



نقش متغیرهای زیست‌اقليمی و توپوگرافی در پراکنش گونه شمشاد هیرکانی (*Buxus hyrcana*) در جنگل‌های ناحیه خزری (Pojark).

عارف حسابی^۱، سید جلیل علوی^{۲*} و امید اسماعیل‌زاده^۲

^۱ دانشجوی دکتری علوم و مهندسی جنگل، گرایش مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران
^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران.
^۲ دانشیار گروه علوم و مهندسی جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، مازندران، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶)

چکیده

مقدمه: درک رابطه بین یک گونه یا جامعه و محیط آن، مفهومی بنیادین در بوم‌شناسی و حفاظت است. یکی از روش‌های رایج برای شناسایی مناطق دارای تنوع زیستی زیاد، شبیه‌سازی پراکنش بالقوه گونه‌های مهم و در حال انقراض است. گونه شمشاد هیرکانی، از معدود درختان پهن‌برگ همیشه‌سبز در جنگل‌های هیرکانی است. در سال‌های اخیر شیوع بیماری قارچی سوختگی برگ و گسترش آفت شب‌پره شمشاد، وضعیت حفاظتی این گونه را در جنگل‌های شمال ایران با چالشی جدی مواجه کرده است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی متغیرهای مؤثر بر پراکنش این گونه با استفاده از متغیرهای زیست‌اقليمی Chelsa در پهنه جنگل‌های هیرکانی است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، ۵۷۰ داده حضور گونه شمشاد در منطقه تحقیق برای اجرای مدل حداکثر آنتروپی آماده‌سازی شدند. آزمون VIF در مورد متغیرهای زیست‌اقليمی پایگاه Chelsa و متغیرهای اولیه و ثانویه توپوگرافی برای بررسی هم‌خطی صورت گرفت. داده‌ها در مقیاس یک کیلومتر تنک شد. ۷۰ درصد نمونه‌ها (۸۰ نمونه) به‌عنوان داده‌های آموزشی برای توسعه مدل و ۳۰ درصد (۳۴ نمونه) باقی‌مانده به‌عنوان داده‌های آزمون برای اعتبارسنجی مدل اختصاص داده شدند. تعداد ۱۰ هزار نقطه پس‌زمینه تعیین و فرایند مدل‌سازی ۱۰ بار تکرار شد. سپس برای اجرای مدل حداکثر آنتروپی در زبان برنامه‌نویسی R، تنظیمات مدل بهینه براساس معیارهای ارزیابی وابسته به آستانه (یعنی نرخ حذف) برای یافتن بهترین پارامترهایی که میانگین ارزیاب‌ها را در اعتبارسنجی به حداکثر می‌رسانند استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل از دو روش AUC و TSS استفاده شد.

یافته‌ها: براساس نتایج، عملکرد مدل در پیش‌بینی پراکنش گونه شمشاد با استفاده از آماره AUC برابر با ۰/۹۳ و با استفاده از آماره TSS نیز برابر با ۰/۷۴ شد. اهمیت متغیرهای واردشده در فرایند مدل‌سازی براساس روش درصد مشارکت نشان داد که دو متغیر میانگین دما در فصل مرطوب (Bio 8) و طول و ضریب شیب (LS_Factor) در مجموع حدود ۷۰ درصد بر پراکنش شمشاد تأثیر داشته‌اند. منحنی پاسخ شمشاد نسبت به متغیرهای تأثیرگذار رسم و نقشه مطلوبیت رویشگاه شمشاد در جنگل‌های هیرکانی تهیه شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که بهترین رویشگاه‌های شمشاد در استان مازندران و بخش هیرکانی مرزی قرار دارند.

نتیجه‌گیری: براساس یافته‌های این پژوهش، شمشاد هیرکانی به‌عنوان گونه‌ای رطوبت‌پسند، نیازمند شرایط آب‌وهوایی معتدل و رویشگاه‌هایی با شیب کم است. نقشه‌های تولیدشده در این پژوهش، مناطق جدیدی با پتانسیل زیاد برای رویشگاه‌های بالقوه این گونه را شناسایی کرده‌اند که در حال حاضر فاقد حضور شمشاد هستند. این مناطق می‌توانند در آینده به‌عنوان گزینه‌های مناسب برای برنامه‌های احیا و توسعه جمعیت این گونه استفاده شوند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، تأثیرات تغییرات اقلیمی بر رویشگاه‌های بالقوه این گونه و بقیه گونه‌های در معرض خطر به‌طور جامع بررسی شود. این امر می‌تواند به توسعه راهبردهای انعطاف‌پذیرتر و پایدارتر برای حفاظت از تنوع زیستی در شرایط متغیر اقلیمی کمک کند. اطلاعات حاصل از این پژوهش می‌تواند به برنامه‌ریزی‌های حفاظتی هدفمندتر و بهبود راهبردهای مدیریتی برای حفاظت از گونه‌های در معرض خطر منجر شود.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های هیرکانی، حداکثر آنتروپی، مدل پراکنش گونه‌ای، مطلوبیت رویشگاه.

مقدمه

تغییرات محیطی، شاخص‌هایی ارزشمند برای شناسایی اختلالات اکوسیستمی و تنوع زیستی محسوب می‌شوند (Farashi et al., 2017). پراکنش بالقوه این گونه‌ها می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره ویژگی‌های رویشگاه بقیه موجودات نیز فراهم کند (Ye et al., 2020) و شبیه‌سازی پراکنش آنها، ابزاری مؤثر برای شناسایی مناطق با تنوع زیستی زیاد است (Ma et al., 2022). با این حال، با وجود مزایای مدل‌های پراکنش، محدودیت‌هایی همچون سوگیری مکانی، کمبود داده‌های عدم حضور و ناکافی بودن متغیرهای پیشگو، می‌توانند دقت پیش‌بینی آنها را کاهش دهند (Cayuela et al., 2009). از این رو انتخاب متغیرهای محیطی مناسب، گامی اساسی در توسعه مدل‌های مؤثر و قابل انتقال به مقیاس‌های مکانی و زمانی دیگر است (Lechner et al., 2012). چنین مدل‌هایی به‌ویژه در برنامه‌ریزی‌های حفاظت زیست‌محیطی در شرایط تغییرات جهانی اهمیت زیادی دارند. برای دستیابی به این هدف، طبقه‌بندی صحیح متغیرهای پیش‌بینی‌کننده ضروری است (Bradley et al., 2012). در میان الگوریتم‌های دارای استفاده، مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) به دلیل عملکرد مناسب در پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها، از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است و به‌طور گسترده در پژوهش‌های اکولوژیکی به کار گرفته شده است (Abrha et al., 2018; Elith et al., 2006; Girma et al., 2016; Kumar et al., 2006; Phillips et al., 2004, 2009). این مدل که تنها به داده‌های حضور گونه نیاز دارد، از طریق تحلیل لایه‌های محیطی در نقاط حضور، احتمال حضور گونه‌ها را در کل منطقه پژوهش برآورد می‌کند. MaxEnt یکی از ابزارهای اصلی مدل‌سازی پراکنش گونه‌هاست که به‌ویژه در مورد گونه‌های درختی، عملکردی موفق داشته است. این الگوریتم مبتنی بر برآورد توزیع بهینه با کمترین پیشفرض‌هاست و از مفهوم آنتروپی برای سنجش احتمال وقوع پدیده‌ها بهره می‌برد (Elith et al., 2011).

ثبات و پایداری بوم‌سازگان‌ها در گرو شناخت دقیق روابط بین پراکنش گونه‌های گیاهی و عوامل محیطی است. این عوامل به‌عنوان محدودکننده یا تسهیل‌کننده استقرار گونه‌ها عمل می‌کنند و بازتابی از تعاملات پیچیده میان پوشش گیاهی و شرایط محیطی منطقه‌اند (Ahmad et al., 2021). یکی از ابزارهای نوین برای تحلیل این روابط، مدل‌های پراکنش گونه‌ای (SDM) است که با بهره‌گیری از داده‌های میدانی و لایه‌های محیطی، محدوده‌های جغرافیایی حضور گونه‌ها را تعیین می‌کنند (Dormann et al., 2012). این مدل‌ها برپایه همبستگی میان پراکنش پوشش گیاهی و متغیرهای محیطی تعریف می‌شوند (Guisan & Zimmermann, 2000) و ابزاری اثربخش در تصمیم‌گیری‌های حفاظتی و مدیریتی هستند (Li et al., 2013). کاربرد SDM‌ها در پیش‌بینی واکنش گونه‌ها به تغییرات محیطی، شناسایی مناطق مطلوب برای استقرار و نیز ارزیابی پویایی زیستگاه‌ها، در پژوهش‌های مختلف به اثبات رسیده است (Dolos et al., 2015). از این مدل‌ها همچنین به‌عنوان روشی غیرمستقیم برای تحلیل ویژگی‌های گیاهان و ارتباط آنها با متغیرهای محیطی بهره گرفته می‌شود. در این زمینه، مدل‌سازی مطلوبیت رویشگاه به‌عنوان رویکردی نوین، هم به شناسایی زیستگاه مطلوب گونه‌ها کمک می‌کند و هم نوع گونه و شرایط اکولوژیکی آن را در نظر می‌گیرد (Mahmoodi et al., 2022).

درک تعامل گونه‌ها یا جوامع گیاهی با محیط پیرامون، یکی از مفاهیم اساسی در علم اکولوژی و حفاظت به شمار می‌رود. استفاده از مدل‌های SDM، فهم عمیق‌تری از این تعاملات فراهم آورده و در پیش‌بینی پاسخ گونه‌ها به تغییرات محیطی بسیار مؤثر بوده است (Elith et al., 2006, 2009; Norberg et al., 2010; Zimmermann et al., 2019). به‌ویژه گونه‌های نادر و در خطر انقراض به دلیل حساسیت زیاد به

شبکه عصبی مصنوعی، مدل خطی تعمیم‌یافته، رگرسیون تطبیقی چندمتغیره، حداکثر آنتروپی و جنگل تصادفی استفاده شد. نتایج نشان داد که همه مدل‌های مجزا توانایی شناسایی محدوده پراکنش راش شرقی را داشتند، اما مدل اجماعی و سپس جنگل تصادفی بهترین عملکرد را نشان دادند. بررسی اهمیت متغیرها نشان داد که ارتفاع، تغییرات فصلی دما و شیب، تأثیرگذارترین عوامل در پراکنش گونه بودند. با به‌کارگیری پنج مدل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، K نزدیک‌ترین همسایه، مدل خطی تعمیم‌یافته و حداکثر آنتروپی، (Asadi et al. (2025) پراکنش فعلی گونه انجیلی (*Parrotia persica* (DC.)) (C.A.Mey. را در جنگل‌های هیرکانی بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار سطح زیر منحنی برای مدل جنگل تصادفی (۰/۸۷) بود که بهترین عملکرد را در بین همه مدل‌ها داشت. بررسی اهمیت متغیرها نشان داد که ارتفاع از سطح دریا مهم‌ترین متغیر در پراکنش انجیلی بود. در حالی که متغیر درصد شن خاک و مقدار بارش دومین متغیر مهم به‌ترتیب توسط مدل جنگل تصادفی و حداکثر آنتروپی شناسایی شد. در پژوهشی جدید در خصوص گونه شمشاد (Hesabi et al. (2025a) از داده‌های پایگاه WorldClim برای مدل‌سازی پراکنش گونه در معرض خطر شمشاد هیرکانی (*Buxus hyrcana* Pojark.) استفاده کردند. نتایج آن پژوهش نشان داد که متغیرهای مرتبط با دما به‌ویژه Bio4 و Bio1 در کنار شاخص‌های توپوگرافی مانند ضریب شیب و فاصله از شبکه آبراهه، بیشترین نقش را در پراکنش این گونه دارند و رویشگاه‌های بسیار مناسب در استان‌های گیلان و مازندران متمرکزند؛ با این حال پژوهش دیگری در زمینه مقایسه مستقیم پایگاه‌های داده اقلیمی WorldClim و Chelsa با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک در جنگل‌های هیرکانی نشان داد که WorldClim در برآورد بارندگی عملکرد دقیق‌تری دارد، اما داده‌های Chelsa در برآورد میانگین دمای سالانه همبستگی بیشتری با داده‌های

تحقیقات مختلفی در زمینه مدل‌سازی پراکنش گونه‌های درختی انجام گرفته است. Moridpour et al. (2023) مناطق مطلوب رویشگاهی گونه ون (*Fraxinus excelsior* L.) را در جنگل خیرودکنار نوشهر شناسایی کردند. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی با بیشترین مقدار ارزیاب‌های مختلف بهترین عملکرد را در مدل‌سازی نقشه مطلوبیت ون داشته است. همچنین مهم‌ترین متغیرها بر پراکنش گونه ون به‌ترتیب عمق دره، انحنای پروفیل، شیب و شاخص موقعیت توپوگرافی بودند. (Moghbel Esfahani et al. (2023) در پژوهشی با استفاده از پنج مدل رویشگاه‌های مطلوب گونه بلندمازو (*Quercus castaneifolia* C.A.Mey) را در جنگل‌های هیرکانی تعیین کردند. نتایج نشان داد که وزن مخصوص ظاهری خاک، pH، تغییرات بارندگی فصلی و بارندگی در سردترین فصل سال بیشترین تأثیر را در پراکنش گونه بلندمازو داشتند. در ذخیره‌گاه زیست‌کره ارسباران، (Sarhangzadeh et al. (2020) عملکرد بیشینه آنتروپی را در پیش‌بینی رویشگاه‌های بالقوه سرخدار (*Taxus baccata* L.) بررسی کردند. نتایج نشان داد که سرخدار بیشتر به محدوده ارتفاعی ۹۰۰ تا ۱۷۰۰ متر از سطح دریا، شیب ۲۵ تا ۶۰ درجه، دامنه‌های شمالی و بارندگی ۳۶۰ تا ۴۸۰ میلی‌متر در سال تمایل دارد. (Mohammadi et al. (2019) رویشگاه بالقوه گونه ملج (*Ulmus glabra* Huds.) در جنگل خیرود نوشهر را با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و خصوصیات اولیه و ثانویه توپوگرافی و نیز نقشه‌های خاک‌شناسی، حاصلخیزی خاک و زمین‌شناسی تعیین کردند. نتایج نشان داد که ارتفاع از سطح دریا و عمق دره، مهم‌ترین متغیرهای مؤثر در تعیین رویشگاه گونه ملج هستند و حدود ۳۲/۵۷ درصد منطقه تحقیق، دارای پتانسیل زیاد و بسیار زیاد برای حضور گونه ملج است. در پژوهشی دیگر Hedayati et al. (2025) پراکنش فعلی راش شرقی (*Fagus orientalis* Lipsky) را در جنگل‌های هیرکانی مدل‌سازی کردند. از الگوریتم‌های مدل‌سازی شامل

هکتار برآورد شده است (Sagheb Talebi et al., 2014). شمشاد گونه‌ای بردبار به سایه است و در زیرآشکوب جنگل‌های جلگه‌ای و میان‌بند شمال پراکنش دارد که با ایجاد تاج‌پوشش انبوه و فشرده، محیطی تاریک در جنگل ایجاد می‌کند. به دلیل تخریب گسترده رویشگاه‌های شمشاد در دهه‌های اخیر، این گونه جزء جوامع ذخیره‌گاهی در نظر گرفته شده است تا از انقراض آن جلوگیری شود. بالاترین ارتفاع رویش این درخت که دیده شده، ۱۷۰۰ متر و مربوط به دره «شیرین رود» در دودانگه ساری است و غنی‌ترین و بکرترین جنگل آن در «خیبوس» ساری قرار دارد. دما از مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده پراکنش گونه‌های گیاهی است و شمشاد هیرکانی نیز گونه‌ای حساس به تغییرات دمایی به شمار می‌رود؛ از این‌رو در این پژوهش از داده‌های Chelsa به‌جای WorldClim استفاده شد تا ضمن شناسایی دقیق‌تر متغیرهای مؤثر بر پراکنش این گونه، مقایسه نتایج با پژوهش Hesabi et al. (2025a) ممکن شود. بنابراین هدف اصلی این تحقیق گذشته از شناخت مهم‌ترین ویژگی‌های بوم‌شناختی مؤثر در پراکنش مکانی شمشاد و شناسایی متغیرهای تأثیرگذار بر پراکنش آن و نحوه تأثیرگذاری این متغیرها بر شمشاد، ارزیابی اثر تفاوت داده‌های اقلیمی بر نتایج مدل‌سازی و ارائه توصیه‌های علمی برای انتخاب پایگاه داده مناسب در پژوهش‌های مطلوبیت رویشگاه است.

مواد و روش‌ها

منطقه پژوهش

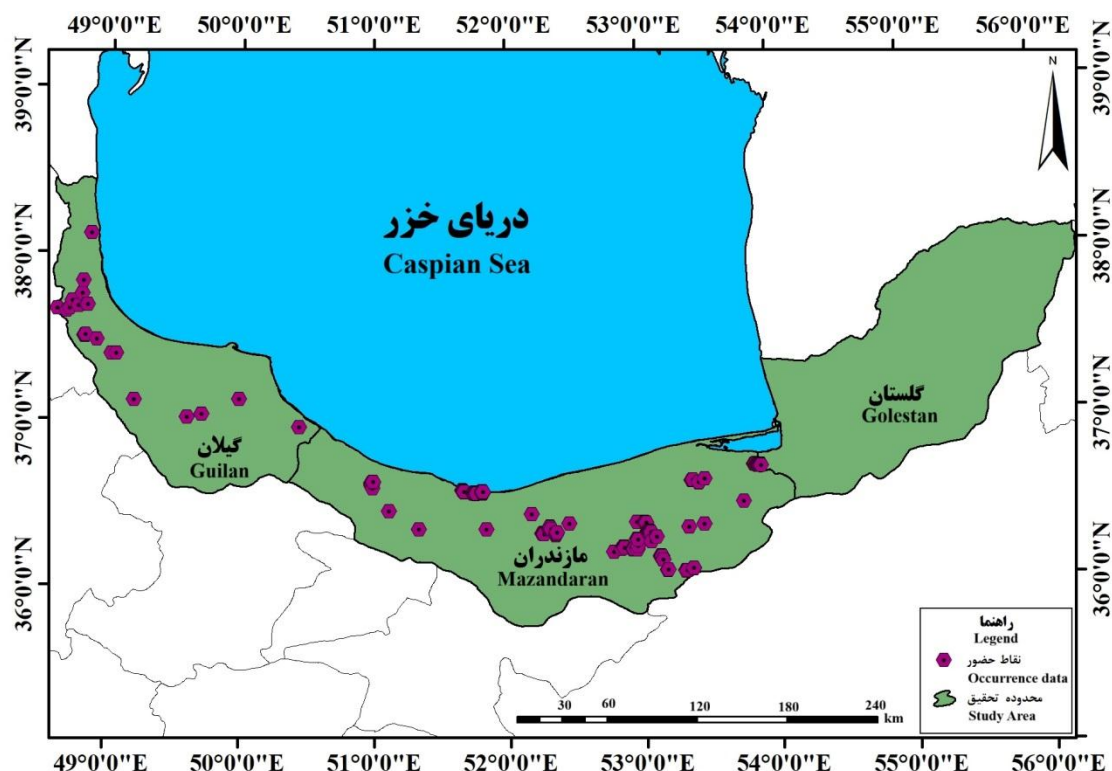
منطقه جغرافیایی مدنظر، جنگل‌های واقع در منطقه پوششی هیرکانی یا خزری بود. این جنگل‌ها در امتداد حاشیه جنوبی دریای خزر و ارتفاعات شمالی رشته‌کوه البرز است که از آستارا در استان گیلان تا گلیداغی در استان گلستان با طول ۸۰۰ کیلومتر و عرض بین ۲۰ تا ۷۰ کیلومتر امتداد دارند. جنگل‌های شمال ایران در مختصات جغرافیایی ۳۸-

زمینی نشان دادند. (Hesabi et al., 2025b). پژوهشی Wani et al. (2023) با استفاده از روش حداکثر آنتروپی، رویشگاه مناسب شمشاد بومی هیمالیا (*Buxus wallichiana* Baill.) را در منطقه هیمالیا تعیین کردند. نتایج نشان داد که تنها ۰/۴ درصد (۲۷۶۵ کیلومتر مربع) از کل مساحت شمال غربی و غربی هیمالیا برای شمشاد هیمالیا مناسب است و باید به سرعت برای حفاظت و احیای این گونه در خطر انقراض اقدام کرد. متغیرهای مهم در مدل‌سازی رویشگاه‌های مطلوب گونه شمشاد هیمالیا، میانگین دمای سالانه، میانگین بارش در خشک‌ترین ماه سال و در پی آن ارتفاع از سطح دریا بود. در پژوهشی Yebeyen et al. (2022) رویشگاه‌های مناسب درختان بامبو (*Bambusa vulgaris* Schrad. ex J.C.Wendl.) در ایتوپیا را بررسی کردند. مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها در بسته SDM در نرم‌افزار R با استفاده از ۲۳۱ داده حضور زمین‌مرجع‌شده همراه با داده‌های آب‌وهوا، توپوگرافی و خاک اجرا شد. نتایج نشان داد که رویشگاه‌های مطلوب برای بامبو اغلب مناطق مرتفع با ارتفاع ۲۱۰۰-۳۱۰۰ متر از سطح زمین با میانگین دمای سالانه ۱۹/۳-۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد، بارش سالانه ۱۹۶۲-۸۷۳ میلی‌متر، بارش خشک‌ترین سه‌ماهه ۱۴۷-۳۶ میلی‌متر و pH خاک ۵/۶ است.

گونه شمشاد هیرکانی (*B. hyrcana*) از معدود درختان همیشه‌سبز پهن‌برگ جنگل‌های هیرکانی است که دیرزیستی زیادی دارد، اما امروزه وقوع بیماری قارچی سوختگی برگ شمشاد و طغیان آفت شب‌پره شمشاد، وضعیت حفاظت شمشاد هیرکانی در جنگل‌های شمال را در وضعیت بحرانی‌تری قرار داده است. این گونه در فهرست گونه‌های گیاهی در خطر انقراض اتحادیه بین‌المللی حفظ طبیعت (IUCN) قرار گرفته است. سطح رویشگاه‌های شمشاد در استان‌های گیلان (۳۵ هزار هکتار)، مازندران (۳۷ هزار هکتار) و گلستان (۴۵۰ هزار هکتار) ۷۲ هزار و ۴۵۰

ارتفاع ۲۵۰۰ متر از سطح دریا گسترش می‌یابد. میانگین بارش سالانه در این ناحیه از ۵۳۰ میلی‌متر در مناطق شرقی تا ۱۳۵۰ میلی‌متر در مناطق غربی است (Taleshi et al., 2019).

۳۶ درجه عرض شمالی و مختصات ۴۸-۵۶ درجه طول شرقی قرار گرفته‌اند (شکل ۱) (Moghbel et al., 2023). محدوده رویشی این اکوسیستم‌های جنگلی از سطح دریا آغاز می‌شود و تا



شکل ۱- خروجی منطقه پژوهش

Figure 1. Output of the research area

گلستان در سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۷ برداشت شده‌اند. این داده‌ها از شرقی‌ترین منطقه پراکنش شمشاد هيرکاني در ذخیره‌گاه چشمه‌بلبل بندرگز تا لیره‌سر تنکابن در غرب استان مازندران شامل جنگل حفاظت‌شده خیبوس در حوزه تالار با تعداد ۴۴، جنگل‌های شمشاد مناطق شیرگاه در حوزه تالار، لیره‌سر، سری یک بخش ۳ حوزه نکا- ظالم‌رود، به‌ترتیب با تعداد ۴۳، ۳۰ و ۲۰، ذخیره‌گاه سی‌سنگان با تعداد ۳۰، جنگل شمشاد انارور با تعداد ۶۱، جنگل‌های شمشاد فریم با تعداد ۵۲، جنگل‌های شمشاد حوزه غرب هراز با تعداد ۶۸، جنگل‌های شمشاد وزملای منطقه سنگده با تعداد ۲۰، جنگل‌های شمشاد چشمه بلبل بندرگز با تعداد ۹۴ و جنگل‌های شمشاد مزگا با

شیوه اجرای پژوهش

برای شناسایی عوامل مؤثر بر پراکنش شمشاد و تهیه نقشه مطلوبیت رویشگاه، چهار مرحله اصلی مدنظر قرار گرفته است: آماده‌سازی داده‌ها، بررسی هم‌خطی بین متغیرها، اجرای مدل و تعیین متغیرهای تأثیرگذار و در نهایت ارزیابی مدل.

داده‌های حضور

در پژوهش حاضر از داده‌های حضور شمشاد که همه رویشگاه‌های این گونه را در جنگل‌های هيرکاني شامل می‌شود استفاده شد (Khabazi et al., 2019). این بانک اطلاعاتی مشتمل بر تعداد ۵۰۸ داده از رویشگاه‌های شمشاد هيرکاني در استان مازندران و

داده‌های Chelsa در برآورد میانگین دمای سالانه همبستگی بسیار بیشتری با ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه دارند (Hesabi et al., 2025b). دما از مهم‌ترین متغیرهای تعیین‌کننده پراکنش گونه‌ها محسوب می‌شود. از این‌رو استفاده از داده‌های Chelsa می‌تواند قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌های مدل را بهبود بخشد. برای مدل‌سازی میانگین ۳۰ سال گرفته شد. پایگاه اطلاعاتی Chelsa یکی از منابع باارزش داده‌های زیست‌اقلیمی محسوب می‌شود. متغیرهای زیست‌اقلیمی در Chelsa از میانگین، حداکثر و حداقل دمای ماهانه و همچنین مقادیر میانگین بارندگی محاسبه می‌شوند (Ramirez-Villegas et al., 2014). این متغیرها، روندهای سالانه، فصلی و عوامل محیطی شدید مرتبط با مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها و کاربردهای اکولوژیکی را در بر می‌گیرند. دقت داده‌های دما این پایگاه بسیار نزدیک به ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک است (Hesabi et al., 2025b). میزان وضوح تصاویر این پایگاه نیز ۱ کیلومتر یا ۳۰ قوس بر ثانیه (30 arc/second) است. برخی از متغیرهای زیست‌اقلیمی ویژه Chelsa شامل میانگین دمای هوای سالانه، محدوده دما و مقدار بارندگی است (جدول ۱).

متغیر شیب، ارتفاع و جهت جغرافیایی از مهم‌ترین متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای هستند که در پژوهش‌های مختلف استفاده شده‌اند (Gama et al., 2016). این سه متغیر شامل شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI^۳)، شاخص همگرایی (CI^۴)، عمق دره (VD^۵)، فاصله عمودی تا آبراه (ChND^۶)، طول شیب و ضریب شیب (LS Factor^۷) و شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI^۸) به عنوان متغیر ثانویه می‌باشند. متغیر شیب (Slope) یکی از

تعداد ۴۶ استفاده شد. همچنین ۶۲ موقعیت جغرافیایی نیز از توده‌های شمشاد در استان گیلان در رویشگاه‌های رضوانشهر، تالش، سفارود، لیسار، لاکان و گشت رودخان ثبت شد.

این داده‌ها نقاط حضور رویشگاه‌های شمشاد در سه استان شمالی کشور شامل ۱۶ رویشگاه اصلی و تعداد ۵۷۰ نقطه حضور واقعی توده‌های شمشاد هستند. تمامی نقاط وقوع با استفاده از گیرنده دستی سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS^۱) ثبت شده و سپس با استفاده از تابع "thindata" در بسته SDMtune در نرم‌افزار R به مقیاس ۱ کیلومتر تنک شد (R Core Team, 2024; Vignali et al., 2020). این کار برای جلوگیری از اریبی ناشی از نمونه‌برداری داده‌ها انجام گرفت. بسته نرم‌افزاری SDMtune در هر پیکسل یک نقطه حضور را در نظر می‌گیرد و بقیه نقاطی را که در پیکسل باشند حذف می‌کند. بدین صورت که در هر پیکسل که اندازه آن ۱ کیلومتر مربع است، فقط یک نقطه حضور باقی می‌ماند. بنابراین تعداد نقاط حضور پس از تنک کردن به ۱۱۴ نقطه کاهش یافت.

متغیرهای زیست‌اقلیمی و توپوگرافی

متغیرهای زیست‌اقلیمی یکی از مهم‌ترین متغیرهای محیطی هستند که در بیشتر پژوهش‌های مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها استفاده می‌شوند (Ramirez-Villegas et al., 2014). متغیرهای زیست‌اقلیمی استفاده‌شده در این پژوهش شامل ۱۹ متغیر زیست‌اقلیمی بود که با تفکیک مکانی ۱ کیلومتری در بازه زمانی (۲۰۱۰-۱۹۸۰) و از پایگاه داده Chelsa^۲ (<https://chelsa-climate.org/>) به دست آمده است (جدول ۱). انتخاب این پایگاه داده بر مبنای نتایج یک مطالعه صحت‌سنجی در محدوده جنگل‌های هیرکانی انجام گرفت که نشان داد

3. Topography Wetness Index
4. Convergence Index
5. Valley Depth
6. Channel Network Distance
7. Length and Steepness Factor
8. Topography Position Index

1. Global Positioning System
2. Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas

جدول ۱- متغیرهای زیست‌اقليمی پایگاه جهانی Chelsea
Table 1. Bioclimatic variables of the Chelsea database

متغیر زیست‌اقليمی Bioclimatic variable	نام اختصاری Abbreviated name	متغیر زیست‌اقليمی Bioclimatic variable	نام اختصاری Abbreviated name
میانگین دما در سردترین فصل Mean Temperature of Coldest Quarter	Bio11	میانگین دمای سالانه Mean Annual Temperature	Bio1
مجموع بارندگی سالانه Annual Precipitation	Bio12	میانگین دامنه دمای روزانه Mean Diurnal Range	Bio2
بارندگی در مرطوب‌ترین ماه Precipitation of Wettest Month	Bio13	هم‌دمایی Isothermality	Bio3
بارندگی در خشک‌ترین ماه Precipitation of Driest Month	Bio14	تغییرات فصلی دما Temperature Seasonality	Bio4
تغییرات بارندگی فصلی Precipitation Seasonality	Bio15	حداکثر دما در گرم‌ترین ماه Max Temperature of Warmest Month	Bio5
بارندگی در مرطوب‌ترین فصل Precipitation of Wettest Quarter	Bio16	حداقل دما در سردترین ماه Min Temperature of Coldest Month	Bio6
بارندگی در خشک‌ترین فصل Precipitation of Driest Quarter	Bio17	تغییرات دمای سالانه Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)	Bio7
بارندگی در گرم‌ترین فصل Precipitation of Warmest Quarter	Bio18	میانگین دما در مرطوب‌ترین فصل Mean Temperature of Wettest Quarter	Bio8
بارندگی در سردترین فصل Precipitation of Coldest Quarter	Bio19	میانگین دما در خشک‌ترین فصل Mean Temperature of Driest Quarter	Bio9
		میانگین دما در گرم‌ترین فصل Mean Temperature of Warmest Quarter	Bio10

TRASP در مدل‌های SDM سبب بهبود دقت پیش‌بینی می‌شود، به‌ویژه در مناطق کوهستانی که تفاوت‌های میکروکلیمایی مرتبط با جهت بسیار پررنگ است. این شاخص در کنار متغیرهای ارتفاع و شیب، یکی از ارکان تحلیل توپوگرافی محسوب می‌شود و تأثیر مهمی در تعیین مرزهای اکولوژیک و ترجیحات زیستگاهی گونه‌ها ایفا می‌کند. در پژوهش‌های مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای، از LS Factor به‌عنوان شاخص ثانویه توپوگرافی استفاده می‌شود، زیرا این متغیر بر ویژگی‌های رطوبتی خاک، ضخامت خاک، توان تولید زی‌توده و در نهایت بر پراکنش گونه‌ها اثرگذار است. فاصله عمودی (ChND) تا آبراه به‌صورت ارتفاع قائم یک نقطه از سطح زمین نسبت به

مهم‌ترین پارامترهای توپوگرافی در پژوهش‌های بوم‌شناسی و مدل‌سازی پراکنش گونه‌هاست که بیانگر زاویه یا میزان انحراف سطح زمین نسبت به افق است. این متغیر اثر مهمی در تعیین شرایط فیزیکی و زیست‌محیطی یک منطقه ایفا می‌کند و به‌طور مستقیم بر الگوهای رطوبت، دما، زهکشی، فرسایش خاک و حتی قابلیت استقرار گونه‌های گیاهی تأثیرگذار است (Guisan & Zimmermann, 2000). متغیر ارتفاع از سطح دریا (Elevation) یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های توپوگرافی در پژوهش‌های بوم‌شناختی و مدل‌سازی پراکنش گونه‌هاست که به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر تنوع زیستی، ترکیب پوشش گیاهی، و گستره پراکنش گونه‌ها تأثیر می‌گذارد. استفاده از شاخص

مشخصات اولیه و ثانویه توپوگرافی نیز برای مدل سازی پراکنش گونه شمشاد استفاده شد.

$$\text{TRASP} = [1 - \cos((\pi / 180) (\theta - 30))] / 2 \quad \text{رابطه ۱}$$

بررسی هم خطی بین متغیرها

به منظور بررسی هم خطی بین متغیرهای زیست اقلیمی و توپوگرافی از تحلیل عامل تورم واریانس (VIF^۴) استفاده شد. این تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از تابع vifstep در بسته usdm در نرم افزار آماری R انجام گرفت (Naimi et al., 2014; R Core Team, 2024). تنها از متغیرهایی که مقدار VIF آنها کمتر از ۱۰ بود در مدل سازی استفاده شد (جدول ۲).

مدل سازی پراکنش فعلی گونه شمشاد

ساختار ریاضی مدل MaxEnt به صورت تابع نمایی از مجموع وزنی ویژگی های زیست محیطی تعریف می شود.

$$p(x) = \frac{1}{Z} \exp\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i f_i(x)\right) \quad \text{رابطه ۲}$$

ساختار ریاضی مدل MaxEnt به صورت تابع نمایی از مجموع وزنی ویژگی های زیست محیطی تعریف می شود. در این ساختار، توابع ویژگی، $f_i(x)$ ضرایب λ_i یادگیری شده برای هر ویژگی، و Z ثابت نرمال سازی است. این ساختار، مشابه رگرسیون لجستیک تعمیم یافته است، اما مختص داده های حضور توسعه یافته است و از روش regularization برای جلوگیری از بیش برآزش بهره می برد (Elith et al., 2011) (رابطه ۲). با توجه به ماهیت داده های استفاده شده در این پژوهش که داده های صرفاً حضور گونه شمشاد است، از مدل MaxEnt در بسته SDMtune در محیط نرم افزار R استفاده شد (Vignali et al., 2020). به طور تصادفی ۷۰ درصد نمونه ها به عنوان مجموعه داده های آموزشی برای توسعه مدل استفاده شدند و ۳۰ درصد باقی مانده به عنوان مجموعه

نزدیک ترین آبراهه دائمی یا فصلی تعریف می شود. این متغیر نشان می دهد که یک نقطه چقدر از نظر توپوگرافی بالاتر یا پایین تر از شبکه زهکشی قرار دارد. شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) یک متغیر ژئومورفولوژیکی است که برای تعیین موقعیت نسبی یک نقطه در توپوگرافی اطراف آن به کار می رود. این شاخص تفاوت ارتفاع نقطه مدنظر با میانگین ارتفاع نقاط اطرافش را نشان می دهد. شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) به عنوان معیاری مطرح است که با تکیه بر ویژگی های زمین ریخت شناسی، ظرفیت تجمع رطوبت در خاک را در نقاط مختلف چشم انداز تخمین می زند. عمق دره (VD) به فاصله عمودی بین یک نقطه در سطح زمین و نزدیک ترین خط الرأس اطراف آن اشاره دارد. شاخص همگرایی (CI) معیاری است که درجه همگرایی یا واگرایی خطوط جریان آب را در یک نقطه از سطح زمین توصیف می کند. این شاخص نشان می دهد که آیا شیب زمین در آن نقطه سبب تمرکز جریان (convergent)، پراکندگی جریان (divergent) یا بی تفاوتی (planar) در جهت رواناب سطحی می شود. مدل رقومی ارتفاع (DEM) با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر از مأموریت توپوگرافی راداری شاتل (SRTM) استخراج شد. مشخصات ثانویه توپوگرافی از دو یا چند مشخصه اولیه مدل رقومی ارتفاعی (DEM) محاسبه می شوند. متغیرهای مذکور با استفاده از نرم افزار SAGA (نسخه ۹/۲) از DEM استخراج شدند. جهت جغرافیایی با استفاده از رابطه زیر به شاخص تابش خورشیدی (TRASP) تبدیل شد که در آن θ مقدار آزیموت جهت برحسب درجه است (رابطه ۱). مقدار شاخص تابش خورشیدی بین صفر و یک است و جهت شمال و شمال شرقی دارای مقدار صفر (خنک ترین دامنه) و جهت جنوب و جنوب غربی دارای مقدار یک (گرم ترین دامنه) است (Aertsen et al., 2010). در این پژوهش از مدل رقومی ارتفاع و

1. Digital Elevation Model

2. Shuttle Radar Topography Mission

3. Topographic Solar Radiation Aspect Index

4. Variance Inflation Factor

جدول ۲- متغیرهای استفاده‌شده در ساخت مدل

Table 2. Variables used for model building

واحد Unit	توضیح Explanation	نام متغیر Variable name
درجه سانتی‌گراد °C	میانگین دمای سالانه Mean Annual Temperature	Bio 1
-	هم‌دمایی Isothermality	Bio 3
-	Temperature Seasonality حداکثر دما در گرم‌ترین ماه	Bio 4
درجه سانتی‌گراد °C	میانگین دما در مرطوب‌ترین فصل Mean Temperature of Wettest Quarter	Bio 8
میلی‌متر mm	مجموع بارندگی سالانه Annual Precipitation	Bio 12
-	تغییرات بارندگی فصلی Precipitation Seasonality	Bio 15
-	شاخص تابش خورشیدی Topographic solar radiation aspect index	TRASP
-	عمق دره Valley Depth	V_D
-	شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic Wetness Index	TWI
-	شاخص موقعیت توپوگرافی Topography Position Index	TPI
-	شاخص همگرایی Convergence Index	C_I
-	طول و ضریب شیب Length and Steepness Factor	LS
-	فاصله عمودی تا آبراه Channel Network Distance	CH_N_D

ویژگی‌های آستانه (H) و ویژگی‌های قطعه (T) شدند (Allouche et al., 2006). ۱۰ هزار نقطه پس‌زمینه تعیین شد و فرایند مدل‌سازی ده بار تکرار شد. بسته SDMtune در نرم‌افزار R ترکیب ویژگی (FC)^۱ و ضریب تنظیم (RM)^۲ را برای بهبود بهینه‌سازی مدل اصلاح می‌کند. تحقیقات علمی متعدد نشان داده است که اصلاح پارامتر تنظیم در کنار دسته‌بندی ویژگی‌ها می‌تواند کارایی مدل را افزایش دهد (Muscarella et al., 2014; Radosavljevic et al., 2014). مدل Maxent شامل پنج ترکیب ویژگی مجزاست: ویژگی‌های خطی (L)، ویژگی‌های درجه دوم (Q)، ویژگی‌های ضربی (P)، ویژگی‌های آستانه (H) و ویژگی‌های قطعه (T) (Valavi et al., 2022). برای اصلاح مدل Maxent از RM ۰/۵ تا ۴ متغیر است و در هر مرحله ۰/۵ افزایش می‌یابد؛ در مجموع هشت تکرار تنظیم‌شده ایجاد شد. همزمان از شش ترکیب یک یا چند ویژگی استفاده شد: LH, H, LQ, LQH, LQP and LQPHT. با استفاده از ترکیب و جایگزینی، در مجموع ۲۱ ترکیب پارامتری تولید شد. اثربخشی ۲۱ پارامتر مذکور ارزیابی‌شده و پیچیدگی مدل براساس مقدار auc.test ارزیابی شد. هرچه این مقدار بیشتر باشد، نتایج پیش‌بینی‌کننده مدل دقیق‌تر است. در پژوهش پیش رو، پارامترهای پیش‌فرض برای نرم‌افزار Maxent به $RM = 1$ و $FC = L$ تنظیم شد. پس از شناسایی تنظیمات مناسب و بهینه MaxEnt، بقیه

داده‌های آزمون برای اعتبارسنجی مدل اختصاص داده شدند (Allouche et al., 2006). ۱۰ هزار نقطه پس‌زمینه تعیین شد و فرایند مدل‌سازی ده بار تکرار شد. بسته SDMtune در نرم‌افزار R ترکیب ویژگی (FC)^۱ و ضریب تنظیم (RM)^۲ را برای بهبود بهینه‌سازی مدل اصلاح می‌کند. تحقیقات علمی متعدد نشان داده است که اصلاح پارامتر تنظیم در کنار دسته‌بندی ویژگی‌ها می‌تواند کارایی مدل را افزایش دهد (Muscarella et al., 2014; Radosavljevic et al., 2014). مدل Maxent شامل پنج ترکیب ویژگی مجزاست: ویژگی‌های خطی (L)، ویژگی‌های درجه دوم (Q)، ویژگی‌های ضربی (P)،

1. Feature Classes
2. Regularization Multiplier

گزینه‌های انتخاب‌شده در این پژوهش شامل روش بلوکی با ۱۰ هزار نقطه پس‌زمینه است. روش «بلوک» داده‌ها را براساس خطوط طول و عرض جغرافیایی، و حضور را به چهار دسته (تا حد امکان) با تعداد مساوی تقسیم می‌کند. نقاط حضور و پس‌زمینه براساس موقعیت آنها نسبت به این خطوط به هر یک از چهار مخزن اختصاص داده می‌شوند (Muscarella et al., 2014). برای تحلیل روابط بین احتمال حضور گونه و متغیرهای محیطی، از منحنی‌های پاسخ استفاده شد. این منحنی‌ها با استفاده از تابع `plot_response()` از بسته `flexsdm` و برپایه مدل نهایی تنظیم‌شده Maxent استخراج شدند. در فرایند ترسیم این منحنی‌ها، مقدار بقیه متغیرهای محیطی در مقدار میانگین خود ثابت نگه داشته شد تا تأثیر مستقل هر متغیر بر احتمال حضور گونه به‌صورت مجزا بررسی شود. این نمودارها تغییرات پاسخ مدل را نسبت به هر متغیر نشان می‌دهند و تفسیر نتایج مدل‌سازی را ممکن می‌کنند.

اعتبارسنجی مدل

عملکرد مدل با استفاده از معیار AUC^۱ ارزیابی شد. مقدار AUC از ۰/۵ تا ۱ متغیر است (Phillips et al., 2008). مقدار AUC نزدیک به ۱ نشان‌دهنده عملکرد بهتر در پیش‌بینی؛ مقادیر بین ۰/۵ و ۰/۷ نشان‌دهنده توانایی پیش‌بینی ضعیف؛ مقادیر ۰/۸ تا ۰/۹ نشان‌دهنده عملکرد پیش‌بینی خوب و مقادیر بین ۰/۹ و ۱ نشان‌دهنده پیش‌بینی بسیار دقیق است (جدول ۳) (Yudaputra et al., 2020).

افزون بر این شاخص، آمار مهارت درست (TSS^۲) محاسبه شد. دامنه آماره مهارت درست یا TSS بین ۱- تا ۱+ نشان‌دهنده توافق کامل بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی است. در مقادیر صفر یا کمتر نیز احتمال تصادفی مقادیر واقعی و پیش‌بینی وجود دارد. TSS از مجموع حساسیت با ویژگی منهای یک

نتایج

عملکرد مدل

عملکرد پیش‌بینی پراکنش گونه شمشاد با استفاده از آماره AUC برابر با ۰/۹۳ شد که بسیار عالی ارزیابی می‌شود (جدول ۳). معیار `log loss` که خطای مدل را در پیش‌بینی احتمالات بیان می‌کند، ۰/۱۷ گزارش شد که نشان‌دهنده خطای کم و دقت زیاد پیش‌بینی‌های احتمالی مدل است. ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از آماره TSS نیز برابر با ۰/۷۴ شد که نشان‌دهنده توانایی پیش‌بینی قابل اعتماد مدل است (جدول ۴). همچنین دو معیار حساسیت (Sensitivity) و ویژگی (Specificity) محاسبه شد که نشان‌دهنده خطای نوع دوم و خطای نوع اول مدل هستند. حساسیت مدل که بیانگر توانایی آن در شناسایی صحیح نمونه‌های حضور گونه است، ۰/۸۸ به دست آمد. ویژگی مدل که بیانگر دقت در شناسایی نمونه‌های عدم حضور است، ۰/۸۷ به دست آمد (جدول ۴).

اهمیت متغیرها

اهمیت هر کدام از متغیرهای واردشده به فرایند مدل‌سازی براساس روش درصد مشارکت در شکل ۲ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که دو متغیر میانگین دما در مرطوب‌ترین فصل (Bio 8) و طول و ضریب شیب (LS_Factor) تأثیر زیادی بر پراکنش شمشاد تأثیر داشته‌اند.

منحنی پاسخ گونه نسبت به متغیرها

با توجه به اهمیت نسبی متغیرها، چهار متغیر مؤثر بر پراکنش شمشاد مشخص شده و منحنی پاسخ گونه شمشاد نسبت به آنها رسم شد (شکل ۳).

1. Area Under Curve
2. True Skill Statistic

جدول ۳- عملکرد پیش‌بینی پراکنش مکانی گونه‌ای

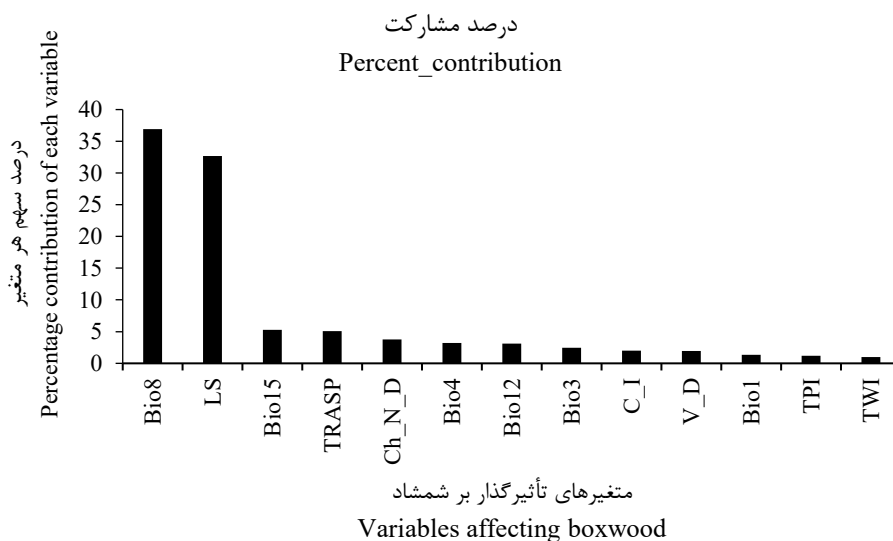
Table 3. Performance of predicting species spatial distribution

عملکرد مدل Model Performance	مقدار سطح زیر منحنی (AUC) Area Under the Curve
بسیار عالی Very great	0.9-1
عالی Excellent	0.8-0.9
خوب Good	0.7-0.8
متوسط Medium	0.6-0.7
پایین Low	0.5-0.6

جدول ۴- عملکرد مدل به‌دست‌آمده از مقادیر AUC و TSS

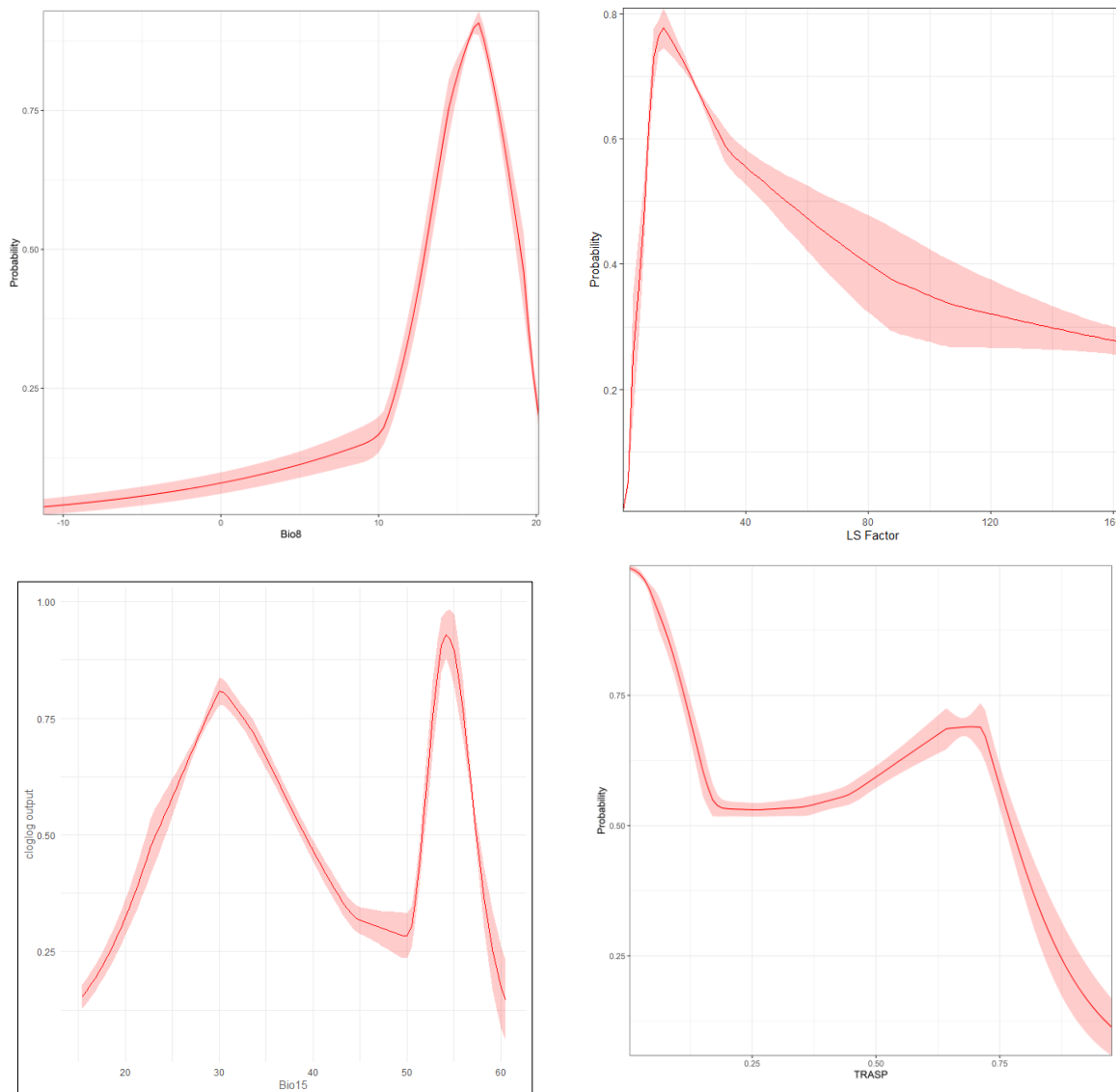
Table 4. Model Performance obtained from AUC and TSS values

معیارهای ارزیابی Evaluation criteria	مدل حداکثر آنتروپی Maxent model
مقدار سطح زیر منحنی (AUC) Area Under the Curve	0.93
آماره مهارت درست True Skill Statistic	0.74
معیار حساسیت Sensitivity	0.88
معیار ویژگی Specificity	0.87



شکل ۲- محاسبه اهمیت نسبی متغیرها با استفاده از روش درصد مشارکت

Figure 2. Relative importance of variables measured by the Percent contribution method



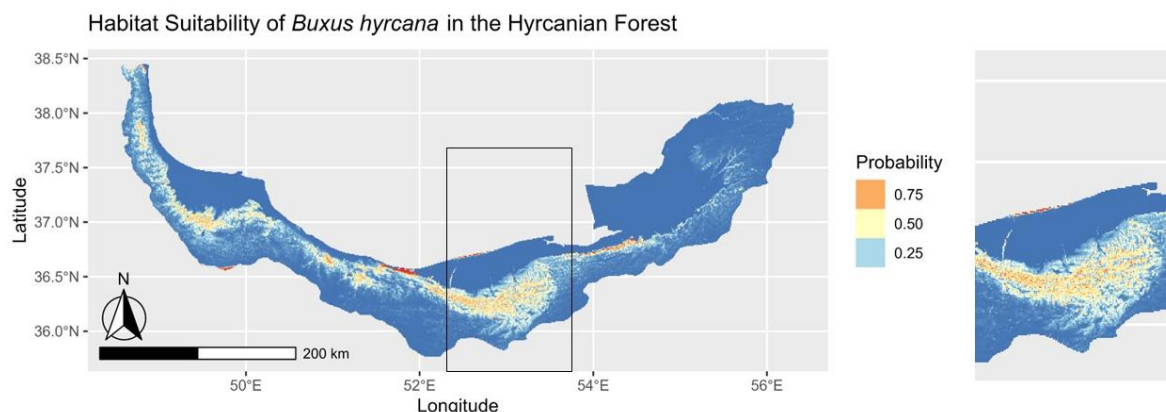
شکل ۳- منحنی پاسخ شمشاد نسبت به چهار متغیر محیطی مؤثر بر اساس روش درصد مشارکت (سمت راست بالا LS، سمت راست پایین TRASP، سمت چپ بالا Bio 8، سمت چپ پایین Bio 15)

Figure 3. Boxwood response curve to 4 effective environmental variables based on the percentage contribution method (upper right LS, lower right TRASP, upper left bio 8, lower left bio 15)

شمشاد در استان مازندران و بخش هیرکانی مرزی است. در جدول ۵ مساحت مناطق با میزان مطلوبیت کم تا زیاد به تفکیک استان آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تنها حدود ۴ درصد از مساحت سه استان شمالی کشور دارای مطلوبیت بسیار زیاد تشخیص داده شده که بیانگر محدودیت شدید رویشگاه برای این گونه در معرض خطر است (جدول ۵).

نقشه رویشگاه مطلوب گونه شمشاد

نقشه مطلوبیت رویشگاه شمشاد با استفاده از متغیرهای زیست‌اقلیمی و توپوگرافی و همچنین نقاط حضور شمشاد مدل‌سازی و تولید شد (شکل ۴). مطلوبیت رویشگاه به سه دسته مطلوبیت زیاد (بیشتر از ۰/۷۵)، مطلوبیت متوسط (بین ۰/۵۰ تا ۰/۷۵) و مطلوبیت کم (بین ۰/۲۵ تا ۰/۵۰) دسته‌بندی شد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که بهترین رویشگاه‌های



شکل ۴- نقشه مطلوبیت رویشگاه گونه شمشاد در جنگل‌های هیرکانی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی

Figure 4. Habitat suitability map of boxwood species in Hyrcanian forests using the Maxent model

جدول ۵- مساحت مناطق دارای مطلوبیت کم تا زیاد به تفکیک سه استان شمالی کشور

Table 5. Area of areas with low to high desirability, divided into three northern provinces of the country

استان	بدون مطلوبیت Not Suitable	مطلوبیت کم Low Suitable	مطلوبیت متوسط Medium Suitable	مطلوبیت زیاد High Suitable	مطلوبیت بسیار زیاد Very High Suitable	کل (هکتار) Total (ha)
مازندران Mazandaran	1,628,379 (68.4%)	419,931 (17.6%)	203,039 (8.53%)	92,623 (3.89%)	35,947 (1.51%)	2,379,919
گیلان Guilan	848,087 (60.2%)	301,252 (21.4%)	155,104 (11.0%)	76,884 (5.45%)	28,105 (1.99%)	1,409,432
گلستان Golestan	1,898,505 (94.0%)	79,233 (3.92%)	21,356 (1.06%)	13,056 (0.646%)	7,352 (0.364%)	2,019,502

مدل (2025) در مدل‌سازی گونه سرخدار عملکرد مدل

Maxent را بسیار عالی ارزیابی کردند.

در خصوص اهمیت نسبی متغیرها، روش درصد مشارکت (Percent contribution) چهار متغیر مؤثر بر پراکنش شمشاد را شناسایی کرد. دو متغیر میانگین دما در مرطوب‌ترین فصل و طول و ضریب شیب، تأثیر بسیار زیاد و دو متغیر بعدی تأثیر کمتری در پراکنش شمشاد داشتند و اثر بقیه متغیرها نیز ناچیز بود. دما و رطوبت مهم‌ترین عامل بر پراکنش گونه‌های درختی هستند. همان‌طور که نتایج بیان می‌کند، دما در فصل مرطوب تأثیر زیادی بر احتمال حضور شمشاد داشت، به طوری که در دماهای زیر صفر درجه سانتی‌گراد، احتمال حضور شمشاد بسیار کم بود و به تدریج با افزایش دما این احتمال بیشتر شد. نتایج منحنی پاسخ نشان می‌دهد که از دمای ۱۰ تا ۱۶ درجه سانتی‌گراد احتمال حضور شمشاد به طور محسوسی افزایش و بعد از آن کاهش یافت. رشد

بحث

در این پژوهش رویشگاه‌های مطلوب گونه شمشاد هیرکانی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و داده‌های حضور شمشاد در جنگل‌های هیرکانی و متغیرهای زیست‌اقليمی پایگاه اطلاعاتی Chelsa و متغیرهای اولیه و ثانویه توپوگرافی شناسایی و عملکرد مدل با دو ارزیاب AUC و TSS بررسی شد، متغیرهای تأثیرگذار بر پراکنش شمشاد و منحنی پاسخ شمشاد نسبت به این متغیرها تعیین شد. نتایج نشان داد که مدل حداکثر آنتروپی عملکرد بسیار خوبی در پیش‌بینی پراکنش فعلی شمشاد دارد. عملکرد مدل Maxent در پژوهش‌های متعددی بررسی شده است. کار با مدل Maxent به دلیل استفاده صرف از نقاط حضور نسبت به مدل‌هایی که با داده حضور و عدم حضور کار می‌کنند بسیار راحت است و پیچیدگی ندارد (Baldwin, 2009). (Mirzaeizadeh et al. (2022). پژوهشی در استان ایلام و نیز Habibikilak et al.

دره‌هایی با جهت شمالی- جنوبی هستند یافت می‌شود. این دره‌ها در تابستان تحت تأثیر جریان‌های مرطوب برخاسته از دریای خزر قرار دارند. حتی جنگل‌های شمشاد را می‌توان در شیب‌های بسیار تند و صخره‌ای که خاک سطحی آنها بسیار کم‌عمق است، مانند دامنه‌های منطقه وزملا با شیب ۱۲۰ درصد مشاهده کرد. این مورد تأییدی بر تأثیرگذاری متغیر بارش فصلی (bio 15) است که نشان می‌دهد مقدار بارش و پراکنش آن در طول فصول مختلف اثرهای متفاوتی بر حضور شمشاد دارد. شاخص تابش خورشیدی (TRASP) تأثیرگذار بر حضور شمشاد بود. Bale et al. (1998) بیان می‌کنند که جهت دامنه‌ها تأثیر اساسی در تنوع بوم‌سازگان دارد. این عامل در کنار تأثیر بر مقدار نور دریافت‌شده، بر مقدار آب در دسترس برای گیاهان و دمای خاک اکوسیستم نیز اثر دارد. شمشاد شرایط آب‌وهوایی مرطوب را ترجیح می‌دهد و مقدار رطوبت در شیب‌های جنوبی کمتر از شیب‌های شمالی است، این گیاه در شیب‌های جنوبی به‌ندرت یافت می‌شود. حضور شمشاد در دامنه‌های شمالی و شمال شرقی بسیار بیشتر است، درحالی که پراکندگی آن در دامنه‌های جنوبی و جنوب غربی به‌طور چشمگیری محدودتر است.

مقایسه نتایج این پژوهش با یافته‌های Hesabi et al. (2025a) که مبتنی بر داده‌های WorldClim انجام گرفته بود، نشان می‌دهد که دقت کلی مدل‌ها از نظر شاخص‌های آماری مانند AUC (به ترتیب ۰/۹۳ و ۰/۹۴) و TSS (۰/۷۹ و ۰/۸۰) به‌طور تقریبی مشابه است، اما تفاوت‌های معناداری در رتبه‌بندی متغیرهای مهم و الگوهای مکانی نقشه‌های مطلوبیت مشاهده می‌شود. در پژوهش مبتنی بر WorldClim، متغیرهایی همچون LS-Factor، فاصله از شبکه آبراه و تغییرپذیری فصلی دما و بارش Bio4 و Bio15 مهم‌تر بودند، درحالی که در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های Chelsa، میانگین دما در فصل مرطوب (Bio8) همراه با شاخص‌های توپوگرافی مانند LS-

گونه‌های درختی تابع دمای مشخصی است. بی‌تردید برای رشد هر درخت دمای بهینه‌ای وجود دارد (Alavi et al., 2020). جنس دیگر شمشاد در اسپانیا یعنی *Buxus balearica* Lam. نیز همانند شمشاد هیرکانی به میانگین دما واکنش نشان داد و اثر سه متغیر مهم بر پراکنش آن (بارندگی بهاره، میانگین دمای گرم‌ترین ماه و میانگین دمای سردترین ماه) با نتایج تحقیق حاضر همسو بود (Navarro-Cerrillo et al., 2011). شمشاد گونه‌ای است که بیشتر در ارتفاعات پایین‌بند و جلگه حضور دارد و اقلیم دریایی را می‌پسندد. دامنه دمای ۱۰ تا ۱۶ درجه سانتی‌گراد تأیید می‌کند که گونه شمشاد رطوبت‌پسند است (Habibi kilak et al., 2019; Navarro-Cerrillo et al., 2023; Wani et al., 2024; Wani et al., 2011). منحنی پاسخ مربوط به متغیر طول و ضریب شیب یک الگوی تک‌نمایی را نشان می‌دهد که چوله به سمت راست است. بر این اساس، حتی افزایش کمی در متغیر شیب تا حد زیادی احتمال حضور گونه شمشاد را افزایش می‌دهد که پس از رسیدن به مقدار اوج خود به تدریج کاهش می‌یابد. در این زمینه می‌توان گفت گونه شمشاد به شیب‌های کم تا متوسط گرایش دارد. در پژوهشی Habibi kilak et al. (2019) به این نتیجه رسیدند که شمشاد اغلب مناطق پرشیب را ترجیح می‌دهد و حضور آن با افزایش شیب رابطه مستقیم دارد که با یافته‌های پژوهش حاضر اختلاف دارد (Habibi kilak et al., 2019). شمشاد در گذشته در اغلب رویشگاه‌های جنگلی جلگه‌ای که حاوی خاک سبک بودند انتشار داشت؛ اما امروزه به دلیل تغییر کاربری زمین و نابودی جنگل‌های جلگه‌ای هیرکانی، اندک رویشگاه‌های جنگلی جلگه‌ای شمشاد هیرکانی مثل سی‌سنگان و چشمه بلبل باقی مانده است (Karimi et al., 2024). شمشاد بیشتر در جنگل‌های واقع در مناطق کوهستانی، به‌ویژه در دامنه‌های شمالی مرطوب که به‌سوی دره‌های مه‌آلود قرار گرفته‌اند یا در دامنه‌های شرقی و غربی که رو به

میان آنها باید براساس بوم‌شناسی گونه و حساسیت آن به متغیرهای اقلیمی صورت گیرد؛ به طوری که در گونه‌های حساس به دما مانند شمشاد، داده‌های Chelsa برتری آشکاری دارند، در حالی که برای گونه‌های وابسته به بارش، داده‌های WorldClim ممکن است نتایج قابل اعتمادتری فراهم کنند. این مقایسه به خوبی نشان می‌دهد که کیفیت داده‌های اقلیمی ورودی ممکن است به اندازه خود روش مدل‌سازی مهم باشد. نادیده گرفتن این موضوع ممکن است سبب برداشت‌های مدیریتی نادرست شود.

نقشه رویشگاه‌های مطلوب گونه شمشاد با بهره‌گیری از مدل Maxent تهیه و مدل‌سازی شد (شکل ۴). نتایج نشان می‌دهد که مناطق مطلوب برای رشد این گونه اغلب در استان مازندران و نواحی مرکزی جنگل‌های هیرکانی قرار دارند. تراکم زیاد رویشگاه‌ها و جمعیت‌های طبیعی شمشاد در این مناطق، گواهی بر صحت این یافته‌هاست. در استان گیلان نیز بخش‌های مطلوبی وجود دارد که با توجه به رطوبت‌دوست بودن شمشاد و مقدار بارندگی بیشتر در غرب هیرکانی این مورد به درستی در نقشه مطلوبیت نمایش داده شد و مدل توانست عملکرد خوب و درستی را به نمایش بگذارد (Alipour et al., 2023). با اینکه در استان گلستان نقاط حضوری از شمشاد نبود و توده شمشادی در این استان وجود ندارد، مدل مناطقی را با مطلوبیت متوسط در این استان به نمایش گذاشت. با توجه به دو آماره Specificity و Sensitivity که به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۸۷ محاسبه شد، مدل حاضر دارای عملکرد قابل قبول و تعادلی مناسب بین شناسایی حضور و عدم حضور گونه است و از نظر کاهش خطاهای نوع اول (مثبت کاذب) و نوع دوم (منفی کاذب) موفق بوده است. بنابراین مدل در تشخیص نقاط وقوع گونه عملکرد خوبی دارد و مناطقی را که به عنوان رویشگاه مطلوب معرفی کرده قابل اعتماد است و می‌توان برای احیا و حفظ این گونه بارز اقدامات احیایی را انجام داد. البته این

Factor، عوامل اصلی پراکنش گونه شناسایی شدند. این جابه‌جایی در اهمیت نسبی متغیرها ممکن است ناشی از دقت بیشتر Chelsa در بازنمایی شرایط دمایی به ویژه در مناطق کوهستانی و میان‌بند جنگل‌های هیرکانی باشد، جایی که شمشاد هیرکانی بیشترین تراکم را دارد.

از منظر الگوهای مکانی نیز هر دو پژوهش نشان دادند که استان‌های گیلان و مازندران هسته‌های اصلی پراکنش و زیستگاه‌های بسیار مطلوب شمشاد را در خود جای داده‌اند. با این حال، نقشه‌های تهیه‌شده براساس داده‌های Chelsa محدوده‌های کوهستانی را با وضوح بیشتری به عنوان زیستگاه‌های بالقوه نشان دادند و در عین حال مساحت زیستگاه‌های مطلوب در استان گلستان را محدودتر برآورد کردند. این در حالی است که پژوهش پیشین با WorldClim زیستگاه‌های وسیع‌تری را در گلستان پیش‌بینی کرده بود. تفاوت یادشده ممکن است ناشی از برآورد دقیق‌تر داده‌های Chelsa از متغیرهای دمایی و حساسیت زیاد این گونه به تغییرات حرارتی باشد. چنین اختلافاتی نشان می‌دهد که انتخاب پایگاه داده اقلیمی می‌تواند بر شناسایی مناطق احیا و مدیریت حفاظتی تأثیر مستقیم داشته باشد. یافته‌های پژوهش صحت‌سنجی داده‌های اقلیمی در جنگل‌های هیرکانی نیز این موضوع را تأیید می‌کند. در آن پژوهش مشخص شد که WorldClim در برآورد بارندگی با داده‌های ایستگاه‌های زمینی همخوانی بیشتری دارد، در حالی که Chelsa در برآورد میانگین دمای سالانه ($r = 0/91$) عملکرد به مراتب بهتری نشان داد (Hesabi et al., 2025b). شمشاد هیرکانی گونه‌ای حساس به آستانه‌های دمایی است و دامنه بردباری حرارتی محدودی دارد، از این رو استفاده از داده‌های Chelsa در پژوهش حاضر موجب بازنمایی دقیق‌تر شرایط رویشگاهی و شناسایی صحیح‌تر محدوده‌های بالقوه شده است. بنابراین هر دو پایگاه داده می‌توانند برای پژوهش‌های پراکنش گونه‌ای مفید باشند، اما انتخاب

خوب عمل می‌کند و توانایی مناسبی در تهیه نقشه مطلوبیت رویشگاه و متغیرهای مؤثر بر پراکنش آن دارد؛ همچنین متغیرهای میانگین دمای هوا در فصل مرطوب و طول و ضریب شیب بر پراکنش شمشاد تأثیر بسزایی دارند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که شمشاد گونه‌ای رطوبت‌پسند و خواهان آب‌وهوای معتدل و رویشگاه‌های کم‌شیب است. نقشه مناطق پرپتانسیل، رویشگاه‌های جدیدی را معرفی کرده که در حال حاضر شمشاد در آنها حضور ندارد و این رویشگاه‌ها می‌تواند در آینده برای توسعه و احیای دوباره این گونه با ارزش استفاده شود. پیشنهاد می‌شود که از همه مناطق حضور این گونه حفاظت شده و از مناطق پرپتانسیل به‌عنوان رویشگاه‌های جدید بهره‌گیری شود. این اطلاعات می‌تواند به برنامه‌ریزی‌های حفاظتی مؤثرتر و بهبود راهبردهای احیای این گونه کمک کند.

سیاسگزاری

از خانم مهندس شادی حبیبی بابت کمک در مراحل تجزیه و تحلیل این پژوهش تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

اقدام نیازمند بررسی بیشتر شرایط محیطی و همچنین نیازهای بوم‌شناختی گونه مدنظر است. شمشاد گونه‌ای رطوبت‌دوست و سایه‌پسند است و بیشتر در آشکوب پایین جنگل‌های هیرکانی استقرار دارد (Sagheb Talebi et al., 2014)، و توصیه می‌شود که رویشگاه‌های مناسب برای استقرار این گونه در ارتفاعات پایین و مناطق پررطوبت فراهم شود. در قسمت غربی استان گیلان با توجه به ارتفاع کم از سطح دریا و اقلیم بحری و نیز مقدار بارش سالانه و فصلی مناسب، شرایط مطلوب‌تر است و در نقش، مطلوبیت نیز مشهود است (Alipour et al., 2023). حفظ رویشگاه‌های شمشاد در مکان‌هایی که در نقشه با درجه مطلوبیت زیاد مشخص شده است به‌طور اکید توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

درک نیازهای بوم‌شناختی هر گونه و واکنش آن به تغییرات محیطی و اقلیمی، اولین قدم برای شناخت بهتر و حفاظت از گونه‌های با ارزش است. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل حداکثر آنتروپی در مدل‌سازی رویشگاه‌های بالقوه شمشاد هیرکانی، گونه بومی و در حال انقراض جنگل‌های هیرکانی، بسیار

References

- Abrha, H., Birhane, E., Hagos, H., & Manaye, A. (2018). Predicting suitable habitats of endangered *Juniperus procera* tree under climate change in Northern Ethiopia. *Journal of Sustainable Forestry*, 37(8), 842-853 doi: 10.1080/10549811.2018.1494000.
- Aertsen, W., Kint, V., van Orshoven, J., Özkan, K., & Muys, B. (2010). Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling*, 221(8). doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.01.007.
- Ahmad, A., Ahmad, S.R., Gilani, H., Tariq, A., Zhao, N., Aslam, R.W., & Mumtaz, F. (2021). A synthesis of spatial forest assessment studies using remote sensing data and techniques in Pakistan. *Forests*, 12(9), 1211.
- Alavi, S.J., Ahmadi, K., Hosseini, S.M., Tabari, M., & Nouri, Z. (2020). The importance of climatic, topographic, and edaphic variables in the distribution of yew species (*Taxus baccata* L.) and prioritization of areas for conservation and restoration in the north of Iran. *Iranian Journal of Forest*, 11(4), 477-492. (In Persian)
- Alipour, S., & Walas, L. (2023). The influence of climate and population density on *Buxus hyrcana* potential distribution and habitat connectivity. *Journal of Plant Research*, 136(4). doi: 10.1007/s10265-023-01457-5.

- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6). doi: 10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x.
- Asadi, H., Jalilvand, H., Tafazoli, M., & Hosseini, S. (2025). Modeling Suitable Habitats of *Parrotia persica* (DC.) C.A.Mey. in the Hyrcanian Forests Using Environmental Factors. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 33(1) 50-68 . doi: 10.22092/ijfpr.2024.366708.2173. (In Persian)
- Baldwin, R.A. (2009). Use of Maximum Entropy Modeling in Wildlife Research. *Entropy*, 11(4), 854-866. <https://doi.org/10.3390/e11040854>.
- Bale, C.L., Williams, J.B., & Charley, J.L. (1998). The impact of aspect on forest structure and floristics in some Eastern Australian sites. *Forest Ecology and Management*, 110(1-3). doi: 10.1016/S0378-1127(98)00300-4.
- Bradley, B.A., Olsson, A.D., Wang, O., Dickson, B.G., Pelech, L., Sesnie, S.E., & Zachmann, L.J. (2012). Species detection vs. habitat suitability: are we biasing habitat suitability models with remotely sensed data?. *Ecological Modelling*, 244, 57-64.
- Cayuela, L., Golicher, D.J., Newton, A.C., Kolb, M., de Albuquerque, F.S., Arets, E.J.M.M., Alkemade, J.R.M., & Pérez, A.M. (2009). Species Distribution Modeling in the Tropics: Problems, Potentialities, and the Role of Biological Data for Effective Species Conservation. *Tropical Conservation Science*, 2(3). doi: 10.1177/194008290900200304.
- Dolos, K., Bauer, A., & Albrecht, S. (2015). Site suitability for tree species: Is there a positive relation between a tree species' occurrence and its growth? *European Journal of Forest Research*, 134(4), 609-621. doi: 10.1007/s10342-015-0876-0.
- Dormann, C.F., Schymanski, S.J., Cabral, J., Chuine, I., Graham, C., Hartig, F., Kearney, M., Morin, X., Römermann, C., Schröder, B., & Singer, A. (2012). Correlation and process in species distribution models: Bridging a dichotomy. *Journal of Biogeography*, 39(12). doi: 10.1111/j.1365-2699.2011.02659.x.
- Elith, J.H., Graham, C.P., Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A.J., Hijmans, R., Huettmann, F.R., Leathwick, J., Lehmann, A., Li, J.G., Lohmann, L.A., Loiselle, B., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., McC.M.Overton, J., Townsend Peterson, A., Steven, J., Phillips-Karen Richardson, Ricardo Scachetti-Pereira, Robert E. Schapire, Jorge Soberón, Stephen Williams, Mary, S., Wisz, E., & Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, 29(2). doi: 10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x.
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 40(1), 677-697.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., & Yates, C.J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and distributions*, 17(1), 43-57.
- Farashi, A., & Shariati, M. (2017). Biodiversity hotspots and conservation gaps in Iran. *Journal for Nature Conservation*, 39, 37-57. doi: 10.1016/j.jnc.2017.06.003.
- Gama, M., Crespo, D., Dolbeth, M., & Anastácio, P. (2016). Predicting global habitat suitability for *Corbicula fluminea* using species distribution models: The importance of different environmental datasets. *Ecological Modelling*, 319, 163-169. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2015.06.001.
- Girma, A., de Bie, C.A.J.M., Skidmore, A.K., Venus, V., & Bongers, F. (2016). Hyper-temporal SPOT-NDVI dataset parameterization captures species distributions. *International Journal of Geographical Information Science*, 30(1). doi: 10.1080/13658816.2015.1082565.
- Guisan, A., & Zimmermann, N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, 135(2-3). doi: 10.1016/S0304-3800(00)00354-9.
- Habibi kilak, S., Alavi, S.J., & Esmailzadeh, O. (2019). Analyzing the ecological niche of *Buxus hyrcana* Pojark in the northern forests of Iran. *Forest and Wood Products*, 72(1), 21-31. (In Persian)

- Habibikilak, S., Alavi, S.J., & 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). doi: 10.30466/jfrd.2024.55623.1740. (In Persian)
- Hedayati Kaliji, S., Hosseini, S.M., Alavi, S.J., & Amiri, M. (2025). Current and future distribution modeling of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in Hyrcanian forests. *Forest Research and Development*, 10(4), 527-543. doi: 10.30466/jfrd.2023.54968.1698. (In Persian)
- Hesabi, A., Alavi, S.J., & Esmailzadeh, O. (2025a). From Data to Action: MaxEnt-Based Conservation Planning for *Buxus hyrcana* pojarck in the Hyrcanian Forest. *Environmental and Sustainability Indicators*, 28(1)1-13. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100865>.
- Hesabi, A., Alavi, S.J., & Esmailzadeh, O. (2025b). Evaluation of the accuracy of climatic data from the WorldClim and Chelsa databases in three northern provinces of Iran. *Forest Research and Development*, 11(1), 109-132. doi: 10.30466/jfrd.2025.55648.1743. (In Persian)
- Karimi, Y., Omid, E., & Nouraei, A.S. (2024). Ten-Year Monitoring of the Vegetation Composition of the Sisangan Forest Park before and after the *Cydalima perspectali* Outbreak. *Ecology of Iranian Forest*, 12(1), 1–15. doi: 10.61186/ifej.12.1.1. (In Persian)
- Khabazi, F., Esmailzadeh, O., & Najafi, A. (2019). Supervised classification of *Buxus hyrcana* plant communities using artificial neural network. *Iranian Journal of Forest*, 11(3), 387–400. (In Persian)
- Kumar, S., & Stohlgren, T.J. (2009). Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 1(4), 94-98.
- Lechner, A.M., Langford, W.T., Bekessy, S.A., & Jones, S.D. (2012). Are landscape ecologists addressing uncertainty in their remote sensing data?. *Landscape Ecology*, 27(9), 1249-1261. doi: 10.1007/s10980-012-9791-7.
- Ma, B., Zeng, W., Xie, Y., Wang, Z., Hu, G., Li, Q., Cao, R., Zhuo, Y., & Zhang, T. (2022). Boundary delineation and grading functional zoning of Sanjiangyuan National Park based on biodiversity importance evaluations. *Science of the Total Environment*, 825, 154068. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154068.
- Mahmoodi, S., Ahmadi, K., Zahravi, M., & Karami, O. (2022). Modeling of Iranian oak distribution in the southwest of Iran based on the presence-based approach Maximum Entropy (MaxEnt). *Forest Research and Development*, 8(2), 113-131. doi: 10.30466/jfrd.2021.53916.1576. (In Persian)
- Mirzaeizadeh, v., Mahdavi, A., Naji, A.R., & Ahmadi, H. (2022). Modeling the Distribution of Species *Pistacia atlantica* in Ilam Province using MaxEnt Methods. *Ecology of Iranian Forest*, 10(20), 129–139. doi: 10.52547/ifej.10.20.129. (In Persian)
- Moghbel Esfahani, F., Alavi, S.J., Hosseini, S.M., & Tabari Kochaksarai, M. (2023). Determining the habitat suitability of *Quercus castaneifolia* C. A. Mey In order to plan restoration using species distribution modeling. *Forest Research and Development*, 9(3), 419–436. doi: 10.30466/jfrd.2023.54577.1654. (In Persian)
- Mohammadi, A., Alavi, S.J., & Hosseini, S.M. (2019). Predicting the potential habitat of Wych elm (*Ulmus glabra* Huds.) using the Maxent model in Kheyrod forest. *Iranian Journal of Forest*, 10(4), 475-486. (In Persian)
- Moridpour, A., Namiranian, M., Alavi, S.J., & Etemad, V. (2023). Identifying the most important factors affecting the distribution of Ash (*Fraxinus excelsior* L.) and detect potential habitats areas in Kherudkanar Nowshahr forest. *Iranian Journal of Forest*, 15(2), 69–85. doi: 10.22034/ijf.2022.337489.1863. (In Persian)
- Muscarella, R., Galante, P.J., Soley-Guardia, M., Boria, R.A., Kass, J.M., Uriarte, M., & Anderson, R.P. (2014). ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating

- optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1198-1205. doi: 10.1111/2041-210X.12261.
- Naimi, B., Hamm, N.A.S., Groen, T.A., Skidmore, A.K., & Toxopeus, A.G. (2014). Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling?. *Ecography*, 37(2), 191-203. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.00205.x.
- Navarro-Cerrillo, R.M., Hernández-Bermejo, J.E., & Hernández-Clemente, R. (2011). Evaluating models to assess the distribution of *Buxus balearica* in southern Spain. *Applied Vegetation Science*, 14(2). doi: 10.1111/j.1654-109X.2010.01112.x.
- Norberg, A., Abrego, N., Blanchet, F.G., Adler, F.R., Anderson, B.J., Anttila, J., Araújo, M.B., Dallas, T., Dunson, D., Elith, J., Foster, S.D., Fox, R., Franklin, J., Godsoe, W., Guisan, A., O'Hara, B., Hill, N.A., Holt, R.D., Hui, F.K.C.M., Husby, J.A., Kålås, A., Lehikoinen, M., Luoto, H.K., Mod, G., Newell, I., Renner, T., Roslin, J., Soininen, W., Thuiller, J., Vanhatalo, D., Warton, M., White, N. E. Zimmermann, D., & Ovaskainen, O. (2019). A comprehensive evaluation of predictive performance of 33 species distribution models at species and community levels. *Ecological Monographs*, 89(3). e01370. doi: 10.1002/ecm.1370.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., & Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4). doi: 10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026.
- Phillips, S.J., & Dudík, M. (2008). Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*, 31(2). doi: 10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x.
- Phillips, S.J., Dudík, M., & Schapire, R.E. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. *Proceedings, Twenty-First International Conference on Machine Learning, ICML 2004*, 83p. doi: 10.1145/1015330.1015412.
- R Core Team. (2024). *A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria*. URL <https://www.R-project.org/>.
- Radosavljevic, A., & Anderson, R.P. (2014). Making better Maxent models of species distributions: Complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, 41(4), 629-643. doi: 10.1111/jbi.12227.
- Ramirez-Villegas, J., Cuesta, F., Devenish, C., Peralvo, M., Jarvis, A., & Arnillas, C.A. (2014). Using species distributions models for designing conservation strategies of Tropical Andean biodiversity under climate change. *Journal for Nature Conservation*, 22(5), 391-404. doi: 10.1016/j.jnc.2014.03.007.
- Sagheb Talebi, K., Sajedi, T., & Pourhashemi, M. (2014). *Forests of Iran: A treasure from the past, a hope for the future* (10). Springer, Dordrecht.
- Sarhangzadeh, J., & Elmi, M.R. (2020). Application of Maximum Entropy in Prediction of Common Yew (*Taxus baccata* L.) potential habitats in the Arasbaran biosphere reserve. *Iranian Journal of Forest*, 12(3), 359-375. (In Persian)
- Taleshi, H., Jalali, S.G., Alavi, S.J., Hosseini, S.M., Naimi, B., & 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. doi: 10.1007/s10113-019-01578-5.
- Valavi, R., Guillera-Aroita, G., Lahoz-Monfort, J.J., & Elith, J. (2022). Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code. *Ecological Monographs*, 92(1), e01486. doi: 10.1002/ecm.1486.
- Vignali, S., Barras, A.G., Arlettaz, R., & Braunisch, V. (2020). SDMtune: An R package to tune and evaluate species distribution models. *Ecology and Evolution*, 10(20), 11488-11506. doi: 10.1002/ece3.6786.

- Wani, Z.A., Satish, K.V., Islam, T., Dhyani, S., & Pant, S. (2023). Habitat suitability modelling of *Buxus wallichiana* Baill.: an endemic tree species of Himalaya. *Vegetos*, 36(2), 583-590. doi: 10.1007/s42535-022-00428-w.
- Wani, Z., Khan, S., Satish, K., Haq, S., Pant, S., & Siddiqui, S. (2024). Ensemble modelling reveals shrinkage of suitable habitat for Himalayan Boxwood (*Buxus wallichiana* Bail.) under climate change – implications for conservation. *Phytocoenologia*, 52, 1-55. doi: 10.1127/phyto/2024/0427.
- Ye, P.C., Zhang, G.F., & Wu, J.Y. (2020). Hotspots and conservation gaps: A case study of key higher plant species from Northwest Yunnan, China. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01005.
- Yebeyen, D., Nemomissa, S., Hailu, B.T., Zewdie, W., Sileshi, G.W., Rodríguez, R.L., & Woldie, T.M. (2022). Modeling and Mapping Habitat Suitability of Highland Bamboo under Climate Change in Ethiopia. *Forests*, 13(6), 859-871. doi: 10.3390/f13060859.
- Yudaputra, A., Fijridiyanto, I.Z.U., & Cropper, W.P. (2020). The potential impact of climate change on the distribution pattern of *Eusideroxylon zwageri* (Bornean ironwood) in Kalimantan, Indonesia. *Biodiversitas*, 21(1), 326-333. doi: 10.13057/biodiv/d210140.
- Zimmermann, N. E., Edwards Jr, T.C., Graham, C.H., Pearman, P.B., & Svenning, J.C. (2010). New trends in species distribution modelling. *Ecography*, 33(6), 985-989.



The role of bioclimatic and topographic variables in the species distribution of Hyrcanian boxwood (*Buxus hyrcana* Pojark.) in the forests of the Caspian region

A. Hesabi¹, S.J. Alavi^{2*}, and O. Esmailzadeh²

¹Ph.D. Student of Forest Management, Dept. of Forest Science, Faculty of Natural Resources and marine science, Tarbiat Modares University, Nur, Mazandaran, I. R. Iran.

²Associate Prof., Dept. of Forest Science, Faculty of Natural Resources and marine science, Tarbiat Modares University, Nur, Mazandaran, I. R. Iran

²Associate Prof., Dept. of Forest Science, Faculty of Natural Resources and marine science, Tarbiat Modares University, Nur, Mazandaran, I. R. Iran

(Received: 28 April 2025; Accepted: 18 October 2025)

Abstract

Introduction: Understanding the relationship between a species or community and its environment is a fundamental concept in ecology and conservation. One of the common approaches for identifying areas of high biodiversity is modeling the potential distribution of key and endangered species. *Buxus hyrcana*, one of the few evergreen broadleaf trees in the Hyrcanian forests, is among such species. However, in recent years, the outbreak of leaf blight fungal disease and the spread of the box tree moth have posed serious challenges to the conservation status of this species in northern Iranian forests. The main objective of this research is to identify the variables affecting the distribution of this species using Chelsa's bioclimatic variables in the Hyrcanian forest area.

Materials and Methods: In this study, a total of 570 presence records of *Buxus hyrcana* were prepared for implementing the Maxent model. Chelsa Bioclimatic variables as well as primary and secondary topographic variables were tested for multicollinearity using the Variance Inflation Factor (VIF). The data were spatially thinned at a one-kilometer resolution. Seventy percent of the samples (80 records) were used as training data for model development, while the remaining 30% (34 records) were reserved for testing and validation. A total of 10,000 background points were generated, and the modeling process was repeated 10 times. The Maxent model was implemented in R programming language, and optimal model settings were selected based on threshold-dependent evaluation metrics (i.e., omission rate) to identify parameter configurations that maximize average validation performance. Model performance was assessed using the AUC and TSS metrics.

Results: The results showed that the model performed well in predicting the distribution of *Buxus hyrcana*, with an AUC value of 0.93 and a TSS value of 0.74. The contribution analysis revealed that two variables—mean temperature of the wettest quarter (Bio8) and the slope length and steepness factor (LS_Factor)—accounted for approximately 70% of the species' distribution. Response curves were generated to show the species' reaction to influential variables, and a habitat suitability map was produced for *Buxus hyrcana* in the Hyrcanian forests. The model identified the most suitable habitats for this species to be located in Mazandaran province and the Hyrcanian border regions.

Conclusion: According to the findings of this study, *Buxus hyrcana*, as a moisture-loving species, requires temperate climatic conditions and prefers habitats with gentle slopes. The maps generated in this study identified new areas with high potential for suitable habitats where the species is currently absent. These areas could be considered as priority sites for future restoration and population expansion programs. It is recommended that future studies examine the impacts of climate change on potential habitats of this and other endangered species in a comprehensive manner. Such efforts can contribute to the development of more flexible and sustainable strategies for biodiversity conservation under changing climatic conditions. The information derived from this research can support more targeted conservation planning and enhance management strategies for protecting threatened species.

Keywords: Habitat Suitability, Hyrcanian forests, Maxent, Species Distribution Modeling.