Integrated Watershed Management, Autumn, 2025, 5(3), 105-117 **Article Type: Research**

doi: 10.22034/iwm.2025.2041786.1174 **Online ISSN: 2783-4581**

Modeling the distribution of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl) in Holilan, Iran, using MaxEnt method

Behroz Naseri

Department of Forest Sciences, Islamic Azad University, Ilam, Iran

*__Corresponding author__: Email address: naseribehroz2023@gmail.com

(Received: 23 September 2024 Revised: 04 April 2025 Accepted: 20 April 2025)

Extended abstract

Introduction: The Zagros forests, one of the largest and most significant vegetation zones in Iran, play a vital role in sustaining natural resources and environmental stability. These forests provide critical ecosystem services, including groundwater recharge, soil erosion reduction, climate regulation, biodiversity conservation, and socio-economic benefits. Among the dominant species, *Quercus brantii* (Persian oak) holds a crucial position, widely distributed across the Zagros forests. However, this species has become highly vulnerable and is at risk of extinction due to threats such as overexploitation, habitat destruction, and climate change. This study aims to model the distribution of Quercus brantii using the maximum entropy (MaxEnt) method, evaluate the influence of various environmental factors on its distribution, and produce an optimal distribution map for the species in Holilan County, Ilam Province. The findings will support targeted conservation strategies and sustainable management of Zagros forests.

Materials and Methods: To model the distribution of Quercus brantii in the forests of Holilan County, Ilam Province, the MaxEnt method was employed. For model development, 75% of the data (89 pints) were randomly selected as training data, and the remaining 25% (30 points) were used as test data for independent model evaluation. The maximum number of background points was set to 10,000 with 15 repetitions. Nineteen climatic variables, three physiographic variables (elevation, slope, aspect), and snow cover data were utilized. Initially, the desired environmental layers were prepared using ArcGIS software, and then the MaxEnt model was used to assess the species' current and future (2050-2070) distribution. Model performance was evaluated using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve and the Area Under the Curve (AUC) metric.

Results and Discussion: The evaluation of the modeling accuracy based on the ROC curve showed that the model's accuracy was at an excellent level (AUC = 0.947). The model identified annual temperature, mean monthly temperature, isothermality, annual precipitation, and elevation as the most influential variables, collectively explaining 58% of the distribution variance. Suitable habitats for Quercus brantii covered 7,067 hectares (excellent potential) and 10,779 hectares (good potential), while 54,750 hectares showed low-to-moderate suitability. The species primarily occurred at elevations between 1,000–2,339 meters, with higher prevalence on southern, eastern, and southeastern slopes. Presence peaked at slopes up to 25%, beyond which habitat suitability declined.

Conclusion: The overall findings of this study highlight the significant role of variables such as annual mean temperature, mean monthly temperature, isothermality, annual precipitation, and elevation in modeling the distribution of Quercus brantii. The species is predominantly distributed in southern aspects and at elevations ranging from 1,000 to 2,339 meters above sea level. This research provides valuable insights into the ecological tolerance range of Quercus brantii in relation to environmental variables, which can serve as a scientific basis for management decisions. The information obtained is not only effective for prioritizing protected areas and implementing conservation and restoration measures but also enhances the success rate of plantation and rehabilitation projects, aiding in the preservation and development of this species in vulnerable regions.

Keywords: Quercus brantii, Maximum entropy, Modeling, Holilan, GIS

Citation: Naseri, B. (2025). Modeling the distribution of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl) in Holilan, Iran, using MaxEnt method. *Integrated Watershed Management*, 5(3), 105-117. doi= 10.22034/iwm.2025.2041786.1174

Copyrights:
Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/ by/4.0).

مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، سال پنجم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۴، صفحات (۱۱۷-۱۰۵) نوع مقاله: پژوهشی

شاپا الکترونیکی: ۴۵۸۱-۲۷۸۳ doi: 10.22034/iwm.2025.2041786.1174

مدل‌سازی پراکنش گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) در شهرستان هلیلان با استفاده از روش حداکثر آنتروپی (MaxEnt)

بهروز ناصری

گروه علوم جنگل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد ایلام، ایلام، ایران

* **مسئول مکاتبات**: ایمیل: naseribehroz2023@gmail.com

(**تاریخ دریافت:** ۱۴۰۳/۰۷/۰۲ **تاریخ بازنگری:** ۱۴۰۴/۰۱/۱۵ **تاریخ پذیرش:** ۱۴۰۴/۰۱/۳۱)

چکیده مبسوط

مقدمه: جنگل‌های زاگرس به‌عنوان یکی از وسیع‌ترین و مهم‌ترین نواحی رویشی ایران، نقشی حیاتی در پایداری منابع طبیعی و محیط‌زیست ایفا می‌کنند. این جنگل‌ها علاوه بر ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی و کاهش فرسایش خاک، به دلیل ارائه خدمات ارزشمندی مانند تعدیل اقلیم، حفاظت از تنوع زیستی و ارائه منافع اجتماعی-اقتصادی از اهمیت به‌سزایی برخوردارند. در این میان، بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) مهمترین گونه جنگل‌های زاگرس است و دامنه پراکنش وسیعی در این جنگل‌ها دارد. با توجه به اینکه این گونه به‌دلیل تهدیداتی مانند بهره‌برداری بی‌رویه، تخریب زیستگاه‌ها و تغییرات اقلیمی به‌شدت آسیب‌پذیر شده و در معرض خطر نابودی قرار دارد، این تحقیق با هدف مدل‌سازی پراکنش گونه بلوط ایرانی با استفاده از روش حداکثر آنتروپی (MaxEnt)، بررسی تأثیر عوامل مختلف محیطی بر پراکنش و تهیه نقشه پراکنش بهینه آن در شهرستان هلیلان با استفاده از روش حداکثر آنتروپی انجام شد. نتایج این تحقیق می‌تواند به برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تر برای حفاظت از این گونه ارزشمند و مدیریت پایدار جنگل‌های زاگرس کمک کند.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق برای مدل‌سازی پراکنش این گونه در جنگل‌های شهرستان هلیلان استان ایلام از روش حداکثر آنتروپی استفاده شد. برای ایجاد مدل، ۷۵ درصد داده‌ها (۸۹ نقطه) به‌صورت تصادفی به عنوان داده‌های آموزشی و ۲۵ درصد (۳۰ نقطه) مابقی به عنوان داده‌های آزمون جهت ارزیابی مستقل مدل به کار رفت. حداکثر تعداد نقاط پس‌زمینه نیز ۱۰۰۰۰ با ۱۵ تکرار در نظر گرفته شد. برای این کار از ۱۹ متغیر اقلیمی، ۳ متغیر فیزیوگرافی و پوشش برف استفاده شد. در ابتدا با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS لایه‌های محیطی موردنظر تهیه گردید. سپس از مدل MaxEnt برای بررسی توزیع فعلی و آینده (۲۰۷۰-۲۰۵۰) گونه استفاده شد. همچنین برای ارزیابی دقت مدل‌سازی، آماره سطح زیر نمودار در منحنی ROC اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث: ارزیابی دقت مدل‌سازی بر اساس منحنی ROC نشان داد که دقت مدل در سطح عالی است (AUC = 0.947). نتایج این مطالعه نشان داد که درجه حرارت سالانه، متوسط درجه حرارت ماهانه، شاخص هم‌دمایی، بارش سالانه و ارتفاع از سطح دریا بیشترین سهم را در مدل‌سازی پراکنش گونه بلوط ایرانی داشتند. علاوه بر این، درجه حرارت سالانه و متوسط درجه حرارت ماهانه بیش از نیم درصد سهم کل متغیرها یعنی ۵۸ درصد پراکنش گونه بلوط ایرانی را توجیه کردند و بیشترین سهم را در توجیه پراکنش آن دارا هستند. نتایج مدل نشان داد که محدوده‌ای با مساحت ۷۰۶۷ هکتار در منطقه مورد مطالعه دارای پتانسیل عالی و محدوده‌ای با مساحت ۱۰۷۷۹ هکتار دارای پتانسیل خوب جهت پراکنش گونه بلوط ایرانی می‌باشد. از طرفی ۵۴۷۵۰ هکتار از محدوده منطقه مورد مطالعه پتانسیل ضعیف و متوسطی برای پراکنش گونه بلوط ایرانی نشان داد. نتایج نشان داد که دامنه ارتفاعی حضور گونه بلوط ایرانی از ۱۰۰۰ تا ۲۳۳۹ متر از سطح دریا بوده که با افزایش ارتفاع، احتمال حضور گونه افزایش می‌یابد. گونه بلوط ایرانی تقریباً در تمام جهات جغرافیایی دیده می‌شود و دامنه غالب حضور گونه دامنه‌های جنوبی، شرقی و جنوب‌شرقی است و با افزایش شیب تا حدود ۲۵ درصد، حضور گونه در رویشگاه دارای روند افزایشی است و پس از آن با محدودیت مواجه خواهد شد.

نتیجه‌گیری: نتایج کلی این مطالعه نشان داد که متغیرهایی نظیر دمای متوسط سالانه، دمای متوسط ماهانه، شاخص هم‌دمایی، بارش سالانه و ارتفاع از سطح دریا نقش مهمی در مدل‌سازی پراکنش گونه بلوط ایرانی ایفا می‌کنند. پراکنش این گونه عمدتاً در جهات جنوبی و در دامنه ارتفاعی ۱۰۰۰ تا ۲۳۳۹ متر از سطح دریا مشاهده شد. این تحقیق اطلاعات ارزشمندی درباره دامنه تحمل‌پذیری گونه بلوط ایرانی نسبت به متغیرهای محیطی ارائه می‌دهد که می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد. این اطلاعات نه‌تنها در اولویت‌بندی مناطق حفاظت‌شده و اجرای اقدامات حفاظتی و اصلاحی مؤثر هستند، بلکه با افزایش احتمال موفقیت طرح‌های کاشت و احیاء، به حفظ و توسعه این گونه در مناطق در معرض تخریب کمک می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: بلوط، حداکثر آنتروپی، مدل‌سازی، هلیلان، GIS.

استناد: ناصری، ب. (۱۴۰۴). مدل‌سازی پراکنش گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) در شهرستان هلیلان با استفاده از روش حداکثر آنتروپی (MaxEnt). *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۵(۳)، ۱۱۷-۱۰۵.

حق چاپ:

حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وب‌سایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل‌دسترس است.

مقدمه

جنگل‌های زاگرس به عنوان وسیع‌ترین ناحیه رویشی ایران، دارای جایگاه ویژه‌ای در توسعه اقتصادی بوده و تضمین‌کننده بقاء و پایداری آب و خاک کشور می‌باشند. این جنگل‌ها حدود یک‌سوم جمعیت کل کشور را در خود جای داده و از گذشته محل زندگی ساکنین و عشایر بوده‌اند (Fatahi, 1995). جنگل‌های زاگرس به واسطه نقشی که در ذخیره آب‌های زیرزمینی، حفاظت خاک و دیگر خدمات اجتماعی- اقتصادی ایفا می‌کنند، از اهمیت به‌سزایی برخوردارند. به‌همین دلیل به اطلاعات به‌هنگام برای برنامه‌ریزی دقیق نیاز دارند. هرگونه برنامه‌ریزی نیازمند گستره وسیعی از اطلاعات همه‌جانبه و به‌هنگام است تا با استفاده از آن‌ها برای اتخاذ تصمیم‌های جامع و کامل، حفظ و استمرار این جنگل‌ها تحقق و تداوم یابد. از آنجایی که پوشش گیاهی موجود در جنگل‌های زاگرس قادر به تولید چوب قابل استفاده در صنایع مربوطه نمی‌باشد؛ بنابراین نمی‌توان حجم توده جنگلی را به عنوان یک عامل بررسی و اندازه‌گیری مورد استفاده قرار داد.

در سال‌های اخیر، افزایش دسترسی به داده‌های اقلیمی و استفاده گسترده از مدل‌های توزیع گونه‌ای، پژوهش‌های بوم‌شناسی را تسهیل کرده است. این مدل‌ها، بین پارامترهای محیطی و حضور و عدم حضور گونه‌های گیاهی- جانوری روابط کمّی برقرار می‌کنند، سپس این روابط برای پیش‌بینی توزیع گونه‌ها در مناطق نمونه‌برداری نشده مورد استفاده قرار گرفته و همچنین تغییرات زیست‌محیطی و پیامدهای بوم‌شناختی ناشی از آن را مورد بررسی قرار می‌دهند (Elith & Leathwick, 2009).

آگاهی از پراکنش گونه‌های گیاهی و عوامل تأثیرگذار بر آن‌ها از اهمیت به‌سزایی در مدیریت، بهره‌برداری پایدار و حفاظت از آن‌ها برخوردار است، به‌ویژه در حال حاضر که زیستگاه‌ها و جمعیت گونه‌ها به دلیل افزایش تخریب‌های انسانی، تغییرات آب و هوایی و آفات و امراض محدود شده‌اند. متأسفانه به دلیل محدودیت زمانی و بودجه در دسترس برای مطالعه، اطلاعات کافی از پراکنش گونه‌ها در اختیار نیست. از این رو روش‌های مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای ابزار مناسبی برای غلبه بر این محدودیت‌ها هستند. در این روش‌ها پیش‌بینی پراکنش گونه‌های گیاهی با استفاده از متغیرهای محیطی که با پراکنش گیاهان همبستگی داشته یا کنترل‌کننده این پراکنش هستند، قابل پیش‌بینی است.

بطور کلی، روش‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی برای مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای معرفی شده‌اند که عمده این روش‌ها وابسته به نقاط حضور و عدم حضور گونه و متغیرهای زیستگاهی هستند که تداعی کننده عناصر آشیان بوم‌شناختی آن گونه می‌باشند. یکی از مدل‌های قوی در بررسی نحوه توزیع گونه‌ها الگوریتم حداکثر آنتروپی[1] (MaxEnt) است (Phillips *et al*., 2006). الگوریتم حداکثر آنتروپی متأثر از محدودیت‌های ناشی از متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر نحوه توزیع مکانی گونه است. در واقع این مدل محل حضور را با متغیرهای محیطی در آن مناطق بررسی می‌کند و سپس در سراسر منطقه مورد مطالعه از اصول حداکثر آنتروپی برای تولید نقشه پیش‌بینی در مناطقی که نمونه‌برداری نشده‌اند استفاده می‌کند (Elith *et al*, 2006; Yang *et al*., 2013). به همین دلیل، از مهمترین اهداف این مطالعه، مدل‌سازی پراکنش گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) با استفاده از روش حداکثر آنتروپی، بررسی تأثیر عوامل مختلف بر پراکنش گونه بلوط در شهرستان هلیلان و تهیه نقشه پراکنش بهینه گونه بلوط در شهرستان هلیلان با استفاده از روش حداکثر آنتروپی می‌باشد.

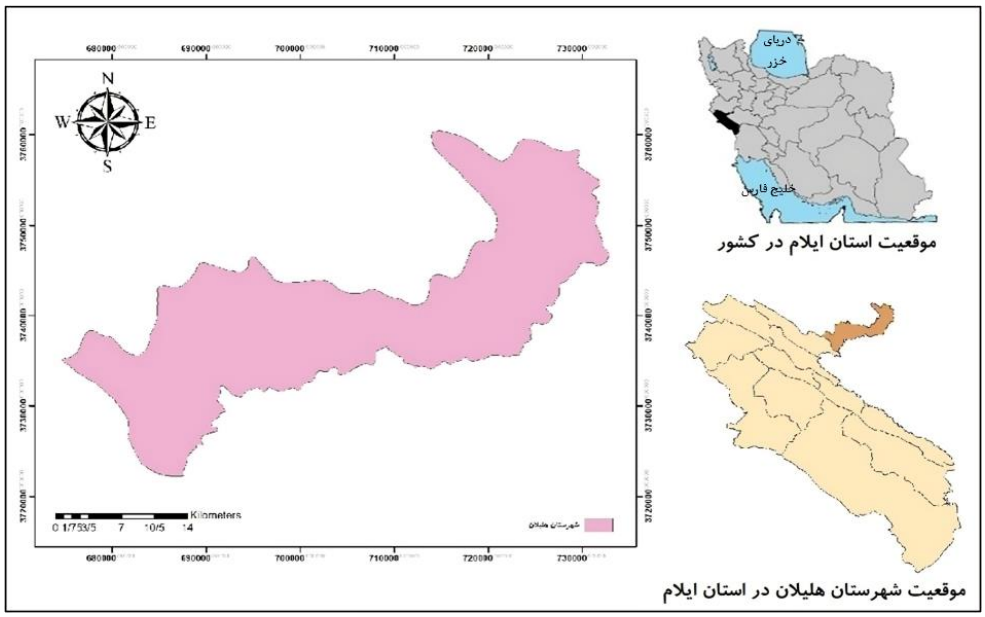
[1] Maximum entropy

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شهرستان هلیلان در شمال استان ایلام با مساحت ۷۲۵۹۶ هکتار می‌باشد. این شهرستان در مجاورت استان‌های کرمانشاه و لرستان قرار دارد. بر اساس سیستم مختصات متریک، منطقه در طول ۶۷۳۹۸۴ و عرض ۳۶۷۲۲۵۷ متر تا طول ۷۳۴۴۵۵ و عرض ۳۷۱۹۹۲۸ متر واقع شده است (شکل ۱).

پوشش غالب آن را جامعه جنگلی بلوط (*Quercetum*) تشکیل می‌دهد تیپ غالب جوامع جنگلی در اکثر نقاط گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) بوده (Amini & Shahbazi, 2015) که ۹۰ درصد پوشش جنگلی را به خود اختصاص داده است. اقلیم منطقه نیمه‌خشک بوده و میانگین بارندگی و دمای سالیانه آن به‌ترتیب ۵۵۰/۵ میلی‌متر و ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد است.



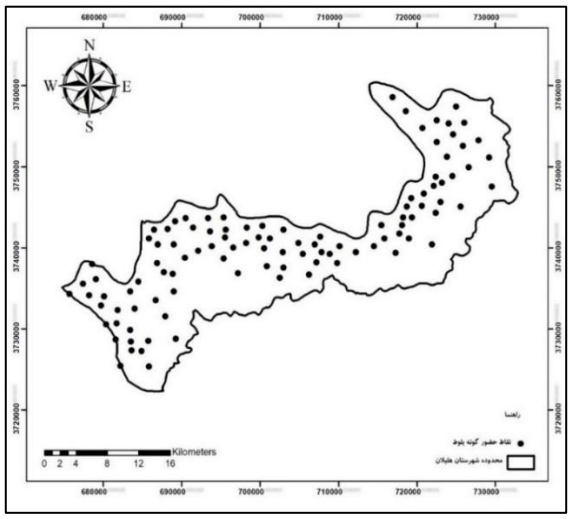
شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان ایلام

Figure 1 - Location of the study area in the country and Ilam province

روش تحقیق

ابتدا محدوده پراکنش گونه درختی بلوط با استفاده از نقشه‌های پوشش گیاهی که از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان تهیه شده بود، مشخص گردید. سپس، بر اساس عوامل فیزیوگرافی (میزان شیب، جهت شیب و ارتفاع از سطح دریا)، مناطق همگن محیطی تفکیک شدند و به‌صورت تصادفی سایت‌های نمونه‌برداری در طبقات همگن، انتخاب گردید. سپس نقاط حضور گونه در این مناطق جنگلی بر اساس بررسی‌های میدانی (اطلاعات کارشناسان اداره منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان هلیلان، ساکنین مناطق و جنگل گردشی) انتخاب شد. ملاک این انتخاب، حضور توده‌هایی بود که گونه موردنظر در آن‌ها تراکم بیشتری داشته باشد. از آنجایی که برای یک قدرت تحلیل مناسب حداقل یک نسبت ده‌تایی از متغیر پیش‌بینی کننده برای اندازه نمونه، باید مورد استفاده قرار گیرد (Miller, 2010)، در نهایت، نقشه حضور گونه بلوط با طول و عرض‌جغرافیایی مشخص و جهت ورود به مدل آماده‌سازی گردید. شکل ۲ موقعیت نقاط حضور ثبت شده در محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج اولیه حاصل از جنگل‌گردشی نشان داد که بخش‌های وسیعی از شهرستان دارای پایه‌های گونه بلوط ایرانی هستند. توده‌های با نسبت آمیختگی بالا که کمترین فاصله بین این توده‌ها ۵ کیلومتر بود انتخاب شدند و مختصات طول و عرض جغرافیایی نقاط حضور گونه با استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی

(GPS) ثبت شدند (شکل ۲). به منظور مدل‌سازی پراکنش گونه بلوط ایرانی در شهرستان هلیلان به تولید نقشه برخی عوامل محیطی مؤثر در انتشار جغرافیایی این گونه در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.7 پرداخته شد. متغیرهای محیط زیستی مورد استفاده برای مدل‌سازی شامل ۱۹ متغیر اقلیمی، ۳ متغیر فیزیوگرافی و متغیر پوشش برف بودند. لازم به ذکر است پیش از مدل‌سازی، همبستگی بین متغیرها بررسی و همبستگی بیش از ۰/۷ مشاهده نشد. در این مطالعه از نرم‌افزارهای Idrisi Selva، ENVI 4.5 و MaxEnt 3.3.3k نیز استفاده شد.



شکل۲- نقشه نقاط ثبت‌شده حضور گونه بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindl) در شهرستان هلیلان

Figure 2- Map of the recorded points of presence of oak species (*Quercus brantii* Lindl) in Holilan city

مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)

مدل MaxEnt یک مدل توزیع گونه‌ای نشأت گرفته از ماشین‌های یادگیری است که برای پیش‌بینی توزیع بالقوه گونه‌ها به کار می‌رود (Phillips *et al.*, 2006). در این روش، ابتدا لایه‌های محیطی ورودی بر اساس نقاط مشاهده شده وارد مدل می‌شوند. مدل MaxEnt بین نقاط رخداد گونه و متغیرهای محیطی بهترین تابع توزیع را بر اساس مفهوم حداکثر آنتروپی تعیین کرده و سپس تابع مذکور را به سرتاسر منطقه مورد مطالعه تعمیم می‌دهد و نقشه پراکنش گونه موردنظر را تولید می‌کند. مدل به منظور پیش‌بینی توزیع حاضر و آینده (۲۰۷۰-۲۰۵۰) در نرم‌افزار MaxEnt 3.3.3k اجرا شد. برای تولید مدل، ۷۵ درصد داده‌ها به‌صورت تصادفی به عنوان داده‌های آموزشی و ۲۵ درصد دیگر به عنوان داده‌های آزمون جهت ارزیابی مستقل مدل به کار رفتند. حداکثر تعداد نقاط پس‌زمینه ۱۰۰۰۰ با ۱۵ تکرار در نظر گرفته شد و مابقی تنظیمات به‌صورت پیش‌فرض پذیرفته گردید (Yang *et al.*, 2013). همچنین برای محاسبه سطح زیر منحنی از پلات ROC استفاده شد. نمودار ROC به‌صورت گرافیکی نشان می‌دهد که یک مدل تا چه میزان قادر است بین کلاس‌های مختلف تمایز قائل شود (Gonçalves *et al.*, 2014). منحنی ROC با ترسیم یک منحنی دوبعدی از نسبت نرخ مثبت صحیح[2] (TPR) در برابر نرخ مثبت کاذب[3] (FPR) ایجاد می‌شود. محور عمودی نمودار نمایانگر TPR و محور افقی نمایانگر FPR است. در این منحنی، سطح زیر نمودار[4] (AUC)، یک معیار عددی است که عملکرد کلی یک مدل را نشان می‌دهد. دامنه AUC بین صفر و ۱ است بطوریکه اعداد نزدیک به ۱ نشان‌دهنده عملکرد عالی در شناسایی کلاس‌ها و اعداد نزدیک به صفر نشان‌دهنده عملکرد ضعیف و عدم توانایی در تفکیک کلاس‌ها می‌باشد.

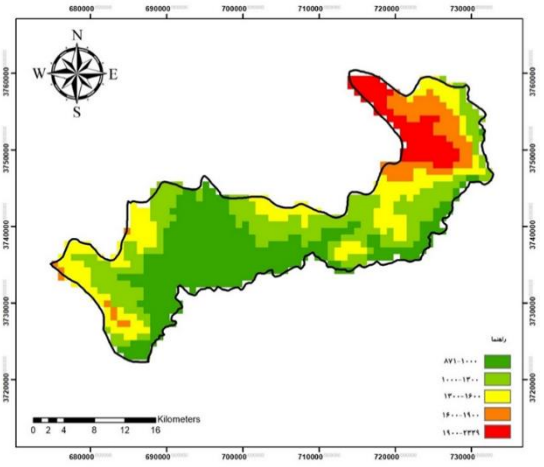
نتایج

عوامل فیزیوگرافی

برای تهیه نقشه‌های عوامل فیزیوگرافی ابتدا مدل رقومی ارتفاع با استفاده از خطوط توپوگرافی تهیه و سپس نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا با دقت ۳۰ متر از آن استخراج گردید (شکل‌های ۳ تا ۵).

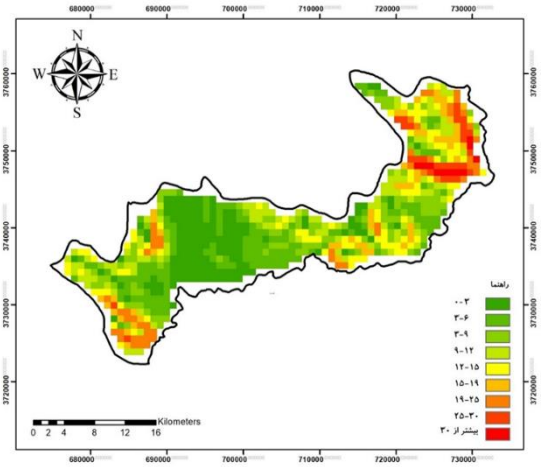
[2] True Positive Rate
[3] False Positive Rate
[4] Area Under the Curve

نقشه پوشش برف با استفاده از محصول ۸ روزه و ۵۰۰ متری MOD10A2 که در پایگاه داده https://nsidc.org موجود است، برای دو ماه پربرف مشخص شده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی محدوده مورد مطالعه (ژانویه و فوریه)، طی دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۰ به کمک نرم‌افزارهای ENVI 4.7 و TerrSet 2020 تولید گردید (شکل ۶).



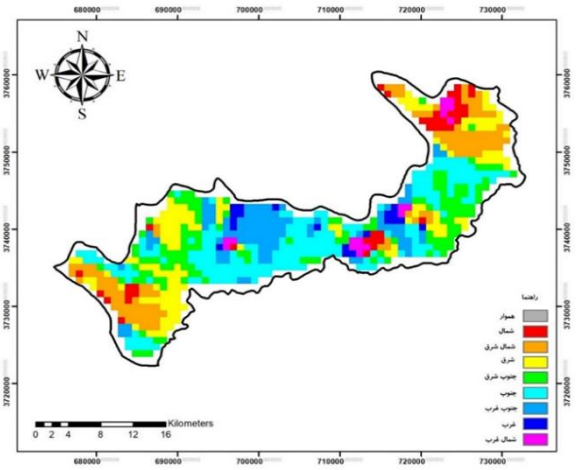
شکل ۳- نقشه طبقات ارتفاعی شهرستان هلیلان

Figure 3- Map of elevation classes of Holilan city



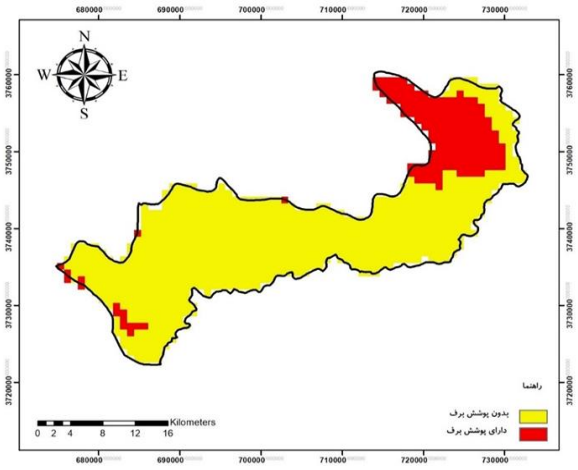
شکل ۴- نقشه طبقات درصد شیب در شهرستان هلیلان

Figure 4- Map of slope percentage classes in Holilan city



شکل ۵-نقشه طبقات جهت شیب در شهرستان هلیلان

Figure 5- map of slope direction classes in Holilan city

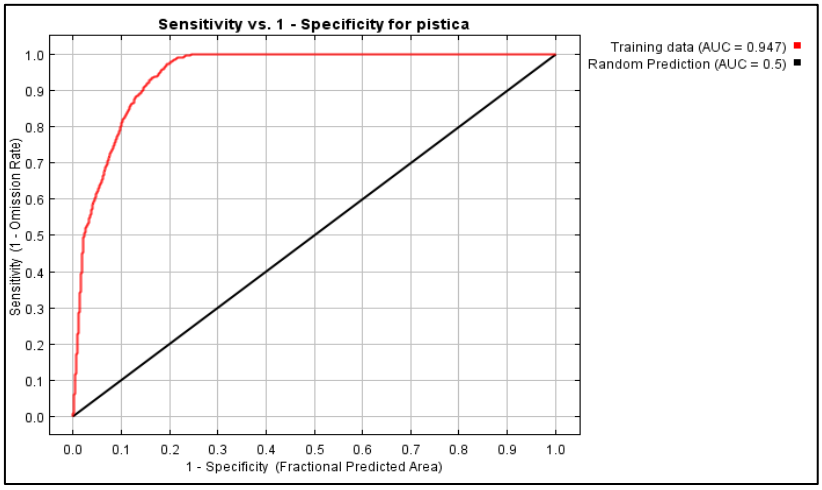


شکل ۶- نقشه تراکم پوشش برف شهرستان هلیلان

Figure 6- Snow cover density map of Holilan city

سطح زیر منحنی

در این تحقیق، ارزیابی نتایج مدل‌سازی با شاخص سطح زیر نمودار (AUC) نشان داد که این آماره با عدد ۰/۹۴۷ بیانگر پیش‌بینی عالی مدل است. سهم هر یک از متغیرها در توسعه مدل نیز در جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق این جدول مهمترین متغیرهایی که بیشترین سهم را در مدل داشته‌اند به‌ترتیب دامنه درجه حرارت سالانه، متوسط ماهانه درجه حرارت، شاخص هم‌دمایی، بارش سالانه و ارتفاع از سطح دریا هستند. دو متغیر دامنه درجه حرارت سالانه، متوسط ماهانه درجه حرارت بیش از نیم درصد سهم کل متغیرها یعنی ۵۸ درصد پراکنش گونه را توجیه می‌کنند و بیشترین سهم را در توجیه پراکنش آن دارا هستند (جدول ۱).



شکل۷- منحنی ROC و مقدار AUC مدل پراکنش گونه بلوط در شهرستان هلیلان

Figure 7- ROC curve and AUC value of oak species distribution model in Holilan city

جدول ۱- سهم تأثیرگذاری (اهمیت) متغیرهای زیست‌محیطی در پراکنش گونه بلوط در شهرستان هلیلان

Table 1- The influence (importance) of environmental variables on the distribution of oak species in Holilan city

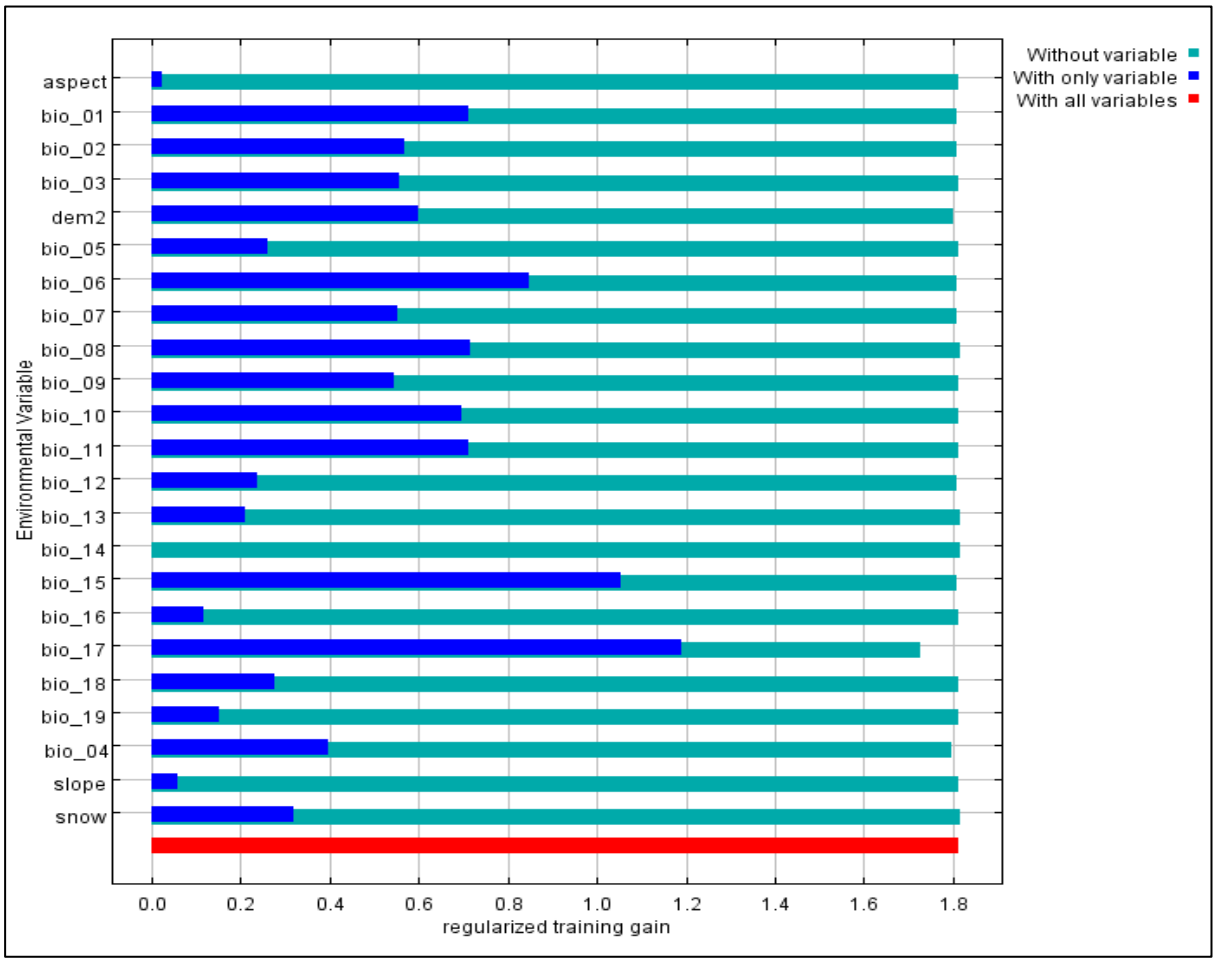
ردیف	متغیر	درصد اهمیت	ردیف	متغیر	درصد اهمیت
1	دامنه درجه حرارت سالانه	38	13	بارش فصلی	0.7
2	میانگین دامنه دمای روزانه	20	14	متوسط درجه حرارت سردترین فصل سال	0.6
3	شاخص هم‌دمایی	14.5	5	جهت	0.5
4	بارش سالانه	7.6	16	درصد شیب	0.5
5	ارتفاع از سطح دریا	5.7	17	حداکثر درجه حرارت گرم‌ترین ماه سال	0.4
6	درجه حرارت فصلی	4.1	18	حداقل درجه حرارت سردترین ماه سال	0.3
7	درجه حرارت متوسط سالانه	1.7	19	بارش سردترین فصل سال	0.1
8	بارش مرطوب‌ترین ماه	1.6	20	بارش گرم‌ترین فصل سال	0
9	بارش مرطوب‌ترین فصل سال	1.2	21	متوسط درجه مرطوب‌ترین فصل سال	0
10	پوشش برف	1	22	متوسط درجه حرارت گرم‌ترین فصل سال	0
11	متوسط درجه حرارت خشک‌ترین فصل سال	0.9	23	بارش خشک‌ترین ماه	0
12	بارش خشک‌ترین فصل سال	0.8			

نتایج تحلیل جک نایف

آنالیز جک‌نایف[5] دستیابی به افزوده (Gain) را در سه حالت مختلف مدل (بدون یک متغیر خاص، تنها با یک متغیر خاص و با تمام متغیرها) نشان می‌دهد. مطابق نتایج این تحلیل، بارندگی خشک‌ترین فصل سال (Bio17) متغیری است که حذف آن بیشترین کاهش را در AUC ایجاد می‌کند. بر اساس نتایج این آزمون بارش فصلی (Bio15) و حداقل دمای سردترین ماه (Bio6) بیشترین سهم را در پیش‌بینی مدل داشته‌اند (شکل ۹). به علاوه، در این مطالعه منحنی‌های پاسخ گونه به متغیرهای محیطی نیز ترسیم شدند (شکل ۱۰). منحنی‌های پاسخ نشان‌دهنده اثر متغیرها روی احتمال توزیع گونه هستند و اینکه هر متغیر به چه شیوه‌ای بر پراکنش گونه تأثیرگذار بوده است. در نهایت بر اساس کارایی خوب مدل در پیش‌بینی پراکنش گونه بلوط بر اساس نقاط احتمال حضور (پراکنش) این گونه

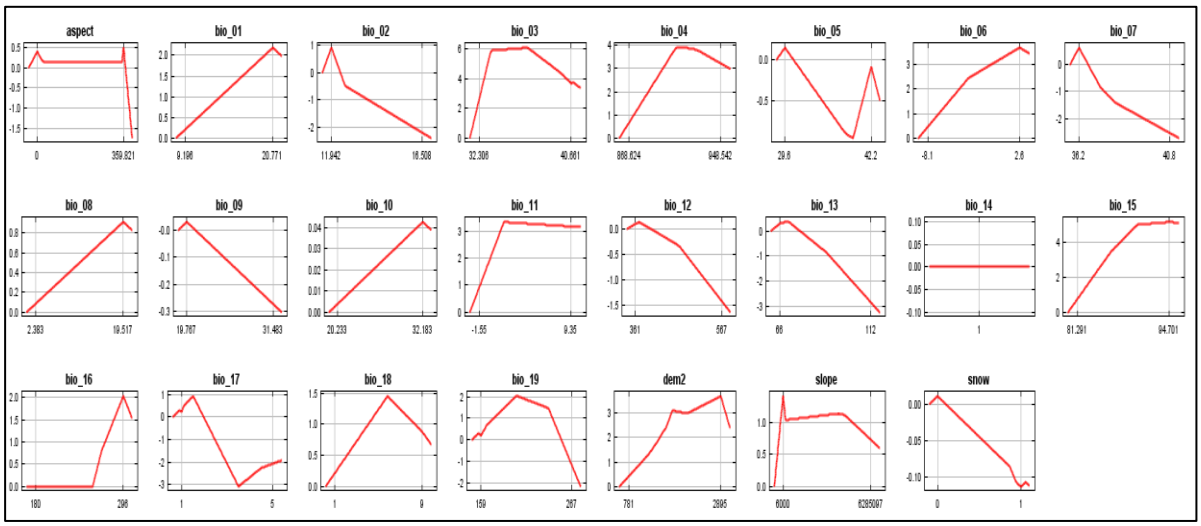
[5] Jackknife

در شهرستان هلیلان تعیین گردید (شکل ۱۱). مطابق این شکل بهترین مکان‌های پیش‌بینی شده برای حضور گونه بلوط در شهرستان هلیلان در مناطق مرتفع و با شیب کمتر می‌باشد.



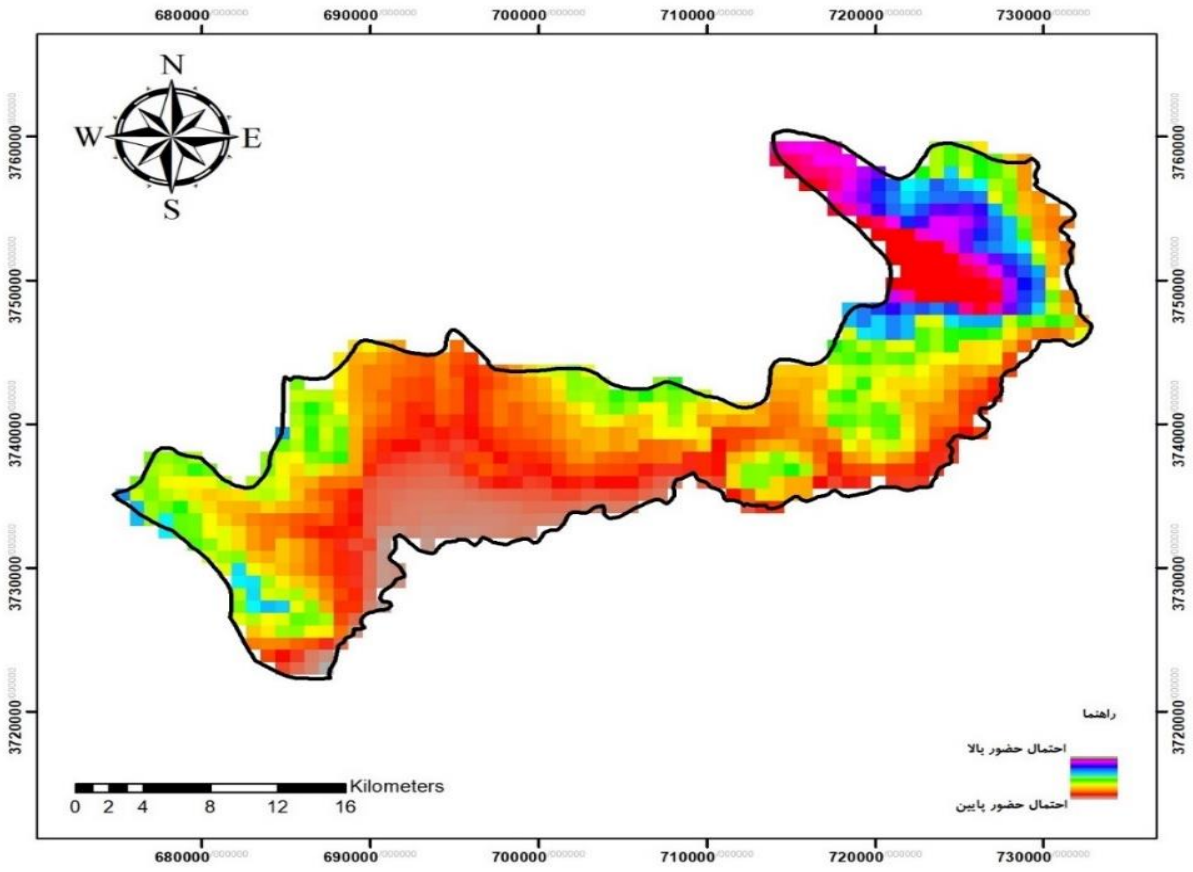
شکل ۹- نتایج آزمون جک نایف برای تعیین اهمیت متغیرهای محیطی در توسعه مدل

Figure 9- Jackknife test results to determine the importance of environmental variables in model development



شکل ۱۰- منحنی‌های پاسخ گونه بلوط ایرانی نسبت به متغیرهای محیطی

Figure 10- The response curves of Persian Oak species to environmental variables



شکل ۱۱- پراکنش پیش‌بینی شده گونه بلوط ایرانی در شهرستان هلیلان

Figure 11- Predicted distribution of Persian Oak species in Holilan city

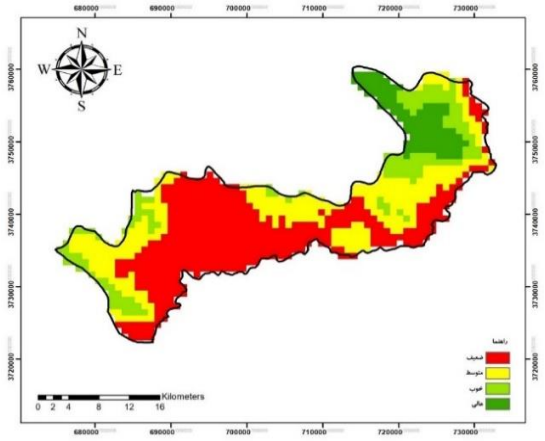
پیش‌بینی تغییرات پراکنش گونه بلوط تحت مدل حداکثر آنتروپی

نتایج نشان داد که محدوده با پتانسیل عالی جهت پراکنش گونه بلوط در منطقه مورد مطالعه مساحتی معادل ۷۰۶۷ هکتار را به خود اختصاص داده است و محدوده با پتانسیل خوب مساحتی معادل ۱۰۷۷۹ هکتار را پوشش می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله ۵۴۷۵۰ هکتار از سطح شهرستان، پتانسیل ضعیف و متوسطی برای پراکنش گونه بلوط در منطقه مورد مطالعه دارد (جدول ۲ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳). با مشاهده شکل ۲ و در نظر گرفتن تراکم نقاط حضور درخت، تطابق بالایی دو نقشه مشاهده می‌شود.

جدول۲- طبقات پراکنش گونه بلوط ایرانی تحت مدل حداکثر آنتروپی

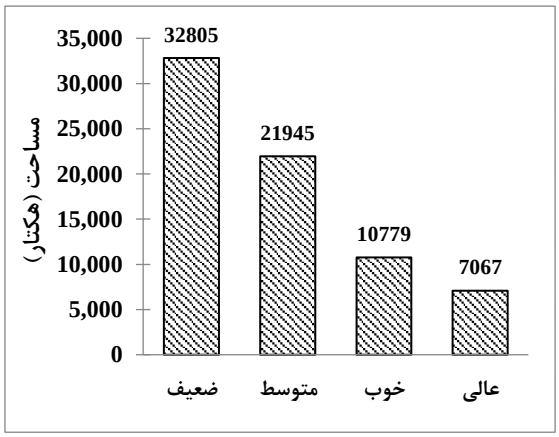
Table 2- distribution classes of Persian Oak species under the MaxEnt model

طبقات پتانسیل گونه	مساحت (هکتار)	درصد از کل مساحت
ضعیف	32805	45.18
متوسط	21945	3.22
خوب	10779	14.84
عالی	7067	9.73
مجموع	72596	100



شکل ۱۲- طبقات پتانسیل پراکنش گونه بلوط ایرانی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی

Figure 12- Persian Oak species distribution potential classes using the MaxEnt model



شکل ۱۳- مساحت پتانسیل پراکنش گونه بلوط ایرانی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی

Figure 13- The area of Persian Oak species distribution potential using the MaxEnt model

بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه، رویشگاه مطلوب گونه بلوط ایرانی به عنوان یکی از گونه‌های مهم جنگل‌های زاگرس با استفاده از ۲۳ پارامتر محیطی (فیزیوگرافی، زیست‌اقلیمی و شرایط پوشش سطح زمین) تحت مدل توزیع گونه‌ای حداکثر آنتروپی برای شرایط حاضر مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که دامنه ارتفاعی حضور گونه بلوط از ۱۰۰۰ تا ۲۳۳۹ متر از سطح دریا بوده، تقریباً در تمام جهات جغرافیایی دیده می‌شود و جهت غالب حضور گونه دامنه‌های شمال و شمال‌شرق است و با افزایش شیب تا حدود ۲۵ درصد، حضور گونه در رویشگاه دارای روند افزایشی است و پس از آن با محدودیت مواجه خواهد شد (شکل ۱۰).

بیشترین فراوانی حضور گونه در طبقه ارتفاعی چهارم، ۲۰۰۰-۱۳۰۰ متر و شیب ۳۰-۲۰ درصد و جهات جغرافیایی شمال و شمال‌شرقی می‌باشد که با یافته‌های Sarangzai و همکاران (۲۰۱۲) که در بررسی اکولوژی و پویایی گونه اُرس در بلوچستان پاکستان، دامنه ارتفاعی این گونه را ۳۰۰۰-۲۰۰۰ متر و شیب حضور گونه را ۱۰ تا ۳۰ درصد دانستند، همخوانی دارد. Bordbar و همکاران (۲۰۱۰) نیز، دامنه ارتفاعی توزیع گونه بلوط را در استان فارس را ۲۵۵۰-۱۰۵۰ متر از سطح دریا بیان کردند.

نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین پراکنش گونه در مناطقی است که کمترین فاصله را با خط برف دارند. همچنین، زمانی که متوسط درجه حرارت در سردترین فصل سال صفر تا ۱۵ و در مرطوب‌ترین فصل حدود ۱۹/۵ درجه سانتی‌گراد و بارش سالانه ۲۵۰-۱۰۰ میلی‌متر باشد، احتمال حضور گونه افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، گونه بلوط در مناطقی حضور پیدا می‌کند که نیاز رطوبتی آن با ذخیره در فصل سرد (بارش زمستان) و فصل گرم (ذوب برف) تأمین شود. گونه بلوط، دره‌ها، مسیل‌ها و محل‌های تجمع رطوبت را برای تأمین نیاز آبی خود و جبران افزایش درجه حرارت به سایر مناطق ترجیح می‌دهد (Querejeta *et al.*, 2009). افزایش فاصله از خط برف به علت افزایش درجه حرارت، موجب هدررفت و تبخیر این ذخیره آبی شده و نمی‌تواند گیاه را برای سال‌های آینده به‌ویژه در شرایط خوب و بسیار خوب سرپا نگه دارد. Ahmed و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه جامعه‌شناسی گیاهی و ساختار جنگل‌های هیمالیا در پاکستان عامل فاصله از خط برف و عمق برف را در توزیع گونه بلوط در این مناطق تأثیرگذار دانستند. Marvi Mohajer (۲۰۰۶)

به تأثیر نقش برف بر توسعه و رشد گونه بلوط تأکید کرده است. به عبارت دیگر، نتایج حاکی از آنست که ذوب برف و دامنه‌های برف‌گیر و رطوبت ناشی از آن، از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر رشد گونه و پراکنش آن در سطح منطقه می‌باشند، با توجه به وجود دوره خشکی سه تا پنج ماهه، ذوب تدریجی برف در این دوره نقش مهمی در تأمین نیاز آبی گیاهان دارد. با افزایش ارتفاع و ماندگاری برف، کاهش دما به‌ویژه در فصول سرد سال، احتمال حضور گونه افزایش می‌یابد. Sass-Klaassen و همکاران (۲۰۰۷)، در مطالعه‌ی حلقه‌های رویشی بلوط در کوهستان‌های شمالی عمان، متوسط درجه حرارت ۱۸، حداکثر ۳۶/۳ و حداقل ۳/۶- درجه سانتی‌گراد را عنوان کردند. بر اساس نتایج به‌دست آمده دو متغیر درجه حرارت سالانه و بارش سالانه تأثیرگذارترین پارامترها بر توزیع گونه بلوط در محدوده مورد مطالعه بوده‌اند.

بررسی خروجی مدل توزیع گونه‌ای نمایشگر آن است که توزیع پتانسیل گونه بلوط در شرایط اقلیمی حاضر، در طبقات مختلف احتمال حضور گونه دارای اختلاف زیادی است. مدل MaxEnt، سطح حضور گونه را در طبقه پتانسیل ضعیف بیش‌تر و در پتانسیل عالی کمتر پیش‌بینی کرده است. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل، دارای عملکرد بسیار ضعیف نبوده که بتوان خروجی حاصل از آن را حذف یا نادیده گرفت. این موضوع با نتایج مطالعات سایر محققان در جنوب آسیا، مانند Remya و همکاران (۲۰۱۵) در کشور هند و Khanum و همکاران (۲۰۱۳) در کشور پاکستان مطابقت دارد.

نتایج اجرای مدل‌ها در مقیاس محلی نشان داد که دو عامل متوسط درجه حرارت مرطوب‌ترین فصل و ارتفاع از سطح دریا، اثرگذارترین متغیرها بر توزیع گونه در منطقه بوده و دامنه تغییرات آن‌ها، احتمالاً متفاوت با بررسی احتمال حضور گونه در مقیاس منطقه‌ای خواهد بود.

پراکنش جغرافیایی گونه‌های گیاهی و استقرار آن‌ها در عرصه‌های طبیعی، بر اساس دامنه بردباری‌شان به عوامل مختلف محیطی و ویژگی‌های اکولوژیکی صورت می‌پذیرد؛ بنابراین شناخت عوامل تأثیرگذار بر پراکنش جغرافیایی گونه می‌تواند در شناسایی مکان بالقوه گونه‌هایی که ارزش حفاظتی آب و خاک را دارند، کارآمد باشد و همچنین به احیاء و توسعه اکوسیستم‌های تخریب شده کمک کند. مدل‌های پیش‌بینی پراکنش جغرافیایی گونه‌های گیاهی مطالعاتی هستند که با داشتن داده‌هایی با قابلیت اطمینان بالا می‌توانند از صرف وقت و هزینه زیاد جلوگیری کرده و انجام تحقیقات اکولوژیکی را مقرون به صرفه نمایند. کارایی مدل حداکثر آنتروپی ثابت کرده که در بحث تعیین مطلوبیت زیستگاه و پراکنش گونه‌ها خیلی مؤثر بوده زیرا فقط بر داده‌های حضور متکی بوده و فاقد بسیاری از عوارض مرتبط با روش‌های تحلیلی حضور و غیاب است (Baldwin, 2009). نتایج به دست آمده از ارزیابی عملکرد مدل حداکثر آنتروپی از طریق آماره سطح زیر منحنی (AUC) معادل ۰/۹۴۷ نشان داد که مدل از توانایی پیش‌بینی عالی برخوردار بوده است. مطالعات بیانگر آن است که حتی در مواقعی که تعداد نمونه‌ها کم است، عملکرد پیش‌بینی روش حداکثر آنتروپی می‌تواند با روش‌هایی که بالاترین دقت پیش‌بینی را دارند، رقابت کند و نتایج قابل قبولی را ارائه دهد (Peterson & Shaw, 2003; Elith *et al*, 2006; Yang *et al*., 2013).

در فرآیند مدل‌سازی دانستن این که کدام متغیرها و به چه میزان در مدل‌سازی نقش داشته‌اند اهمیت دارد، نتایج حاصل از عملکرد گونه در امتداد شیب تغییرات محیطی از طریق منحنی‌های پاسخ به دست می‌آید و بر اساس بررسی که در ارتباط با عوامل مؤثر بر پراکنش گونه بلوط در این پژوهش انجام شد، مشخص شد که دامنه درجه حرارت سالانه، متوسط ماهانه درجه حرارت، شاخص هم‌دمایی، بارش سالانه و ارتفاع از سطح دریا از مهمترین عوامل مؤثر بر پراکنش گونه بلوط ایرانی در سطح استان ایلام است. نتایج این تحقیق با نتایج مطالعه Yaghmaei و همکاران (۲۰۰۹) در خصوص بررسی تأثیر عوامل اقلیمی بر گسترش تیپ‌های جنگلی در استان چهارمحال و بختیاری

همخوانی دارد. این محققین با بررسی ۷۱ متغیر اقلیمی و با استفاده از روش تحلیل عاملی نشان دادند که دمای گرمایشی و بارش از مهمترین عوامل اقلیمی مؤثر بر پراکنش تیپ‌های جنگلی دارای گونه زالزالک است که یکی از گونه‌های غالب در استان چهارمحال و بختیاری می‌باشد.

منحنی عکس‌العمل گونه بلوط نسبت به ارتفاع از سطح دریا نشان داد که بیشترین احتمال حضور گونه در مناطقی با ارتفاع ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر پیش‌بینی می‌شود و با افزایش ارتفاع احتمال حضور گونه افزایش می‌یابد که با نتایج حاصل از تحقیقی که در جنگل‌های شهرستان آبدانان استان ایلام روی گونه زالزالک انجام شد، همخوانی دارد (Hashemnia, 2014).

پراکنش بلوط ایرانی در دامنه ارتفاعی بسیار وسیع می‌باشد؛ اما بهترین رویشگاه این گونه در حوزه رویشی زاگرس در ارتفاعات ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از سطح دریا است. بلوط در جهات مختلف جغرافیایی می‌روید ولی بیشترین سطح گسترش آن در جهات جنوبی است و نیز سرشت نورپسند آن موجب شده در جهات جنوبی دارای تاج پوشش و تراکم بیشتری باشد (Fatahi, 1995) که این موضوع با نتایج این مطالعه مطابقت دارد. Titshall و همکاران (۲۰۰۰) بیان نمودند که ارتفاع، شیب و جهت سه عامل توپوگرافی مهمی هستند که پراکنش و الگوهای پوشش گیاهی را در مناطق کوهستانی کنترل می‌کنند. در مطالعه حاضر نیز ارتفاع مهمترین عامل توپوگرافی در پیش‌بینی پراکنش گونه بلوط ایرانی شناخته شد.

نتایج حاصل از آزمون جک نایف نیز نشان داد که متغیرهای دامنه درجه حرارت سالانه، متوسط ماهانه درجه حرارت، شاخص هم‌دمایی، بارش سالانه و ارتفاع از سطح دریا بر پراکنش گونه تأثیر بیشتری نسبت به دیگر متغیرها دارند که با نتایج حاصل از مطالعه‌ای هماهنگی دارد که دمای گرمایشی را مهمترین عامل در پراکنش پوشش گیاهی در استان چهارمحال و بختیاری می‌داند (Parisaei, 2006). تأثیر عامل دما بیشتر در قسمت‌های جنوب و جنوب‌شرقی استان بارز است و طبق منحنی پاسخ گونه بیشترین پراکنش گونه بلوط ایرانی نیز در جهت جنوبی بوده است.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق اطلاعات کلیدی و مهمی را درباره دامنه تحمل‌پذیری گونه بلوط نسبت به متغیرهای محیطی تأثیرگذار فراهم آورده است. این اطلاعات در اتخاذ تصمیمات مدیریتی برای اولویت‌بندی مناطق حفاظتی و انجام اقدامات اصلاحی و حفاظتی به‌خصوص در مناطقی که پوشش گیاهی در حال تخریب است، مؤثر بوده و شانس موفقیت در طرح‌های کاشت و احیاء را افزایش می‌دهد.

References

Ahmed, M., Husain, T., Sheikh, A.H., Hussain, S.S., & Siddiqui, M.F. (2006). Phytosociology and structure of Himalayan forests from Himalayan climatic zones of Pakistan. *Journal of Botany*, 38(2), 361-383.

Amini, A., & Shahbazi, Z. (2015). Estimating the recreational value of oak forest in Sirvan and Chardavol Townships using contingent valuation method (CVM). *Spatial Planning*, *5*(1), 27-48. (In Persian)

Baldwin, R.A. (2009). Use of maximum entropy modeling in wildlife research. Kearney agricultural center. University of California, *Entropy* , 11, 854-866. https://doi.org/10.3390/e11040854

Bordbar, K., Sagheb-Talebi, Kh., Hamzehpour, M., Joukar, L., Pakparvar, M., & Abbasi, A. R. (2010). Impact of environmental factors on distribution and some quantitative characteristics of Manna Oak (*Quercus brantii* Lindl.) in Fars Province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(3), 390-404. (In Persian)

Bradley, A.P. (1997). The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern recognition*, *30*(7), 1145-1159. https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00142-2

Elith, J. Graham, C.H., & Anderson, R.P. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Echography*, 29, 129-151. https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04596.x

Fatahi, M. (1995). *The history of Zagros vegetation, especially Pistacia atlantica forests, an article presented in the first national seminar of Pistacia atlantica* (Green Pearl). Ilam. 26-62. (In Persian)

Gonçalves, L., Subtil, A., Oliveira, M. R., & de Zea Bermudez, P. (2014). ROC curve estimation: An overview. *REVSTAT-Statistical Journal*, 12(1), 1-20. https://doi.org/10.57805/revstat.v12i1.141

Hashemnia., M. (2014). *Ecological Survey of Crataegus pontica species and rehabitation of suitable regions for plantation in Abdanan*. M.Sc. Thesis Faculty of Agriculture. Ilam University (In Persian)

Khanum, R., Mumtaz, A.S., & Kumar, S. (2013). Predicting impacts of climate change on medicinal asclepiads of Pakistan using Maxent modeling. *Acta Oecologica*, 49, 23-31. https://doi.org/10.1016/j.actao.2013.02.007

Marvi Mohajer, M. (2006). *Forestry and Forestry*.Tehran University Press, Iran: Tehran. (In Persian)

Miller, J. (2010). Species Distribution Modeling. *Geography Compass*. 4(6), 490-509. https://doi.org/101111/j.1749-8198.2010.00351.x

Parisaei, B. (2006). Investigation of important climatic factors on distribution of vegetation types in Charmahal provience using statistical multivariate methods and GIS. *Master's thesis, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology*. (In Persian)

Peterson, A.T., & Shaw, J. (2003). Lutzomyia vectors for cutaneous leishmaniasis in southern Brazil: ecological niche models. predicted geographic distribution, and climate change effects. *International Journal of Parasitology*, 33, 919-931. https://doi.org/10.1016/s0020-7519(03)00094-8

Phillips, S.J. Anderson, R.P., & Schapire, R.E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modeling*, 190, 231-259. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Querejeta, J. I., Egerton-Warburton, L. M., & Allen, M. F. (2009). Topographic position modulates the mycorrhizal response of oak trees to interannual rainfall variability. *Ecology*, *90*(3), 649–662. https://doi.org/10.1890/07-1696.1

Remya K., Ramachandran A., & Jayakumar, S. (2015). Predicting the current and future suitable habitat distribution of Myristica dactyloides Gaertn using MaxEnt model in the Eastern Ghats, India. *Ecological Engineering*, 82, 184-188. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.053

Sarangzai, A. M., Ahmed, M., Ahmed, A., Tareen, L., & Jan, S. U. (2012). The ecology and dynamics of Juniperus excelsa forestin Balochistan - Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 44(5), 1617-1625.

Sass-Klaassen, U., Leuschner, H.H., Buerkert, A., & Helle, G. (2008). Tree- ring analysis of Juniperus excelsa from the northern Oman Mountains. *TRACE Den-drosymposium. 3-6 may, Riga, Latvia*.

Titshall, L.W. O'Connor, T.G., & Morris, C.D. (2009). Effect of long-term exclusion of fire and herbivory on the soils and vegetation of sour grassland. *African Journal of Range and Forage Science*, 17, 70–80. https://doi.org/10.2989/10220110009485742

Yaghmaei, L., Khodagholi, M., Soltani, S., & Saboohi, R. (2009). Effect of climatic factors on distribution of forest types using multivariate statistical methods. *Iranian Journal of Forest*, 1(3), 239-251. (In Persian)

Yang, X.Q. Kushwaha, S.P.S. Saran. S. Xu, J., & Roy, P.S. (2013). Maxent modeling for predicting the potential distribution of medicinal plant, Justiciaadhatoda L. in Lesser Himalayan foothills. *Ecological Engineering*, 51, 83–87. http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.004