقلیمی آینده (RCP2.6-2050)



شکل ۵. نقشه پراکنش گونه ممرز در شمال ایران تحت تاثیر تغییرات اقلیمی آینده (RCP2.6-2070)



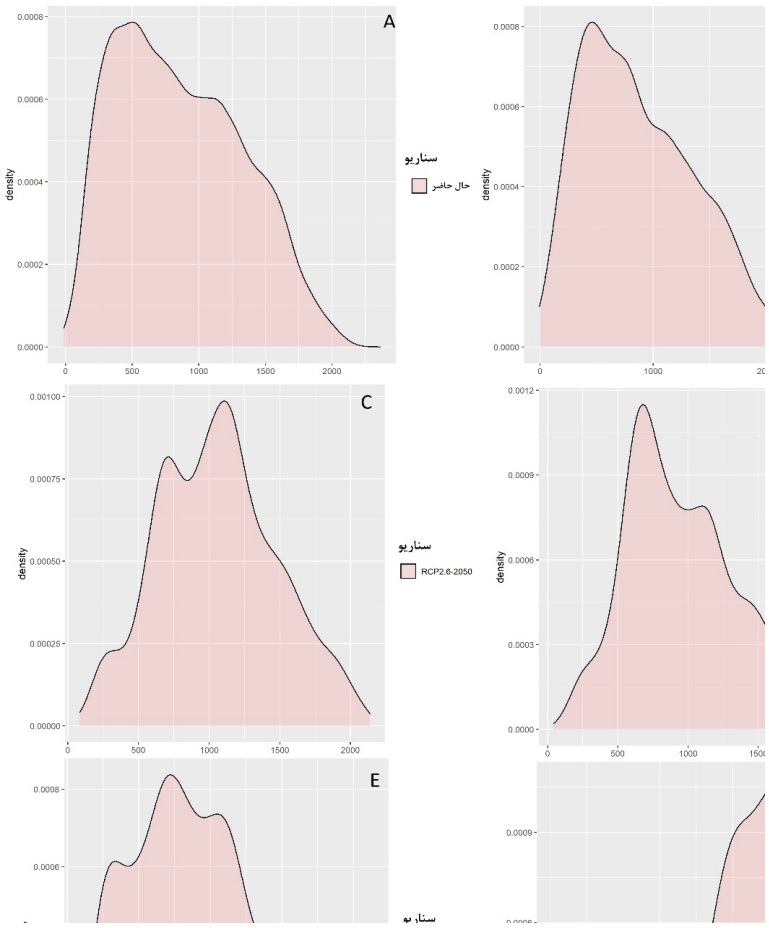
شکل ٦. نقشه پراکنش گونه ممرز در شمال ایران تحت تاثیر تغییرات اقلیمی آینده (RCP8.5-2050)



شکل ۷. نقشه پراکنش گونه ممرز در شمال ایران تحت تاثیر تغییرات اقلیمی آینده (RCP8.5-2070)

پراکنش ارتفاعی مناطق دارای پتانسیل حضور گونه ممرز در شمال ایران در حال حاضر و تحت تاثیر تغییر اقلیم آینده

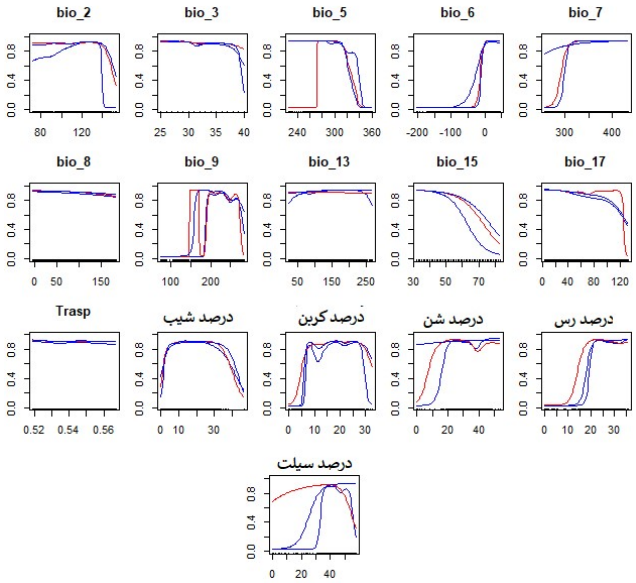
در این مطالعه پس از تهیه نقشه پتانسیل حضور گونه‌ها در حال حاضر و تحت تاثیر تغییرات اقلیمی آینده، پراکنش رویشگاه‌های مناسب حضور این گونه‌ها نسبت به ارتفاع از سطح دریا نیز بررسی شد. بدین منظور تراکم حضور نقاط مناسب با استفاده از پلات تراکم به‌دست آمد. همچنین، علاوه بر تهیه نمودار نقشه‌های به‌دست‌آمده، نمودار نقاط حضور این گونه در پلات‌های نمونه‌برداری نیز تهیه شد. شکل (۷) نمودار پراکنش نقاط حضور گونه ممرز در جنگل‌های هیرکانی نسبت به ارتفاع از سطح دریا در حال حاضر را نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، این‌گونه از سطح دریا تا ۲۵۰۰ متر حضور دارد ولی بیشترین پتانسیل حضور این‌گونه تا ارتفاع ۱۰۰۰ متر از سطح دریاست.



شکل ۷. نمودار پراکنش مناطق مناسب برای حضور گونه ممرز در شمال ایران نسبت به متغیر ارتفاع از سطح دریا

بر اساس این نمودار رویشگاه‌های مناسب حضور این گونه تحت تاثیر تغییر اقلیم سناریو RCP2.6-1428 غالبا در ارتفاع ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متری از سطح دریا پراکنش خواهد یافت. نکته مهم در این نمودار، از بین رفتن رویشگاه‌های با پتانسیل بالای حضور این گونه در مناطق جلگه‌ای شمال ایران تحت تاثیر تغییر اقلیم است. شکل (۷) نمودار پراکنش پتانسیل حضور گونه ممرز در جنگل‌های هیرکانی نسبت به ارتفاع از سطح دریا تحت تاثیر تغییر اقلیم سناریو RCP2.6-1448 را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار رویشگاه‌های مناسب حضور این‌گونه تحت تاثیر تغییر اقلیم سناریو RCP2.6-1448 مانند همین سناریو و در سال ۱٤۲۸ غالبا در ارتفاع ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متری از سطح دریا پراکنش خواهند یافت. بر اساس این نمودار رویشگاه‌های مناسب حضور این گونه تحت تاثیر تغییر اقلیم سناریو RCP8.5-1428 غالبا در ارتفاع ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ متری از سطح دریا پراکنش خواهند یافت. به‌طور کلی، تغییرات ارتفاعی برای این گونه در سناریوهای پایین‌تر، کمتر بوده است. رویشگاه‌های مناسب حضور این گونه تحت تاثیر تغییر اقلیم سناریو RCP8.5-1448 غالبا در ارتفاع بیش از ۱۰۰۰ متری از سطح دریا پراکنش خواهند یافت. در این سناریو اقلیمی تغییرات شدید ارتفاعی مشاهده خواهد شد. بر اساس این نتایج مناطق دارای پتانسیل بالا در ارتفاعات پایین به‌شدت کاهش خواهند یافت.

شکل (۸) منحنی پاسخ گونه ممرز را نسبت به متغیرهای محیطی نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل نشان داده شده است، پراکنش گونه ممرز نسبت به برخی از متغیرهای محیطی (شاخص تابش خورشیدی، میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل و بارش مرطوب‌ترین ماه) نسبتا بی‌تفاوت بوده است. نسبت به متغیر «ایزوترمالیتی bio3» گونه ممرز بیشترین پراکنش را در دامنه دمایی بیشتر از ٤ درجه سانتی‌گراد داشته است.



شکل ۸. منحنی پاسخ گونه ممرز نسبت به متغیرهای محیطی در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران
(محور عمودی احتمال حضور y (۰ تا ۱) و محور افقی متغیر محیطی را نشان می‌دهد)

بحث و نتیجه‌گیری

در دهه‌های اخیر اثرات گرمایش جهانی و تغییرات آب‌وهوایی افزایش یافته است و آنها را به مشکلات اصلی زیست محیطی زمان حاضر تبدیل کرده است. گرم شدن زمین و در نتیجه آن افزایش دمای کره زمین علاوه بر اثرات اجتماعی- اقتصادی و سیاسی خود مانند خشکسالی، کمبود مواد غذایی، کمبود انرژی، کاهش منابع آب و بیابان‌زایی، باعث تخریب چشم‌انداز طبیعی شده و بر سیستم‌هایی که اجزای اساسی تنوع زیستی را تشکیل می‌دهند، مانند اکوسیستم‌ها، گونه‌ها و منابع ژنتیکی تاثیرات منفی می‌گذارد (Demir, 2009; Perring *et al*., 2016). با توجه به این اثرات نامطلوب، گونه‌ها بیشتر و بیشتر به تغییرات آب‌وهوایی واکنش نشان می‌دهند. بر اساس تحقیقات فعلی، تغییرات آب وهوایی یکی از تاثیرگذارترین عوامل در نابودی زیستگاه‌ها به نظر می‌رسند (Wang *et al*., 2017; Yi *et al*., 2016). محققان به این نتیجه رسیدند که انقراض‌ها در مناطقی با بالاترین افزایش سالانه دما بیشتر اتفاق می‌افتند. بنابراین، در صورتی که تغییرات اقلیمی با سرعت فعلی خود ادامه یابد، انتظار می‌رود تغییرات مهم و نامطلوبی در تنوع زیستی رخ دهد. Brun و همکاران (۲۰۲۰) پیچیدگی مدل‌های توزیع گونه‌ها را بررسی کردند و اظهار داشتند که این پیچیدگی هم بر عملکرد یک مدل و هم بر تنوع پیش‌بینی‌ها در توزیع گونه‌ها تاثیر می‌گذارد. مطالعه حاضر از متغیرهای زیست‌اقلیمی برای مدل‌سازی مناطق با پراکنش بالقوه گونه‌ای استفاده کردند که زیستگاه آنها به دلیل تاثیرات تغییرات آب‌وهوایی جهانی در حال تغییر است. تحقیقات مشابهی که به بررسی اثر تغییرات آب‌وهوایی بر پراکندگی بالقوه گونه‌ها می‌پردازد، نشان داده است که سایر عوامل محیطی مانند شکل زمین، شیب و قرار گرفتن در معرض تابش خورشید در جنگل‌های مناطق کوهستانی در یک چرخه روزانه را می‌توان همراه با متغیرهای زیست‌اقلیمی در مدل‌سازی‌های آینده مورد استفاده قرار داد (Han *et al*., 2014).

در پیش‌بینی پراکنش گونه ممرز در جنگل‌های هیرکانی شمال ایران بر اساس معیارهای ارزیابی مدل، مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل‌ها کارایی بالاتری داشت. تا کنون در مطالعات بسیاری به کارایی بالای مدل جنگل تصادفی در مدل‌سازی پراکنش درختان اشاره شده است (Alavi *et al*., 2019; Taleshi *et al*., 2019; Ahmadi *et al*., 2020). الگوریتم‌های مختلف مدل‌سازی برای پراکنش گونه سرخدار در شمال ایران به‌کار گرفته شده است و از بین تمام مدل‌ها، مدل جنگل تصادفی بیشترین کارایی را داشته است. همچنین در مطالعه Alavi و همکاران (۲۰۱۹) نیز نتایج مشابهی به‌دست آمد که با مطالعه حال حاضر مطابقت دارد. مدل جنگل تصادفی نسبت به سایر تکنیک‌های یادگیری ماشین

دارای مزیت‌های متعددی است. این مدل‌ها می‌توانند اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای پیشگو را که قبلا به‌عنوان چالشی مهم مطرح شده بود، محاسبه کنند. مدل جنگل تصادفی همچنین دارای چندین پارامتر تنظیمی است که توسط کاربر تعریف می‌شود. با انجام اینکار معمولا عملکرد مدل جنگل تصادفی نیز بهبود می‌یابد. منحنی پاسخ گونه ممرز نسبت به بیشترین دما در گرم‌ترین ماه سال نشان می‌دهد که این‌گونه قادر به تحمل دماهای بالا در تابستان نیست و طولانی شدن دوره خشکی و گرمی هوا باعث کاهش زادآوری ممرز می‌شود (علیجانپور و همکاران، ۱۳۹۶). همچنین، منحنی پاسخ گونه ممرز نسبت به متغیر کمترین دما در سردترین ماه سال نیز حاکی از این است که سرمای خیلی زیاد یعنی کمتر از صفر نیز از عوامل محدودکننده پراکنش این گونه است.

در پژوهشی با مطالعه بر روی گونه ممرز در کشور دانمارک به این نتیجه رسیدند دمای پایین در زمستان از عوامل محدودکننده پراکنش این گونه است (Kooijman & Martinez-Hernandez, 2009). احتمال حضور گونه ممرز نسبت به bio7 (اختلاف بین کمترین دما در سردترین ماه سال و بالاترین دما در گرم‌ترین فصل سال) افزایش می‌یابد و هر چقدر دامنه دمایی (bio7) رو به افزایش باشد، احتمال حضور گونه بیشتر خواهد شد. از دیگر متغیرهای مهم تاثیرگذار بر پراکنش گونه ممرز متغیر درصد شیب می‌باشد (گونه ممرز حد واسط گرادیان ارتفاعی را می‌پسندد). نتایج مطالعه حاضر نشان داد گونه ممرز در دامنه‌هایی با شیب متوسط دارای بیشترین پراکنش می‌باشد. در مجموع گونه ممرز با عوامل اکولوژیکی (شامل شیب، دما، پارامترهای اقلیمی و توپوگرافی) ارتباط مثبت و مستقیم و با فاکتورهایی نظیر ارتفاع از سطح دریا و شیب ارتباط و همبستگی معکوس دارد (ابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۹). بر اساس منحنی پاسخ گونه ممرز نسبت به متغیرهای بافت خاک می‌توان بیان نمود گونه ممرز در خاک‌هایی با مقدار کربن بین ۱۰ تا ۳۰ درصد، مقدار رس ۲۰ درصد، مقدار سیلت ۳۰ درصد دارای بهترین عملکرد و به نوعی اعداد فوق نشان‌دهنده بیشترین پراکنش برای گونه ممرز می‌باشند. نتایج نشان داد در مورد گونه ممرز تغییرات ارتفاعی در اثر تغییر اقلیم مشهود است. گونه ممرز در حال حاضر بیشترین پتانسیل حضور تا ارتفاع ۱۰۰۰ متر را دارد، ولی تا ۲۵۰۰ متر هم گسترش دارد و با تغییر اقلیم اگرچه دامنه پراکنش آن تغییر چندانی ندارد ولی بیشترین پتانسیل حضور را در ارتفاع بیشتر از ۱۰۰۰ متر خواهد داشت. در میان اکوسیستم‌های جهان، جنگل‌های کوهستانی و زیستگاه‌های منحصربه‌فرد آنها به وضوح به تغییرات آب‌وهوایی حساس هستند و دامنه‌های توزیع به شدت کاهش‌یافته از ویژگی‌های اکوسیستم‌های کوهستانی است که فضای کوچکی برای حرکت بیشتر به ارتفاعات دارند. از آنجایی که جنگل‌های هیرکانی یک نوار باریک هستند، این امر می‌تواند در از دست دادن بسیاری از زیستگاه‌های مطلوب گونه‌های درختی به‌دلیل تغییر آب‌وهوا اتفاق بیفتد (Alavi *et al*., 2019). تاثیر تغییر اقلیم بر پراکنش درختان می‌تواند پیچیده باشد و از گونه‌ای به گونه دیگر متفاوت باشد. با این‌حال، صعود به ارتفاعات بالاتر و تغییر طولی از برجسته‌ترین اثراتی است که در بسیاری از مطالعات پیش‌بینی شده است (Dorado-Liñán *et al*., 2017; Peñuelas *et al*., 2007; Sedmáková *et al*., 2019; Pavlovic *et al*., 2019).

بر اساس نتایج مدل‌های پراکنش گونه‌ای و پیش‌بینی آینده، مشخص شد که گونه ممرز در آینده بیشتر رویشگاه‌های خود در شمال ایران را از دست می‌دهد و پتانسیل حضور در این مناطق را نخواهد داشت. در اثر تغییرات اقلیمی چون دما و بارش و تاثیر این تغییرات بر گونه ممرز، به‌تدریج پراکنش این گونه محدود شده و سازگاری آن در مقابل شرایط اقلیمی به‌وجود آمده، تغییر می‌کند و دیگر قادر به حضور در رویشگاه خود نیست. چرا که با افزایش دما و کاهش بارندگی شرایط منطقه به آب‌وهوای خشک نزدیک می‌شود. این در حالی است که گونه ممرز در شرایط مرطوب شمال کشور پراکنش دارد. نتایج مطالعه حاضر با مطالعه Tytar (۲۰۱۹) که اثر تغییرات اقلیمی آینده را بر گونه ممرز در جنگل‌های اوکراین بررسی کردند، همخوانی دارد. آنها نشان دادند این گونه تحت تاثیر تغییر اقلیم برخی از رویشگاه‌های مناسب حضور خود را از دست خواهد داد. نکته بسیار جالب آن است که این گونه اگرچه تحت تاثیر اقلیم بخش‌هایی از رویشگاه‌های دارای پتانسیل خود را از دست خواهد داد، اما تحت تاثیر سختگیرانه‌ترین سناریو نیز پراکنش خود در هر سه استان مازندران، گلستان و گیلان را خواهد داشت. اگر چه

مدل‌های پراکنش گونه‌ای در این مطالعه با دقت بالا نشان دادند که مناطق مناسب برای حضور گونه ممرز تحت تاثیر تغییر اقلیم در ارتفاعات بالاتر وجود دارد، اما برخی دیگر از عوامل محدودکننده در جنگل‌های هیرکانی وجود دارند. این تصور که دامنه پراکنش یک گونه منحصرا توسط یک مکانیزم تعیین می‌شود، ممکن است نادرست باشد، زیرا مکانیسم‌های متعددی مانند رقابت، محدودیت پراکندگی و فعالیت‌های انسانی نیز می‌توانند دامنه پراکنش گونه‌ها را تحت تاثیر قرار دهند. در بسیاری از مطالعات، فرض بر این بود که آب‌وهوا نقش مهمی در تعیین پراکنش دامنه ارتفاعی گونه‌ها و مطالعه اندازه دامنه دارد. به همین دلیل، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده سایر عوامل تاثیرگذار بر پراکنش گونه‌های درختی نیز در مدل‌سازی در نظر گرفته شوند. همچنین، می‌توان از نتایج پژوهش حاضر و نقشه‌های به‌دست‌آمده به‌منظور مدیریت و احیا مناطق تخریب شده در آینده استفاده کرد و تاثیر تغییر اقلیم را در برنامه‌ریزی‌های آینده چه در زمینه بهره‌برداری و چه در زمینه بازسازی این مناطق به‌کار گرفت. یافته‌های به‌دست آمده می‌تواند به‌طور موثر برای رسیدگی به طرح‌های گفتگوی تنوع زیستی و اقدامات مدیریتی به‌عنوان یک کل و توسعه استراتژی‌های جدید مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب ممکن است بتوان غنای گونه‌ها را در اکوسیستم‌های طبیعی حفظ کرد و سازگاری با شرایط آب‌وهوایی در حال تغییر را تقویت کرد. مدیران ممکن است از نقشه‌های ارایه شده در اینجا برای شناسایی مناطق پرخطر و در نتیجه اولویت‌بندی آن مناطق برای فعالیت‌های حفاظتی استفاده کنند.

منابع

ابراهیمی، ت.، هاشمی، ر.، رزبان حقیقی، ا. و ایمانی، ا. (۱۳۹۹) عوامل اکولوژیکی موثر در پراکنش گونه ممرز در جنگل‌های ارسباران. مجله ترویجی حفاظت و بهره‌برداری جنگل‌های هیرکانی، ۲(۱): ۳۷ –۴۸.

علوی، س.، احمدی، ک.، حسینی، س.، طبری، م. و نوری، ز. (۱۳۹۸) اهمیت متغیرهای اقلیمی، توپوگرافی و خاک در پراکنش سرخدار و اولویت‌بندی رویشگاه‌های مطلوب برای حفاظت و احیا در جنگل‌های خزری. مجله جنگل ایران، ۱۱(٤): ٤٧٧–٤٧٧.

علیجانپور، ا.، فتح‌الهی، ا.، اسحاقی‌راد، ج. و محامدشبانلو، ع. (۱۳۹٦) تاثیر جهت دامنه و خاک بر خصوصیات کمی و کیفی گونه ممرز در جنگل‌های ارسباران، مطالعه موردی حوزه‌های کلیبر چای و ایلگنه چای. مجله زیست‌شناسی ایران، ۳۰(٤): ۸۸۷–۸۹۸.

Ahmadi, K., Alavi, S.J., Amiri, G.Z., Hosseini, S.M., Serra-Diaz, J.M., 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.

Ahmadi, K., Jalil Alavi, S., Zahedi Amiri, G., Mohsen Hosseini, S., Serra-Diaz, J.M. and Svenning, J.C. (2020) Patterns of density and structure of natural populations of Taxus baccata in the Hyrcanian forests of Iran. Nordic Journal of Botany, 38(2): 1-10.

Alavi, S.J., Ahmadi, K., Hosseini, S.M. and Nouri. Z. (2020) Modeling the potential habitat of English yew (*Taxus baccata* L.) in the Hyrcanian forests of Iran. Forest Research and Development, 5(4): 513-525.

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.

Azizi, G.H. and Roshani, M. (2008) Using Mann-Kendall Test to recognize of climate change in Caspian Sea southern coasts. Physical Geography Research Quarterly, 64(1): 13–28.

Babaeian, E., Nagafineik, Z., Zabolabasi, F., Habeibei, M., Adab, H. and Malbisei, S. (2009) Climate change assessment over Iran during 2010-2039 by using statistical downscaling of ECHO- G Model. Geography and Development, 7(16): 135–152.

Brandt, L.A., Butler, P.R., Handler, S.D., Janowiak, M.K., Shannon, P.D. and Swanston, C.W. (2016) Integrating science and management to assess forest ecosystem vulnerability to climate change. Journal of Forestry, 115(3): 212–221.

Brun, P., Thuiller, W., Chauvier, Y., Pellissier, L., Wüest, R.O., Wang, Z. and Zimmermann, N.E. (2020) Model complexity affects species distribution projections under climate change. Biogeography Journal, 47(1): 130–142.

Chakraborty, A., Joshi, P.K. and Sachdeva. K. (2016) Predicting distribution of major forest Tree species to potential impacts of climate change in the central Himalayan region. Ecological Engineering, 97(2): 593–609.

Chala, D., Brochmann, C., Psomas, A., Ehrich, D., Gizaw, A., Masao, C.A., Bakkestuen, V. and Zimmermann, N.E. (2016) Good-bye to tropical alpine plant giants under warmer climates? Loss of range and genetic diversity in Lobelia rhynchopetalum. Ecology and Evolution, 6(24): 8931-8941.

Kooijman, A.M. and Martinez-Hernandez, G.B. (2009) Effects of litter quality and parent material on organic matter characteristics and Ndynamics in Luxembourg beech and hornbeam forests. Forest Ecology and Management, 257(8): 1732–1739.

Matsui, T., Takahashi, K., Tanaka, N., Hijioka, Y., Horikawa, M., Yagihashi, T. and Harasawa, H. (2009) Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech (Fagus crenata) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan. Applied Vegetation Science, 12(3): 328-339.

Mbatudde, M., Mwanjololo, M., Kakudidi, E.K. and Dalitz, H. (2012) Modelling the potential distribution of endangered Prunus Africana (Hook. f.) K alkm. in East Africa. African Journal of Ecology, 50(4): 393-403.

Naimi, B. and Araujo, M.B. (2016) Sdm: A reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. Ecography, 39(4): 368-375.

Nikoo, M.M., Ramezani, F., Hadzima-Nyarko, M., Nyarko, E.K. and Nikoo, M.M. (2016) Flood-routing modeling with neural network optimized by social-based algorithm. Natural Hazards, 82(1): 1-24. Retrieved from https://doi.org/10.1007/s11069-016-2176-5/

Pavlovic, L., Stojanovic, D., Mladenovic, E., Lakicevic, M. and Orlovic, S. (2019) Potential elevation shift of the european beech stands (Fagus sylvatica l.) in Serbia. Frontiers in Plant Science, 10(1): 1–8.

Penuelas, J., Ogaya, R., Boada, M. and Jump, S.A. (2007) Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). Ecography, 30(6): 829–837.

Perring, M.P., De Frenne, P., Baeten, L., Maes, S.L., Depauw, L., Blondeel, H., Caron, M.M. and Verheyen, K. (2016) Global environmental change effects on ecosystems: The importance of land-use legacies. Global Change Biology, 22(4): 1361–1371.

Piedallu, C., Gégout, J., Lebourgeois, F. and Seynave. I. (2016) Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests. Journal of Vegetation Science, 72(2): 387-399.

Piovesan, G., Saba, E.P., Biondi, F., Alessandrini, A., Di Filippo, A. and Schirone, B. (2009) Population ecology of yew (Taxus baccata L.) in the Central Apennines: Spatial patterns and their relevance for conservation strategies. Plant Ecology, 205(1): 23-46.

R Core Team. (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Agricultural. Reterived from https://www.R-project.org/

Sagheb-Talebi, K.S., Sajedi, T. and Pourhashemi, M. (2014) Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future (Plant and Vegetation) Hardcover, 10 (13): 160.

Claessens, L., Verburg, P.H., Schoorl, J.M. and Veldkamp, A. (2006) Contribution of topographically based landslide hazard modelling to the analysis of the spatial distribution and ecology of kauri (Agathis australis). Landscape Ecology, 21(1): 63-76.

Çoban, H.O., Orücü. O.K. and Arslan, E.S. (2020) MaxEnt modeling for predicting the current and future potential geographical distribution of Quercus libani Olivier. Sustainability Journal, 12 (7): 1-17.

Demir, A. (2009) Küresel iklim de ginin biyolojik çes¸itlilik ve ekosistem kaynakları üzerine etkisi. Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi, 1(2): 37–54.

Dorado-Linan, I., Akhmetzyanov, L. and Menzel. A. (2017) Climate threats on growth of rear edge European beech peripheral populations in Spain. International Journal of Biometeorology, 61(12): 2097–2110.

Gama, M., Crespo, D., Dolbeth, M. and Anastácio, P. (2016) Predicting global habitat suitability for Corbicula fluminea using species distribution models: the importance of different environmental datasets. Ecological Modelling, 319(2): 163–169.

Garza, G., Rivera, A., Venegas Barrera, C.S., Martinez-Avalos, J.G., Dale, J. and Feria Arroyo, T.P. (2020) Potential effects of climate change on the geographic distribution of the endangered plant species Manihot walkerae. Forests, 11(?): 689-689.

Han, H., Cho, S., Song, J., Seol, A., Chung, H., Kim, J. and Chung, J. (2014) Assessing the potential suitability of forest stands as Kirengeshoma koreana habitat using MaxEnt.Landsc. Landscape and Ecological Engineering, 10(2): 339–348.

Hasui, E., Silva, V. X., Cunha, R.G., Ramos, F.N., Ribeiro, M.C., Sacramento, M. and Ribeiro, B.R. (2017) Additions of landscape metrics improve predictions of occurrence of species distribution models. Journal of Forestry Research, 28(5): 963-974.

Hidalgo, P.J., Marín, J.M., Quijada, J. and Moreira, J.M. (2008) A spatial distribution model of cork oak (Quercus suber) in southwestern Spain: a suitable tool for reforestation. Forest Ecology and Management, 255(1): 25-34.

IPCC and Core, W.T. (2014) Climate change: Synthesis report. In: R.K. Pachauri and L.A. Meyer, (Eds.). Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC Geneva, 151p.

Iverson, L.R., Prasad, A.M., Peters, M.P. and Matthews, S.N. (2019) Facilitating adaptive Forest management under climate change: a spatially specific synthesis of 125 species for habitat changes and assisted migration over the eastern United States. Forests, 10(11): 989-989.

Koo, K.A., Park, S.U., Kong, W.S., Hong, S., Jang. I. and Seo, C. (2017) Potential climate change effects on tree distributions in the Korean Peninsula: Understanding model and climate uncertainties. Ecological Modelling, 353(1): 17-27.

Walther, L. and Meier, E.S. (2017) Tree species distribution in temperate forests is more influenced by soil than by climate. Ecology and Evolution, 7(22): 9473- 9484.

Wang, Y.Q., Ma, J.F., Li, X.Q., Wang, Y.F., Cao, S., Xie, A.T., Ye, S.F., Dong, B.X., Zhao, W.X., Qin, Y.X., Xia, F., Zheng, Z.Y., Zhu, X.M., Jiang, J.Y. and Dong, Z.P. (2017) The distribution of Athetis lepigone and prediction of its potential distribution based on GARP and MaxEnt. Journal of Applied Entomology, 141(6): 431–440.

Watling, J.I., Brandt, L.A., Bucklin, D.N., Fujisaki, I., Mazzotti, F.J., Romanach, S.S. and Speroterra, C. (2015) Performance metrics and variance partitioning reveal sources of uncertainty in species distribution models. Ecological Modelling, 309(2): 48-59.

Yi, Y., Zhou, Y., Cai, Y., Yang, W., Li, Z. and Zhao, X. (2018) The influence of climate change on an endangered riparian plant species: the root of riparian Homonoia. Ecological Indicators, 92 (2):40–50.

Yi, Y.J., Cheng, X., Yang, Z.F. and Zhang, S.H. (2016) Maxent modeling for predicting the potential distribution of endangered medicinal plant (H. riparia lour) in Yunnan, China. Ecological Engineering, 92(2): 260–269.

Zhang, K., Yao, L., Meng, J. and Tao, J. (2018) Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. Science of The Total Environment, 634(3): 1326-1334.

Zurell, D. and Engler, J.O. (2019) Ecological niche modeling. Effects of climate change on birds, 23(3): 60-73.

Sedmakov, D., Sedmak, R., Bosela, M., Jezík, M., Blazenec, M. and Hlasny, T. (2019) Growth–climate responses indicate shifts in the competitive ability of European beech and Norway spruce under recent climate warming in East– Central Europe. Dendrochronologia, 54(1125-7865): 37–48.

Silva, L.C.R., Sun, G., Zhu-barker, X., Liang, Q., Wu, N. and Horwath, W.R. (2016) Tree growth acceleration and expansion of alpine forests: the synergistic effect of atmospheric and edaphic change. Science Advances, 2(8): e1501302.

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.

Taylor, S. and Kumar, L. (2013) Potential distribution of an invasive species under climate change scenarios using CLIMEX and soil drainage: a case study of Lantana camara L. in Queensland, Australia. Journal of environmental management, 114(4): 414-422.

Tytar, V.M. (2019) Climatic limits for the present European distribution of hornbeam (Carpinus betulus), with special reference to Ukraine. Departement of Evolutioonary and Genetic Fundamentals of Systematics Institute of zoology. National Academy of Sciences of Ukraine, 112(3): 223-239.

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K. and Masui, T. (2011) The representative concentration pathways: An overview. Climatic Change, 109(1): 5-31.

Elevational shift of Carpinus betulus L. under the future climate change in northern Iran

Mahdieh Khalatbari Limaki[1], Majid Eshagh Nimvari[2*], Seyed Jalil Alavi[3], Asadollah Mataji[4] and Farid Kazemnezhad[5]

1) Ph.D. Student of Forestry, Faculty of Natural Resources, Chalus Branch, Islamic Azad University, Chalus, Mazandaran, Iran.
2) Assistant Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources, Chalus Branch, Islamic Azad University, Chalus, Mazandaran, Iran. *Corresponding Author Email Address: majides-haghi@iauc.ac.ir
3) Associate Professor, Department of Forestry, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
4) Professor, Department of Environmental and Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
5) Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Natural Resources, Chalus Branch, Islamic Azad University, Chalus, Mazandaran, Iran.

Date of Submission: 2022/10/15 Date of Acceptance: 2023/01/09

Abstract

Although there are concerns about the impact of climate change on forests, the impact of future climate change on tree species in the Hyrcanian forests has been less studied. The effect of climate change on the distribution of species usually leads to the movement of species to higher altitudes and latitudes. Hornbeam is the most abundant tree species in the Hyrcanian forests, which is distributed in a large part of northern Iran. In this study, the effect of climate change on the change of hornbeam species elevation using species distribution models are currently being studied under different climate change scenarios for 2050 and 2070. In this study, various statistics including TSS, AUC, KAPPA, Sensitivity and Specificity were used to evaluate the performance of species distribution models. According to the model evaluation criteria, the random forest model had a higher efficiency than other models in the distribution of hornbeam in northern Iran. The future prediction of species distribution models showed that climate change will have a negative impact on the distribution of hornbeam, which will significantly reduce the areas with the potential for the presence of this species under RCP2.6 and RCP8.5 in 2050 and 2070. The results indicated that the hornbeam species currently has the greatest potential for presence up to an altitude of 1000m, but also expands to an altitude of 2500m and with climate change will have the greatest potential for presence at an altitude of more than 1000m. Although very complex mechanisms justify the distribution of tree species in mountainous areas, climate is one of the most important of these mechanisms and the results of this study can be a criterion for future planning in Hyrcanian forests.

Keywords: Carpinus betulus, Habitat suitability, Hyrcanian forests, Mountain forests, Species distribution model.