



پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) در جنگل‌های زاگرس، استان فارس

ندا خواجه‌ئی^۱، وحید اعتماد^{۲*} و جواد بذرافشان^۳

^۱ دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
^۲ دانشیار، گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
^۳ دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۳۱؛ تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۶/۰۷)

چکیده

مقدمه: تغییر اقلیم می‌تواند پراکنش طبیعی گونه‌ها را تغییر دهد و سبب از بین رفتن تنوع زیستی در اکوسیستم‌های جنگلی شود. این تحقیق با هدف بررسی پیامدهای تغییرات اقلیمی بر پراکنش جغرافیایی گونه بلوط ایرانی به منظور مدیریت حفاظت از این گونه و انتخاب منطقه مطلوب برای معرفی گونه صورت گرفت.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش پراکنش گونه بلوط ایرانی در سه دوره حال حاضر، سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ و تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 مدل گردش عمومی HadGEM2-ES با استفاده از مدل مکسنت (Maxent) و متغیرهای اقلیمی و توپوگرافی استان فارس بررسی شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مساحت کل مناطق بالقوه مطلوب برای بلوط ایرانی در حال حاضر ۷/۸ درصد (۹۷۹۴/۵ کیلومتر مربع) از کل مساحت استان است که تحت سناریوی RCP2.6 در ۲۰۵۰ به ۶/۶ درصد کاهش و در ۲۰۷۰ به ۱۳/۳ افزایش می‌یابد. همچنین مقدار کل منطقه مطلوب تحت سناریو RCP8.5 به ۸/۱ درصد در سال ۲۰۵۰ و ۱۰/۲ درصد در سال ۲۰۷۰ افزایش می‌یابد. مناطق با مطلوبیت متوسط، زیاد و بسیار زیاد به ترتیب از ۱/۸، ۱/۵ و ۱/۷ درصد در حال حاضر طبق سناریو RCP2.6 در ۲۰۵۰ به ۱/۱، ۰/۶ و ۰/۳ درصد کاهش و مجدداً در ۲۰۷۰ به ۲/۹، ۱/۶ و ۱/۲ درصد افزایش پیدا می‌کند و براساس سناریو RCP8.5 در ۲۰۵۰ به ۱/۶، ۰/۶ و ۰/۳ درصد کاهش و در ۲۰۷۰ به مقادیر ۲/۵، ۰/۹ و ۰/۲ درصد تغییر می‌یابد.

نتیجه‌گیری: این تحقیق آشکار می‌کند که پتانسیل پراکنش بلوط ایرانی براساس هر دو سناریو اقلیمی تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرد. همچنین مدل Maxent توانایی زیادی در پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها نشان داد.

واژه‌های کلیدی: استان فارس، بلوط ایرانی، پراکنش، تغییر اقلیم، مدل مکسنت.

مقدمه

تهدید اقلیم به یکی از جدیدترین کانون‌های تحقیقاتی در زیست‌شناسی حفاظت و اکولوژی جنگل تبدیل شده است. تغییر اقلیم عامل اصلی محیطی مؤثر بر پراکنش جمعیت گونه‌ها، پراکنش جغرافیایی، تنوع زیستی گونه‌ها، ترکیب، غنا، ساختار و عملکرد

با توجه به گرمایش جهانی، اقلیم به عاملی تعیین‌کننده در پراکنش گونه‌ها تبدیل شده است. پیش‌بینی تغییر مکانی و روند مهاجرت مناطق پراکنش مناسب گونه‌های در حال انقراض در معرض

زیست‌اقلیمی اغلب برای مدل‌سازی آشیان اکولوژیک گیاهان استفاده می‌شود (Huang et al., 2017). برای نمونه (Zuza et al., 2021) در تحقیق پیش‌بینی مطلوبیت اقلیم برای کشت *integrifolia* *Macadamia* در مالاوی با استفاده از سناریوهای تغییر اقلیم (RCP4.5 و RCP8.5) مشاهده کردند که متغیرهای اقلیمی که به‌شدت بر مطلوبیت آب‌وهوایی این گونه تأثیر می‌گذارند، بارش خشک‌ترین ماه (۲۹/۱ درصد) و هم‌دمایی (۱۷/۳ درصد) هستند.

استفاده از مدل‌های آماری ریاضی برای پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها و در بررسی الگوهای پراکنش مکانی گونه‌ها در زمینه محیط و تغییرات اقلیمی اهمیت زیادی دارد. مدل‌های پراکنش گونه‌ها ^۳SDM به‌طور معمول برای پیش‌بینی محدوده جغرافیایی یک گونه با توجه به داده‌های وقوع فقط حضور و متغیرهای محیطی که فرض می‌شود بر پراکنش آن تأثیر می‌گذارند استفاده می‌شوند. با ظهور فناوری‌های جدید آمار محاسباتی و توسعه سیستم اطلاعات جهانی (GIS)^۴، همبستگی مستقیم بین عوامل محیطی (مانند اقلیم، توپوگرافی، داده‌های هواشناسی) و گونه‌ها ممکن شد و چنین همبستگی‌ها به‌طور گسترده در بررسی‌های اکولوژیکی استفاده شده است (Shi et al., 2021). تنوع کیفیت داده‌ها، روش‌های مدل‌سازی، مدل‌های گردش عمومی (GCM)^۵، سناریوهای انتشار، آستانه‌ها و پتانسیل پراکنش می‌تواند بر بزرگی، جهت و مقدار تغییر در پیش‌بینی مکان اقلیمی مطلوب مدل‌سازی شود و در امتداد آن بر نتیجه مدیریت هدفمند تأثیر گذارد (Dai et al., 2017).

مدل حداکثر بی‌نظمی (Maxent)^۶ در مدل‌سازی گونه‌های کمیاب با دامنه‌های محدود و داده‌های وقوع حضور کمیاب در دسترس به‌خوبی عمل کرده است، زیرا توزیع احتمال یک گونه را با کمک قوانین بی‌نظمی

اکوسیستم‌هاست (Cao et al., 2022). شاخص‌های آب‌وهوایی (دما، بارش، رطوبت و غیره) تأثیر بسزایی در رشد و نمو گیاهان دارند و بدین ترتیب پراکنندگی جغرافیایی گونه‌های گیاهی را مشخص می‌کنند. سیستم‌های آب‌وهوایی به‌طور طبیعی در طول تاریخ جهان تغییر می‌کنند. در واکنش به این تغییرات، شرایط محیطی شدیدی ایجاد شده که انقراض برخی از گونه‌ها یا تغییرات تکاملی آنها را در پی داشته است. روند تغییرات اقلیمی جهان امروزه شدت گرفته است. پنجمین گزارش ارزیابی هیأت بین‌دولتی^۱ تغییرات آب‌وهوایی (IPCC)^۲ نشان داد که افزایش تدریجی گازهای گلخانه‌ای (مانند CO₂) به گرم شدن کره زمین منجر می‌شود. گرمایش زمین می‌تواند شدیدتر از حد انتظار باشد و در قرن بیست‌ویکم از حداقل ۰/۳ تا ۱/۷ درجه سانتی‌گراد تا حداکثر ۲/۶ تا ۴/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. انتظار می‌رود که گرم شدن آب‌وهوا، فرکانس و شدت رویدادهای شدید آب‌وهوایی (مانند دمای زیاد، امواج گرما، خشکسالی، آتش‌سوزی، توفان و سیل) را تغییر دهد (Coban et al., 2020; Zhao et al., 2021). موقعیت جغرافیایی، تنوع ارتفاعی و شرایط آب‌وهوایی، اکوسیستم‌ها و زیستگاه‌های مختلفی را ایجاد می‌کند که پراکنش پوشش گیاهی را تعیین می‌کند. افزون‌بر این، حاصلخیزی خاک، توپوگرافی و تابش نقش مهمی در پراکنش رویشگاه در مقیاس محلی یا کوچک دارند (Mahatara et al., 2021). محدوده گونه‌های مرتبط با آب‌وهوا ممکن است در پاسخ به تغییر اقلیم تغییر کند، کوچک شود، گسترش یابد یا تکه‌تکه شود. بنابراین ارزیابی‌هایی جامع و فوری از تغییر دامنه بالقوه رویشگاه مطلوب اقلیمی گونه‌های درختی در پاسخ به تغییرات آب‌وهوایی ضرورت دارد. تغییر اقلیم حیاتی‌ترین عامل محیطی است که بر پراکنش گونه‌ها در مناطق مطلوب تأثیر می‌گذارد، به‌طوری که عوامل

3. Species distribution models
4. Global Information System
5. Global Climate Models
6. Maximum Entropy

1. IPCC's Fifth Assessment Report
2. Intergovernmental Panel on Climate Change

احیای نقاط تخریب‌یافته اهمیت زیادی دارد (Mataji et al., 2016). در پژوهش حاضر هدف بررسی پراکنش این گونه در شرایط حاضر و آینده با استفاده از مدل پراکنش گونه‌ای Maxent در استان فارس است. با استفاده از مدل گردش عمومی HadGEM-ES براساس مشاهدات حضور گونه نقشه‌های مطلوبیت رویشگاه براساس دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 و عوامل مؤثر بر پراکنش این گونه در دوره‌های حاضر، ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ به‌دست آمد. نتیجه تحقیق حاضر می‌تواند برای دست‌اندرکاران جنگلداری به‌منظور مدیریت بهتر این گونه از نظر حفاظت و احیا استفاده شود.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

منطقه پژوهش، جنگل‌های بلوط در ناحیه رویشی زاگرس در استان فارس بود. این تحقیق در بخش جنوبی رشته‌کوه زاگرس در استان فارس انجام گرفت. این منطقه با اقلیم نیمه‌خشک دارای متوسط دما و بارش سالانه به‌ترتیب ۱۸ درجه سانتی‌گراد و ۳۰۷ میلی‌متر است. استان فارس با مساحتی بالغ بر ۱۲۵۰۰۰ کیلومترمربع در جنوب ایران بین طول شرقی ۵۰ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۴۰ دقیقه و عرض شمالی ۲۷ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۵ دقیقه و همچنین در ارتفاع متوسط ۱۴۹۱ متری از سطح دریا قرار دارد که بخش اعظم آن را ناحیه رویشی ایران و تورانی شامل می‌شود (Arvin & Shojaeezadeh, 2014; Shiraz municipality, 2018).

شیوه اجرای پژوهش

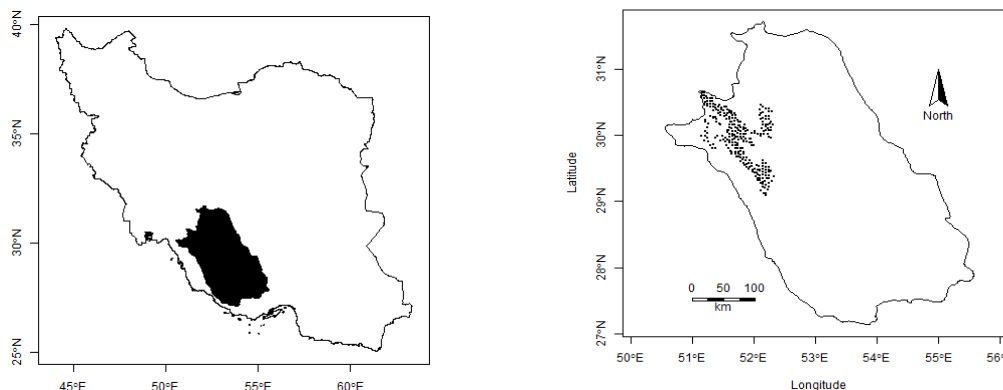
در این پژوهش مناطق حضور گونه بلوط ایرانی در استان فارس براساس منابع اطلاعات غیررسمی و اظهار نظر کارشناسان و افراد متخصص شناسایی شد. سپس به‌صورت تصادفی مختصات جغرافیایی آن با دستگاه (GPS)^۱ برداشت شد. مختصات جغرافیایی در سیستم مختصات WGS84 طراحی شدند. به‌منظور کاهش

حداکثر (بزرگ‌ترین توزیع یکنواخت) محاسبه می‌کند (Pramanik et al., 2018). Maxent یک برنامه یادگیری ماشین مبتنی بر بی‌نظمی حداکثر است که فقط داده‌های حضور و همچنین مجموعه‌ای از متغیرهای محیطی از یک محدوده جغرافیایی مشخص را برای فراهم ساختن یک مدل پراکنش به‌عنوان ورودی دریافت می‌کند (Mahatara et al., 2021). پژوهش (Qin et al., 2017) براساس مدل‌سازی Maxent برای پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر توزیع بالقوه *Thuja sutchuenensis* Franch همچنین بررسی (Cao et al., 2022) با این مدل برای توزیع گونه‌های گیاهی *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg. و *Liriodendron tulipifera* Linn. که در اثر تغییر اقلیم ایجاد شده صحت زیادی را در چین نشان دادند.

ایران مانند دیگر نقاط جهان به‌شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم و پیامدهای آن قرار گرفته است. جنگل‌های زاگرس در سال‌های اخیر دچار زوال شده که با گذر زمان وسعت این پدیده افزایش می‌یابد و اقلیم از عوامل اصلی آغاز آن در جنگل‌های زاگرس است (Attarod et al., 2021; Attarod et al., 2017). بلوط‌ها در مقایسه با دیگر پهن‌برگان با جنگل‌های وسیع در نواحی معتدل شمال آمریکا، اروپا و شرق آسیا با بیش از ۲۰۰ گونه و با زیرگونه‌های متعدد، واریته‌ها و هیبریدهای طبیعی گونه‌های حیاتی در جنگلداری جهان هستند (Coban et al., 2020). گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl.) وسیع‌ترین پراکنش را در بین گونه‌های جنس بلوط در حوزه رویشی زاگرس دارد و از دره سیلوانا در آذربایجان غربی تا ارتفاعات جنوبی روستای دادنجان و چنار سوخته شهرستان فیروزآباد فارس گسترش دارد. بلوط ایرانی نسبت به دیگر گونه‌های جنس بلوط دارای نیاز رطوبتی کمتری است و حضور این گونه در دامنه ارتفاعی حداقل حدود ۴۵۰ متر از سطح دریا تا حداکثر ۲۶۰۰ متر از سطح دریا مشاهده می‌شود (Jazirehi & Rostaghi, 2003). این درخت که دارای ارزش زیادی از نظر اکولوژیکی، حفاظتی و اقتصادی-اجتماعی است در

1. Global Positioning System

فاصله کمتر از ۵ کیلومتر حذف شد (Anderson & Raza, 2010) و در مجموع ۲۳۶ نقطه حضور بلوط ایرانی ثبت و در مدل Maxent استفاده شد (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت نقاط حضور گونه بلوط ایرانی در استان فارس
Figure 1. The location of *Quercus brantii* in Fars province

شده‌اند که در پژوهش‌های مختلف برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌ای استفاده شده‌اند (جدول ۱). وضوح مکانی همه داده‌های محیطی مورد استفاده در مقیاس مکانی ۳۰ ثانیه یا ۱ کیلومتر مربع بود (Guo et al., 2019).

برای دانلود داده‌های زیست‌اقلیمی آینده از مدل محیط زیستی جهانی نسخه ۲ سیستم زمینی (HadGEM2-ES) مدل گردش عمومی (GCM) و دو سناریو واداشت تابشی (RCP) استفاده شد که RCP2.6 (خوش‌بینانه‌ترین) و RCP8.5 (بدبینانه‌ترین) هستند. RCP2.6 خوش‌بینانه در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده غلظت کمتر CO₂ است. RCP8.5 بدبینانه و با سطوح بالای انتشار گازهای گلخانه‌ای منظور شده است (Deb et al., 2017). در تحقیق حاضر از مدل HadGEM2-ES استفاده شد، زیرا این مدل وقتی با داده‌های واقعی ایستگاه‌های سینوپتیک مختلف در ایران مقایسه می‌شود پیش‌بینی دما و بارش مناسبی را نشان می‌دهد (Erfanian et al., 2021). وضوح لایه‌های حال و آینده ۱ کیلومتر مربع بود.

انتخاب داده‌های محیطی

برای پیش‌بینی پراکنش گونه‌ای از نقشه‌های فیزیوگرافی و متغیرهای زیست‌اقلیمی مشتق شده از بارش و دما استفاده شد. نقشه‌های فیزیوگرافی شامل ارتفاع، شیب و جهت هستند که از نقشه DEM^۱ ۳۰ متری به دست آمده از پایگاه Earth Data در نرم‌افزار ARC GIS تهیه شدند (Erfanian et al., 2021).

جهت به‌عنوان مقدار آزیموت (θ) برحسب درجه از شمال ثبت شد و به شاخص تابش خورشیدی (RI)^۲ با استفاده از معادله $TRASP = [1 - \cos((\pi / 180)(\theta - 30))]$ تبدیل شد. این معادله مقدار صفر به جهت‌های شمالی و شمال شرقی (به‌طور معمول سردترین و مرطوب‌ترین دامنه) و مقدار ۱ به دامنه‌های گرم‌تر و خشک‌تر جنوبی و جنوب غربی اختصاص می‌دهد (Aertsen et al., 2010).

همچنین از نوزده متغیر زیست‌اقلیمی در این تحقیق استفاده شد که از پایگاه داده‌ای WorldClim استخراج شده (<https://www.worldclim.org>) که شامل داده‌های سال‌های (۱۹۷۰-۲۰۰۰) و سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ است و از دما و بارش ماهانه گرفته

3. Representative Concentration Pathway

1. Digital Elevation Model
2. Radiation Index

جدول ۱- متغیرهای محیطی استفاده‌شده در پژوهش

Table 1. Environmental variables used in the research

متغیر	توصیف متغیر	متغیر	توصیف متغیر
Variable	Variable Description	Variable	Variable Description
BIO1	دمای متوسط سالانه	BIO13	بارندگی مرطوب‌ترین ماه سال
BIO2	متوسط ماهانه (دمای حداکثر- دمای حداقل)	BIO14	بارندگی خشک‌ترین ماه سال
BIO3	هم‌دمایی (BIO2/BIO7) × 100	BIO15	بارندگی فصلی
BIO4	دمای فصلی (انحراف معیار × 100)	BIO16	بارندگی مرطوب‌ترین فصل سال
BIO5	حداکثر دمای گرم‌ترین ماه سال	BIO17	بارندگی خشک‌ترین فصل سال
BIO6	حداقل دمای سردترین ماه سال	BIO18	بارندگی گرم‌ترین فصل سال
BIO7	دامنه دمای سالانه	BIO19	بارندگی سردترین فصل سال
BIO8	متوسط دمای مرطوب‌ترین فصل سال	DEM	ارتفاع از سطح دریا
BIO9	متوسط دمای خشک‌ترین فصل سال	SLOPE	شیب
BIO10	متوسط دمای گرم‌ترین فصل سال	ASPECT	جهت
BIO11	متوسط دمای سردترین فصل سال	TRASP	شاخص تابش خورشیدی
BIO12	بارندگی سالانه		Radiation Index

شدند. روش جک نایف برای ارزیابی اهمیت هر متغیر در مدل به‌کار گرفته شد (Zhao et al., 2021).

ارزیابی مدل و طبقه‌بندی مناطق مطلوب

در راستای اجرای مدل به‌طور معمول مساحت زیرمنحنی (ROC)^۳ یا (AUC)^۴ برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل به‌کار می‌رود و محدوده آن بین ۰ و ۱ است. هرچه مقدار AUC بیشتر باشد مقدار تمایز رویشگاه‌های مطلوب و نامطلوب بیشتر است که $AUC \geq 0.9$ پیش‌بینی خیلی دقیق مدل را نشان می‌دهد (Ye et al., 2018).

مطلوبیت رویشگاه برای گونه بلوط ایرانی به‌طور معمول با مقادیر ۰ تا ۱ بیان می‌شود که مقادیر بیشتر

عامل‌های اقلیمی تأثیر مهمی بر دقت نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل دارد. برای ارزیابی مهم‌ترین عامل‌های زیست‌اقلیمی که بر پراکنش بالقوه بلوط ایرانی اثرگذارند، ضریب همبستگی پیرسون^۱ و روش جک نایف^۲ به‌کار گرفته شد (Shcheglovitova & Anderson, 2013).

مدل‌سازی

برای این پژوهش، از برنامه مدل‌سازی Maxent نسخه ۳.۴.۴ در نرم‌افزار R نسخه ۳.۳.۱ برای اجرای مدل حداکثر بی‌نظمی گونه بلوط ایرانی استفاده شد (Ab Lah et al., 2021). ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و بقیه داده‌ها برای آزمون مدل انتخاب

3. Receiver Operating Characteristic
4. Area Under the Curve

1. Pearson correlation coefficient
2. Jackknife method

فصلی، بارندگی مرطوب‌ترین فصل سال و متوسط دمای خشک‌ترین فصل سال به ترتیب بیشترین استفاده را در مدل‌سازی پراکنش گونه بلوط ایرانی دارند و از متغیرهای دمای فصلی، شاخص تابش خورشیدی، جهت و هم‌دمایی کمترین استفاده شده است (شکل ۲).

همچنین آزمون جک نایف نشان داد که به ترتیب متغیرهای BIO13 (بارندگی مرطوب‌ترین ماه سال)، BIO12 (بارندگی سالانه)، شیب، BIO15 (بارندگی فصلی) و BIO5 (حداکثر دمای گرم‌ترین ماه سال) دارای بیشترین اهمیت و متغیرهای جهت و تابش خورشیدی دارای کمترین اهمیت در مدل بودند، وقتی که به‌تنهایی در مدل استفاده شدند (شکل ۳).

مناطق بالقوه مطلوب حاضر و آینده

مطلوبیت یک رویشگاه برای گونه‌ها به‌طور معمول با مقادیر ۰ تا ۱ بیان می‌شود که هر چه مقادیر بیشتر باشد گونه‌ها سازگاری بیشتری با رویشگاه دارند. مدل براساس آستانه MSTSPS (۰/۲۵۷) به پنج واحد مکانی به شرح زیر در نقشه‌ها تقسیم شد (نامطلوب تا مطلوبیت بسیار زیاد): ۰ تا ۰/۲۵۷ نامطلوب، ۰/۲۵۸ تا ۰/۴۴۳ مطلوبیت کم، ۰/۴۴۴ تا ۰/۶۲۹ مطلوبیت متوسط، ۰/۶۳۰ تا ۰/۸۱۵ مطلوبیت زیاد، ۰/۸۱۶ تا ۱ مطلوبیت بسیار زیاد. وسعت پراکنش حاضر و آینده این گونه براساس طبقات مطلوبیت در این نقشه‌ها در جدول ۳ و شکل ۴ نشان داده شده است. نقشه مطلوبیت حال حاضر رویشگاه بلوط ایرانی با استفاده از مدل بی‌نظمی حداکثر همچنین پراکنش آینده گونه بلوط ایرانی تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ در شکل ۵ نشان داده شده است.

مساحت کل مناطق بالقوه مطلوب برای بلوط ایرانی، ۹۷۹۴/۵ کیلومتر مربع (۷/۸ درصد) و بیشتر مناطق شمال غربی استان را تشکیل می‌دهد که تحت سناریوی RCP2.6 در ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد و به ۶/۶ درصد می‌رسد و در ۲۰۷۰ مجدداً نسبت به حال

نشان‌دهنده سازگاری بیشتر گونه در رویشگاه است. مطابق آستانه حداکثر حساسیت و اختصاصی بودن آزمون (MTSPS) ۱ بر دیگر گزینه‌های سنجش آستانه برای طبقه‌بندی رویشگاه‌های مطلوب ارجح است. محدوده مطلوبیت بین MTSPS و یک به چهار بخش مساوی تقسیم شده که به ترتیب با رویشگاه‌های با مطلوبیت کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد مطابق است (Zhao et al., 2021).

نتایج

تحلیل صحت مدل و طبقه‌بندی نواحی مطلوب

به‌طور معمول براساس اجرای مدل مساحت زیرمنحنی (AUC) برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل به کار می‌رود و محدوده AUC بین صفر تا ۱ است. از نظر مقادیر AUC، نتایج دقیق برای داده‌های آموزشی با مقدار ۰/۹۶۹ و نتایج قابل قبولی نیز برای داده‌های آزمون با مقدار ۰/۸۶۷ به دست آمد. مقادیر بیشتر AUC قابلیت تشخیص بین رویشگاه‌های مطلوب و نامطلوب را نشان می‌دهد که مقدار $AUC = 0.969$ در مدل قدرت پیش‌بینی بسیار دقیق را نشان می‌دهد.

ضریب همبستگی پیرسون بین ۲۲ متغیر محیطی محاسبه شد و $|R| \geq 0.95$ به‌عنوان آستانه قضاوت همبستگی معنی‌دار بین عوامل اقلیمی و محیطی استفاده شد. همه متغیرهای محیطی موجود با استفاده از همبستگی پیرسون تحت آزمون چندخطی قرار گرفتند و براساس آستانه مورد نظر متغیرهایی که برای منطقه پژوهش بسیار همبسته بودند حذف شدند، زیرا هم‌خطی بین دو متغیر تخمین دقیق شاخص‌ها را دشوار می‌کند. برای این پژوهش در نهایت ۱۵ متغیر محیطی زیستی انتخاب شد و در مدل Maxent برای مدل‌سازی پراکنش جغرافیایی حال حاضر گونه بلوط ایرانی استفاده شد (جدول ۲).

سهم نسبی متغیرهای محیطی نشان داد که مدل Maxent از متغیرهای شیب، بارش سالانه و بارش

(مطلوبیت زیاد و بسیار زیاد) برای هر دو سناریو در دهه ۲۰۵۰ به یک اندازه کاهش می‌یابد؛ ولی در سناریو RCP2.6 در دهه ۲۰۷۰ وسعت مناطق با مطلوبیت زیاد مجدداً افزایش پیدا می‌کند و به‌عبارت دیگر با کاهش کمتری نسبت به دهه ۲۰۵۰ مواجه است. همچنین طبق سناریو RCP8.5 در دهه ۲۰۷۰ اندکی وسعت این مناطق نسبت به دهه ۲۰۵۰ بیشتر است.

نتایج این بررسی نشان می‌دهد که براساس سناریو RCP2.6 بیشترین مناطق دارای مطلوبیت پایدار در آینده در طبقه دارای مطلوبیت کم است که این نوع جابه‌جایی در سال ۲۰۵۰ برابر با ۱۴ درصد معادل ۵۰۹ کیلومتر مربع و در سال ۲۰۷۰ تا ۲۹/۷ درصد معادل ۱۰۸۴ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد. همچنین کمترین مناطق دارای مطلوبیت پایدار در آینده در طبقه دارای مطلوبیت زیاد است که این نوع جابه‌جایی در سال ۲۰۵۰ برابر با ۳/۸ درصد معادل ۷۰/۱ کیلومتر مربع خواهد بود و در سال ۲۰۷۰ به ۵ درصد معادل ۹۲/۹ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد.

بیشترین مقدار جابه‌جایی مثبت از منطقه نامطلوب به منطقه با مطلوبیت کم است که این نوع جابه‌جایی در سال ۲۰۵۰ برابر با ۴۲۶۰ کیلومتر مربع و در سال ۲۰۷۰ به ۶۵۹۰ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد. کمترین مقدار جابه‌جایی مثبت از منطقه متوسط به منطقه با مطلوبیت بسیار زیاد است که این نوع جابه‌جایی در سال ۲۰۵۰ برابر ۱۳ کیلومتر مربع خواهد بود و در سال ۲۰۷۰ به ۶۷/۳ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد.

بیشترین مقدار جابه‌جایی منفی از منطقه با مطلوبیت کم به منطقه نامطلوب است که این نوع جابه‌جایی در سال ۲۰۵۰ برابر با ۲۸۹۸ کیلومتر مربع و در سال ۲۰۷۰ به ۱۸۴۷/۴ کیلومتر مربع کاهش می‌یابد. کمترین مقدار جابه‌جایی منفی در سال ۲۰۵۰ از منطقه با مطلوبیت زیاد به منطقه با مطلوبیت متوسط است که این نوع جابه‌جایی برابر با ۹۰ کیلومتر مربع است و وسعت این مناطق در سال ۲۰۷۰ به ۱۹۵/۳ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد.

حاضر گسترش می‌یابد و ۱۳/۳ درصد منطقه یعنی ۱۶۶۲۲/۸ کیلومتر مربع را به خود اختصاص می‌دهد. این در حالی است که مناطق با مطلوبیت کم از زمان حال تا دو مقطع زمانی ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ در آینده روند افزایشی دارد. همچنین مناطقی با مطلوبیت بسیار زیاد، زیاد و متوسط در ۲۰۵۰ کاهش و مجدداً در سال ۲۰۷۰ افزایش پیدا می‌کنند (جدول ۳، شکل ۴). مناطق بالقوه مطلوب از شمال غرب استان در ۲۰۵۰ اندکی به سمت شرق و در ۲۰۷۰ اندکی به سمت غرب گسترش می‌یابد. همچنین مناطق با مطلوبیت بسیار زیاد و زیاد در شمال غرب استان در این دو مقطع زمانی به همین جهات گسترش می‌یابد (شکل ۵).

کل منطقه مطلوب بلوط ایرانی از ۹۷۹۴/۵ کیلومتر مربع در حال حاضر تحت سناریو RCP8.5 به ۱۰۳۳۴/۸ کیلومتر مربع (۸/۱ درصد) در ۲۰۵۰ و به ۱۲۷۴۸/۴ کیلومتر مربع (۱۰/۲ درصد) در سال ۲۰۷۰ افزایش می‌یابد. مناطق با مطلوبیت زیاد و بسیار زیاد نسبت به حال حاضر کاهش می‌یابد و در سال ۲۰۷۰ بیشتر در مناطق شرقی استان واقع می‌شود. مناطق با مطلوبیت متوسط و کم افزایش می‌یابد که البته مقدار افزایش در مناطق با مطلوبیت کم بسیار بیشتر است و از ۳۶۴۴/۹ کیلومتر مربع در حال حاضر به ۸۲۰۹/۱ کیلومتر مربع در سال ۲۰۷۰ می‌رسد (جدول ۳، شکل ۴) که گستره پراکنش آن از شمال غربی استان به شرق و جنوب شرقی امتداد می‌یابد. همچنین در شمال غربی مناطق نامطلوب و با مطلوبیت کم جایگزین می‌شود (شکل ۵).

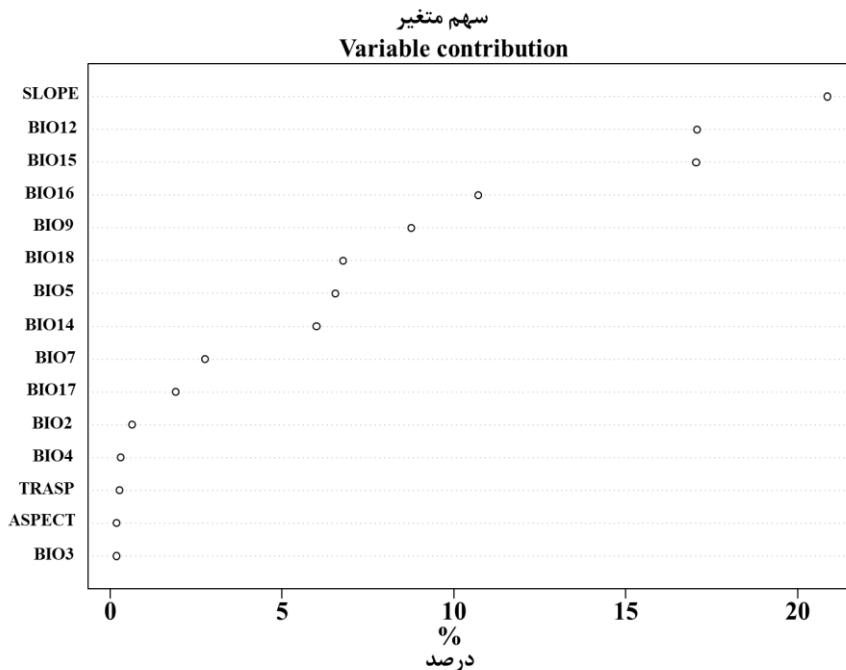
مناطق با مطلوبیت متوسط، زیاد و بسیار زیاد به ترتیب از ۱/۸، ۱/۵ و ۱/۷ درصد در حال حاضر طبق سناریو RCP2.6 در ۲۰۵۰ به ۱/۱، ۰/۶ و ۰/۳ درصد کاهش و مجدداً در ۲۰۷۰ به ۲/۹، ۱/۶ و ۱/۲ درصد افزایش پیدا می‌کند و براساس سناریو RCP8.5 در ۲۰۵۰ به ۱/۶، ۰/۶ و ۰/۳ درصد کاهش و در ۲۰۷۰ به ۲/۵، ۰/۹ و ۰/۲ درصد تغییر می‌یابد. تحقیق حاضر نشان داد که مجموع مناطق با مطلوبیت زیاد

همچنین کمترین مقدار جابه‌جایی منفی در سال
 مطلوبیت زیاد است که این نوع جابه‌جایی برابر با
 ۲۰۷۰ از منطقه با مطلوبیت بسیار زیاد به منطقه با
 ۱۲۶/۲ کیلومتر مربع است (جدول ۴).

جدول ۲- متغیرهای محیطی منتخب به‌کاررفته در ایجاد مدل

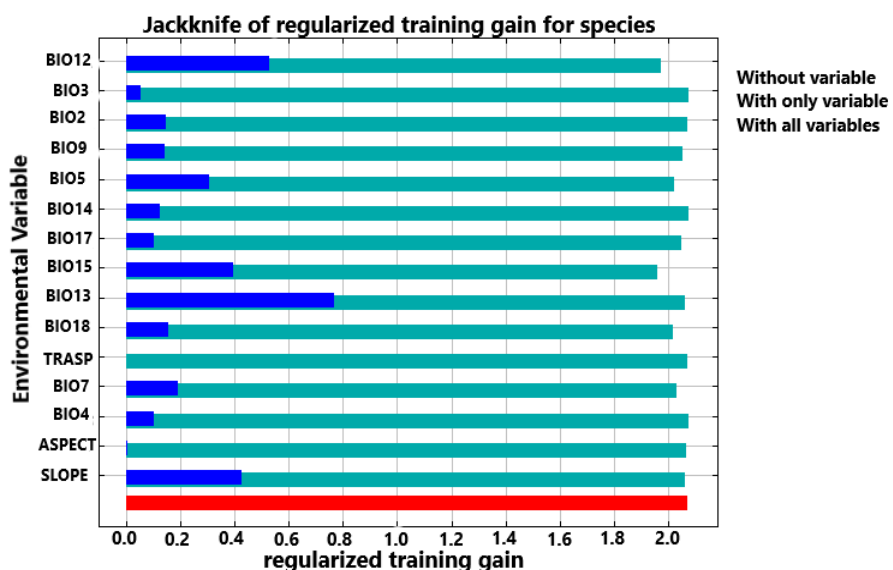
Table 2. Selected environmental variables used in creating the model

متغیر	توصیف متغیر	واحد	درصد سهم متغیر
Variable	Variable Description	Unit	Percent Contribution (%)
SLOPE	Slope	%	20.9
BIO12	Annual Precipitation	mm	17.1
BIO15	Precipitation Seasonality	mm	17
BIO16	Precipitation of Wettest Quarter	mm	10.7
BIO9	Mean Temperature of Driest Quarter	°C	8.8
BIO18	Precipitation of Warmest Quarter	mm	6.8
BIO5	Max Temperature of Warmest Month	°C	6.5
BIO14	Precipitation of Driest Month	mm	6
BIO7	Temperature Annual Range	°C	2.8
BIO17	Precipitation of Driest Quarter	mm	1.9
BIO2	Mean Diurnal Range	°C	0.6
BIO4	Temperature Seasonality	°C	0.3
TRASP	Radiation Index	-	0.3
ASPECT	Aspect	-	0.2
BIO3	Isothermality (BIO2/BIO7) (* 100)	%	0.2



شکل ۲- سهم نسبی متغیرهای محیطی در مدل

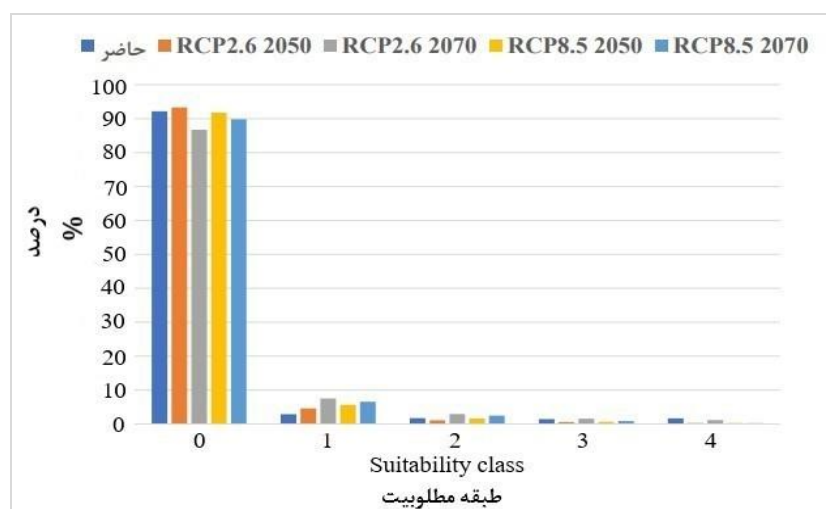
Figure 2. Relative contributions of the environmental variables in the model



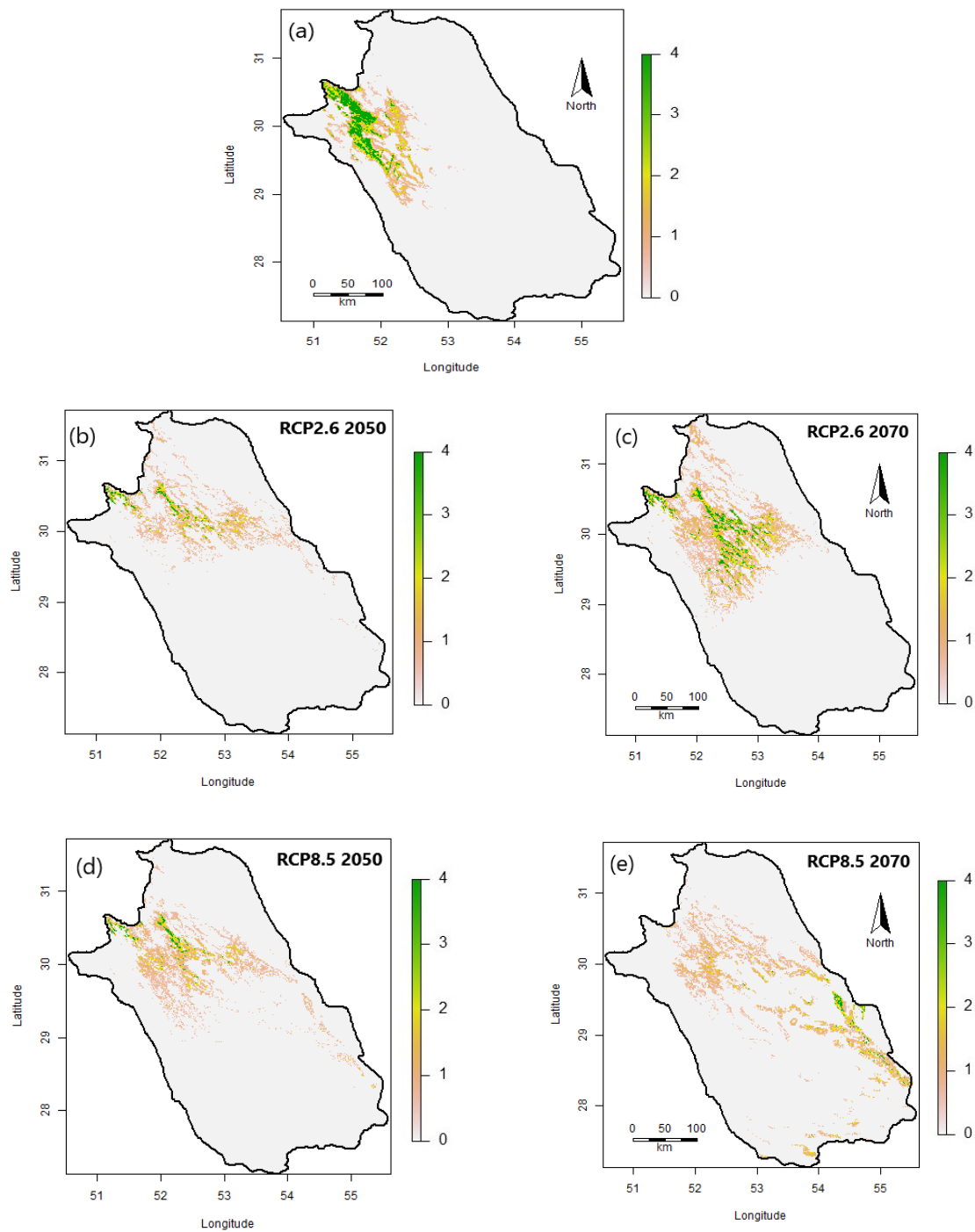
شکل ۳- نتایج آزمون جک نایف متغیرهای موجود در مدل
Figure 3. Jackknife test results of the variables in the model

جدول ۳- نتایج تجزیه و تحلیل مکانی پراکنش جغرافیایی بالقوه فعلی و آینده بلوط ایرانی در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰
Table 3. The results of spatial analysis of the current and future potential geographical distribution of *Quercus brantii* in 2050 and 2070

مطلوبیت Suitability Class	حاضر Current		RCP2.6 2050		RCP2.6 2070		RCP8.5 2050		RCP8.5 2070	
	(Km ²)	%	(Km ²)	%	(Km ²)	%	(Km ²)	%	(Km ²)	%
0	115489.6	92.2	116870.5	93.3	108661.4	86.7	114949.3	91.8	112535.7	89.8
1	3644.9	2.9	5806.7	4.6	9477.4	7.6	7069.7	5.6	8209.1	6.6
2	2216.1	1.8	1432.6	1.1	3681.5	2.9	2057.6	1.6	3140.8	2.5
3	1844.6	1.5	766.9	0.6	1958.9	1.6	798	0.6	1087.1	0.9
4	2088.9	1.7	407.4	0.3	1505	1.2	409.7	0.3	311.4	0.2
	125284.1	100	125284.1	100	125284.1	100	125284.1	100	125284.1	100



شکل ۴- پراکنش جغرافیایی بالقوه حاضر و آینده بلوط ایرانی
Figure 4. Current and future potential geographical distribution of *Quercus brantii*



شکل ۵- مطلوبیت بالقوه حال حاضر (a) و آینده بلوط ایرانی در سال‌های ۲۰۵۰ (سمت چپ) و ۲۰۷۰ (سمت راست) براساس سناریوهای اقلیمی RCP2.6 (b,c) و RCP8.5 (d,e). محدوده طبقات مطلوبیت: ۰ یعنی نامطلوب، ۱ یعنی مطلوبیت کم، ۲ یعنی مطلوبیت متوسط، ۳ یعنی مطلوبیت زیاد و ۴ یعنی مطلوبیت بسیار زیاد

Figure 5. Current (a) and future potential suitability of *Quercus brantii* in 2050 (left) and 2070 (right) based on RCP2.6 (b,c) and RCP8.5 (d,e) climate scenarios. The range of suitability classes: 0 means Not suitable, 1 means low suitability, 2 means moderate suitability, 3 means high suitability, and 4 means very high suitability

جدول ۴- جابجایی پراکنش جغرافیایی حاضر بلوط ایرانی به پراکنش پیش‌بینی شده در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ براساس سناریوی اقلیمی RCP2.6 و RCP8.5

Table 5. Shifting the current geographical distribution of *Quercus brantii* to the predicted distribution in 2050 and 2070 based on the RCP2.6 and RCP8.5 climate scenarios

RCP2.6 2050											
طبقه مطلوبیت در ۲۰۵۰ (کیلومتر مربع) Suitability class in 2050 (Km ²)						طبقه مطلوبیت در ۲۰۵۰ (درصد) Suitability class in 2050 (%)					
حاضر Curr.	0	1	2	3	4	حاضر Curr.	0	1	2	3	4
0	109580.3	4260	988.7	467.1	193.5	0	94.9	3.7	0.9	0.4	0.2
1	2898	509	122	79.1	37	1	79.5	14	3.3	2.2	1
2	1705.8	355.1	83.5	39.9	31.7	2	77	16	3.8	1.8	1.4
3	1363.7	277.3	90	70.1	43.5	3	73.9	15	4.9	3.8	2.4
4	1322.8	405.3	148.4	110.7	101.8	4	63.3	19.4	7.1	5.3	4.9
RCP2.6 2070											
طبقه مطلوبیت در ۲۰۷۰ (کیلومتر مربع) Suitability class in 2070 (Km ²)						طبقه مطلوبیت در ۲۰۷۰ (درصد) Suitability class in 2070 (%)					
حاضر Curr.	0	1	2	3	4	حاضر Curr.	0	1	2	3	4
0	103815.3	6590	2567.2	1456.1	1060.3	0	89.9	5.7	2.2	1.3	0.9
1	1847.4	1084	389.1	177.8	146.5	1	50.7	29.7	10.7	4.9	4
2	1061.9	720.3	260.7	105.9	67.3	2	47.9	32.5	11.8	4.8	3
3	907.1	568.9	195.3	92.9	80.4	3	49.2	30.8	10.6	5	4.4
4	1029.6	513.5	269.1	126.2	150.5	4	49.3	24.6	12.9	6	7.2

مربع است و در سال ۲۰۷۰ به ۶۲۶۰/۶ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد. کمترین مقدار جابه‌جایی مثبت از منطقه متوسط به منطقه با مطلوبیت بسیار زیاد است که این نوع جابه‌جایی در ۲۰۵۰ برابر با ۳۹/۲ کیلومتر مربع است و در ۲۰۷۰ به نزدیک صفر درصد معادل ۰/۷ کیلومتر مربع کاهش می‌یابد.

بیشترین مقدار جابه‌جایی منفی از منطقه با مطلوبیت کم به منطقه نامطلوب است که در سال ۲۰۵۰ برابر با ۲۲۷۷/۵ کیلومتر مربع است و در سال ۲۰۷۰ به ۲۵۷۵/۱ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد. کمترین مقدار جابه‌جایی منفی در سال ۲۰۵۰ از منطقه با مطلوبیت بسیار زیاد به منطقه با مطلوبیت زیاد است که برابر با ۱۲۴/۱ کیلومتر مربع است و در سال ۲۰۷۰ به ۱۱/۸ کیلومتر مربع کاهش می‌یابد (جدول ۵).

همچنین براساس سناریو RCP8.5 بیشترین مناطق دارای مطلوبیت پایدار در آینده در طبقه دارای مطلوبیت کم است که در سال ۲۰۵۰ برابر با ۲۵/۳ درصد معادل ۹۲۱/۳ کیلومتر مربع است و وسعت این مناطق در سال ۲۰۷۰ به ۲۲/۵ درصد معادل ۸۲۰/۱ کیلومتر مربع کاهش می‌یابد. همچنین کمترین مناطق دارای مطلوبیت پایدار در آینده در طبقه دارای مطلوبیت زیاد است که در سال ۲۰۵۰ برابر با ۳/۸ درصد معادل ۷۰/۹ کیلومتر مربع است و وسعت این مناطق در سال ۲۰۷۰ به ۱/۲ درصد معادل ۲۱/۵ کیلومتر مربع کاهش می‌یابد.

بیشترین مقدار جابه‌جایی مثبت از منطقه نامطلوب به منطقه با مطلوبیت کم است که این نوع جابه‌جایی در سال ۲۰۵۰ برابر با ۴۶۵۳/۵ کیلومتر

جدول ۵- جابه‌جایی پراکنش جغرافیایی حاضر بلوط ایرانی به پراکنش پیش‌بینی‌شده در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ براساس سناریوی اقلیمی RCP8.5

Table 6. Shifting the current geographical distribution of *Quercus brantii* to the predicted distribution in 2050 and 2070 based on the RCP8.5 climate scenario

RCP8.5 2050											
طبقه مطلوبیت در ۲۰۵۰ (کیلومتر مربع)						طبقه مطلوبیت در ۲۰۵۰ (درصد)					
حاضر	Suitability class in 2050 (Km ²)					حاضر	Suitability class in 2050 (%)				
Curr.	0	1	2	3	4	Curr.	0	1	2	3	4
0	109104.1	4653.5	1134.4	437.4	160.2	0	94.5	4	1	0.4	0.1
1	2277.5	921.3	283.5	107.2	55.4	1	62.5	25.3	7.8	2.9	1.5
2	1305.1	603.3	210.1	58.4	39.2	2	58.9	27.2	9.5	2.6	1.8
3	1071.8	459.5	190	70.9	52.4	3	58.1	24.9	10.3	3.8	2.8
4	1190.9	431.8	239.6	124.1	102.5	4	57	20.7	11.5	5.9	4.9
RCP8.5 2070											
طبقه مطلوبیت در ۲۰۷۰ (کیلومتر مربع)						طبقه مطلوبیت در ۲۰۷۰ (درصد)					
حاضر	Suitability class in 2070 (Km ²)					حاضر	Suitability class in 2070 (%)				
Curr.	0	1	2	3	4	Curr.	0	1	2	3	4
0	105479.4	6260.6	2451.8	990.8	307	0	91.3	5.4	2.1	0.9	0.3
1	2575.1	820.1	213.5	34.8	1.5	1	70.6	22.5	5.9	1	0
2	1416.7	551.2	219.3	28.1	0.7	2	63.9	24.9	9.9	1.3	0
3	1286.7	356.4	178.5	21.5	1.5	3	69.8	19.3	9.7	1.2	0.1
4	1777.9	220.7	77.8	11.8	0.7	4	85.1	10.6	3.7	0.6	0

بحث

نشان می‌دهد که شاخص‌های مبتنی بر بارش در پیش‌بینی تناسب محیط برای بلوط ایرانی نسبت به عوامل مبتنی بر دما مؤثرترند (Mahatara et al., 2021; Zuzi et al., 2021). همچنین در این بررسی مشاهده شد که متغیر جهت دارای کمترین تأثیر در حضور این گونه است که Jazirehi & Ebrahimi (2003) Rostaghi موافق با این نتیجه اظهار داشته‌اند بلوط ایرانی در رویشگاه خود در تمامی جهات جغرافیایی حضور دارد و منحصر به جبهه‌ای خاص نمی‌شود. ارزیابی مدل با استفاده از روش تحلیل سطح زیرمنحنی نشان داد که مدل‌سازی Maxent توانایی زیادی در پیش‌بینی پراکنش گونه بلوط ایرانی در ناحیه رویشی زاگرس در سطح استان فارس دارد. نتایج بسیاری از تحقیقات مشابه مانند Zhao et al. (2021) و Qin et al. (2017) و Pramanik et al. (2018) نیز تأیید می‌کند که این مدل توانایی بسیار خوبی در پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها دارد.

بدیهی است که پراکنش جمعیت‌های بلوط ایرانی تغییر خواهد کرد؛ ولی طبیعت تغییر به سناریوهای

دانشمندان در اثر تغییر اقلیم الگوریتم‌هایی برای فراهم‌سازی داده‌های کاربردی برای درک بهتر پراکنش حاضر گیاهان و کمک به پیش‌بینی پراکنش آینده آنان براساس متغیرهای محیطی ارائه داده‌اند (Çoban et al., 2020). براساس یافته‌های این تحقیق از بین عوامل محیط زیستی شیب، بارش سالانه و بارش فصلی، بارندگی مرطوب‌ترین فصل سال و متوسط دمای خشک‌ترین فصل سال به ترتیب بیشترین سهم را در پراکنش گونه بلوط ایرانی دارند. احتمال می‌رود که شیب به دلیل ایجاد محدودیت چرای دام در پراکنش این گونه سهم زیادی دارد. بسیاری از تحقیقات بیان می‌کنند که تغییر اقلیم تغییراتی را در پراکنش جغرافیایی گونه‌های گیاهی ایجاد می‌کند که اغلب آنها با افزایش دما و کاهش بارش در فصل رویش در آینده ارتباط دارد (Shi et al., 2021). به نظر می‌رسد که براساس نتایج آزمون جک‌نایف، بلوط ایرانی محیط‌های گرم‌تر و مرطوب‌تر را ترجیح می‌دهد (Qin et al., 2017). تحقیق حاضر

۲۰۷۰ می‌رسد و گستره پراکنش آن از شمال غربی استان به شرق و جنوب شرقی امتداد می‌یابد. همچنین در شمال غربی مناطق نامطلوب و با مطلوبیت کم جایگزین می‌شود. نتایج اثبات کرد که در حال حاضر مناطق با پتانسیل مطلوبیت برای این گونه در شمال غربی استان قرار دارد، در حالی که براساس سناریوهای اقلیمی سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ گسترش مرکز پراکنش مناطق بالقوه مطلوب بلوط ایرانی به سمت شرق و جنوب شرقی استان امتداد می‌یابد. نتایج بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد که تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دهه‌های آینده، منطقه با مطلوبیت زیاد برای گونه‌ها با گذر زمان کاهش می‌یابد (Coban et al., 2020; Shi et al., 2021) و این مناطق به تدریج با افزایش غلظت RCP کاهش می‌یابند (Coban et al., 2020; Pramanik et al., 2018). تحقیق حاضر نشان داد که مجموع این مناطق (مطلوبیت زیاد و بسیار زیاد) برای هر دو سناریو در دهه ۲۰۵۰ به یک اندازه کاهش می‌یابند، ولی در دهه ۲۰۷۰ وسعت مناطق با مطلوبیت زیاد با کاهش کمتری نسبت به دهه ۲۰۵۰ مواجه است (Cao et al., 2022).

از سوی دیگر نتایج این بررسی نشان می‌دهد که براساس هر دو سناریو بیشترین مناطق دارای مطلوبیت پایدار در آینده در طبقه دارای مطلوبیت کم است که در سناریو RCP2.6 در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ روند افزایشی دارد، ولی براساس سناریو RCP8.5 روند کاهش می‌یابد. همچنین کمترین مناطق دارای مطلوبیت پایدار در آینده در طبقه دارای مطلوبیت زیاد است که در سناریو RCP2.6 در دو مقطع آینده روند افزایشی دارد، ولی براساس سناریو RCP8.5 روند کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار جابه‌جایی مثبت براساس هر دو سناریو از منطقه نامطلوب به منطقه با مطلوبیت کم است و در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ روند افزایشی دارد. کمترین مقدار جابه‌جایی مثبت از منطقه متوسط به منطقه با مطلوبیت بسیار زیاد است

تغییر اقلیم بستگی دارد. بررسی‌های مشابه براساس این موضوع انجام گرفته‌اند که اظهار می‌کنند تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین عواملی است که سبب از بین رفتن و تکه‌تکه شدن رویشگاه و همچنین تنوع زیستی می‌شود (Coban et al., 2020). همچنین محققان بسیاری در تحقیقات خود اثر تغییر اقلیم در جابجایی مراکز مطلوب گونه‌ها را تأیید کرده‌اند (Huang et al., 2017; Dai et al., 2017; Shi et al., 2021). مساحت کل مناطق بالقوه مطلوب برای بلوط ایرانی ۹۷۹۴/۵ کیلومتر مربع (۷/۸ درصد) است و بیشتر مناطق شمال غربی استان را تشکیل می‌دهد که تحت سناریوی RCP2.6 در ۲۰۵۰ کاهش می‌یابد و به ۶/۶ درصد می‌رسد و در ۲۰۷۰ مجدداً نسبت به حال حاضر گسترش می‌یابد و ۱۳/۳ درصد منطقه یعنی ۱۶۶۲۲/۸ کیلومتر مربع را به خود اختصاص می‌دهد. این در حالی است که مناطق با مطلوبیت کم از زمان حال تا دو مقطع زمانی ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ در آینده روند افزایشی دارد. همچنین مناطقی با مطلوبیت بسیار زیاد، زیاد و متوسط در ۲۰۵۰ کاهش و دوباره در سال ۲۰۷۰ افزایش پیدا می‌کنند. مناطق بالقوه مطلوب از شمال غرب استان در ۲۰۵۰ اندکی به سمت شرق و در ۲۰۷۰ اندکی به سمت غرب گسترش می‌یابد. همچنین مناطق با مطلوبیت بسیار زیاد و زیاد در شمال غرب استان در این دو مقطع زمانی به همین جهات گسترش می‌یابد. کل منطقه مطلوب در حال حاضر از ۹۷۹۴/۵ کیلومتر مربع تحت سناریو RCP8.5 به ۱۰۳۳۴/۸ کیلومتر مربع (۸/۱ درصد) در ۲۰۵۰ و به ۱۲۷۴۸/۴ کیلومتر مربع (۱۰/۲ درصد) در سال ۲۰۷۰ افزایش می‌یابد. مناطق با مطلوبیت زیاد و بسیار زیاد نسبت به حال حاضر کاهش می‌یابد و در ۲۰۷۰ بیشتر در مناطق شرقی استان واقع می‌شود. مناطق متوسط و با مطلوبیت کم افزایش می‌یابد که البته مقدار افزایش در مناطق با مطلوبیت کم بسیار بیشتر است و از ۳۶۴۴/۹ کیلومتر مربع در حال حاضر به ۸۲۰۹/۱ کیلومتر مربع در سال

مناطق مطلوب گونه‌ها در آینده تحت سناریوهای اقلیمی به نتایج مشابهی دست یافته‌اند.

براساس یافته‌های حاضر پیشنهاد می‌شود که ادارات منابع طبیعی که جنگل‌های کشور را مدیریت می‌کنند، برای آینده اقدامات احتیاطی مانند شناسایی مناطق بالقوه مطلوب برای احیا، توسعه و همچنین حفاظت جنگل انجام دهند. افزون بر این، باید تأکید کرد که جدا از اقدامات حفاظتی انجام‌گرفته، برنامه‌های کاربردی اراضی تهیه و از تحقیقات ژنتیکی حمایت شود تا منابع بذر برای تداوم گونه حفظ شود و انتقال گونه‌ها به مناطق پراکنش احتمالی آینده انجام گیرد و همچنین شرایطی برای جلوگیری از چرای زیاد دام و مصارف انسانی فراهم شود.

توده‌هایی با پایه‌هایی از گونه بلوط ایرانی را که مقاوم به خشکی هستند می‌توان از طریق تحقیقات ژنتیکی شناسایی کرد تا از تداوم گونه و مقاومت آن در برابر تغییرات اقلیمی در آینده اطمینان حاصل شود. بنابراین باید در آینده تلاش‌هایی برای حفاظت پایه‌هایی که کمتر تحت تأثیرات منفی تغییر اقلیم قرار می‌گیرند و می‌توانند به زنده ماندن و تولید مثل ادامه دهند انجام گیرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از متخصصان و دست‌اندرکاران محترم که در به ثمر رسیدن و نشر این پژوهش یاری رساندند اعلام می‌دارند.

که در سناریو RCP2.6 در دو مقطع آینده روند افزایشی دارد، ولی براساس سناریو RCP8.5 روند کاهشی است.

بیشترین مقدار جابه‌جایی منفی براساس هر دو سناریو از منطقه با مطلوبیت کم به منطقه نامطلوب است که در سناریو RCP2.6 در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ روند کاهشی دارد، ولی براساس سناریو RCP8.5 روند افزایشی است. کمترین مقدار جابه‌جایی منفی براساس سناریو RCP2.6 در سال ۲۰۵۰ از منطقه با مطلوبیت زیاد به منطقه با مطلوبیت متوسط است که در سال ۲۰۷۰ افزایش می‌یابد. کمترین مقدار جابه‌جایی منفی براساس این سناریو در سال ۲۰۷۰ از منطقه با مطلوبیت بسیار زیاد به منطقه با مطلوبیت زیاد است. براساس سناریو RCP8.5 کمترین مقدار جابه‌جایی منفی در سال ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ از منطقه با مطلوبیت بسیار زیاد به منطقه با مطلوبیت زیاد است.

این پژوهش آشکار می‌کند که پتانسیل پراکنش بلوط ایرانی براساس هر دو سناریو و مطابق مدل‌سازی براساس الگوریتم حداکثر بی‌نظمی تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرد و براساس سناریو RCP2.6 اثر آن تا سال ۲۰۵۰ منفی است و کم‌وسعت‌تر می‌شود، ولی تا سال ۲۰۷۰ نسبت به حال حاضر دارای وسعت بیشتری می‌شود و براساس سناریو RCP8.5 تا ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ نسبت به حال حاضر دارای وسعت بیشتری می‌شود که البته این مقدار گسترش نسبت به سناریو RCP2.6 کمتر خواهد بود. (Qin et al. (2017) و Cao et al. (2022) در خصوص تغییر در وسعت

References

- Ab Lah, N.Z., Yusop, Z., Hashim, M., Mohd Salim, J., & Numata, S. (2021). Predicting the Habitat Suitability of *Melaleuca cajuputi* Based on the MaxEnt Species Distribution Model. *Forests*, 12(11), 1449. <https://doi.org/10.3390/f12111449>.
- Aertsens, W., Kint, V., Van Orshoven, J., Ozkan, K., & Muys, B. (2010). Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling*, 221, 1119–1130. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.01.007>.
- Anderson, R.P., & Raza, A. (2010). The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography*, 37(7), 1378–1393. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02290.x>.

- Arvin, A.A., & Shojaeezadeh, K. (2014). Assessment of climate tourism in Shiraz city using physiologic equivalence temperature and predicted mean vote indexes. *Physical Geography Quarterly*, 7(26), 87–98. (In Persian).
- Attarod, P., Kheirkhah, F., Khalighi Sigaroodi, S., Sadeghi, S.M.M., Dolatshahi, A., & Bayramzadeh, V. (2017). Trend analysis of meteorological parameters and reference evapotranspiration in the Caspian region. *Iranian Journal of Forest*, 9(2), 171–185. (In Persian).
- Attarod, P., Beiranvand, S., Asgari, M., Fanaei, N., & Hashemzadeh, M. (2021). The effects of rainfall fluctuations on declining Zagros Forests in Ilam and Lorestan provinces. *Iranian Journal of Forest*, 13(2), 141–154. <https://doi.org/10.22034/IJF.2021.136938>. (In Persian).
- Cao, Y., Feng, J., Hwarari, D., Ahmad, B., Wu, H., Chen, J., & Yang, L. (2022). Alterations in Population Distribution of *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg. and *Liriodendron tulipifera* Linn. Caused by Climate Change. *Forests*, 13(3), 488. <https://doi.org/10.3390/f13030488>.
- Çoban, H.O., Örucü, O.K., & Arslan, E.S. (2020). MaxEnt Modeling for Predicting the Current and Future Potential Geographical Distribution of *Quercus libani* Olivier. *Sustainability*, 12(7), 1-11. <https://doi.org/10.3390/su12072671>.
- Dai, G., Yang, J., Huang, C., Sun, C., Jia, L., & Ma, L. (2017). The Effects of Climate Change on the Development of Tree Plantations for Biodiesel Production in China. *Forests*, 8(6), 207. <https://doi.org/10.3390/f8060207>.
- Deb, J.C., Phinn, S., Butt, N., & McAlpine, C.V. (2017). The impact of climate change on the distribution of two threatened Dipterocarp trees. *Ecology and Evolution*, 7(7), 2238-2248. <https://doi.org/10.1002/ece3.2846>.
- Erfanian, M.B., Sagharyan, M., Memariani, F., & Ejtehadi, H. (2021). Predicting range shifts of three endangered endemic plants of the Khorassan-Kopet Dagh foristic province under global change. *Scientific Reports*, 11, 9159. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88577-x>.
- Guo, Y., Li, X., Zhao, Z., & Nawaz, Z. (2019). Predicting the impacts of climate change, soils and vegetation types on the geographic distribution of *Polyporus umbellatus* in China. *Science of the Total Environment*, 648, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.465>.
- Huang, J., Li, G., Li, J., Zhang, X., Yan, M., & Du, S. (2017). Projecting the Range Shifts in Climatically Suitable Habitat for Chinese Sea Buckthorn under Climate Change Scenarios. *Forests*, 9(1), 9. <https://doi.org/10.3390/f9010009>.
- Jazirehi, M.H., & Ebrahimi Rostaghi, M. (2003). *Silviculture in Zagros*: University of Tehran Press. P560. (In Persian).
- Mahatara, D., Acharya, A.K., Dhakal, B.P., Sharma, D.K., Ulak, S., & Paudel, P. (2021). Maxent modelling for habitat suitability of vulnerable tree *Dalbergia latifolia* in Nepal. *Silva Fennica*, 55(4), 2242-4075. <https://doi.org/10.14214/sf.10441>.
- Mataji, A., Abdi, F., Etemad, V., & Kiadaliri H. (2016). Effects of seed origin on survival morphology and growth of Iranian oak (*Quercus brantii* Lindl.). *Iranian Journal of Forest*, 8(1), 11–22. (In Persian).
- Pramanik, M., Paudel, U., Mondal, B., Chakraborti, S., & De, P. (2018). Predicting climate change impacts on the distribution of the threatened *Garcinia indica* in the Western Ghats, India. *Climate Risk Management*, 19, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.11.002>.
- Qin, A., Liu, B., Guo, Q., Bussmann, R.W., Ma, F., Jian, Z., Xu, G., & Pei, S. (2017). Maxent modeling for predicting impacts of climate change on the potential distribution of *Thuja sutchuenensis* Franch., an extremely endangered conifer from southwestern China. *Global Ecology and Conservation*, 10, 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.02.004>.

- Shcheglovitova, M., & Anderson, R.P. (2013). Estimating optimal complexity for ecological niche models: A jackknife approach for species with small sample sizes. *Ecological Modelling*, 269, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.011>.
- Shi, X., Yin, Q., Sang, Z., Zhu, Z., Jia, Z., & Ma, L. (2021). Prediction of potentially suitable areas for the introduction of *Magnolia wufengensis* under climate change. *Ecological Indicators*, 127, 107762. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107762>.
- Shiraz municipality (2018). *Shiraz Municipality annual report*. Shiraz: Shiraz municipality. (In Persian).
- Ye, X., Yu, X., Yu, C., Tayibazhaer, A., Xu, F., Skidmore, A.K., & Wang, T. (2018). Impacts of future climate and land cover changes on threatened mammals in the semi-arid Chinese Altai Mountains. *Science of the Total Environment*, 612, 775–787. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.191>.
- Zhao, Q., Zhang, Y., Li, W.N., Hu, B.W., Zou, J.B., Wang, S.Q., Niu, J.F., & Wang, Z.Z. (2021). Predicting the Potential Distribution of Perennial Plant *Coptis chinensis* Franch. in China under Multiple Climate Change Scenarios. *Forests*, 12(11), 1464. <https://doi.org/10.3390/f12111464>.
- Zuza, E.J., Maseyk, K., Bhagwat, S.A., Sousa, K., Emmott, A., Rawes, W., & Araya, Y.N. (2021). Climate suitability predictions for the cultivation of macadamia (*Macadamia integrifolia*) in Malawi using climate change scenarios. *PLoS ONE*, 16(9), e0257007. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257007>.



Research Article

Predicting climate change impacts on distribution of Brant's oak trees (*Quercus brantii* Lindl.) in the Zagros forests, Fars Province

N. Khajei¹, V. Etemad^{2*}, and J. Bazrafshan³

¹ Ph.D. Student of Silviculture and Forest Ecology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran.

² Associate Prof., Dept. of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran.

³ Associate Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, I. R. Iran.

(Received: 21 June 2022; Accepted: 29 August 2022)

Abstract

Introduction: Climate change has the potential to alter the natural distribution of species and reduce biodiversity in forest ecosystems. This study aimed to investigate the effects of climate change on the geographical diversity of Brant's oak (*Quercus brantii* L.) to identify the suitable area for this species' occurrence and manage its conservation.

Material and Methods: The distribution of *Quercus brantii* was studied under current and future climate conditions (2050, 2070) using two climate change scenarios, RCP2.6 and RCP8.5, HadGEM2-ES General Circulation Model, the Maxent model, and topography data of Fars province.

Findings: The results showed that the current potentially suitable areas for *Q. brantii* constitute 7.8% (9794.5 Km²) of the total area of the province. Under the RCP2.6 scenario, this will decrease to 6.6% in 2050 and increase to 13.3% in 2070. Also, under the RCP8.5 scenario, the suitable area will increase to 8.1% in 2050 and 10.2% in 2070. Areas with moderate, high, and very high suitability, currently at 1.8%, 1.5%, and 1.7% respectively, will decrease to 1.1%, 0.6%, and 0.3% in 2050 according to the RCP2.6 scenario, and then increase to 2.9%, 1.6%, and 1.2% in 2070. According to the RCP8.5 scenario, these values will decrease to 1.6%, 0.6%, and 0.3% in 2050, and finally change to 2.5%, 0.9%, and 0.2% in 2070.

Conclusion: The study demonstrated that the distribution of *Quercus brantii* is affected by climate change based on both scenarios. Also, the Maximum Entropy model has proven highly effective in predicting the distribution of this species.

Keywords: Climate change, Distribution, Fars province, Maxent, *Quercus brantii*.