

Research Paper

Predicting Potential Distribution of *Quercus infectoria* Oliv. in Zagros Forests Under Climate Change Scenarios

Alireza Dosti¹, Mehdi Heydari^{*2}, Seyed Jalil Alavi³, Reza Omidipour⁴ and Hooman Latifi⁵

1- Ph.D. student of forest sciences, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, I.R. Iran. (dousti.alireza634@gmail.com)

2-* (Corresponding author) Professor, Department of Forest science, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, I. R. Iran. (m.heidari@ilam.ac.ir)

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

4- Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture, Ilam University, Ilam, I. R. Iran. (r.omidipour@yahoo.com)

5- Associate professor, Department of Photogrammetry and Remote Sensing, School of Surveying and Geospatial Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, I. R. Iran. (hooman.latifi@kntu.ac.ir)

Received: 18 July 2025

Accepted: 28 September 2025

Extended Abstract

Background and Objective: The Zagros forests, as one of Iran's most vital ecosystems, play an unparalleled role in maintaining biodiversity and environmental sustainability. However, these forests, predominantly composed of oak species, have in recent decades been affected by climate change, recurrent droughts, and destructive human activities, leading to the phenomenon known as "oak decline." Among these species, Aleppo oak (*Quercus infectoria* Oliv.) holds special ecological and economic value, particularly for the production of "Mazo" used in pharmaceutical and cosmetic industries. The future of this key species is increasingly threatened by climate change and land-use change. Given the lack of comprehensive studies predicting its distribution using modern algorithms, this study was designed with two main objectives: (1) to predict potential distribution changes of Aleppo oak under climate scenarios for 2050 and 2070 using MaxEnt and Random Forest (RF) models, and (2) to compare model performances and identify key environmental variables to provide a scientific basis for conservation strategies.

Material and Methods: The study area comprised the Northern Zagros ecoregion, spanning parts of Iran, Iraq, and Turkey. For modeling, 246 species presence points (collected from field surveys and databases) and 29 environmental variables (including climatic, topographic, edaphic, and land cover factors) were used. Presence points were thinned to a minimum distance of one kilometer, and 1,000 pseudo-absence points were generated. Future climate data were obtained from the MIROC6 General Circulation Model (GCM) for two time horizons, 2050 and 2070, under two scenarios: SSP2-4.5 (medium) and SSP5-8.5 (pessimistic). After removing highly collinear variables (VIF>10) using the Variance Inflation Factor test, 17 variables were selected for final modeling. Models were implemented using MaxEnt and RF algorithms in the R environment with the biomod2 package. Model stability was evaluated via 10-fold cross-validation, dividing data into 80% for training and 20% for testing. Model performance was assessed using ROC, TSS, and Kappa statistics.

Results: Evaluation results showed that both algorithms exhibited very high accuracy. The RF model achieved near-perfect performance with a mean ROC of 0.965 and TSS of 0.860, while the MaxEnt model also performed excellently with a mean ROC of 0.885 and TSS of 0.718. Variable importance analysis indicated that, for MaxEnt, precipitation seasonality (Bio15) and annual precipitation (Bio12) were the most influential variables. In the RF model, importance was more balanced, with annual precipitation (Bio12), soil organic carbon, and precipitation seasonality (Bio15) being the top factors. Future predictions revealed alarming outcomes. Under the pessimistic SSP5-8.5 scenario by 2070, the RF model projected an 88.4% reduction in suitable habitat, while MaxEnt predicted a 73.0% decline. Newly emerging suitable habitats were minimal compared to the area lost. Spatial analysis indicated that remaining habitats would be limited to small, isolated patches at higher elevations. The species' optimal elevational range is expected to shift from the current 1,100–1,800 m to 1,500–2,500 m in the future, indicating a forced upward migration of 400–700 meters.

Conclusion: The findings indicate that Aleppo oak faces a serious threat from climate change. Severe habitat loss and forced upward migration, coupled with stands fragmentation, place the long-term survival of the species at serious risk. These results emphasize the urgent need for integrated management and conservation strategies. Key recommendations include: (1) protecting climate refugia by identifying and safeguarding high-elevation areas that remain suitable in the future; (2) Adaptive restoration through afforestation programs in high-elevation areas predicted to be suitable habitats in the future; (3) reducing human pressures such as overgrazing to enhance ecosystem resilience; and (4) establishing a gene bank to preserve genetic resources of at-risk populations. This study provides a scientific foundation for effective conservation planning and sustainable management of the Zagros forest ecosystems.

Keywords: Climate change, Environmental variables, Modeling, Random Forest, Species distribution.

How to Cite This Article: Dosti, A., Heydari, M., Alavi, S. J., Omidipour, R., and Latifi, H. (2025). Predicting Potential Distribution of *Quercus infectoria* Oliv. in Zagros Forests Under Climate Change Scenarios. Forest Research and Development, 11(3), 421-444. DOI: [10.30466/jfrd.2025.56374.1765](https://doi.org/10.30466/jfrd.2025.56374.1765)



Copyright ©2024 Dosti et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

پیش‌بینی پراکنش بالقوه گونه بلوط دارمازو (*Quercus infectoria* Oliv.) در جنگل‌های زاگرس تحت سناریوهای تغییر اقلیم

علیرضا دوستی^۱، مهدی حیدری^{۲*}، سیدجلیل علوی^۳، رضا امیدپور^۴ و هومن لطیفی^۵

۱- دانشجوی دکتری علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. (dousti.alireza634@gmail.com)

۲- استاد، گروه علوم جنگل، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. (m.heidari@ilam.ac.ir)

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

۴- استادیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران. (r.omidipour@yahoo.com)

۵- دانشیار، گروه فتوگرامتری و سنجش‌ازدور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران. (hooman.latifi@kntu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۷

چکیده

مقدمه و هدف: جنگل‌های زاگرس به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین بوم‌سازگان‌های ایران، نقش بی‌بدیلی در حفظ تنوع زیستی و پایداری محیطی دارند. با این حال، این جنگل‌ها که بیشتر از گونه‌های بلوط تشکیل شده‌اند، در دهه‌های اخیر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های مکرر، فعالیت‌های انسانی مخرب و پدیده زوال بلوط روبرو شده‌اند. در این میان، بلوط دارمازو (*Quercus infectoria* Oliv.) به‌دلیل ارزش بوم‌شناسی و اقتصادی بالا (به‌ویژه در تولید "مازو" برای صنایع دارویی و آرایشی) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آینده این گونه کلیدی با تغییرات اقلیمی و تغییر کاربری اراضی تهدید مورد تهدید قرار گرفته است. با توجه به نبود پژوهشی جامع برای پیش‌بینی پراکنش این گونه با استفاده از الگوریتم‌های نوین، این بررسی با دو هدف اصلی طراحی شد: (۱) پیش‌بینی تغییرات پراکنش بالقوه بلوط دارمازو تحت سناریوهای اقلیمی برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ با استفاده از مدل‌های حداکثر آنتروپی (MaxEnt) و جنگل تصادفی (RF و ۲) مقایسه عملکرد مدل‌ها و شناسایی متغیرهای محیطی کلیدی برای ارائه مبنای علمی برای تدوین استراتژی‌های حفاظتی.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد بررسی، ناحیه رویشی زاگرس شمالی (شامل بخش‌هایی از ایران، عراق و ترکیه) بود. برای مدلسازی، از ۲۴۶ نقطه حضور گونه (جمع‌آوری شده از پیمایش‌های میدانی و پایگاه‌های داده) و ۲۹ متغیر محیطی (اقلیمی، توپوگرافی، خاک‌شناسی و پوشش اراضی) استفاده شد. داده‌های حضور با حداقل فاصله یک کیلومتر تنک شدند و ۱۰۰۰ نقطه شبه‌عدم‌حضور نیز تولید شد. داده‌های اقلیمی آینده از مدل گردش عمومی جو MIROC6 (GCM) برای دو افق زمانی ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰، تحت دو سناریوی

SSP2-4.5 (میانی) و SSP5-8.5 (بدبینانه) استخراج شد. پس از حذف متغیرهای دارای هم خطی بالا ($VIF > 10$) با استفاده از آزمون عامل تورم واریانس، ۱۷ متغیر برای مدلسازی نهایی انتخاب شدند. مدلسازی با الگوریتم‌های MaxEnt و RF در محیط نرم افزار R و با بسته biomod2 انجام شد. برای ارزیابی پایداری مدل‌ها، از روش اعتبارسنجی متقاطع با ۱۰ تکرار (تقسیم داده‌ها به ۸۰ درصد آموزشی و ۲۰ درصد ارزیابی) استفاده شد. عملکرد مدل‌ها با شاخص‌های آماری ROC, TSS و Kappa ارزیابی شدند.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی نشان داد که هر دو الگوریتم دقت بسیار بالایی دارند. مدل جنگل تصادفی (RF) با میانگین $ROC = 0.965$ و $TSS = 0.860$ ، عملکردی بی نقص داشت. مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) نیز با میانگین $ROC = 0.885$ و $TSS = 0.718$ ، عملکردی عالی ثبت کرد. در تحلیل اهمیت متغیرها، برای مدل MaxEnt، فصلی بودن بارش (Bio15) و بارش سالانه (Bio12) بیشترین تأثیر را داشتند. در مدل RF، توزیع اهمیت متعادل تر بود و بارش سالانه (Bio12)، کربن آلی خاک و فصلی بودن بارش (Bio15) مهم ترین عوامل بودند. پیش بینی‌ها برای آینده نتایج نگران کننده ای را نشان دادند. تحت سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 تا سال ۲۰۷۰، مدل RF کاهش ۸۸/۴ درصدی و مدل MaxEnt کاهش ۷۳/۰ درصدی مساحت زیستگاه مناسب را پیش بینی کردند. همچنین مشخص شد که مساحت رویشگاه جدید ایجاد شده در آینده، در مقایسه با مساحت ازدست رفته، بسیار ناچیز است. تحلیل مکانی نشان داد که زیستگاه‌های باقی مانده به لکه‌های کوچک و ایزوله در ارتفاعات بالاتر محدود خواهند شد. محدوده ارتفاعی بهینه گونه نیز از ۱۸۰۰-۱۱۰۰ متر فعلی به ۲۵۰۰-۱۵۰۰ متر در آینده جابجا خواهد شد که به معنای یک جابجایی اجباری به میزان ۴۰۰ تا ۷۰۰ متر به سمت ارتفاعات بالاتر است.

نتیجه گیری: یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که گونه بلوط دارمازو با تهدیدی جدی ناشی از تغییرات اقلیمی روبرو است. کاهش شدید مساحت زیستگاه و جابجایی اجباری به ارتفاعات بالاتر، همراه با تکه تکه شدن توده‌ها، بقای بلندمدت این گونه را در معرض خطر جدی قرار داده است. این نتایج بر ضرورت اتخاذ فوری راهبردهای مدیریتی و حفاظتی یکپارچه تأکید دارد. پیشنهادهای کلیدی شامل موارد زیر است: (۱) حفاظت از پناهگاه‌های اقلیمی: شناسایی و حفاظت ویژه از مناطق مرتفعی که در آینده زیستگاه مناسب تر این گونه هستند. (۲) احیای تطبیقی: اجرای برنامه‌های جنگلکاری در مناطقی که مدل‌ها به عنوان زیستگاه‌های مناسب آینده پیش بینی کرده‌اند. (۳) کنترل فشارهای انسانی: کاهش فعالیت‌های مخرب مانند چرای بی رویه برای افزایش تاب آوری بوم سازگان. (۴) ایجاد بانک ژن: حفظ ذخایر ژنتیکی جمعیت‌های در معرض خطر از طریق ایجاد بانک ژن و بذر. این پژوهش مبنایی علمی برای تدوین راهبردهای حفاظتی مؤثر و مدیریت پایدار بوم سازگان جنگلی زاگرس فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، مدلسازی، جنگل تصادفی، پراکنش گونه‌ای، متغیرهای محیطی.

مقدمه

جنگل‌ها به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین و پویاترین بوم-سازگان‌های خشکی، پشتیبان اساسی زندگی روی کره زمین محسوب می‌شوند. این بوم‌سازگان‌ها، فراتر از مجموعه‌ای از درختان، یک شبکه درهم‌تنیده از روابط بوم‌شناسی بین اجزای زنده و غیرزنده هستند (Hartmann et al., 2022; Zhang et al., 2024). اهمیت جنگل‌ها در مقیاس جهانی غیرقابل انکار است؛ آنها با تولید اکسیژن، جذب و ذخیره‌سازی مقادیر عظیمی از کربن اتمسفری، نقش کلیدی در تنظیم اقلیم جهانی ایفا می‌کنند و به‌عنوان کانون‌های اصلی تنوع زیستی، زیستگاه میلیون‌ها گونه را فراهم می‌آورند (Brockerhoff et al., 2017). علاوه بر این، خدمات بوم‌سازگانی جنگل‌ها شامل حفاظت از منابع آب، جلوگیری از فرسایش خاک، و فراهم آوردن منابع حیاتی مانند چوب و گیاهان دارویی، زیربنای اقتصاد و معیشت جوامع محلی و جهانی است (Mori et al., 2017; Dalir et al., 2025).

کشور ایران، با وجود قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی، به واسطه تنوع اقلیمی و وجود رشته‌کوه‌های عظیم البرز و زاگرس، میزبان جنگل‌های تاریخی و ارزشمندی است. با این حال، این میراث طبیعی با تهدیدات جدی روبرو است. شواهد تاریخی نشان می‌دهد که وسعت جنگل‌های ایران در گذشته بسیار بیشتر از سطح فعلی آنها بوده است، اما امروزه تنها حدود ۱۲ میلیون هکتار از این جنگل‌ها باقی‌مانده است و متأسفانه روند نگران‌کننده تخریب این جنگل‌ها به‌ویژه در ناحیه رویشی زاگرس همچنان ادامه دارد (Moradi and Shabanian, 2023; Japelaghi et al., 2022). در این میان، جنگل‌های زاگرس که از شمال غربی تا جنوب غربی ایران امتداد دارند، با وسعتی

حدود پنج میلیون هکتار، یکی از حیاتی‌ترین بوم-سازگان‌های کشور به‌شمار می‌روند (Sagheb Talebi et al., 2014). این جنگل‌ها که بیشتر از گونه‌های مختلف بلوط و برخی گونه‌های همراه دیگر تشکیل شده‌اند، نقش بی‌بدیلی در معیشت ساکنان محلی و حفاظت از آب و خاک ایفا می‌کنند.

در ناحیه رویشی زاگرس شمالی که دارای اقلیم نیمه‌مرطوب و خشک‌تری نسبت به زاگرس جنوبی است، گونه بلوط دارمازو (*Quercus infectoria* Oliv.) حضور دارد (Zolfaghari et al., 2021). این گونه علاوه بر نقش بوم‌شناختی ارزشمند، از اهمیت اقتصادی و دارویی بالایی برخوردار است. گال‌های ایجادشده روی شاخه‌های جوان این درخت، منبع اصلی تولید "مازو" است؛ ماده‌ای غنی از تانن که قرن‌هاست در طب سنتی و صنایع مدرن مانند صنایع آرایشی کاربرد دارد. با این وجود، بقا و آینده این گونه مانند دیگر گونه‌های بلوط این ناحیه رویشی ارزشمند توسط دو تهدید هم‌زمان و تشدیدشونده یعنی تغییرات اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی در معرض تهدید قرار گرفته است (Valavi et al., 2019; Mirhashemi et al., 2023; Mehri et al., 2024).

طبق گزارش‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC)، تغییر اقلیم پدیده‌ای آشکار و اجتناب‌ناپذیر است که سبب افزایش دمای جهانی و دگرگونی در الگوهای بارش شده است (Pachauri et al., 2014). این پدیده در منطقه زاگرس خود را به شکل خشکسالی‌های درازمدت و مکرر نشان داده و عامل اصلی پدیده‌ای ویرانگر به نام "زوال بلوط" شناخته می‌شود (Shiravand and Hosseini, 2020). بررسی‌های فیزیولوژیک نیز نشان داده است که درختان بالغ بلوط در واکنش به تنش خشکی، با افزایش پرولین و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی برای بقا تلاش

می‌کنند که نشان‌دهنده حساسیت بالای این گونه به کمبود آب است (Jafarian et al., 2024). در کنار این بحران، فعالیت‌های انسانی مانند جنگل‌زدایی برای توسعه کشاورزی، چرای بی‌رویه دام و قطع درختان برای تولید هیزم منجر به تجزیه و قطعه‌قطعه شدن شدید رویشگاه‌ها شده است (Soltani et al., 2014). این دو عامل فشاری هم‌افزا بر بوم‌سازگان وارد می‌کنند؛ به‌طوری که یک زیستگاه چندپاره، توانایی گونه‌ها برای مهاجرت و سازگاری با شرایط جدید اقلیمی را به شدت محدود می‌سازد (Tilman and Lehman, 2001). در چنین شرایطی، نیاز به ابزارهایی برای پیش‌بینی آینده و تدوین راهبردهای مدیریتی بیش از پیش احساس می‌شود.

مدل‌های پراکنش گونه‌ای (SDMs) به‌عنوان یک رویکرد قدرتمند در علوم بوم‌شناسی و حفاظت از بوم‌سازگان‌ها، این امکان را فراهم می‌آورند (Ahmadi et al., 2023; Mirhashemi et al., 2023; Khwarahm, 2020). این مدل‌ها با برقراری رابطه آماری میان حضور گونه و متغیرهای محیطی، می‌توانند مطلوبیت یک زیستگاه را پیش‌بینی کنند. اهمیت این مدل‌ها زمانی دوچندان می‌شود که می‌توان با وارد کردن داده‌های سناریوهای اقلیمی آینده، نقشه پراکنش احتمالی گونه‌ها را در آینده آتی تهیه کرد (Liu et al., 2022; Zhao et al., 2025).

با این حال، باوجود اهمیت بوم‌شناختی و اقتصادی بالای بلوط دارمازو، تاکنون پژوهش‌های جامعی که به‌طور خاص به پیش‌بینی پراکنش این گونه تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین بپردازد، انجام نشده است. این شکاف پژوهشی، برنامه‌ریزی برای حفاظت از این گونه ارزشمند را با چالش مواجه کرده است. نوآوری اصلی این پژوهش، پرکردن همین شکاف علمی است. در این

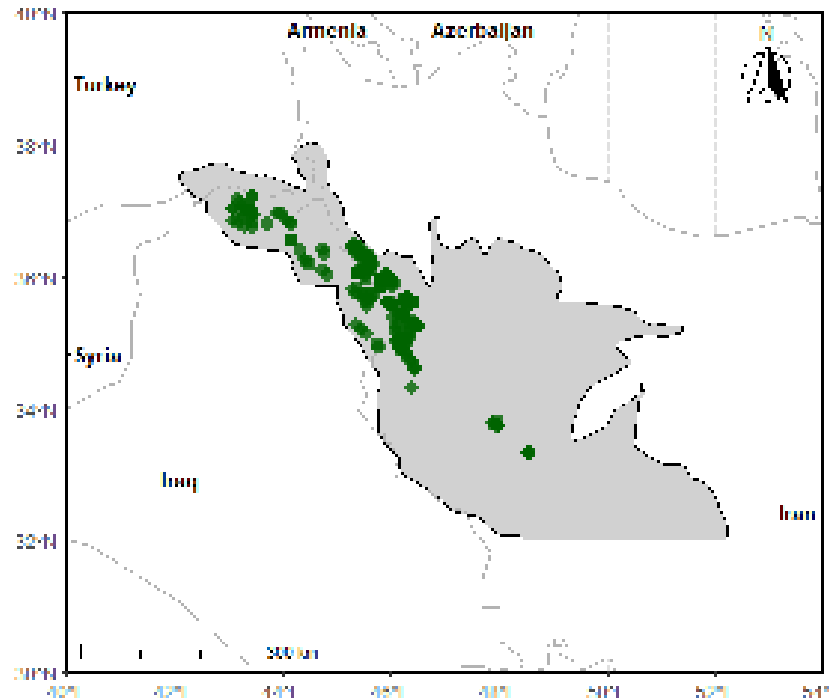
پژوهش، با به‌کارگیری دو الگوریتم پرکاربرد حداکثر آنتروپی (MaxEnt) و جنگل تصادفی (RF)، تأثیرات تغییر اقلیم بر آشیان بوم‌شناسی بلوط دارمازو به‌صورت کمی و کیفی ارزیابی شد. این دو مدل به دلیل دقت و کارایی بالا در بررسی‌های بوم‌شناسی کاربرد گسترده‌ای دارند (Bai et al., 2024; Roebroek et al., 2025). هدف این پژوهش پیش‌بینی تغییرات آتی در پراکنش گونه و مقایسه کارایی دو رویکرد مدلسازی برای ارائه تحلیلی جامع و قابل اتکاست. نتایج حاصل، مبنایی علمی و ضروری برای تدوین استراتژی‌های حفاظتی هدفمند، شناسایی پناهگاه‌های اقلیمی بالقوه و مدیریت پایدار این گونه کلیدی در بوم‌سازگان جنگلی زاگرس فراهم خواهد آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد پژوهش

منطقه مورد پژوهش، ناحیه بوم‌شناختی زاگرس است که گستره‌ای شامل بخش‌هایی از غرب ایران (استان‌های آذربایجان غربی، لرستان، کردستان و کرمانشاه)، شمال عراق (استان‌های اربیل، سلیمانیه و دهوک) و جنوب شرقی ترکیه (استان‌های حکاری و شرناخ) را پوشش می‌دهد. این منطقه که بین عرض‌های جغرافیایی ۳۵ تا ۳۸ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۲ تا ۵۲ درجه شرقی واقع شده و مساحت کل آن ۶/۲۴۲۲۵۴ کیلومتر مربع برآورد شد. این ناحیه با ویژگی‌های توپوگرافیک متنوع شامل رشته‌کوه‌های مرتفع، دره‌های عمیق و دشت‌های مرتفع شناخته می‌شود. دامنه ارتفاعی در منطقه مورد بررسی از ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر متغیر است. آب و هوای منطقه بیشتر از نوع مدیترانه‌ای با زمستان‌های سرد و پربرف و تابستان‌های گرم و خشک است. میانگین بارش سالانه بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر است. این شرایط اقلیمی و توپوگرافی متنوع،

بستری بهینه برای شکل‌گیری جنگل‌های بلوط فراهم آورده که گونه دارمازو یکی از اجزای اصلی آن است (Moloudia and Shokati, 2018).



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی منطقه مورد بررسی در ناحیه زاگرس

Figure 1. Geographic location map of the study area in the Zagros region

tidyverse برای پردازش و بصری‌سازی داده‌ها (Wickham et al., 2019) اشاره کرد.

داده‌های مربوط به حضور گونه دارمازو از منابع مختلفی شامل پیمایش‌های میدانی هدفمند، نقشه‌های ممیزی جنگل، داده‌های موجود در ادارات منابع طبیعی و بررسی‌های پیشین جمع‌آوری شد. داده‌ها و موقعیت رویشگاه بلوط دارمازو در اقلیم کردستان عراق با مساعدت دکتر Nabaz R. Khwarahm از دانشگاه سلیمانیه و بر اساس پایگاه داده موجود فراهم شد. همچنین، موقعیت و اطلاعات مربوط به رویشگاه‌های این گونه در ایران با همکاری اداره‌های منابع طبیعی استان‌های مربوطه و از طریق طرح‌های آماربرداری انجام‌شده به‌دست آمد. علاوه بر این، موقعیت و شرایط

جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های زیستی (حضور و عدم حضور) دارمازو

این پژوهش با رویکردی کمی و با استفاده از تکنیک‌های مدلسازی مکانی برای پیش‌بینی پراکنش گونه بلوط دارمازو طراحی و اجرا شد. تمامی مراحل پردازش داده‌ها، مدلسازی و تحلیل نتایج در محیط نرم‌افزار آماری R نسخه ۴.۰.۰.۲ و با استفاده از بسته‌های تخصصی انجام شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به biomod2 برای مدلسازی پراکنش گونه (Thuiller et al., 2016)، terra و raster برای پردازش داده‌های مکانی (Hijmans, 2020)، sf برای کار با داده‌های برداری (Pebesma, 2018)، usdm برای تحلیل هم‌خطی متغیرها (Naimi et al., 2014) و مجموعه

۳- متغیرهای خاک‌شناسی (Edaphic): شامل متغیرهایی نظیر pH، درصد رس، شن و کربن آلی خاک که از پایگاه داده جهانی SoilGrids تهیه شدند (Hengl et al., 2017).

۴- متغیر پوشش/کاربری اراضی که این لایه از پروژه ESA CCI Land Cover استخراج شد (CCI, 2017). برای یکسان‌سازی داده‌های مکانی، تمام لایه‌های محیطی که دارای وضوح‌های مکانی متفاوتی بودند (مانند داده‌های خاک با وضوح ۲۵۰ متر)، با استفاده از توابع موجود در بسته نرم‌افزاری terra (Hijmans, 2023) در محیط R، به یک وضوح مکانی مشترک (۱ کیلومتر) و سیستم مختصات یکسان (WGS84) بازنمونه‌برداری (resample) شدند. این فرآیند تضمین می‌کند که تمامی پیکسل‌ها در لایه‌های مختلف پیش‌بینی کننده، از نظر مکانی با یکدیگر هم‌پوشانی دقیق داشته باشند که برای اجرای صحیح مدل‌های پراکنش گونه ضروری است. سپس، به منظور جلوگیری از مشکل هم‌خطی چندگانه (Multicollinearity) که به دلیل همبستگی بالا میان متغیرهای پیش‌بینی کننده رخ می‌دهد و می‌تواند دقت و قابلیت تفسیر مدل را کاهش دهد، از آزمون عامل تورم واریانس (VIF) استفاده شد. این آزمون، مقدار همبستگی هر متغیر مستقل را با تمام متغیرهای مستقل دیگر ارزیابی می‌کند. در یک فرآیند گام به گام، متغیرهایی که دارای مقدار VIF بالاتر از آستانه استاندارد ۱۰ بودند، به صورت تکراری حذف شدند تا در نهایت مجموعه‌ای شامل ۱۵ متغیر با کمترین مقدار هم‌خطی برای ورود به مدل‌های نهایی انتخاب شدند (Chatterjee and Hadi, 2015).

برای پیش‌بینی آینده، از داده‌های اقلیمی مدل گردش عمومی جو MIROC6 برای دو افق زمانی ۲۰۵۰ (میانگین ۲۰۶۰-۲۰۴۱) و ۲۰۷۰ (میانگین ۲۰۸۰-۲۰۶۱) استفاده شد. برای دوره زمانی حال

شمار قابل توجهی از رویشگاه‌های شاخص این گونه توسط تیم تحقیقاتی این پژوهش به صورت میدانی بررسی و کنترل شد. در مجموع موقعیت مکانی ۲۴۶ نقطه حضور گونه به دست آمد. برای کاهش اثر همبستگی مکانی و جلوگیری از سوگیری مدل ناشی از تراکم نمونه‌برداری در برخی مناطق، داده‌ها با استفاده از تابع thin از پکیج spThin در نرم‌افزار R تنک‌سازی شدند (Aiello-Lammens et al., 2015)، به طوری که کمینه فاصله بین هر دو نقطه یک کیلومتر باشد تا با وضوح مکانی لایه‌های اقلیمی هماهنگ شود. از آنجایی که جمع‌آوری داده‌های "عدم حضور واقعی" (تأیید قطعی اینکه یک گونه در مکانی وجود ندارد) در عمل بسیار دشوار و اغلب غیرممکن است، در این پژوهش از نقاط شبه عدم حضور (Absence Pseudo) استفاده شد. این نقاط به تعداد ۱۰۰۰ عدد و به صورت تصادفی از مناطقی که در آن‌ها حضور گونه ثبت نشده بود، توسط پکیج biomod2 تولید شدند تا پس‌زمینه محیطی منطقه را برای مدلسازی فراهم کنند.

متغیرهای محیطی و سناریوهای اقلیمی

برای مدلسازی پراکنش گونه، مجموعه‌ای جامع از ۲۹ متغیر پیش‌بینی کننده محیطی در چهار دسته اصلی تهیه شد:

۱- متغیرهای اقلیمی (Bioclimatic): شامل ۱۹ متغیر (Bio1 تا Bio19) که از پایگاه داده جهانی WorldClim استخراج شدند و جنبه‌های مختلف دما و بارش را توصیف می‌کنند (Hijmans et al., 2005).

۲- متغیرهای توپوگرافی (Topographic): شامل ارتفاع، شیب و جهت شیب، از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استخراج شدند. این داده‌ها با تفکیک‌پذیری مکانی (دقت) ۳۰ متر، بر اساس محصولات ماهواره‌ای SRTM تهیه شده و از پایگاه داده سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS) دریافت شدند (Farr et al., 2007).

حاضر، از مجموعه داده‌های استاندارد WorldClim با تفکیک‌پذیری مکانی ۳۰ ثانیه قوسی (تقریباً یک کیلومتر) بهره گرفته شد (Hijmans et al., 2005). دوره ۲۰۵۰ به‌عنوان یک افق زمانی میان‌مدت، برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری‌های تطبیقی در آینده نزدیک دارای اهمیت است. دوره ۲۰۷۰ نیز به‌عنوان یک افق زمانی بلندمدت، چشم‌انداز کامل‌تری از پیامدهای شدیدتر و پایدارتر تغییر اقلیم را نشان می‌دهد که برای تدوین راهبردهای حفاظتی بلندمدت و ارزیابی بقای گونه‌ها ضروری است.

این داده‌ها بر اساس نسل جدید سناریوهای مورد استفاده در گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) تهیه شدند که ترکیبی از "مسیرهای مشترک اجتماعی-اقتصادی" و اهداف نیروی تابشی (Radiative Forcing) هستند. روایت‌های مختلفی از آینده توسعه جهانی را بدون در نظر گرفتن سیاست‌های جدید اقلیمی توصیف می‌کنند. در این پژوهش، دو سناریوی متضاد برای پوشش طیف وسیعی از آینده‌های محتمل انتخاب شد:

۱- SSP2-4.5 (سناریوی میانی): این سناریو، که بیشتر به‌عنوان "مسیر میانی" شناخته می‌شود، آینده‌ای را توصیف می‌کند که در آن روندهای اجتماعی، اقتصادی و فناوری به‌طور چشمگیری از الگوهای تاریخی منحرف نمی‌شوند. در این مسیر، توسعه جهانی ادامه می‌یابد اما با نابرابری‌هایی همراه است و سیاست‌های اقلیمی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اجرا می‌شوند، اما این اقدامات برای رسیدن به اهداف بلندپروازانه اقلیمی کافی نیستند. از نظر کمی، عدد ۴/۵ در این سناریو به نیروی تابشی (تغییر در تراز انرژی زمین) تقریبی معادل ۴/۵ وات بر مترمربع تا سال ۲۱۰۰ اشاره دارد. این مسیر، افزایش دمای جهانی را تا پایان

قرن در محدوده ۱/۰ تا ۲/۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوران پیش از صنعتی‌شدن پیش‌بینی می‌کند (Thomson et al., 2011). این سناریو فرض می‌کند که غلظت دی‌اکسیدکربن در جو به حدود ۶۵۰ ppm می‌رسد و جمعیت جهان حدود ۹/۵ میلیارد نفر خواهد بود. این مسیر نمایانگر یک آینده با اقدامات اقلیمی متوسط و چالش‌های متوسط برای کاهش انتشار و سازگاری است (Riahi et al., 2017).

۲- SSP5-8.5 (سناریوی بدبینانه): این سناریو، که به‌عنوان "مسیر توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی" شناخته می‌شود، بدبینانه‌ترین حالت ممکن را ترسیم می‌کند. این مسیر، جهانی با رشد اقتصادی بسیار سریع و مصرف انرژی بسیار بالا را فرض می‌کند که به شدت به سوخت‌های فسیلی وابسته است و سیاست‌های اقلیمی مؤثری برای کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای در آن وجود ندارد. عدد ۸/۵ به یک نیروی تابشی بسیار بالا معادل ۸/۵ وات بر مترمربع در انتهای قرن اشاره دارد که پیامدهای آن شامل افزایش شدید و سریع دمای جهانی (در محدوده ۲/۶ تا ۴/۸ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوران پیش از صنعتی‌شدن) و تغییرات گسترده در سیستم اقلیمی زمین است (Harris et al., 2014). در این سناریو شدید، پیش‌بینی می‌شود جمعیت جهان به حدود ۱۲ میلیارد نفر و غلظت دی‌اکسیدکربن به بیش از ۱۲۰۰ ppm برسد (O'Neill et al., 2016).

انتخاب این دو سناریو برای بررسی طیف وسیعی از نتایج محتمل، از یک آینده با اقدامات اقلیمی متوسط تا یک آینده با بدترین حالت ممکن، انجام شده است.

فرآیند مدلسازی و ارزیابی

فرآیند مدلسازی با استفاده از بسته جامع biomod2 در محیط نرم‌افزار R (Thuiller et al., 2016) و با تمرکز بر دو الگوریتم یادگیری ماشین، جنگل تصادفی (RF)

عملکرد "عالی" مدل در نظر گرفته شد. علاوه بر این، اهمیت نسبی هر متغیر محیطی با استفاده از یک روش مبتنی بر جایگشت (Permutation) با سه بار تکرار ($\text{var.import} = 3$) محاسبه شد تا تأثیرگذارترین عوامل بر پراکنش گونه شناسایی شوند.

نتایج

ارزیابی عملکرد مدل‌ها، نشان داد که هر دو الگوریتم RF و MaxEnt با موفقیت توانسته‌اند روابط میان حضور گونه و متغیرهای محیطی را مدلسازی کنند (جدول ۱). برای ارزیابی نهایی، عملکرد مدل‌ها هم بر اساس کل داده‌های آموزشی (calibration) و هم بر اساس داده‌های آزمون مستقل در هر تکرار اعتبارسنجی متقاطع (validation) سنجیده شد. نتایج نشان داد که مدل جنگل تصادفی (RF) با میانگین TSS برابر با ۰/۸۶۰، عملکردی "عالی" و قدرت پیش‌بینی بسیار بالایی بر روی داده‌های آزمون مستقل داشته است. این مقادیر بالا و پایدار در تکرارهای مختلف، استحکام و قابلیت اطمینان بالای این الگوریتم را تأیید می‌کند. مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) نیز با میانگین TSS برابر با ۰/۷۱۸ و میانگین ROC برابر با ۰/۸۸۵، عملکردی "خوب تا بسیار خوب" از خود به نمایش گذاشت.

و حداکثر آنتروپی (MaxEnt)، اجرا شد. برای ارزیابی پایداری مدل‌ها و کاهش احتمال بیش‌برازش (Overfitting)، از روش اعتبارسنجی متقاطع (Cross-Validation) استفاده شد. در این فرآیند، تعداد ۲۴۶ نقطه حضور گونه به همراه داده‌های عدم حضور مشابه، به صورت تصادفی ($\text{CV.strategy} = \text{"random"}$) به دو بخش شامل ۸۰ درصد برای آموزش و ۲۰ درصد برای ارزیابی مدل تقسیم شدند ($\text{CV.perc} = 0.8$). این فرآیند تقسیم و ارزیابی ۱۰ بار تکرار شد ($\text{CV.nb.rep} = 5$) تا از استحکام و پایداری نتایج اطمینان حاصل شود.

برای شاخص‌های داخلی هر الگوریتم، تنظیمات پیش‌فرض بسته biomod2 به کار گرفته شد. این تنظیمات، بهترین رویه‌های استاندارد را برای هر مدل فراهم می‌کنند. پس از اتمام مراحل اعتبارسنجی، یک مدل نهایی برای هر الگوریتم با استفاده از کل مجموعه داده‌ها (۱۰۰ درصد داده‌ها) آموزش داده شد ($\text{do.full.models} = \text{TRUE}$). این اقدام تضمین می‌کند که از بیشینه اطلاعات موجود برای پیش‌بینی پراکنش گونه در سناریوهای حال و آینده استفاده شود.

عملکرد مدل‌ها در هر تکرار با سه شاخص آماری معتبر سطح زیر منحنی ROC، آماره مهارت واقعی (TSS) و آماره کاپا (KAPPA) ارزیابی شد. مقادیر بالای ۰/۸ برای این شاخص‌ها به عنوان معیاری برای

جدول ۱- مقایسه عملکرد مدل‌های RF و MaxEnt

Table 1. Comparison of the performance of RF and MaxEnt models.

مدل	میانگین ROC $\pm$ انحراف معیار	میانگین TSS $\pm$ انحراف معیار	میانگین کاپا $\pm$ انحراف معیار
Algorithm	Mean ROC $\pm$ SD	Mean TSS $\pm$ SD	Mean KAPPA $\pm$ SD
جنگل تصادفی RF	0.965 (± 0.007)	0.860 (± 0.063)	0.861 (± 0.052)
حداکثر آنتروپی MaxEnt	0.885 (± 0.021)	0.718 (± 0.048)	0.719 (± 0.060)

اهمیت متغیرهای محیطی کلیدی

برای درک عمیق‌تر عوامل بوم‌شناختی مؤثر بر پراکنش گونه دارمازو، اهمیت نسبی هر یک از متغیرهای محیطی در مدل‌سازی ارزیابی شد. جدول ۲، میانگین اهمیت نسبی تمام ۱۷ متغیر مورد استفاده را برای هر دو مدل RF و MaxEnt، بر اساس میانگین ۱۰ بار اجرای مدل، نمایش می‌دهد.

تحلیل نتایج (جدول ۲) نشان‌دهنده تفاوت بنیادین در نحوه عملکرد دو الگوریتم است. در مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)، اهمیت متغیرها به شدت بر چند عامل کلیدی متمرکز است. نوسانات فصلی بارش (Bio15) با سهم ۱۶/۶ درصد به وضوح به‌عنوان تأثیرگذارترین متغیر شناخته شد و پس از آن، بارش سالانه (Bio12) با ۸/۵ درصد، ارتفاع از سطح دریا (Dem) با ۸/۲ درصد و نوسانات فصلی دما (Bio4) با ۸/۱ درصد در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. این نتایج

نشان می‌دهد که مدل MaxEnt پراکنش گونه را بیشتر بر اساس یک آشیان اقلیمی تعریف‌شده توسط متغیرهای اصلی آب و هوا و توپوگرافی مدل‌سازی می‌کند. در مقابل، مدل جنگل تصادفی (RF) توزیع اهمیت متعادل‌تری را میان متغیرها نشان می‌دهد. در این مدل، هیچ متغیر واحدی به تنهایی سهم غالبی در پیش‌بینی ندارد و قدرت پیش‌بینی بین تعداد بیشتری از متغیرها تقسیم شده است. بالاترین اهمیت در مدل RF به بارش سالانه (Bio12) با ۱۶/۰ درصد اختصاص دارد و پس از آن، متغیرهایی مانند کربن آلی خاک (Carbon) با ۱۲/۱ درصد و نوسانات فصلی بارش (Bio15) با ۱۰/۰ درصد قرار دارند. این الگو نشان می‌دهد که RF به جای اتکا به چند عامل اصلی، از تعاملات پیچیده میان مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی، خاکی و توپوگرافی برای پیش‌بینی حضور گونه بهره می‌برد.

جدول ۲- مقایسه اهمیت نسبی تمام متغیرهای محیطی در مدل‌های RF و MaxEnt دوره فعلی

Table 2. Comparison of the relative importance of all environmental variables in RF and MaxEnt models for the current period

متغیر محیطی Environmental Variable	کد متغیر Variable Code	اهمیت نسبی در مدل MaxEnt (درصد) Relative importance in the MaxEnt (%)	اهمیت نسبی در مدل RF (درصد) Relative importance in the RF model (%)
بارش سالانه Annual Precipitation	Bio12	8.5%	16.0%
کربن آلی خاک Soil Organic Carbon	Carbon	4.8%	12.1%
فصلی بودن بارش Precipitation Seasonality	Bio15	16.6%	10.0%
نوسانات فصلی دما Temperature Seasonality	Bio4	8.1%	8.3%
بارش گرم‌ترین فصل Precipitation of Warmest	Bio18	1.8%	8.1%
نوع خاک Soil Type	Soil Class	6.8%	7.5%

ادامه جدول ۲.

Continued Table 2.

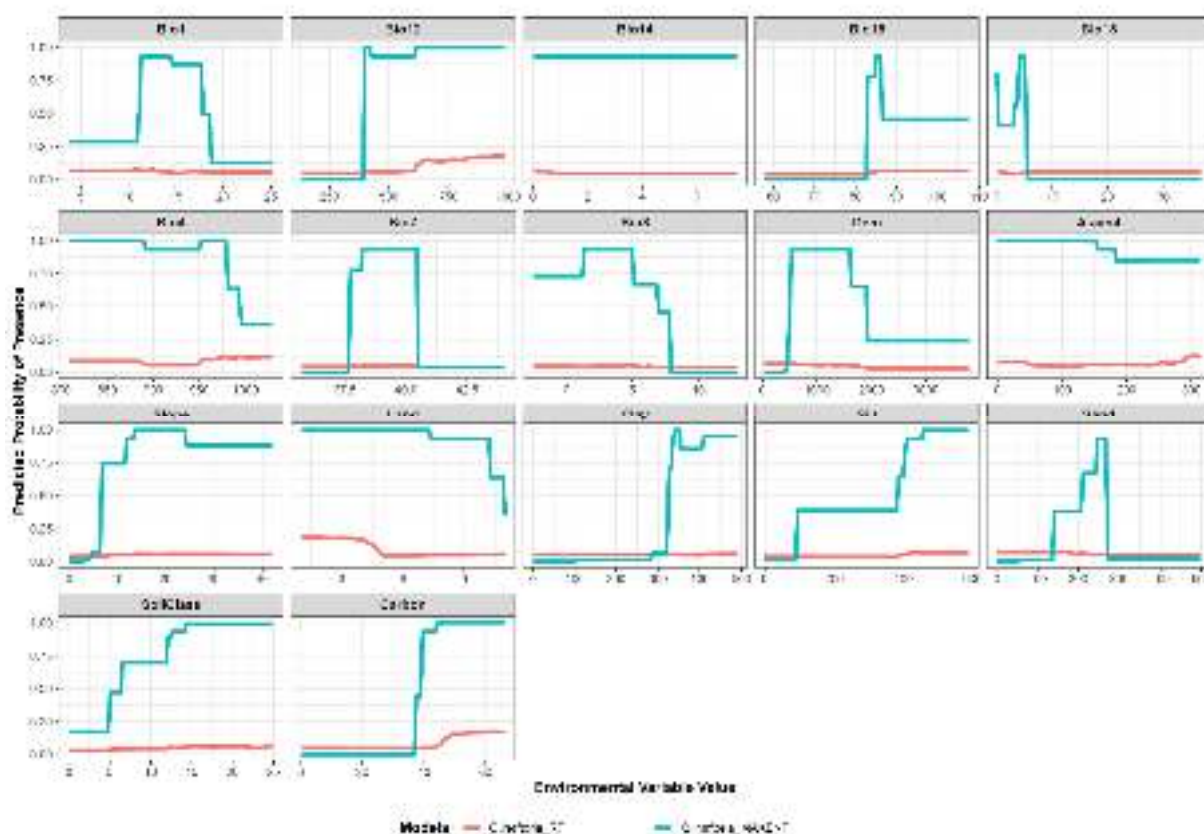
اهمیت نسبی در مدل RF (درصد) Relative importance in the RF model (%)	اهمیت نسبی در مدل MaxEnt (درصد) Relative importance in the MaxEnt (%)	کد متغیر Variable Code	متغیر محیطی Environmental Variable
5.41%	7.6%	Sand	درصد شن Sand Percentage
5.3%	4.7%	Bio8	دمای میانگین مرطوب‌ترین فصل Mean Temperature of Wettest
4.2%	2.4%	Bio7	دامنه دمای سالانه Annual Temperature Range
3.9%	4.0%	Slope	شیب Slope
3.9%	7.7%	Bio1	میانگین دمای سالانه Mean Annual Temperature
3.8%	8.2%	Dem	ارتفاع از سطح دریا Elevation
3.4%	0.4%	Bio14	بارش خشک‌ترین ماه Precipitation of Driest Month
3.0%	5.3%	Clay	درصد رس Clay Percentage
2.3%	3.5%	Silt	درصد سیلت Silt Percentage
1.6%	2.8%	Land	پوشش/کاربری اراضی Land Cover/Use
1.2%	6.7%	Aspect	جهت شیب Aspect

شناسایی کند؛ برای مثال، برای متغیر ارتفاع (Dem)، مدل RF یک منحنی پاسخ زنگوله‌ای شکل کلاسیک تولید کرده است که یک محدوده ارتفاعی بهینه برای گونه (تقریباً بین ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ متر) را نشان می‌دهد. در مقابل، مدل MaxEnt در این پژوهش، پاسخی به شدت گسسته و پله‌ای (threshold-based) تولید می‌کند که نشان‌دهنده شناسایی آستانه‌های محیطی مشخص است. به عنوان مثال، برای متغیر بارش سالانه (Bio12)، هر دو مدل توافق دارند که احتمال حضور گونه در مناطقی با بارش کمتر از حدود ۶۵۰-۷۰۰ میلی‌متر بسیار پایین است، اما MaxEnt این رابطه را به صورت یک آستانه قاطع نمایش می‌دهد. این دو

برای درک عمیق‌تر این روابط، منحنی‌های پاسخ شکل ۲ رفتار گونه را نسبت به مهم‌ترین متغیرها نشان می‌دهند و مقایسه منحنی‌های پاسخ تولیدشده توسط دو الگوریتم MaxEnt و RF دو پارادایم متفاوت در تفسیر روابط گونه-محیط را آشکار می‌سازد.

درحالی‌که MaxEnt به دنبال یافتن یک تابع بهینه و مقایسه این منحنی‌ها، دو رویکرد کاملاً متفاوت در مدل‌سازی آشیان بوم‌شناسی را آشکار می‌سازد. مدل جنگل تصادفی (RF)، منحنی‌های پیوسته و هموار تولید می‌کند که نشان‌دهنده یک پاسخ تدریجی و اغلب غیرخطی از سوی گونه به گرادیان‌های محیطی است. این رویکرد به خوبی می‌تواند محدوده‌های بهینه را

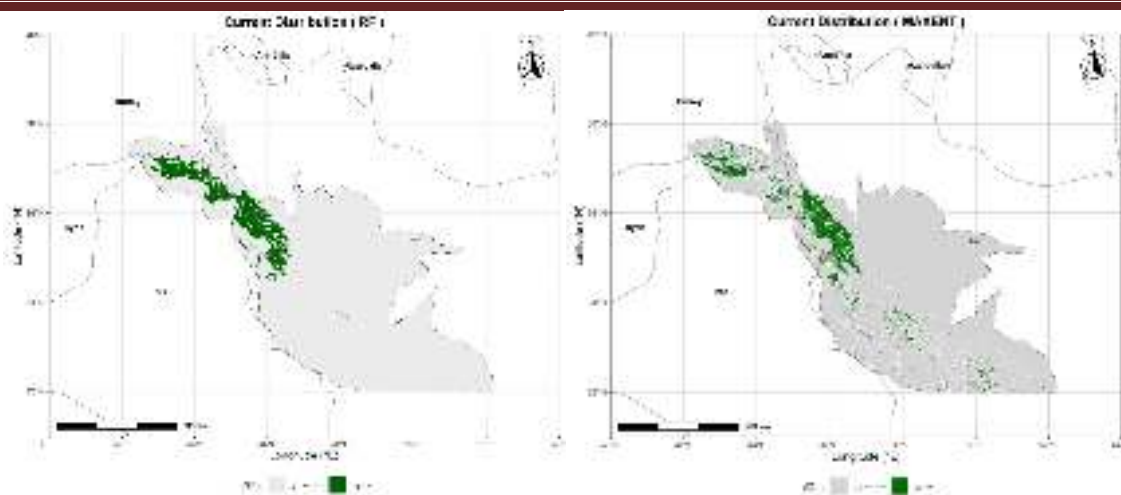
رویکرد مکمل یکدیگر هستند؛ MaxEnt به شناسایی روندهای تدریجی و محدوده‌های بهینه گونه ارائه می‌دهد. محدودیت‌های حیاتی و غیرقابل انعطاف کمک می‌کند، درحالی‌که RF تصویری جامع‌تر از ترجیحات،



شکل ۲- منحنی‌های پاسخ گونه دارمازو به متغیرهای محیطی کلیدی بر اساس مدل‌های RF (قرمز) و MaxEnt (آبی)
Figure 2. Response curves of *Quercus infectoria* to key environmental variables based on RF (blue) and MaxEnt (red) models

۲۲۵۲۱۱ کیلومتر مربع برآورد شد، درحالی‌که مدل حداکثر آنتروپی MaxEnt گستره بزرگ‌تری را پیش‌بینی کرده و مساحت رویشگاه مناسب را ۳۳۳۴۱۳ کیلومتر مربع تخمین زد. این تفاوت کمی در نقشه‌های پراکنش تولیدشده توسط دو مدل نیز به‌وضوح قابل مشاهده است (شکل ۳).

پراکنش فعلی و مساحت رویشگاه گونه دارمازو پس از تأیید عملکرد عالی هر دو مدل، از آنها برای پیش‌بینی پراکنش جغرافیایی گونه دارمازو در شرایط اقلیمی فعلی استفاده شد. تحلیل کمی نتایج نشان داد که دو مدل برآوردهای متفاوتی از کل مساحت رویشگاه مناسب گونه ارائه می‌دهند؛ به‌طوری‌که بر اساس مدل جنگل تصادفی RF مساحت کل رویشگاه مناسب فعلی



شکل ۳- نقشه پراکنش بالقوه فعلی گونه *Quercus infectoria* بر اساس مدل‌های RF و MaxEnt

Figure 3. Current potential distribution maps of *Quercus infectoria* based on RF and MaxEnt models

معرفی می‌کند. این تفاوت در الگوهای پیش‌بینی‌شده ناشی از حساسیت متفاوت دو الگوریتم به متغیرهای محیطی است. مدل RF با تکیه بر تعاملات پیچیده میان متغیرها روی‌شگاه تحقق‌یافته و متمرکز گونه را مدلسازی می‌کند، درحالی‌که مدل MaxEnt با تمرکز بر عوامل اصلی اقلیمی آشیان اکولوژیک بالقوه گونه را در گستره وسیع‌تری به تصویر می‌کشد. در مجموع، این دو نقشه دیدگاهی جامع از وضعیت فعلی گونه ارائه می‌دهند: یکی هسته اصلی و حیاتی جمعیت را مشخص می‌کند و دیگری تمامی مناطق بالقوه برای بقا یا احیای آینده را نشان می‌دهد.

تحلیل جامع تغییرات روی‌شگاه در سناریوهای آینده
برای ارزیابی کمی و مکانی تغییرات روی‌شگاه گونه دارمازو در آینده نسبت به حال حاضر، از تابع BIOMOD_RangeSize استفاده شد. این تحلیل، نقشه باینری پراکنش فعلی را با نقشه‌های پیش‌بینی‌شده برای چهار سناریوی آینده مقایسه کرده و معیارهای کلیدی مانند مساحت پایدار (Stable)، ازدست‌رفته (Loss) و جدید (Gain) را محاسبه می‌کند. نتایج کامل این تحلیل در جدول ۳ ارائه شده است.

هر دو نقشه هسته اصلی پراکنش گونه دارمازو را در شمالی‌ترین بخش‌های رشته‌کوه زاگرس، در نوار مرزی بین ایران، عراق و ترکیه، مشخص می‌کنند، اما الگوهای پیش‌بینی‌شده توسط دو مدل تفاوت‌های قابل توجهی دارند. مدل RF یک روی‌شگاه بسیار متمرکز، یکپارچه و پیوسته را پیش‌بینی می‌کند؛ لکه‌های زیستگاهی بسیار به هم نزدیک بوده و هسته اصلی و باکیفیت‌ترین بخش روی‌شگاه گونه را نشان می‌دهند، درحالی‌که پراکندگی لکه‌های کوچک و منفرد در خارج از این هسته مرکزی بسیار ناچیز است. این الگو نمایانگر یک پیش‌بینی محافظه‌کارانه است که بر مناطقی با بالاترین درجه مطلوبیت تمرکز دارد. در مقابل، مدل MaxEnt پراکنش گسترده‌تر اما پراکنده‌تری را پیش‌بینی می‌کند؛ علاوه بر هسته اصلی در شمال زاگرس، این مدل تعداد زیادی لکه‌های زیستگاهی کوچک و متوسط را در امتداد دامنه‌های زاگرس به سمت جنوب و جنوب‌شرقی ایران شناسایی می‌کند. این الگو نشان می‌دهد که MaxEnt آشیان بوم‌شناسی بالقوه گونه را وسیع‌تر در نظر گرفته و مناطقی را که شرایط محیطی مشابه نقاط حضور دارند، حتی اگر از هسته اصلی جمعیت فاصله داشته باشند، به‌عنوان زیستگاه مناسب

جدول ۳- تحلیل جامع و مقایسه‌ای تغییرات مساحت رویشگاه گونه دارمازو برای تمام سناریوهای آینده

Table 3. A comprehensive and comparative analysis of changes in the habitat area of *Quercus infectoria* across all future scenarios

سناریو و دوره زمانی	مدل	مساحت پایدار (کیلومتر مربع) Stable area (km ²)	مساحت ازدست‌رفته (کیلومتر مربع) Lost (km ²)	مساحت جدید (کیلومتر مربع) Gain (km ²)	درصد کاهش	درصد افزایش	درصد تغییر خالص
Scenario and time period	Model				Percentage loss	Percentage gain	Net percent change
2050 (SSP2-4.5)	RF	124,236	100,975	4,410	44.8%	2.0%	-42.9%
	MaxEnt	137,356	196,057	27,486	58.8%	8.2%	-50.6%
2050 (SSP2-8.5)	RF	77,936	147,275	2,478	65.4%	1.1%	-64.3%
	MaxEnt	100,629	232,784	23,080	69.8%	6.9%	-62.9%
2070 (SSP2-4.5)	RF	89,760	135,451	2,949	60.1%	1.3%	-58.8%
	MaxEnt	110,282	223,131	25,435	66.9%	7.6%	-59.3%
2070 (SSP2-8.5)	RF	25,369	199,842	723	88.7%	0.3%	-88.4%
	MaxEnt	78,121	255,292	11,746	76.6%	3.5%	-73.0%

۴.۵) می‌شود. به‌عنوان مثال، در سال ۲۰۷۰، درصد کاهش رویشگاه (PercLoss) در مدل RF از ۶۰/۱ درصد در سناریوی میانی به ۸۸/۷ درصد در سناریوی بدبینانه افزایش می‌یابد. این موضوع، تأثیر مستقیم شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای بر بقای گونه را آشکار می‌سازد.

- تأثیر زمان: با گذشت زمان از سال ۲۰۵۰ به ۲۰۷۰، در هر دو سناریو، مقدار تخریب رویشگاه تشدید می‌شود. برای مثال، در مدل MaxEnt تحت سناریوی SSP2-4.5، درصد کاهش خالص از ۵۰/۶ درصد در سال ۲۰۵۰ به ۵۹/۳ درصد در سال ۲۰۷۰ افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که اثرات منفی تغییر اقلیم با گذشت زمان، روندی فزاینده و تجمعی دارد.

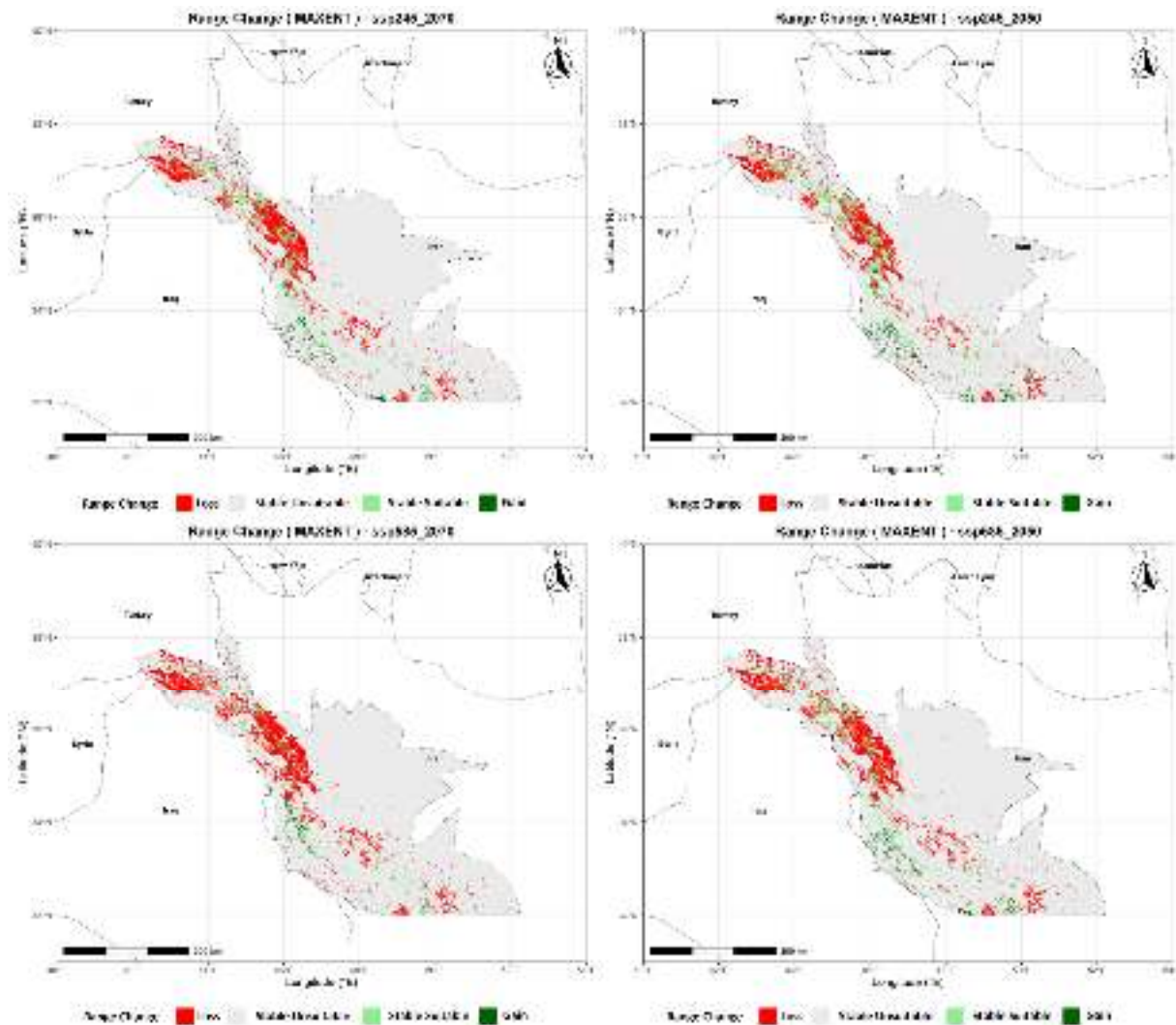
- محدودیت در ایجاد رویشگاه جدید (Gain): یکی از نگران‌کننده‌ترین یافته‌ها این است که در تمام سناریوها، مساحت رویشگاه جدیدی که ایجاد می‌شود، در مقایسه با مساحت عظیمی که از دست می‌رود، بسیار ناچیز

تحلیل نتایج نشان‌دهنده یک روند کلی و هشداردهنده از کاهش شدید مساحت رویشگاه مناسب برای گونه دارمازو در تمام سناریوهای آینده است. هرچند شدت این کاهش بین دو مدل و سناریوهای مختلف متفاوت است، اما پیام اصلی کاملاً واضح است: - مقایسه عملکرد مدل‌ها: مدل جنگل تصادفی (RF) به‌طور مداوم پیش‌بینی‌های بدبینانه‌تری نسبت به مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) ارائه می‌دهد. برای مثال، در سناریوی شدید SSP5-8.5 برای سال ۲۰۷۰، مدل RF کاهش خالص ۸۸/۴ درصدی رویشگاه را پیش‌بینی می‌کند، درحالی‌که این مقدار برای مدل MaxEnt ۷۳/۰ درصد است. این تفاوت نشان می‌دهد که RF به دلیل حساسیت بالاتر به تعاملات متغیرها، انقباض شدیدتری را برای آشیان اکولوژیک گونه پیش‌بینی می‌کند.

- تأثیر شدت سناریو: همانطور که انتظار می‌رفت، سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) منجر به ازدست‌رفتن بسیار بیشتر رویشگاه نسبت به سناریوی میانی (SSP2-

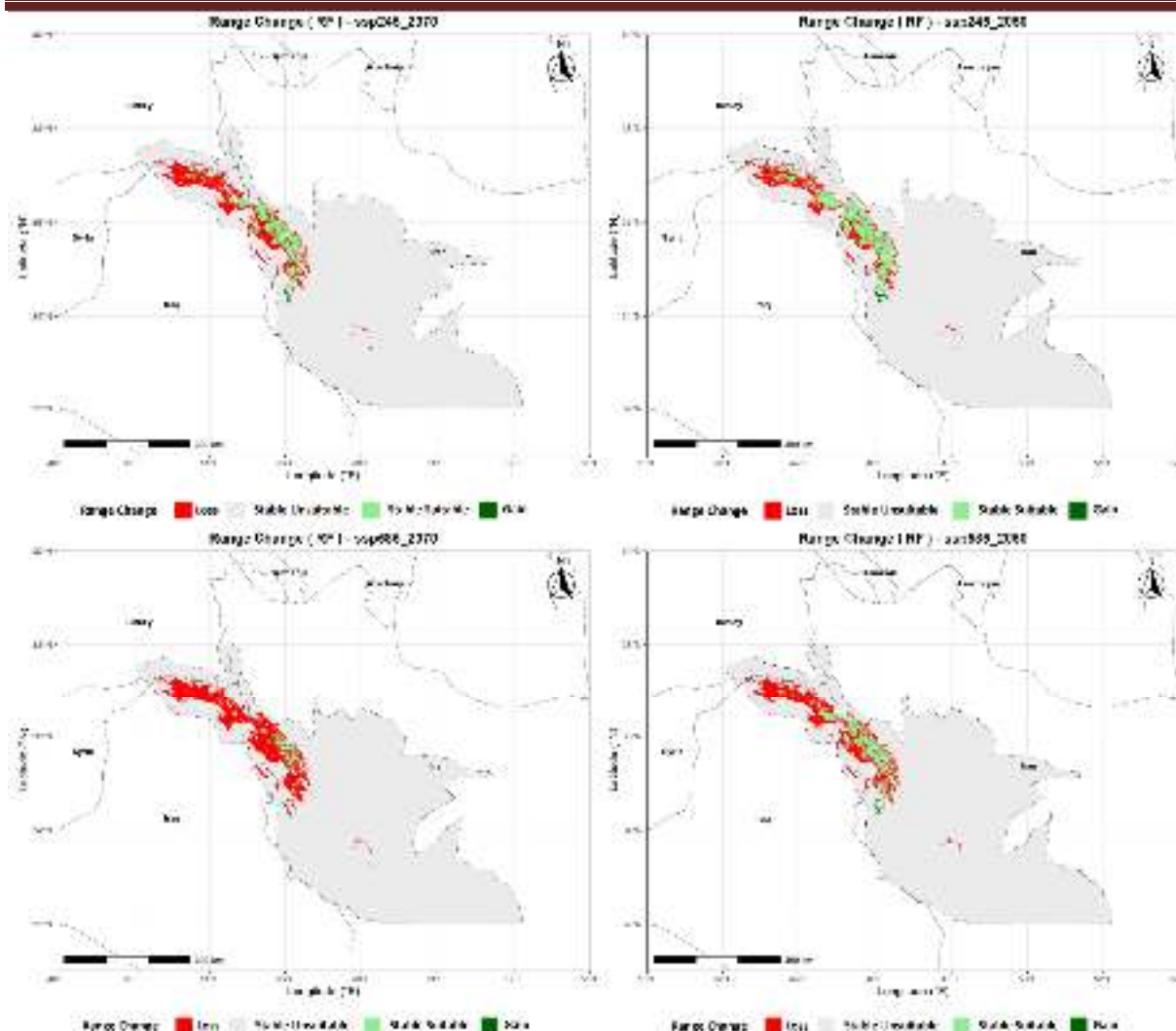
در مجموع، تحلیل‌ها تصویری از یک آینده چالش‌برانگیز را برای بلوط دارمازو ترسیم می‌کنند که در آن زیستگاه گونه به شدت منقبض شده و به لکه‌های پراکنده‌تر و احتمالاً مرتفع‌تر محدود خواهد شد.

است. حتی در بهترین حالت (MaxEnt, SSP2-4.5, 2050)، درصد افزایش تنها ۸/۲ درصد است که قادر به جبران ۵۸/۸ درصد کاهش نیست. این بدان معناست که گونه دارمازو فرصت بسیار محدودی برای جبران زیستگاه‌های ازدست‌رفته از طریق مهاجرت به مناطق جدید خواهد داشت.



شکل ۴- نقشه باینری تغییرات حضور گونه بر اساس مدل Maxent برای هر یک از چهار سناریوی آینده

Figure 4. Binary map of species presence changes based on the Maxent model for each of the four future scenarios



شکل ۵- نقشه باینری تغییرات حضور گونه بر اساس مدل جنگل تصادفی برای هر یک از چهار سناریوی آینده
Figure 5. Binary map of species presence changes based on the Random Forests model for each of the four future scenarios

وضعیت فعلی (منحنی قرمز): در حال حاضر، هر دو مدل نشان می‌دهند که هسته اصلی و بهینه رویشگاه گونه دارمازو در یک محدوده ارتفاعی مشخص متمرکز است. مدل جنگل تصادفی (RF) این محدوده را با یک قله بسیار شاخص و باریک در حدود ۱۲۰۰ متر نشان می‌دهد، در حالی که مدل MaxEnt یک محدوده کمی وسیع‌تر با قله‌ای در حدود ۱۳۰۰ تا ۱۴۰۰ متر را پیش‌بینی می‌کند. این نتایج نشان‌دهنده یک آشیان اکولوژیک ارتفاعی مشخص برای گونه در شرایط فعلی است.

جابجایی ارتفاعی رویشگاه: تحلیل کمی و کیفی یکی از مهم‌ترین و شناخته‌شده‌ترین پاسخ‌های گونه‌های گیاهی به گرمایش جهانی، مهاجرت به سمت ارتفاعات بالاتر برای یافتن شرایط اقلیمی مناسب است. نمودار توزیع ارتفاعی گونه دارمازو (شکل ۷)، که بر اساس نتایج مدل‌های RF و MaxEnt برای شرایط فعلی و سناریوهای آینده ترسیم شده است، این پدیده را به وضوح تأیید می‌کند و ابعاد کمی و کیفی این جابجایی را به تصویر می‌کشد.

است که چالش‌های جدی را برای بقای گونه در آینده ایجاد می‌کند، زیرا زیستگاه‌های مناسب در ارتفاعات بالاتر ممکن است از نظر مساحت و کیفیت خاک محدود باشند.

بحث

این پژوهش با ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر پراکنش گونه بلوط دارمازو و مقایسه دو الگوریتم پیشرفته مدلسازی، به یافته‌های مهمی دست یافت که در این بخش به تفسیر و تحلیل عمیق‌تر آن‌ها در مقایسه با مبانی نظری و پژوهش‌های پیشین پرداخته می‌شود.

تفسیر عملکرد مدل‌ها و برتری الگوریتم جنگل تصادفی
نتایج ارزیابی عملکرد مدل‌ها (جدول ۱) نشان داد که هر دو الگوریتم جنگل تصادفی (RF) و حداکثر آنتروپی (MaxEnt) از دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی پراکنش گونه برخوردار بودند که این موضوع، اعتبار کلی یافته‌های پژوهش را تأیید می‌کند. مدل MaxEnt با کسب نمره ROC برابر با ۰/۸۸۵ در مدل نهایی، عملکردی "عالی" از خود به نمایش گذاشت. این یافته با بدنه وسیعی از بررسی‌های پیشین که قدرت و اعتبار مدل MaxEnt را در مدلسازی پراکنش گونه‌های گیاهی مختلف تأیید کرده‌اند، همخوانی دارد (Wei et al., 2025; Huang et al., 2024; Mahmoodi et al., 2022).

عملکرد مدل RF نیز در این پژوهش ROC برابر با ۰/۹۶۵، ظرفیت بالای این الگوریتم را در مدلسازی پدیده‌های پیچیده بوم‌شناختی آشکار می‌سازد. مدل RF با ساختن صدها درخت تصمیم مستقل و تجمیع نتایج آن‌ها، قادر است روابط بسیار پیچیده، غیرخطی و دارای اثرات متقابل میان حضور گونه و متغیرهای محیطی را به خوبی شناسایی کند (Breiman, 2001; Cutler et al., 2007). این ویژگی در بوم‌سازگان‌های کوهستانی

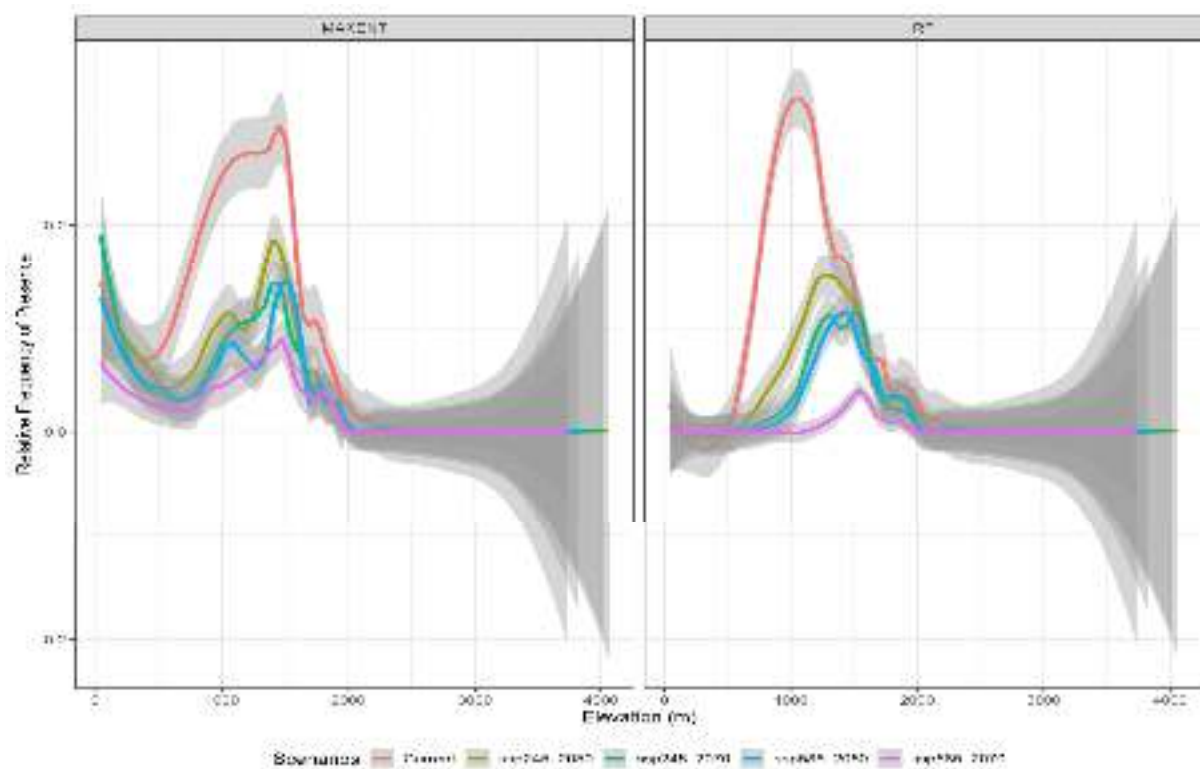
جابجایی رویشگاه در سناریوهای آینده: تحلیل نمودار برای سناریوهای آینده دو روند همزمان و نگران‌کننده را آشکار می‌سازد:

۱- مهاجرت به سمت ارتفاعات بالاتر: در تمام سناریوها و برای هر دو مدل، یک جابجایی واضح و تدریجی در محدوده ارتفاعی بهینه به سمت بالا مشاهده می‌شود. تحت سناریوی میانی (SSP2-4.5)، این جابجایی تا سال ۲۰۷۰ سبب می‌شود که اوج پراکنش گونه به ارتفاع حدود ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰ متر منتقل شود. این روند در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) بسیار شدیدتر است، به طوری که تا سال ۲۰۷۰، محدوده بهینه ارتفاعی به حدود ۱۷۰۰ متر عقب‌نشینی می‌کند. این به معنای یک جابجایی ارتفاعی ۴۰۰ تا ۷۰۰ متری نسبت به شرایط فعلی است.

۲- کاهش شدید مطلوبیت و کمیت رویشگاه: مهم‌تر از جابجایی، کاهش شدید ارتفاع قله‌های نمودار در تمام سناریوهای آینده است. ارتفاع قله، نشان‌دهنده "فراوانی نسبی حضور" یا به عبارتی، کمیت و کیفیت رویشگاه در آن ارتفاع بهینه است. همانطور که در نمودار مشخص است، حتی در سناریوی میانی (منحنی‌های سبز)، ارتفاع قله به شدت کاهش می‌یابد. این روند در سناریوی بدبینانه برای سال ۲۰۷۰ (منحنی بنفش) به اوج خود می‌رسد، جایی که منحنی به یک کوهان بسیار کوتاه و مسطح تبدیل می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که نه تنها گونه مجبور به مهاجرت به ارتفاعات بالاتر است، بلکه زیستگاه‌های جدیدی که در آن ارتفاعات پیدا می‌کند، از نظر مساحت و کیفیت، بسیار نامناسب‌تر و محدودتر از زیستگاه‌های فعلی آن خواهند بود.

در مجموع، تحلیل پراکنش ارتفاعی تأیید می‌کند که گونه دارمازو در پاسخ به تغییرات اقلیمی، ناگزیر به عقب‌نشینی به سمت پناهگاه‌های مرتفع‌تر است. این جابجایی با یک انقباض و تخریب شدید زیستگاه همراه

مانند زاگرس که عوامل محیطی به شدت با یکدیگر در تعامل هستند، یک مزیت بزرگ محسوب می‌شود. برتری مدل RF در این بررسی، همسو با پژوهش‌هایی است که کارایی بالای این الگوریتم را در مقایسه با سایر مدل‌ها نشان داده‌اند (Aguirre-Gutiérrez et al., 2013; Jafarian and Kargar, 2017).



شکل ۶- نمودار جابجایی دامنه احتمال توزیع گونه دارمازو در امتداد گرادیان ارتفاعی برای شرایط فعلی و سناریوهای آینده بر اساس مدل‌های RF و MaxEnt

Figure 6. Altitudinal distribution shift of *Quercus infectoria* under current and future scenarios based on RF and MaxEnt models.

استفاده کرد، اما نتایج آن بررسی نیز که نشان‌دهنده کاهش شدید رویشگاه بود، اهمیت استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین برای درک آسیب‌پذیری گونه‌های بلوط را برجسته می‌سازد.

عوامل محیطی تعیین‌کننده: نقش حیاتی آب و دما

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش، شناسایی عوامل اقلیمی به‌عنوان نیروهای محرک اصلی در شکل‌دهی به پراکنش جغرافیایی گونه بلوط دارمازو بود (جدول ۲). در هر دو مدل، متغیرهای مرتبط با بارش، به‌ویژه بارش سالانه (Bio12) و نوسانات فصلی بارش (Bio15)،

انتخاب دو مدل RF و MaxEnt و مقایسه آن‌ها، رویکردی قدرتمند برای ارزیابی عدم قطعیت مدل است. هرچند RF در این پژوهش بر اساس داده‌های آزمون عملکرد بهتری داشت، اما همگرایی کلی نتایج هر دو مدل در پیش‌بینی روند اصلی (کاهش و جابجایی رویشگاه) و شناسایی متغیرهای کلیدی، اطمینان ما به نتایج نهایی را دوچندان می‌کند (Araújo and New, 2007). این رویکرد، مشابه بررسی Mirhashemi و همکاران (۲۰۲۳) است که اگرچه از مدل متفاوتی (BART) برای بلوط ایرانی (*Q. brantii*) در زاگرس

بیشترین اهمیت را داشتند. این یافته به شدت تأکید می‌کند که بقای دارمازو نه تنها به مجموع بارش، بلکه به الگوی توزیع زمانی آن در طول سال نیز وابسته است. اقلیم مدیترانه‌ای حاکم بر زاگرس، با زمستان‌های مرطوب و تابستان‌های طولانی و خشک، شرایطی را ایجاد می‌کند که در آن توانایی گونه برای تحمل تنش خشکی در فصل رشد، یک مزیت رقابتی تعیین‌کننده است. نقش حیاتی بارش به‌عنوان یک عامل محدودکننده در بوم‌سازگان‌های نیمه‌خشک زاگرس، بارها در بررسی‌های دیگر تأیید شده است (Habibi, 2016; Mirhashemi et al., 2023).

نقش متغیرهای توپوگرافی مانند ارتفاع نیز در مدل MaxEnt قابل توجه بود. این عوامل به‌طور غیرمستقیم از طریق تأثیر بر میکروکلیم، مقدار دریافت تابش خورشیدی و رژیم رطوبتی خاک، بر مطلوبیت رویشگاه اثر می‌گذارند. در مقابل، مدل RF اهمیت بیشتری به کربن آلی خاک (Carbon) داد که نشان می‌دهد این الگوریتم به خوبی توانسته است به اهمیت کیفیت و حاصلخیزی خاک به‌عنوان یک عامل مؤثر در کنار اقلیم پی ببرد. در مجموع، نتایج این بخش تأیید می‌کند که آشیان اکولوژیک گونه دارمازو در زاگرس شمالی، بیشتر توسط یک رژیم هیدروترمال (آب و دمای) خاص تعریف می‌شود.

انقباض زیستگاه و مهاجرت ارتفاعی: پاسخی ناگزیر به گرمایش جهانی

مهم‌ترین و نگران‌کننده‌ترین یافته این پژوهش، پیش‌بینی کاهش شدید مساحت رویشگاه و جابجایی آن به سمت ارتفاعات بالاتر در آینده است (جدول ۳ و شکل ۶). نتایج هر دو مدل RF و MaxEnt با قاطعیت این روند را تأیید می‌کنند. پیش‌بینی کاهش تا ۸۸/۷ درصدی رویشگاه (بر اساس مدل RF) تحت سناریوی بدبینانه تا سال ۲۰۷۰، هشدار جدی برای احتمال بالای

انقراض محلی این گونه در بخش‌های وسیعی از پراکنش فعلی آن است.

این پدیده که به‌عنوان "مهاجرت ارتفاعی" شناخته می‌شود، یک پاسخ کلاسیک گونه‌ها به گرمایش جهانی است (Fatemi et al., 2018). با افزایش دما، شرایط اقلیمی در ارتفاعات پایین‌تر از آستانه تحمل فیزیولوژیک گونه فراتر رفته و گونه برای یافتن شرایط بهینه، ناچار به "مهاجرت" به سمت ارتفاعات بالاتر و خنک‌تر است. این یافته‌ها با نتایج بررسی‌های مشابه در منطقه زاگرس و جهان همخوانی دارد (Mirhashemi et al., 2023; Subedi et al., 2024)، که آسیب‌پذیری جهانی جنس بلوط در برابر تغییر اقلیم را برجسته می‌سازد.

محدوده ارتفاعی بهینه، از ۱۸۰۰-۱۱۰۰ متر فعلی به ۲۵۰۰-۱۵۰۰ متر جابجا خواهد شد که منجر به تشکیل لکه‌های کوچک و ایزوله از جمعیت‌های این گونه در ارتفاعات بالاتر خواهد شد. این فرآیند با نتایج بررسی‌های پویایی جنگل در زاگرس مطابقت دارد که نشان می‌دهد زوال بلوط در طول زمان باعث کاهش تراکم و تغییر الگوی پراکنش مکانی درختان می‌شود (Akhtari et al., 2023).

محدودیت‌های بررسی و چشم‌اندازهای آتی

هرچند این پژوهش با استفاده از روش‌های پیشرفته انجام شده، اما اذعان به محدودیت‌های آن ضروری است. مدل‌های پراکنش گونه‌ای ذاتاً مدل‌هایی همبستگی هستند و اثرات متقابل زیستی مانند رقابت با دیگر گونه‌ها، شیوع آفات و بیماری‌ها (مانند بیماری زغالی بلوط) و روابط هم‌زیستی را در نظر نمی‌گیرند. همچنین، این مدل‌ها ظرفیت پراکنش و سازگاری ژنتیکی گونه را به‌صورت مستقیم وارد تحلیل نمی‌کنند (Watling et al., 2015). بنابراین، نقشه‌های تولید شده، "پراکنش بالقوه اقلیمی" را نشان می‌دهند و نه "پراکنش

واقعی" در آینده. با وجود این محدودیت‌ها، این مدل‌ها بهترین ابزار موجود برای ارزیابی ریسک و شناسایی روندهای کلان در مقیاس وسیع هستند و مبنای علمی مهمی برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی فراهم می‌آورند.

نتیجه‌گیری کلی

این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که گونه بلوط دارمازو با تهدیدی جدی برای بقای خود در دهه‌های آینده روبرو است. نتایج کلیدی شامل عملکرد عالی هر دو مدل و امتیاز عالی مدل RF، نقش حیاتی بارش سالانه، و پیش‌بینی کاهش شدید مساحت رویشگاه (تا ۹۴ درصد) و جابجایی اجباری آن به سمت ارتفاعات بالاتر است. این یافته‌ها یک زنگ خطر جدی برای مدیران و سیاست‌گذاران منابع طبیعی محسوب می‌شود و تأکید می‌کند که بدون اقدامات فوری و هدفمند، بخش بزرگی از جمعیت این گونه ارزشمند در معرض نابودی قرار خواهد گرفت.

با توجه به این نتایج، اتخاذ یک رویکرد جامع و پیشگیرانه ضروری است. باید بر حفاظت از پناهگاه‌های اقلیمی شناسایی شده در ارتفاعات، اجرای برنامه‌های

احیای تطبیقی و جنگلکاری هدفمند در مناطق مناسب آینده و کاهش سایر عوامل غیراقلیمی تخریب‌کننده مانند چرای دام تمرکز کرد. همچنین، برنامه‌های حفاظت خارج از زیستگاه مانند ایجاد بانک ژن و بذر برای حفظ ذخایر ژنتیکی جمعیت‌های در معرض خطر، یک راهبرد آینده‌نگرانه و حیاتی است. برای افزایش دقت برنامه‌های حفاظتی، انجام پژوهش‌های تکمیلی در زمینه ادغام مدل‌های پراکنش با مدل‌های دینامیک جمعیتی و مطالعات فیزیولوژی و ژنتیک برای شناسایی ژنوتیپ‌های مقاوم پیشنهاد می‌شود.

تشکر و قدرانی

بدین وسیله مراتب قدردانی و سپاس خود را از جناب آقای دکتر نیاز خوارهم از دانشگاه سلیمانیه عراق و همکاران ایشان در فراهم کردن داده، همچنین کارشناسان اداره‌های کل منابع طبیعی به‌ویژه مهندس وریا رحیمی برای تهیه اطلاعات و موقعیت رویشگاه‌های شاخص بلوط دارمازو ابراز می‌داریم. افزون بر این، از دانشگاه ایلام برای پشتیبانی مالی اجرای این پژوهش صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

References

- Aguirre-Gutiérrez, J.; Carvalheiro, L.G.; Polce, C.; van Loon, E.E.; Raes, N.; Reemer, M.; Biesmeijer, J.C., Fit-for-Purpose: Species Distribution Model Performance Depends on Evaluation Criteria – Dutch Hoverflies as a Case Study. *PLoS ONE* **2013**, *8*, e63708.
- Ahmadi, K.; Mahmoodi, S.; Pal, S. C.; Saha, A.; Chowdhuri, I.; Nguyen, T. T.; Jarvie, S.; Szostak, M.; Socha, J.; Thai, V. N., Improving species distribution models for dominant trees in climate data-poor forests using high-resolution remote sensing. *Ecological Modelling* **2023**, *475*, 110190.
- Aiello-Lammens, M. E.; Boria, R. A.; Radosavljevic, A.; Vilela, B.; Anderson, R. P., spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography* **2015**, *38* (5), 541-545.
- Akhtari, M. H.; Mataji, A.; Babaei Kafaki, S.; Kiadaliri, H. Spatiotemporal dynamics of trees distribution patterns following disturbance caused by decline in the oak forests of Lorestan province. *Forest Research and Development*, **2023**; *9*(3): 401-418.
- Araújo, M.B.; New, M., Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution* **2007**, *22*, 42-47.
- Bai, J.; Wang, H.; Hu, Y., Prediction of Potential Suitable Distribution of *Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg. in China Based on Future Climate Change Using the Optimized MaxEnt Model. *Forests* **2024**, *15* (6), 988.
- Breiman, L., Random forests. *Mach. Learn.* **2001**, *45*, 5-32.

- Brockerhoff, E. G.; Barbaro, L.; Castagnyrol, B.; Forrester, D. I.; Gardiner, B.; González-Olabarria, J. R.; Lyver, P. O. B.; Meurisse, N.; Oxbrough, A.; Taki, H., Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodiversity and Conservation* 2017, 26(13), 3005-3035.
- Chatterjee, S.; Hadi, A.S., *Regression Analysis by Example*; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, **2015**.
- Cutler, D. R.; Edwards Jr, T. C.; Beard, K. H.; Cutler, A.; Hess, K. T.; Gibson, J.; Lawler, J. J., Random forests for classification in ecology. *Ecology* **2007**, 88 (11), 2783-2792.
- Dalir, P.; Naghdi, R.; Jafari, S.; Tsioras, P. A., Comparative Assessment of Woody Species for Runoff and Soil Erosion Control on Forest Road Slopes in Harvested Sites of the Hyrcanian Forests, Northern Iran. *Forests* **2025**, 16 (6), 1013.
- CCI, E.; ESA: Land cover CCI product user guide version 2.0. 2017.
- Farr, T.G.; Rosen, P.A.; Caro, E.; Crippen, R.; Duren, R.; Hensley, S., The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*. **2007**, 45, RG2004.
- Fatemi, S.S.; Rahimi, M.; Tarkesh, M.; Ravanbakhsh, H., Predicting the impacts of climate change on the distribution of *Juniperus excelsa* M. Bieb. in the central and eastern Alborz Mountains, Iran. *iForest-Biogeosciences For.* **2018**, 11, 643–650.
- Habibi, M., Investigating the impact of climate changes on qualitative and quantitative growth of oak trees (case study: central Zagros). *Open Journal of Ecology* **2016**, 6 (6), 358-366.
- Harris, R.M.B.; Grose, M.R.; Lee, G.; Bindoff, N.L.; Porfiro, L.L.; Fox-Hughes, P., Climate projections for ecologists. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* **2014**, 5, 621–637.
- Hartmann, H.; Bastos, A.; Das, A. J.; Esquivel-Muelbert, A.; Hammond, W. M.; Martínez-Vilalta, J.; McDowell, N. G.; Powers, J. S.; Pugh, T. A.; Ruthrof, K. X., Climate change risks to global forest health: emergence of unexpected events of elevated tree mortality worldwide. *Annual Review of Plant Biology* **2022**, 73 (1), 673-702.
- Hengl, T.; Mendes de Jesus, J.; Heuvelink, G.B.M.; Ruiperez Gonzalez, M.; Kilibarda, M.; et al. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS ONE* **2017**, 12, e0169748.
- Hijmans, R. J., terra: Spatial data analysis. *CRAN: Contributed Packages* **2020**.
- Hijmans, R.J., terra: Spatial Data Analysis. R package version 1.7-29. **2023**. Available online: <https://CRAN.R-project.org/package=terra> (accessed on 30 August 2024).
- Hijmans, R.J.; Cameron, S.E.; Parra, J.L.; Jones, P.G.; Jarvis, A., Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **2005**, 25, 1965–1978.
- Jafarian, Z.; Kargar, M., Comparison of Random Forest (RF) and Boosting Regression Tree (BRT) for prediction of dominant plant species presence in Polour Rangelands, Mazandaran Province. *Iranian Journal of Applied Ecology* **2017**, 6 (1), 41-55. (In Persian)
- Jaferyan, E.; Pilehvar, B.; Tavakoli, M., Physiological responses of mature Persian oak (*Quercus brantii* L.) under natural conditions to drought stress. *Forest Research and Development*, **2024**; 10(2): 167-181.
- Japelaghi, M.; Hajian, F.; Gholamalifard, M.; Pradhan, B.; Maulud, K. N. A.; Park, H. J., Modelling the impact of land cover changes on carbon storage and sequestration in the central Zagros region, Iran using ecosystem services approach. *Land* **2022**, 11 (3), 423.
- Khwarahm, N. R. Mapping current and potential future distributions of the oak tree (*Quercus aegilops*) in the Kurdistan Region, Iraq. *Ecological Processes* **2020**, 9 (1), 1-16.
- Liu, D.; Lei, X.; Gao, W.; Guo, H.; Xie, Y.; Fu, L.; Lei, Y.; Li, Y.; Zhang, Z.; Tang, S., Mapping the potential distribution suitability of 16 tree species under climate change in northeastern China using Maxent modelling. *Journal of Forestry Research* **2022**, 33 (6), 1739-1750.
- Mahmoodi, S.; Ahmadi, K.; Zahravi, M.; Karami, O., Modeling of Iranian oak distribution in the southwest of Iran based on the presence-based approach Maximum Entropy (MaxEnt). *Forest Research and Development*, **2022**; 8(2): 113-131.
- Mehri, S.; Alesheikh, A. A.; Lotfata, A. Abiotic factors impact on oak forest decline in Lorestan Province, Western Iran. *Scientific reports* **2024**, 14 (1), 3973.
- Mirhashemi, H.; Heydari, M.; Karami, O.; Ahmadi, K.; Mosavi, A., Modeling Climate

- Change Effects on the Distribution of Oak Forests with Machine Learning. *Forests* **2023**, *14*, 469.
- Moloudia, F.; Shokati, S., Assessment of Climate Change in Northern Zagros Forests using Stochastic Weather Generator. *GeoConvention: Calgary, Canada* **2018**.
- Moradi, A.; Shabaniyan, N., Land-use change in the Zagros forests and its impact on soil carbon sequestration. *Environment, Development and Sustainability* **2023**, *25* (6), 5411-5426.
- Mori, A. S.; Lertzman, K. P.; Gustafsson, L., Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology* **2017**, *54* (1), 12-27.
- Naimi, B.; Hamm, N.A.S.; Groen, T.A.; Skidmore, A.K.; Toxopeus, A.G., Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? *Ecography* **2014**, *37*, 191-203.
- O'Neill, B. C.; Tebaldi, C.; Van Vuuren, D. P.; Eyring, V.; Friedlingstein, P.; Hurtt, G.; Knutti, R.; Kriegler, E.; Lamarque, J.-F.; Lowe, J., The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development* **2016**, *9* (9), 3461-3482.
- Pachauri, R. K.; Allen, M. R.; Barros, V. R.; Broome, J.; Cramer, W.; Christ, R.; Church, J. A.; Clarke, L.; Dahe, Q.; Dasgupta, P., *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Ipcc, 2014.
- Pebesma, E., Simple features for R: standardized support for spatial vector data. **2018**.
- Riahi, K.; Van Vuuren, D. P.; Kriegler, E.; Edmonds, J.; O'Neill, B. C.; Fujimori, S.; Bauer, N.; Calvin, K.; Dellink, R.; Fricko, O., The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change* **2017**, *42*, 153-168.
- Roebroek, C. T.; Caporaso, L.; Duveiller, G.; Davin, E. L.; Seneviratne, S. I.; Cescatti, A., Potential tree cover under current and future climate scenarios. *Scientific Data* **2025**, *12* (1), 564.
- Sagheb Talebi, K.; Sajedi, T.; Pourhashemi, M., *Forests of Iran: A Treasure from the Past, a Hope for the Future*; Springer Netherlands, 2014.
- Shiravand, H.; Hosseini, S. A., A new evaluation of the influence of climate change on Zagros oak forest dieback in Iran. *Theoretical and applied climatology* **2020**, *141*, 685-697.
- Soltani, A.; Angelsen, A.; Eid, T., Poverty, forest dependence and forest degradation links: evidence from Zagros, Iran. *Environment and Development Economics* **2014**, *19* (5), 607-630.
- Subedi, S. C.; Drake, S.; Adhikari, B.; Coggeshall, M. V., Climate-change habitat shifts for the vulnerable endemic oak species (*Quercus arkansana* Sarg.). *Journal of Forestry Research* **2024**, *35* (1), 23.
- Thomson, A.M.; Calvin, K.V.; Smith, S.J.; Kyle, P.; Volke, A.; Patel, P., RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Clim. Change* **2011**, *109*, 77-94.
- Thornton, D. H.; Fletcher Jr, R. J., Body size and spatial scales in avian response to landscapes: a meta-analysis. *Ecography* **2014**, *37* (5), 454-463.
- Thuiller, W.; Georges, D.; Engler, R.; Breiner, F.; Georges, M. D.; Thuiller, C. W., Package 'biomod2'. *Species distribution modeling within an ensemble forecasting framework* **2016**, *10*, 1600-0587.
- Tilman, D.; Lehman, C., Human-caused environmental change: impacts on plant diversity and evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **2001**, *98* (10), 5433-5440.
- Valavi, R.; Shafizadeh-Moghadam, H.; Matkan, A.; Shakiba, A.; Mirbagheri, B.; Kia, S. H., Modelling climate change effects on Zagros forests in Iran using individual and ensemble forecasting approaches. *Theoretical and Applied Climatology* **2019**, *137*, 1015-1025.
- Watling, J.I.; Brandt, L.A.; Bucklin, D.N.; Fujisaki, I.; Mazzotti, F.J.; Románach, S.S.; Speroterra, C., Performance metrics and variance partitioning reveal sources of uncertainty in species distribution models. *Ecological Modelling* **2015**, *309-310*, 48-59.
- Wei, L.; Wang G.; Liang H.; Pan Y.; Chen X.; Huang Q., Predicting the potential suitable habitat for China's endangered plant *Cycas sexseminifera* based on the MaxEnt model. *Pakistan Journal of Botany* **2025**, *57*(1):163-71.
- Wickham, H.; Averick, M.; Bryan, J.; Chang, W.; McGowan, L. D. A.; François, R.;

- Grolemund, G.; Hayes, A.; Henry, L.; Hester, J. ,Welcome to the Tidyverse. *Journal of open source software* **2019**, 4 (43), 1686.
- Zhang, W.; Shi, H.; Zhang, K.; Shu, X.; Dang, H., Effects of abiotic and biotic factors on woody plant diversity across vertical strata in a temperate forest. *Plant Ecology* **2024**, 225 (1), 1-11.
- Zhao, M.; Dai, L.; Qiu, H.; Zhang, Y.; Chen, M.; Zhang, S., Predicting the current and future distribution of the bamboo leaf roller (*algedonia coclesalis*) in china using the maxent model: implications of climate change for habitat suitability and distribution shifts. *Applied Ecology & Environmental Research* **2025**, 23 (3).
- Zolfaghari, R.; Fayyaz, P.; Jahantab, E.; Bergmeier, E., Habitat variation and vulnerability of *Quercus brantii* woodlands in the ZagrosMountains, Iran. *Turkish Journal of Botany* **2021**, 45 (7), 688-700.