Research Article

Iranian Journal of Range and Desert Research
Vol. 33, No. 1, Page 36- 53 (2026)

DOI: 10.22092/ijrdr.2026.135493

Effects of climate change on the distribution of *Thymus persicus* (Ronniger Ex Rech.F.) jalas In mountainous habitats of north western Iran

Nasim Shaabani, [1]* Farhad Aghajanloo,[2] Nafiseh Salahi Moghadam,[3] Peyman Akbarzadeh[1], Mehdi Khoshbakht[4]

1*-Corresponding author, Researcher, Forests and Rangelands Research Section, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Zanjan, Iran, Email: n.shabani@areeo.ac.ir
2- Assistant Professor, Forests and Rangelands Research Section, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research Center ,AREEO, Zanjan, Iran
3-Researcher, Economic, Social and Extension Research Section, Zanjan Agricultural and Natural Resources Research Center, AREEO, Zanjan, Iran
4-Watershed Management Expert, Hamadan General Directorate of Natural Resources, Forests,Rangelands and Watershed Management Organization, Hamadan, Iran

Received:04/23/2025 Revised: 09/02/2025 Accepted: 01/25/2026 Published:02/10/2026

Abstract

Background and Objectives

Climate change threatens native plant habitats and distribution. These changes can widely affect plant species distribution. Thymus persicus grows only in certain areas of northwestern Iran and risks extinction for unknown reasons. This study uses the maximum entropy (MaxEnt) model to predict climate change on T. persicus distribution in northwestern Iran. We aim to assess climate change on this species' habitats and identify seriously threatened areas.

Methodology

We selected Mahneshan County in Zanjan Province and Takab County in West Azerbaijan Province in northwestern Iran as study areas. To locate T. persicus, we randomly classified and selected 70 presence sites based on the provinces' vegetation typology map, which served as training data for modeling. To evaluate the model, we collected 70 actual presence sites in the field using GPS in July 2024 in Mahneshan (around Belghis Peak) and Takab County. To model species distribution, we used 30 environmental variables: 19 climatic variables across three periods—present (2024, representing 1990–2020), 2070 (2060–2080), and 2100 (2080–2100)—under SSP585 and SSP126 scenarios using the IPSL-CM6A-LR general circulation model. We also included three physiographic variables (elevation, slope, and aspect) and eight soil physical and chemical variables. We prepared all environmental data using ArcGIS 10.8 at a 30 second scale (about one km²) and then used MaxEnt to model T. persicus distribution.

Results

We prepared current distribution maps using climatic data under SSP585 and SSP126 scenarios alongside soil and physiographic data. Comparing soil and climatic data on distribution prediction using the AUC index showed that soil data (AUC = 0.85) has less of an effect on species distribution. This may reflect missing data on lead and zinc contamination in the region, which

Copyright: © 2024 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (http://ijrdr.areeo.ac.ir/) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0)a, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

we could not incorporate into the model. However, these elements may greatly influence species distribution because T. persicus grows near the Angouran lead and zinc mine. We then prepared future distribution maps for 2070 and 2100 using climatic and physiographic data. The model results showed that altitude, Bio1, Bio10, Bio11, Bio6, Bio12, Bio17, Bio18, Bio5, and slope most strongly affect species distribution. T. persicus distributed more effectively in areas with 300–500 mm annual rainfall, altitudes above 2500 m, temperatures below 8 °C, and slopes above 20°.

Conclusion

Modeling T. persicus distribution under SSP126 and SSP585 scenarios shows a significant future reduction in favorable habitat area. Currently, favorable habitat (best threshold of 0.3) covers about 550.4 km². By 2070, this will shrink to 377.4 km² under SSP126 and to 252.2 km² under SSP585. By 2100, this reduction will continue, with favorable habitat reaching 181.2 km² (SSP126) and 93.9 km² (SSP585). These changes reveal climate change's negative effects on Persian thyme distribution and highlight the urgent need to protect this species from climate threats.

Keywords: Climate Change, favorable habitat ,maximum entropy, *T. Persicus*

بررسی اثر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه آویشن ایرانی (*Thymus persicus* (Ronniger ex rech.f.)jalas) در رویشگاه‌های کوهستانی شمال‌غرب ایران

نسیم شعبانی[۱*]، فرهاد آقاجانلو[۲]، نفیسه صلاحی مقدم [۳]، پیمان اکبرزاده [۱] و مهدی خوشبخت[۴]

۱*- نویسنده مسئول، محقق، بخش جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران، پست‌الکترونیک: n.shabani@areeo.ac.ir

۲- استادیار، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران

۳- محقق، بخش تحقیقات اقتصادی، اجتماعی و ترویجی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان زنجان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زنجان، ایران

۴- کارشناس، بخش آبخیزداری، اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری، همدان، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۰۲/۰۳ تاریخ اصلاح نهایی: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱ تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۱۱/۰۵ تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

چکیده

سابقه و هدف

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تهدیدکننده برای رویشگاه‌ها و پراکنش گیاهان بومی، در حال ظهور است. این تغییرات می‌توانند تأثیرات گسترده‌ای بر پراکنش گونه‌های گیاهی داشته باشند. گونه گیاهی آویشن ایرانی (*Thymus persicus*) تنها در نواحی خاصی از شمال‌غرب ایران یافت می‌شود و به دلایل نامعلومی در معرض خطر انقراض قرار دارد. این مطالعه با استفاده از مدل حداکثرآنتروپی (MaxEnt) به پیش‌بینی اثر تغییرات اقلیمی بر پراکنش آویشن ایرانی در نواحی شمال‌غربی ایران پرداخته است. هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیرات احتمالی تغییرات اقلیمی بر رویشگاه‌های این گونه و شناسایی مناطقی است که ممکن است تحت تهدیدات جدی قرار بگیرند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش شهرستان ماهنشان استان زنجان و شهرستان تکاب در استان آذربایجان‌غربی واقع در شمال‌غرب ایران به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شدند. برای تعیین مکان‌های حضور گونه آویشن ایرانی، ۷۰ سایت حضور به‌صورت تصادفی طبقه‌بندی شده و براساس نقشه تیپ‌بندی پوشش گیاهی استان‌ها انتخاب شد که این نقاط به عنوان داده‌های آموزشی برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین، برای ارزیابی مدل، ۷۰ سایت حضور واقعی به‌صورت میدانی و با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) در تیرماه ۱۴۰۳ در مناطق ماهنشان استان زنجان (محدوده جهت‌های قله بلقیس) و شهرستان تکاب استان آذربایجان غربی برداشت شدند. برای مدل‌سازی پراکنش این گونه، از ۳۰ متغیر محیطی شامل ۱۹ متغیر اقلیمی در سه بازه زمانی حال حاضر ۲۰۲۴ (۱۹۹۰–۲۰۲۰)، ۲۰۷۰ (۲۰۶۰–۲۰۸۰) و ۲۱۰۰ (۲۰۸۰–۲۱۰۰) تحت سناریوهای SSP585 و SSP126 و مدل گردش عمومی IPSL-CM6A-LR، ۳ متغیر فیزیوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت شیب) و ۸ متغیر فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شد. تمامی داده‌های محیطی با نرم‌افزار ArcGIS 10.8 در مقیاس ۳۰ ثانیه (حدود یک کیلومترمربع) آماده گردید. در نهایت از مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) به منظور مدل‌سازی پراکنش گونه آویشن ایرانی استفاده گردید.

نتایج

نقشه‌های پراکنش این گونه با داده‌های اقلیمی تحت دو سناریو SSP585 و SSP126، به همراه داده‌های خاک و فیزیوگرافی

تهیه شدند. مقایسه بین تأثیر داده‌های خاک و اقلیم بر پیش‌بینی پراکنش، با استفاده از شاخص AUC نشان داد که داده‌های خاک (AUC=0.85) تأثیر کمتری در پیش‌بینی پراکنش این گونه دارند. این موضوع می‌تواند به دلیل عدم دسترسی به داده‌هایی مانند آلودگی منطقه به فلزات سرب و روی باشد که این اطلاعات به مدل وارد نشدند. این در حالی است که این عناصر به دلیل قرارگیری گونه آویشن ایرانی در نزدیکی معدن سرب و روی انگوران می‌توانند تأثیر زیادی بر پراکنش این گونه داشته باشند. در ادامه، نقشه‌های پراکنش آینده گونه برای سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ با استفاده از داده‌های اقلیمی و فیزیوگرافی تهیه شد. نتایج مدل نشان داد که مهمترین متغیرهای مؤثر بر پراکنش گونه مورد مطالعه شامل ارتفاع، Bio1، Bio10، Bio11، Bio6، Bio12، Bio17، Bio18، Bio5 و شیب می‌باشند. همچنین طبق نتایج به دست آمده آویشن ایرانی در مناطق با بارش سالانه ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر، ارتفاعات بالای ۲۵۰۰ متر، دماهای کمتر از ۸ درجه سانتی‌گراد و شیب‌های بیش از ۲۰ درجه پراکنش مؤثرتری داشت.

نتیجه‌گیری

نتایج مدل‌سازی پراکنش گونه آویشن ایرانی تحت سناریوهای SSP126 و SSP585 نشان‌دهنده کاهش قابل توجه مساحت مناطق مطلوب برای رویش این گونه در آینده است. در حال حاضر، مساحت منطقه مطلوب (با آستانه بهترین ۰/۳) حدود۵۵۰/۴ کیلومتر مربع است که در سال ۲۰۷۰ به ۳۷۷/۴ کیلومتر مربع تحت سناریوی SSP126 و ۲۵۲/۲ کیلومتر مربع تحت سناریوی SSP585 کاهش می‌یابد. در سال ۲۱۰۰، این کاهش بیشتر شده و مساحت منطقه مطلوب به۱۸۱/۲ کیلومتر مربع (SSP126) و ۹۳,۹ کیلومتر مربع (SSP585) خواهد رسید. این تغییرات نشان‌دهنده تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی بر پراکنش گونه آویشن ایرانی است و ضرورت انجام اقدامات حفاظتی برای حفظ این گونه در برابر تهدیدات ناشی از تغییرات اقلیمی را برجسته می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آویشن ایرانی، تغییر اقلیم، حداکثر آنتروپی، رویشگاه مطلوب.

مقدمه

جمع‌آوری گیاهان دارویی و معطر از طبیعت به منظور تأمین غذا و دارو از قدمت بالایی برخوردار است (Mehrnia & Hosseini, 2024). از ۴۲۲۰۰۰ گونه گیاهان آوندی در جهان، ۵۰۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ گونه از آنها به صورت دارویی استفاده می‌شود و حاوی اطلاعات ارزشمند درمانی هستند. به عنوان یکی از مراکز مهم منابع زیستی جهان، قاره آسیا دارای بیش از ۳۸۶۶۰ گونه گیاهان دارویی و معطر است. امروزه کاربرد این گونه‌ها به دلیل ظرفیت غنی آنها برای درمان بیماری‌های مختلف و عوارض جانبی کمتر رو به افزایش است (Hassanpouraghdam *et al.*, 2022). برداشت بی‌رویه گیاهان دارویی باعث کاهش تدریجی برخی گونه‌ها از رویشگاه‌های طبیعی آنها، فرسایش ژنتیکی و انقراض این گونه‌ها می‌شود. حفاظت از گیاهان در حال انقراض می‌تواند توسط راهبردهای مختلفی به دست آید (Bakhtiar& Mirjalili, 2024). برخی از گیاهان به دلیل اینکه انحصاری هستند، بیشتر در معرض خطر و انقراض قرار دارند. این گونه‌ها فقط در یک منطقه خاص یافت می‌شوند و چون جغرافیای محدودی دارند، تخریب رویشگاه آنها به علت فعالیت‌های معادن، تغییر اقلیم جهانی، آلودگی هوا و آب، جنگل‌زدایی، توسعه شهری و کشاورزی می‌تواند منجر به کاهش شدید جمعیتشان شود (Hassanpouraghdam *et al.*, 2022). در واقع امروزه تغییر اقلیم به عنوان یک نگرانی بزرگ، توجه سیاست‌گذاران و دانشمندان را به خود جلب کرده است و به تهدیدی جدی برای بوم‌نظام‌ها تبدیل شده است (Shidayi *et al.*, 2023). استفاده از سوخت‌های فسیلی، تخریب جنگل و صنعتی شدن جوامع ازجمله عوامل مؤثر در انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شوند و روند تغییر اقلیم را تسریع می‌کنند. براساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، دوره ۳۰ ساله اخیر را می‌توان گرم‌ترین دوره ۸۰۰ سال

گذشته دانست، به‌طوری‌که گرمای کره زمین ۱,۵ درجه سانتی گراد بین سال‌های ۲۰۳۰ و ۲۰۵۰ میلادی افزایش می‌یابد. درک رابطه بین گونه گیاهی و اقلیم، مفهوم کلیدی در بوم شناسی و حفاظت است. تغییر اقلیم یکی از عوامل مؤثر بر پراکنش گونه‌های گیاهی است و باعث انقراض برخی گونه‌ها یا گسترش و پراکنش گونه‌های دیگر می‌شود (Nazari *et al*., 2021).

خانواده Lamiaceae یکی از بزرگ‌ترین گیاهان گلدار است که شامل ۲۳۶ جنس و بیش از ۷۰۰۰ گونه و با ظاهر جذاب، طعم خاص، رایحه قوی و قابلیت درمانی می‌باشد. این خانواده به دلیل ترکیبات گیاهی غنی، از اهمیت اکولوژیکی، اقتصادی و فرهنگی قابل توجهی برخوردار است. همچنین به دلیل این ویژگی‌های مطلوب، به‌طور گسترده در سراسر جهان کشت می‌شود (Jia *et al*.,2024). جنس آویشن (Thymus sp) با دارا بودن بیش از ۲۵۰ گونه گیاهی، یکی از مهمترین سرده‌های تیره نعناعیان است که مراکز تنوع آن در منطقه مدیترانه و غرب آسیاست (Bakhtiar& Mirjalili, 2024). از میان گونه‌های آویشن ۱۰ گونه از ایران شناسایی شده است که از این تعداد ۱۱ گونه و زیرگونه توسط پروفسور ریشینگر در فلور ایرانیکا گزارش شده بود. در این بین، چهار گونه Thymus *Persicus*، *Thymus Carmanicus*، *Thymus Daenensis* و *Thymus Trautvetteri* انحصاری کشور ایران است (Nazarli et al., 2017). گونه‌های مختلف آویشن در رویشگاه‌های زاگرس و البرز و سایر مناطق کوهستانی وجود دارند. ۱۸ گونه از آویشن‌های کشور در استان‌های شمالی، ۱۱ گونه در استان‌های غربی، ۱ گونه در فارس و ۲ گونه در کرمان وجود دارند (Bakhtiar *et al*., 2023). برخی از مطالعات پیشین انجام شده در مورد بررسی اثر تغییر اقلیم بر گونه‌های مختلف آویشن و دیگر گونه‌ها در ایران به شرح ذیل می‌باشد: Nazari و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر پراکنش جغرافیایی گونه دارویی آویشن کوهی (Boiss and Hohen) (*Thymus kotschyanus*) با بهره‌گیری از مدل‌سازی ترکیبی پرداختند و اشاره کردند که تغییر اقلیم محدوده پراکنش گونه را تغییر داده و به سمت ارتفاعات بالاتر در آینده جابه‌جا خواهد کرد. Khajoei Nasab و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر پراکنش گیاهان دارویی *Echium amoenum* و *Echium italicum*در ایران پرداختند و اشاره کردند که پراکنش گونه‌های مورد مطالعه در پاسخ به تغییر اقلیم و تحت سناریوهای انتشار RCP2. 6 و RCP8. 5 در دهه‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ کاهش خواهند یافت. Hosseini و همکاران (۲۰۲۴a) به بررسی مدل‌سازی ظرفیت رویشگاه و تأثیر تغییر اقلیم بر پراکنش فعلی و آینده سه گونه آویشن *Thymus fedtschenkoi, Thymus pubescens, Thymus transcaucasicus* در ایران با استفاده از مدل MaxEnt پرداختند و نتایج نشان داد که این سه گونه آویشن در سال‌های آینده تغییرات مساحتی منفی را تجربه کنند. Hosseini و همکاران (۲۰۲۴b) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر پراکنش آینده دو گونه آویشن *T. kotschyanus* Boiss , *T.daenensis* در ایران با استفاده از مدل MaxEnt پرداختند. نتایج آنان نشان داد که دو گونه مذکور در سال‌های آینده دستخوش تغییرات مساحت منفی شوند. Hosseini و همکاران (۲۰۲۴c) به بررسی محدوده آینده دو زیرگونه *T. daenensis* در ایران تحت سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از مدل MaxEnt پرداختند و نتایج نشان داد که براساس پیش‌بینی‌ها، انتظار می‌رود این دو زیرگونه در سال‌های آینده با کاهش مساحت مواجه شوند. Alinejad و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی پیش‌بینی اثرهای تغییراقلیم بر پراکنش گونه‌های *Teucrium polium* L و *T. kotschyanus* Boiss پرداختند و اشاره کردند که محتوای کربن آلی در نیمرخ خاک مهمترین متغیر مؤثر بر پراکنش هر دو گونه است. نتایج این مطالعه می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای شناسایی اولویت مناطق و پناهگاه‌های احتمالی آینده برای حفاظت از *T. kotschyanus* ارائه دهد.

در این مطالعه با توجه به اهمیت زیست‌محیطی و اکولوژیکی گونه آویشن ایرانی (*T. persicus*) در اکوسیستم‌های شمال‌غربی ایران و تهدیداتی که تغییرات اقلیمی برای این گونه به همراه دارد، به بررسی مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) برای پیش‌بینی اثرهای تغییر اقلیم بر پراکنش این گونه در این مناطق پرداخته و دقت پیش‌بینی‌های آن را ارزیابی

کردیم. در واقع طبق بررسی‌های انجام شده، گونه آویشن ایرانی یکی از گونه‌های بومی ایران است که تنها در مناطق خاصی از کشور مشاهده شده است. این گونه به‌ویژه در مناطق کوهستانی و سخت‌گذر استان‌های شمال‌غربی ایران شامل ماهنشان در استان زنجان، قله بلقیس در این استان و تکاب در استان آذربایجان‌غربی می‌شود. همچنین طبق بازدیدهای میدانی این گونه در کنار معدن سرب انگوران استان زنجان و مناطق کوهستانی، به عنوان یک عنصر مهم در اکوسیستم‌های طبیعی و بومی این نواحی شناخته می‌شود. از آنجایی که این گونه به عنوان یک گیاه بومی در این مناطق و در برخی از رویشگاه‌های خاص یافت می‌شود، حفاظت از پراکنش آن در برابر تغییرات اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. هدف اصلی این مطالعه، پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه آویشن ایرانی در رویشگاه‌های کوهستانی شمال‌غربی ایران با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی می‌باشد.

روش کار

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی این پژوهش شامل شهرستان ماهنشان استان زنجان و شهرستان تکاب در استان آذربایجان‌غربی واقع در شمال‌غرب ایران است. شهرستان ماهنشان با مساحت ۲۸۱۵ کیلومتر مربع، یکی از مناطق غنی از نظر پوشش گیاهی است که به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، دارای ترکیبی از دشت‌ها و ارتفاعات متنوع است. این منطقه از شمال‌شرق به شهرستان زنجان، از شمال‌غرب به استان آذربایجان‌شرقی، از غرب به استان آذربایجان‌غربی و از جنوب به استان کردستان محدود می‌شود. اقلیم شهرستان ماهنشان براساس طبقه‌بندی دومارتن، نیمه‌خشک و سرد و براساس طبقه‌بندی آمبرژه، خشک و سرد است. این منطقه شامل بخش‌های مرتفع کوهستانی با بارش‌های عمدتاً برفی و مناطق پست‌تر با بارش‌های بارانی است(Toghranegar *et al*., 2020) . حضور گونه آویشن ایرانی در این ناحیه و بررسی ارتباط آن با شرایط خاک و اقلیم منطقه، اطلاعات ارزشمندی درباره الگوی پراکنش این گونه ارائه خواهد داد. تکاب مرتفع‌ترین و سردترین شهر استان آذربایجان‌غربی است. این شهرستان با مساحت ۲/۵۲۳ کیلومترمربع، از شمال به شهرستان چاراویماق در استان آذربایجان‌شرقی، از شرق به شهرستان ماهنشان در استان زنجان، از غرب به شهرستان شاهین‌دژ در استان آذربایجان‌غربی و از جنوب به شهرستان‌های بیجار، دیواندره و سقز در استان کردستان محدود می‌شود (Latifi *et al*., 2019) (شکل ۱).

گونه مورد مطالعه

آویشن ایرانی با نام علمی Ronniger Ex *Thymus Persicus Jalas*(Rech.F) ازجمله گیاهان بومی ایران است (شکل ۱) و متعلق به تیره نعناعیان (lamiaceae= labiatae)می‌باشد. این گونه یکی از گونه‌های انحصاری و در حال انقراض جنس آویشن در ایران است که بیشتر در شمال‌غرب ایران، به‌ویژه استان‌های زنجان و آذربایجان‌غربی یافت می‌شود (Asghari *et al*., 2019). در واقع این گونه یکی از گیاهان دارویی پرمصرف در ایران است که در مناطق آلوده به فلزات سنگین ازجمله نیکل و کادمیوم در استان زنجان یافت می‌شود. این گونه با داشتن برگ‌های باریک خطی شکل با کرک‌های غیرغده‌ای بلند به همراه کرک‌های غده‌ای تک‌سلولی کوتاه در بین سایر گونه‌های جنس آویشن به خوبی متمایز است (Sonboli *et al*., 2013). همچنین این گیاه به صورت سنتی به عنوان ضد نفخ، هضم‌کننده غذا، ضداسپاسم، ضد سرفه و خلط‌آور و به‌علت داشتن ترکیبات اصلی تیمول در صنایع غذایی، دارویی، بهداشتی و آرایشی استفاده می‌شود. اثرهای ضد قارچ، ضد انگل و ضد باکتریایی این گیاه و اثرهای درمانی آن برای درمان آسم، سرفه‌های خشک مکرر و برونشیت به اثبات رسیده است (Aghaei & Mostafavi, 2008). گونه آویشن ایرانی به عنوان یک گیاه گرده‌افشانی متقابل می‌باشد که به‌دلیل گستره محدود پراکنش، سرعت تکثیر کم در طبیعت، اختلالات کاربری زمین، بهره‌برداری بیش از حد از معادن و جمع‌آوری بیش از حد

گیاهان وحشی برای اهداف دارویی می‌توان گفت که این گونه اکنون تقریباً منقرض شده و در فهرست گونه‌های در معرض انقراض قرار گرفته است و به‌عنوان یک گونه بسیار آسیب‌پذیر در ایران شناخته می‌شود (Bakhtiar *et al*., 2016). در اطراف زنجان شرکت‌های بزرگ استخراج فلزات سنگین ازجمله سرب، روی، نیکل و کادمیوم قرار دارند و احتمال آلودگی خاک‌ها و گیاهان اطراف شهر به فلزات سنگین وجود دارد. دلایل مختلفی برای در انقراض قرار گرفتن این گونه مهم پیش بینی شده است که در این مطالعه اثر تغییر اقلیم بر پراکنش آن سنجیده شد.

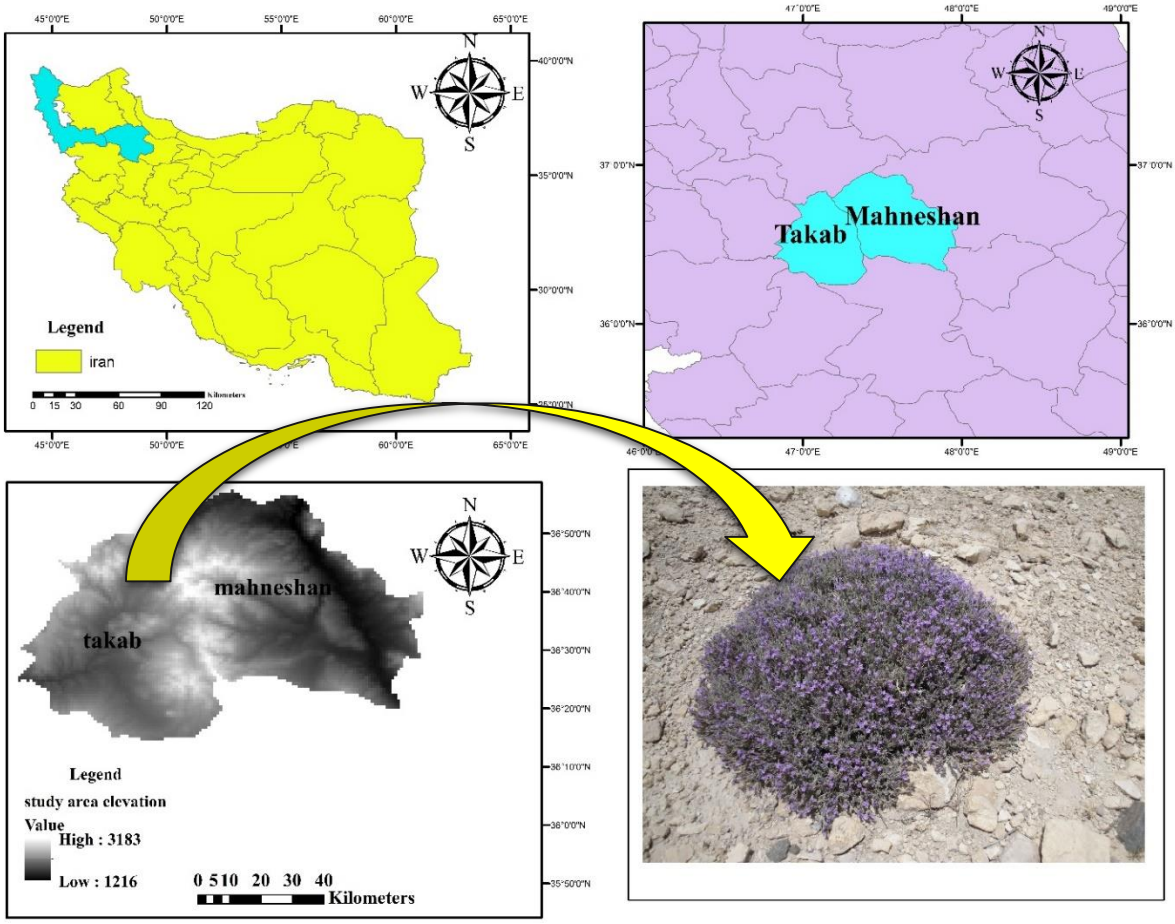
ثبت نقاط حضور گونه

برای مدل‌سازی حضور گونه آویشن ایرانی، ابتدا ۷۰ نقطه حضور به‌صورت تصادفی‌طبقه‌بندی‌شده براساس نقشه تیپ‌بندی پوشش گیاهی مناطق مطالعاتی انتخاب شد و به‌عنوان داده‌های آموزشی وارد مدل شدند. سپس برای ارزیابی عملکرد مدل، ۷۰ نقطه حضور واقعی و میدانی گونه در تیرماه ۱۴۰۳ با استفاده از سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) در مناطق ماهنشان (استان زنجان، محدوده جهت‌های قله بلقیس) و شهرستان تکاب (استان آذربایجان‌غربی) برداشت گردید. نقاط ارزیابی مستقل از نقاط آموزشی بوده و برای سنجش دقت مدل استفاده شدند. فاصله میان نقاط حضور گونه به‌گونه‌ای تنظیم شد که از تجمع نقاط و هم‌پوشانی بیش از حد جلوگیری شود و پوشش مناسبی از پراکنش گونه در نواحی حضور آن فراهم گردد. در واقع با توجه به اینکه وضوح نقشه‌های محیطی مورد استفاده در مدل‌سازی با نرم‌افزار MaxEnt معادل ۳۰ ثانیه قوسی (~۱ کیلومتر مربع) است، برای جلوگیری از اثر همبستگی مکانی (spatial autocorrelation) و نزدیک بودن بیش از حد نقاط، حداقل فاصله بین نقاط حضور پس از پالایش، یک کیلومتر در نظر گرفته شد تا از همپوشانی مکانی در رزولوشن مورد استفاده جلوگیری شود. به‌عبارتی، فاصله بین نقاط حضور متناسب با دقت مکانی داده‌های محیطی (۱ کیلومتر) تنظیم شده و از لحاظ آماری مناسب ارزیابی شده است.

متغیرهای محیطی مورد استفاده

برای مدل‌سازی پراکنش گونه آویشن ایرانی، در مجموع از ۳۰ متغیر محیطی استفاده گردید که شامل ۱۹ متغیر اقلیمی (این لایه‌ها از سه پارامتر اصلی شامل بارش ماهانه، دمای حداقل و حداکثر ماهانه تولید شده‌اند و ارتباط معناداری با پراکنش گونه‌های گیاهی دارند) در سه بازه زمانی حال حاضر (۱۹۹۰–۲۰۲۰)، ۲۰۷۰ (۲۰۶۰–۲۰۸۰) و ۲۱۰۰ (۲۰۸۰–۲۱۰۰) تحت سناریوهای SSP126 و SSP585 و مدل گردش عمومی IPSL-CM6A-LR (این مدل به‌دلیل دقت مناسب در شبیه‌سازی اقلیم مناطق کوهستانی و کارایی آن در شمال‌غرب ایران ازجمله استان‌های زنجان و آذربایجان انتخاب شد) (Zareian *et al*., 2024) اخذ شده از پایگاه داده https://chelsa-climate.org، ۳ متغیر فیزیوگرافی شامل ارتفاع، شیب و جهت شیب و ۸ متغیر فیزیکی و شیمیایی خاک اخذ شده از پایگاه داده https://soilgrids.org بودند (جدول ۱). تمامی داده‌های محیطی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.8 در اندازه پیکسل ۳۰ ثانیه (حدود یک کیلومترمربع) تهیه و آماده گردید.

در این مطالعه، مهمترین متغیرهای محیطی مؤثر بر پراکنش گونه آویشن ایرانی با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) شناسایی شدند. ابتدا مدل با استفاده از ۳۰ متغیر زیست‌اقلیمی و توپوگرافی اجرا گردید. برای کاهش اثر چندهمخطی بودن بین متغیرها، ماتریس همبستگی پیرسون (Pearson correlation) بین متغیرها محاسبه شد. در مواردی که ضریب همبستگی بین دو متغیر بیشتر از۰/۸۵ بود، یکی از متغیرهای همبسته براساس اهمیت اکولوژیکی یا درک زیست‌محیطی حذف گردید (Elith *et al*., 2011; Dormann *et al*., 2013).(جدول۲).



شکل ۱–منطقه و گونه مطالعات (آویشن ایرانی)

Figure 1- Study area and species: T. *persicus*

جدول ۱– متغیرهای محیطی مورد استفاده در مدل

Table 1- Environmental variables used in the model

Unit	Abbreviation	Row	Unit	Abbreviation	Row
mm	Bio16	16	℃	Bio1	1
mm	Bio17	17	℃	Bio2	2
mm	Bio18	18	%	Bio3	3
mm	Bio19	19	℃	Bio4	4
m	alt	20	℃	Bio5	5
Degree	slope	21	℃	Bio6	6
-	Aspect	22	℃	Bio7	7
%	Clay	23	℃	Bio8	8
%	Sand	24	℃	Bio9	9
%	Silt	25	℃	Bio10	10
%	Gravel	26	℃	Bio11	11
%	Om	27	mm	Bio12	12
dS/m	Ec	28	mm	Bio13	13
%	K	29	mm	Bio14	14
%	N	30	mm	Bio15	15

جدول ۲- همبستگی متغیرهای محیطی

Table 2- Correlation of environmental variables

	alt	Bio1	Bio5	Bio6	Bio10	Bio11	Bio12	Bio17	Bio18	slope
alt	1									
Bio1	0.53	1								
Bio5	0.54	0.59	1							
Bio6	0.37	0.64	0.66	1						
Bio10	0.65	0.43	0.62	0.34	1					
Bio11	0.41	0.43	0.51	0.8	0.3	1				
Bio12	0.74	0.75	0.78	0.4	0.42	0.37	1			
Bio17	0.6	0.48	0.52	0.75	0.56	0.72	0.78	1		
Bio18	0.49	0.76	0.46	0.76	0.64	0.66	0.78	0.63	1	
slope	0.36	0.44	0.68	0.41	0.31	0.6	0.53	0.67	0.51	1

فرایند مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای

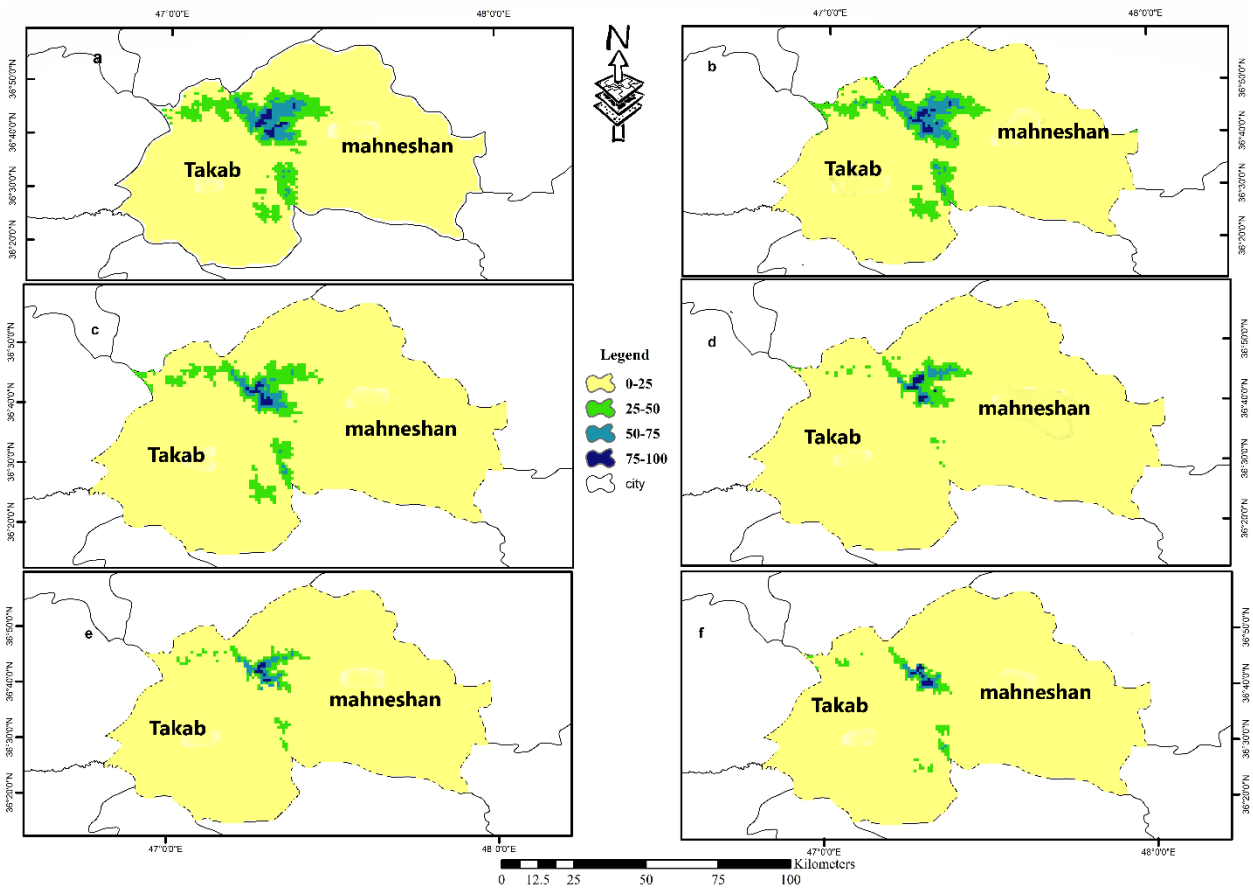
روش حداکثر آنتروپی محل حضور گونه را با متغیرهای محیطی در آن مناطق بررسی می‌کند و بعد در سراسر منطقه مورد مطالعه از اصول حداکثر آنتروپی برای تولید نقشه پیش‌بینی تناسب رویشگاه در مناطقی که نمونه‌برداری نشده است، استفاده می‌کند. خروجی مدل MaxEnt به صورت یک تابع نمایی است که یک مقدار احتمال را به هر نقطه در منطقه مورد مطالعه نسبت می‌دهد. ایده کلی حاکم بر مدل MaxEnt، تخمین احتمال حضور یک هدف (گونه) از طریق یافتن بیشترین حالت یکنواختی پراکنش (حداکثر بی نظمی) براساس نقاط حضور در مقایسه با نقاط زمینه است که البته این گسترش با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی است که در مورد اطلاعات ناکامل ما در مورد پراکنش گونه هدف وجود دارد. همچنین این مدل یکی از بهترین و پرکاربردترین روش‌های پیش‌بینی پراکنش گونه‌ای است. این روش به داده‌های عدم حضور برای گونه مورد نظر نیاز ندارد، در عوض از لایه‌های محیط‌زیستی پس‌زمینه برای تمام منطقه مورد مطالعه استفاده می‌نماید. کارایی این مدل به عنوان یکی از روش‌های مدل‌سازی پراکنش در مقایسه با سایر روش‌ها خوب ارزیابی شده است. مدل حداکثر آنتروپی روشی برای تخمین توزیع گونه‌های گیاهی تنها بر پایه داده‌های حضور و تخمین احتمال ناشناخته توزیع آن‌هاست که کارایی خوبی در این زمینه دارد. این مدل ابتدا لایه‌های محیطی را براساس موقعیت داده‌های آموزشی ارزیابی کرده و بعد احتمال حضور هریک از گونه‌ها در کل منطقه مطالعاتی بررسی می‌کند (Hosseini *et al.*, 2024). این مدل در نرم‌افزار MaxEnt 3.3.3 برازش داده شد. برای اجرای مدل، تنظیمات استاندارد با برخی اصلاحات به‌منظور بهبود دقت و پایایی مدل استفاده شد. مدل به‌صورت ۱۰ بار تکرار متقاطع (cross-validation) اجرا شد تا عملکرد مدل از نظر پایداری و قابلیت تعمیم بهتر ارزیابی شود. خروجی مدل به‌صورت Logistic تنظیم شد که در آن احتمال حضور گونه بین صفر تا یک برای هر سلول مکانی محاسبه می‌شود. حداکثر تعداد تکرار مدل ۵۰۰ بار تعیین شد تا الگوریتم فرصت کافی برای همگرایی کامل داشته باشد. مقدار Regularization Multiplier برابر مقدار پیش‌فرض ۱ باقی ماند تا از بیش‌برازش (overfitting) جلوگیری شود. برای بررسی نقش و اهمیت نسبی متغیرهای ورودی، گزینه‌های Jackknife Test و تولید نمودارهای پاسخ (Response Curves) فعال شدند. در نهایت، نقشه احتمال حضور گونه به‌عنوان نقشه نهایی مناسب رویشگاه (Habitat Suitability Map) تولید گردید که به شناسایی مناطق بالقوه حضور گونه در شرایط فعلی و سناریوهای آینده اقلیمی کمک می‌کند.

نتایج

نقشه‌های پیش‌بینی پراکنش رویشگاه گونه آویشن ایرانی

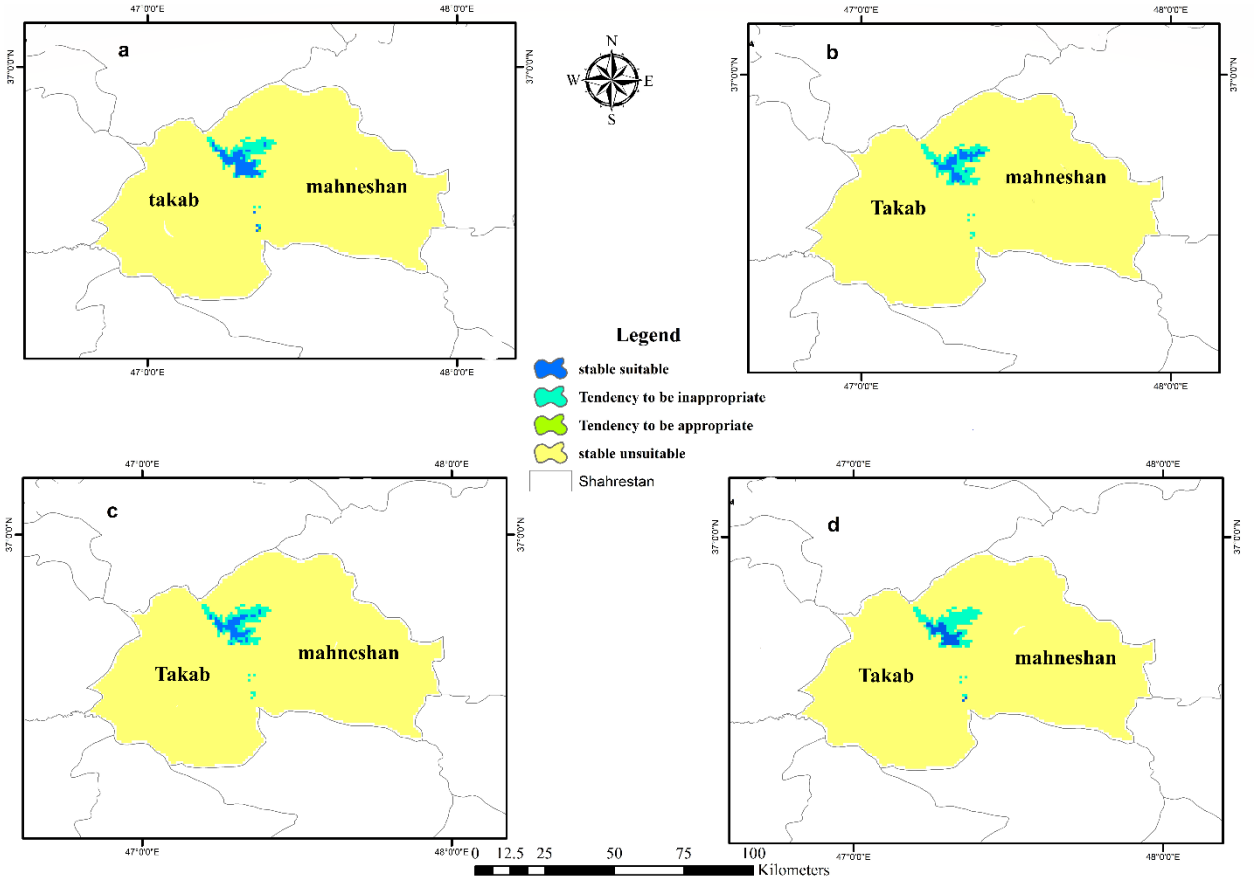
نقشه پراکنش حال حاضر گونه با استفاده از داده‌های اقلیم تحت دو سناریو اقلیمی SSP585 و SSP126، خاک و فیزیوگرافی و بار دیگر بدون داده‌های خاک تولید گردید. در این

دو نقشه مقایسه‌ای بین تأثیر داده‌های خاک و اقلیم در پیش‌بینی پراکنش گونه مورد مطالعه با استفاده از شاخص AUC انجام شد. در این مقایسه داده‌های اقلیم به دلیل شاخص AUC بالاتر، تأثیرگذار شناخته شدند (AUC=0/92) و یا حداقل تأثیر بیشتری از داده‌های خاک (AUC=0/85) در این پراکنش نشان دادند. اما نکته‌ای که در این مطالعه حائز اهمیت می‌باشد این است که داده‌هایی مانند سرب و روی به دلیل عدم دسترسی وارد مدل نشدند که به نظر می‌رسد این داده‌ها به دلیل قرارگیری این گونه در کنار معدن سرب و روی بسیار حائز اهمیت باشد، به حدی که مردم منطقه این گونه را سرب‌دوست اعلام نمودند. همچنین نقشه پراکنش آینده گونه با استفاده از داده‌های اقلیم برای سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ انجام شد (شکل ۲). در شکل ۳ نیز جابه‌جایی گونه مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ نمایش داده شده است.



شکل ۲- نقشه پراکنش حال حاضر گونه آویشن ایرانی (**a**: پراکنش حال حاضر گونه با استفاده از داده‌های اقلیم و خاک (**AUC=0/85**)، **b**: پراکنش حال حاضر گونه با استفاده از داده‌های اقلیم (**AUC=0/92**)، **c**: پراکنش گونه در سال ۲۰۷۰ با استفاده از سناریو **ssp126**،(**AUC=0/92**)، **d**: پراکنش گونه در سال ۲۰۷۰ با استفاده از سناریو **SSP585**،(**AUC=0/91**) **e**: پراکنش گونه در سال ۲۱۰۰ با استفاده از سناریو **SSP126**،(**AUC=0/93**)، **f**: پراکنش گونه در سال ۲۱۰۰ با استفاده از سناریو **SSP585**) (**AUC=0/90**)

Figure 2-Current distribution map of T. persicus species (a: Current distribution of the species using climate and soil data (AUC=0/85), b: Current distribution of the species using climate data (AUC=0/92), c: Distribution of the species in 2070 using the ssp126 scenario, (AUC=0/92), d: Distribution of the species in 2070 using the SSP585 scenario, (AUC=0/91) e: Distribution of the species in 2100 using the SSP126 scenario, (AUC=0/93), f: Distribution of the species in 2100 using the SSP585 scenario) (AUC=0/90)



شکل ۳- تغییرات اندازه محدوده پراکنش گونه آویشن ایرانی تحت تأثیر تغییرات اقلیم در سال‌های ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ (**a**: تغییرات اندازه محدوده پراکنش گونه تحت تأثیر تغییر اقلیم در سال ۲۰۷۰ سناریو **ssp126**، **b**: تغییرات اندازه محدوده پراکنش گونه تحت تأثیر تغییر اقلیم در سال ۲۰۷۰ سناریو **ssp585**، **c**: تغییرات اندازه محدوده پراکنش گونه تحت تأثیر تغییر اقلیم در سال ۲۱۰۰ سناریو **ssp126**، **d**: تغییرات اندازه محدوده پراکنش گونه تحت تأثیر تغییر اقلیم در سال ۲۱۰۰ سناریو **ssp585**)

Figure 3-changes in the size of the distribution range of T. persicus species under the effect of climate change in the years 2070 and 2100 (a: Changes in the size of the distribution range of the species under the effect of climate change in the year 2070, scenario ssp126, b: Changes in the size of the distribution range of the species under the effect of climate change in the year 2070, scenario ssp585, c: Changes in the size of the distribution range of the species under the effect of climate change in the year 2100, scenario ssp126, d: Changes in the size of the distribution range of the species under the effect of climate change in the year 2100, scenario ssp585)

نتایج مدل‌سازی پراکنش گونه آویشن ایرانی با استفاده از مدل MaxEnt تحت سناریوهای اقلیمی SSP126 و SSP585نشان می‌دهد که مساحت رویشگاه‌های مطلوب این گونه در آینده کاهش یافته و در مقابل، مناطق نامطلوب افزایش یا ثبات نسبی خواهند داشت. مساحت مناطق مطلوب (Best Threshold (≥0.3)) برای رویش آویشن ایرانی در شرایط فعلی (بر پایه داده‌های اقلیمی) برابر با ۵۵۰/۴ کیلومتر مربع و مناطق نامطلوب برابر با۴۷۸۷/۳ کیلومترمربع برآورد شده است. در صورتی که عوامل اقلیمی و خاک به‌طور همزمان در مدل لحاظ شوند، مساحت منطقه مطلوب به ۶۶۰ کیلومتر مربع افزایش و منطقه نامطلوب به ۴۶۷۷/۱ کیلومتر مربع کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تغییر اندک در ارزیابی کلی تناسب است. در سال ۲۰۷۰، تحت سناریوی خوش‌بینانه SSP126، مساحت مناطق مطلوب به۳۷۷/۴ کیلومترمربع

کاهش می‌یابد. در همین سناریو، مساحت مناطق نامطلوب به ۴۹۶۷/۱ کیلومترمربع افزایش می‌یابد. در سناریوی بدبینانه SSP585نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که مساحت منطقه مطلوب به ۲۵۲/۲ کیلومترمربع کاهش یافته و منطقه نامطلوب به۵۰۸۷/۷ کیلومترمربع افزایش می‌یابد. در سال ۲۱۰۰، کاهش رویشگاه مطلوب گونه شدت بیشتری می‌گیرد. در سناریوی SSP126، مساحت منطقه مطلوب به ۱۸۱/۲ کیلومتر مربع می‌رسد. در سناریوی SSP585 این مقدار به ۹۳/۹کیلومتر مربع افزایش می‌یابد، که به‌دلیل کاهش مناطق کم‌تناسب و افزایش مناطق متوسط‌تناسب، تغییر نسبتاً متعادلی در طبقات بالاتر ایجاد کرده است. در همین حال، مساحت مناطق نامطلوب تقریباً در هر دو سناریو همچنان در حال افزایش است؛ به‌طوری‌که در SSP126 برابر با ۵۱۵۴/۳ کیلومتر مربع و در SSP585 معادل ۵۲۴۴/۱ کیلومترمربع گزارش شده است. به‌طورکلی، نتایج نشان‌دهنده روند کاهشی مداوم در مساحت رویشگاه مطلوب آویشن ایرانی در آینده است. این روند در سال ۲۱۰۰ به‌ویژه محسوس‌تر خواهد بود. در مقابل، مناطق نامطلوب یا در حال گسترش هستند یا در سطح نسبتاً بالایی باقی می‌مانند. این شرایط بیانگر آثار منفی تغییرات اقلیمی بر پراکنش این گونه بومی بوده و بر ضرورت برنامه‌ریزی دقیق، اقدامات حفاظتی و پایش مداوم برای کاهش اثرهای این تغییرات تأکید دارد.

جدول ۳ مساحت هریک از کلاس‌های مطلوبیت رویشگاه برای گونه آویشن ایرانی را در سه بازه زمانی شامل حال حاضر، سال ۲۰۷۰ و سال ۲۱۰۰ براساس نتایج مدل MaxEntنشان می‌دهد. در این جدول، مطلوبیت رویشگاه به چهار طبقه شامل نامطلوب (۰– ۰/۲۵)، کم (۰/۲۵ – ۰/۵۰)، متوسط (۰/۵۰ – ۰/۷۵) و مطلوب (۰/۷۵–۱) تقسیم‌بندی شده است. همچنین با توجه به محاسبه بهترین آستانه مطلوبیت رویشگاه گونه آویشن ایرانی برابر با ۰/۳ در مدل MaxEnt، در ستون آخر جدول ۳، مساحت مناطق مطلوب براساس این آستانه به‌صورت دقیق‌تر و مبتنی بر معیار بهینه ارائه شده است.

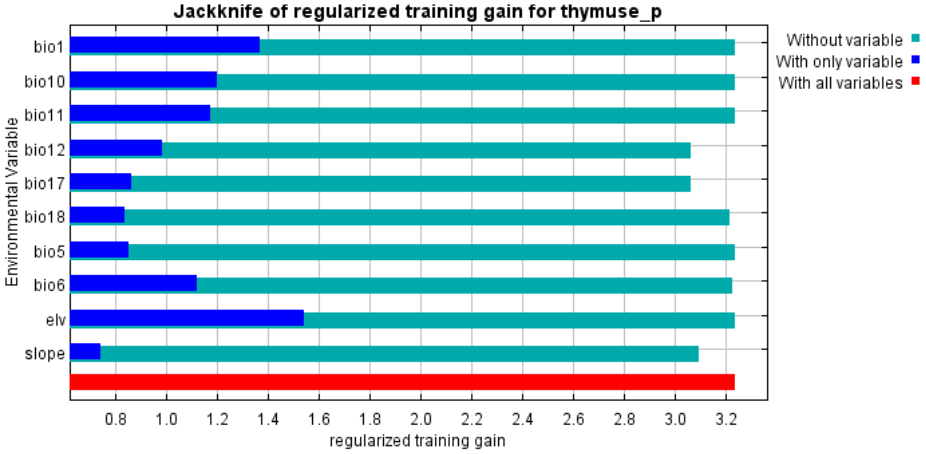
جدول ۳- مساحت مناطق مطلوب و نامطلوب رویشگاه گونه آویشن ایرانی تحت مدل حداکثر آنتروپی و سناریوهای SSP126 و SSP585

Table 3- Extent and Area of Suitable and Unsuitable Habitats for T. persicus under the MaxEnt Model and Climate Scenarios SSP126 and SSP585

Scenario / Time	Area (km²)				
	Unsuitable (0–0.25)	Low (0.25–0.5)	Moderate (0.5–0.75)	High (0.75–1)	Best Threshold (≥0.3)
2024Current (bio)	4787.3	350.4	165.1	34.9	550.4
2024Current (soil+bio)	4677.1	427.8	196.5	36.6	660.0
2070 SSP126	4967.1	278.9	79.1	19.4	377.4
2070 SSP585	5087.7	187.3	45.8	19.1	252.2
2100 SSP126	5154.3	124.9	39.6	16.7	181.2
2100 SSP585	5244.1	16	60.7	17.2	93.9

مهمترین متغیرهای محیطی

پس از حذف متغیرهای همبسته، مدل نهایی با متغیرهای انتخاب‌شده اجرا شد. مهمترین متغیرهای باقی‌مانده شامل: ارتفاع، BIO1،BIO5، BIO6، BIO10، BIO11، BIO12، BIO17، BIO18 و شیب بودند. طبق آزمون جک‌نایف (شکل ۴) متغیر ارتفاع دارای بیشترین اهمیت است و اگر از ورودی مدل حذف شود، بیشترین تأثیر را در نتایج پیش‌بینی مدل خواهد داشت.



شکل ۴- نمودار جک‌نایف

Figure 4- Jackknife diagram

با بررسی آنالیز مشارکت متغیرها در جدول ۴، متغیرهای تأثیرگذار در فرایند مدل‌سازی، میزان مشارکت و اهمیت جای‌گشتی آنها مشخص گردید. به منظور تعیین درصد اهمیت جای‌گشتی، ارزش هر متغیر زیست‌محیطی در داده‌های آموزشی به صورت تصادفی با داده پس‌زمینه جایگزین می‌شود و میزان کاهش AUC که در نتیجه این جایگزینی انجام می‌گردد به عنوان اهمیت جای‌گشتی در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۴- آنالیز مشارکت متغیرها و سهم هر متغیر در فرایند مدل‌سازی

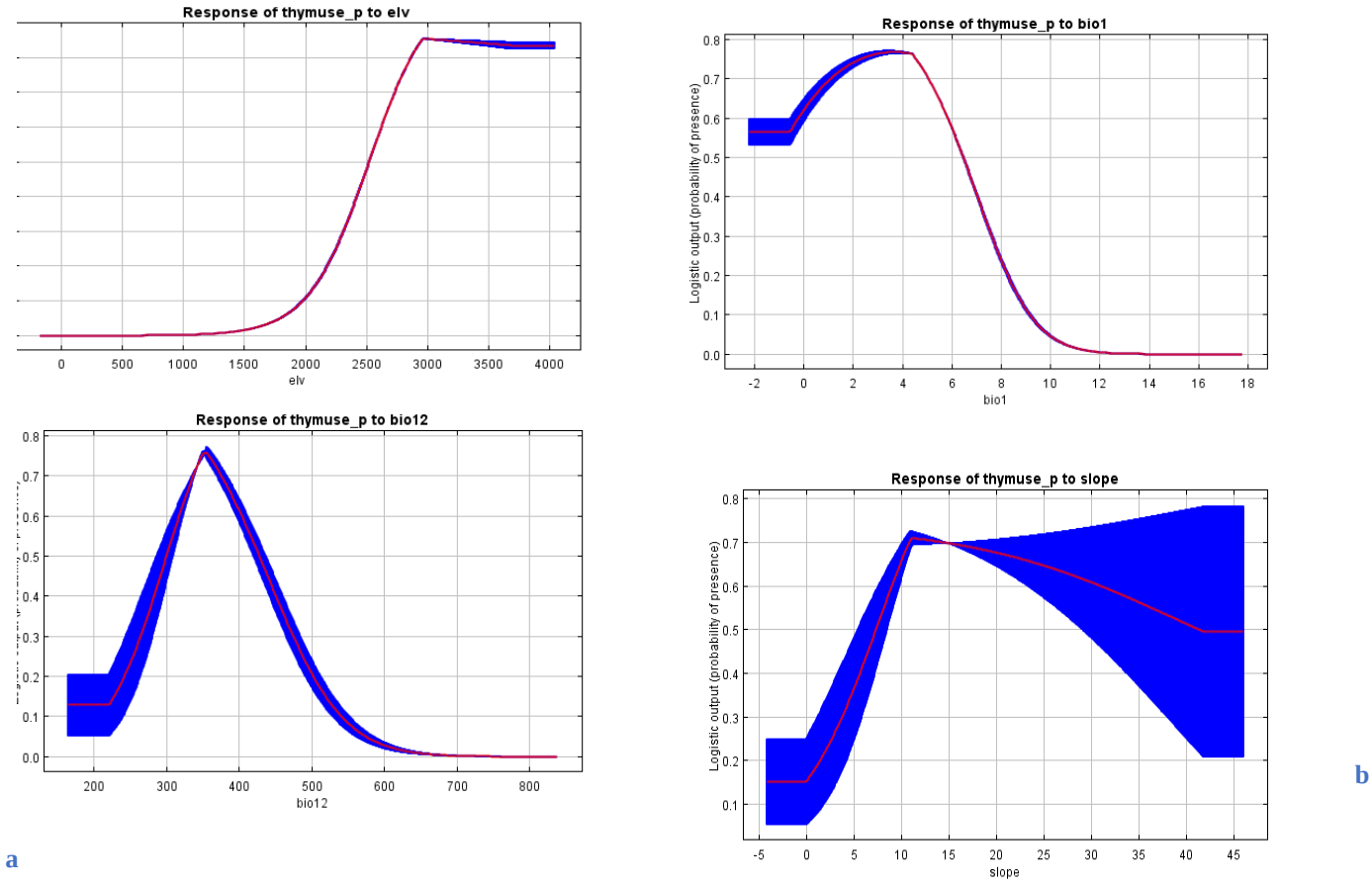
Table 4- Analysis of the contribution of variables and the contribution of each variable in the modeling process

Variable	Contribution %	Permutation Importance %
Elevation	62.60	69.47
Bio1	9.60	4.59
Bio10	9.58	0.60
Bio11	9.60	1.50
Bio6	7.10	4.80
Bio12	7.10	0.06
Bio11	3.30	3.12
Bio18	1.33	0.0072
Bio17	0.61	13.89
Slope	0.29	0

با توجه به جدول ۴ می‌توان گفت که چهار متغیر اول (ارتفاع، Bio1, Bio10, Bio11) بیش از ۸۰ درصد پراکنش گونه آویشن ایرانی را در منطقه مطالعاتی توجیه می‌کنند و با توجه به ارزش اهمیت جای گشتی بیشترین مقدار کاهش AUC در صورت جایگزینی با داده‌های مربوط به ارتفاع باارزش اهمیت جای گشتی برابر۶۹/۴۷ درصد می‌باشد.

در این مطالعه، منحنی‌های پاسخ متغیرهای محیطی مؤثر بر پراکنش گونه آویشن ایرانی تولید و تحلیل شدند تا روابط بین شرایط محیطی و پراکنش این گونه بهتر درک شود. طبق نتایج منحنی‌های پاسخ، این گونه بیشترین پراکنش را در ارتفاعات بالای ۲۵۰۰ متر دارد. این نتیجه به وضوح نشان می‌دهد که آویشن ایرانی به شرایط اقلیمی خاص مناطق کوهستانی علاقه دارد که معمولاً دماهای پایین‌تری دارند و شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک متفاوت از دشت‌ها و مناطق پست است. به عبارت دیگر، آویشن ایرانی به‌طور ویژه به مناطقی با دمای پایین و شرایط خاص ارتفاعی وابسته است

(شکل 5-a). همچنین در مورد دمای سالانه (متغیر BIO1) می‌توان گفت که این گونه در دماهای کمتر از ۸ درجه سانتی‌گراد بیشترین پراکنش را دارد. این به این معنی است که آویشن ایرانی به شرایط اقلیمی سرد و معتدل ترجیح می‌دهد و توانایی تحمل گرما را در حد کم دارد. در مناطق با دمای بالاتر، پراکنش این گونه به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد (شکل 5-b). گونه آویشن ایرانی بیشترین پراکنش را در شرایطی دارد که بارش‌های سالانه (متغیر BIO12) بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. در واقع آویشن ایرانی به شرایط نیمه‌خشک و یا مناطق با بارش متوسط علاقه دارد و قادر است در این بازه بارش به بهترین شکل رشد و تکثیر یابد. به‌طور خاص، در مناطق با بارش‌های پایین‌تر یا بالاتر از این محدوده، پراکنش گونه کاهش می‌یابد، که به‌دلیل کمبود آب در مناطق خشک یا اشباع شدن خاک در مناطق پربارش می‌باشد (شکل 5-c). در نهایت می‌توان گفت این گونه در شیب‌های بیشتر از ۲۰ درجه پراکنش مؤثرتری دارد. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که در مناطق با شیب‌های بالا به‌طور طبیعی شرایط مطلوب‌تری برای این گونه فراهم می‌شود (شکل 5-d).



شکل ۵- منحنی‌های پاسخ مهمترین متغیرهای محیطی گونه آویشن ایرانی (a: ارتفاع، b: دمای سالانه (درجه سانتی‌گراد)، c: متوسط بارش سالانه (میلی‌متر)، d: شیب (درجه))

Figure5- Response curves of the most important environmental variables of the *Thymus persicus* species (a: altitude, b: annual temperature (degrees Celsius), c: average annual precipitation (millimeters), d: slope (degrees)

بحث

گونه آویشن ایرانی (*T. persicus*) عمدتاً در نواحی شمال‌غربی ایران به‌ویژه در استان‌های زنجان و آذربایجان‌غربی، که مناطق کوهستانی سخت‌گذر شهرستان‌های ماهنشان و تکاب از مهمترین رویشگاه‌های طبیعی آن به‌شمار می‌روند، پراکنش دارد؛ نتایج حاصل از مطالعات Sonboli و همکاران (۲۰۱۳)، حضور این گونه را در این مناطق به‌طور دقیق تأیید کرده‌اند. همچنین، مطالعه Bakhtiar و همکاران (۲۰۱۹) نیز گواهی بر سازگاری این گونه با شرایط اکولوژیکی خاص شمال‌غرب کشور می‌باشد. افزون بر این، مرور جامعی بر جنس *Thymus* در ایران نشان داده است که *T. persicus* یکی از گونه‌های بومی و نادر این ناحیه است که از نظر دارویی و بوم‌شناختی دارای اهمیت بالایی می‌باشد (Emami Bistgan *et al*., 2022). در این مطالعه، ابتدا به مقایسه پیش‌بینی پراکنش گونه آویشن ایرانی در شرایط کنونی تحت دو سناریو شامل: استفاده از داده‌های خاک و اقلیم در مدل‌سازی و بار دیگر تنها استفاده از داده اقلیم، پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از داده‌های خاک در کنار داده‌های اقلیمی موجب کاهش شاخص عملکرد مدل (AUC=0/85) شده است. این کاهش ممکن است به دلیل پیچیدگی‌های داده‌های خاک یا عدم تطابق فضایی و دقیق نبودن داده‌های خاک باشد (Bianchini *et al*., 2025). یادآوری می‌شود که در این تحلیل از داده‌های در دسترس خاک (جدول ۱) استفاده گردید و اطلاعات مربوط به آلودگی سرب و روی به دلیل عدم دسترسی در این مرحله مورد استفاده قرار نگرفت، بنابراین نمی‌توان تأثیر احتمالی این آلاینده‌ها بر پراکنش گونه را به‌طور کامل ارزیابی کرد. در واقع باید توجه داشت که تأثیر ویژگی‌های خاص این گونه، مانند سازگاری با محیط‌های آلوده به سرب، نباید نادیده گرفته شود. گونه آویشن ایرانی به دلیل توانایی‌اش در تحمل شرایط آلوده به فلزات سنگین مانند سرب، می‌تواند در مناطقی که نزدیک به منابع آلوده به سرب هستند، پراکنش یابد. این ویژگی ممکن است در برخی از مناطق پیش‌بینی‌شده برای آینده، به‌ویژه در اطراف معادن سرب و روی، عامل مهمی برای ماندگاری و یا حتی گسترش پراکنش این گونه باشد. بنابراین، علاوه بر تغییرات اقلیمی، ویژگی‌های اکولوژیکی خاص این گونه، مانند تحمل به آلودگی‌های محیطی، باید در تحلیل و پیش‌بینی وضعیت آینده پراکنش آن در تحقیقات آینده مدنظر قرار گیرد. بنابراین، برای داشتن پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر درباره آینده پراکنش گونه‌ها، لازم است علاوه بر متغیرهای اقلیمی و فیزیکی، عوامل زیستی و زیست‌محیطی مانند تحمل به آلاینده‌ها، سازگاری با شرایط محیطی خاص و واکنش به فشارهای انسانی نیز در مدل‌ها و تحلیل‌ها گنجانده شوند. این رویکرد جامع می‌تواند به شناسایی مناطق حفاظتی کلیدی و توسعه ذاهبردهای مدیریت پایدار رویشگاه‌ها کمک کند، به‌ویژه در دوره‌ای که تغییرات اقلیمی و آلودگی‌های محیطی به‌طور همزمان گونه‌ها را تهدید می‌کنند (Borymski *et al*., 2018; Sharma & Chakraverty, 2013). در چنین مناطقی، این گونه ممکن است برخی شرایط تغییرات اقلیمی را تحمل کرده و همچنان به عنوان یک گونه بومی با سازگاری خاص در مناطق آلوده به فلزات سنگین باقی بماند. به‌طورکلی نتایج این تحقیق نشان داد که داده‌های اقلیم و خاک می‌توانند به‌طور قابل توجهی در پیش‌بینی پراکنش گونه‌های بومی مؤثر باشند، اما برای ارزیابی کامل و دقیق‌تر اثرهای مختلف، باید سایر عوامل نیز در نظر گرفته شود. نتایج مدل‌سازی پراکنش گونه آویشن ایرانی تحت سناریوهای SSP126 و SSP585 نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر پراکنش این گونه خواهد داشت. در حال حاضر، مساحت مناطق مطلوب برای رویش این گونه با آستانه ۰/۳ حدود ۴۷۴ کیلومتر مربع است، در حالی که مساحت مناطق نامطلوب بیش از ۴۷۲۲ کیلومتر مربع برآورد می‌شود. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که در سال ۲۰۷۰، مساحت مناطق مطلوب به‌ترتیب حدود ۴۰/۹٪ و ۶۰/۵٪ کاهش خواهد یافت (براساس سناریوهای SSP126 و SSP585). در سال ۲۱۰۰، این کاهش به حدود ۵۱/۱٪ در سناریوی SSP126 و ۸۴/۴٪ در سناریوی SSP585 خواهد رسید. در حال حاضر، مساحت مناطق مطلوب برای رویش این گونه با آستانه ۰/۳ حدود ۵۵۰/۴ کیلومتر مربع است، در

حالی که مساحت مناطق نامطلوب۴۷۸۷/۳ کیلومتر مربع برآورد می‌شود (براساس داده‌های اقلیمی). پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که در سال ۲۰۷۰، مساحت مناطق مطلوب به‌ترتیب حدود ۳۱/۵ ٪ و ۵۴/۲ ٪ کاهش خواهد یافت (براساس سناریوهای SSP126 و SSP585) و در سال ۲۱۰۰، این کاهش به حدود ۶۷/۱٪ در سناریوی SSP126 و ۸۲/۹٪ در سناریوی SSP585 خواهد رسید. این روند کاهشی در مساحت مناطق مطلوب تهدید جدی برای بقای این گونه در آینده به‌شمار می‌آید. همچنین با توجه به نتایج مدل‌سازی پراکنش گونه مورد مطالعه، مشاهده شد که تغییرات اقلیمی لزوماً باعث از بین رفتن کامل رویشگاه این گونه نشده است، بلکه باعث جابه‌جایی و تغییر در مساحت نواحی مطلوب آن شده است. به‌طوری‌که، در برخی مکان‌ها، مساحت مناطق مطلوب گونه مذکور کاهش یافته و در عین حال برخی مناطق جدید به عنوان رویشگاه‌های مطلوب شناسایی شده‌اند. این تغییرات نشان‌دهنده جابه‌جایی رویشگاه این گونه به مناطق جدید، به‌ویژه نواحی با ارتفاعات بالاتر، به دلیل تغییرات دمایی و شرایط اقلیمی است. این روند در تمامی سناریوها و دوره‌های زمانی نشان‌دهنده تأثیرات پیچیده تغییرات اقلیمی بر پراکنش گونه‌های بومی است. به عبارتی، تغییر اقلیم می‌تواند نه تنها موجب از بین رفتن نواحی مطلوب برای برخی گونه‌ها شود، بلکه باعث انتقال آنها به مناطق جدیدی که در گذشته به عنوان رویشگاه‌های مناسب شناخته نمی‌شدند، گردد (Teimoori Asl *et al.*, 2020). منحنی‌های واکنش محیطی گونه آویشن ایرانی نشان دادند که این گونه بیشتر در بارش‌های سالانه بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر، ارتفاعات بالای ۲۵۰۰ متر، دمای متوسط سالانه کمتر از ۸ درجه سانتی‌گراد و در شیب‌های بیشتر از ۲۰ درجه، به‌طور مؤثری پراکنش دارد. این یافته‌ها با مطالعه Bakhtiar و Mirjalili (۲۰۲۴) و همچنین Salari و همکاران (۲۰۱۳) نیز همخوانی داشته که ارتفاع ۲۲۷۲ متری، میانگین دمای سالانه ۹ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۳۴۰ میلی‌متر را برای آویشن ایرانی به دست آوردند. در پایان، مدل حداکثر آنتروپی عملکرد خوبی را در پیش‌بینی پراکنش گونه آویشن ایرانی در حال و آینده (AUC=0/97) نشان داد که نشان از دقت بالای این مدل در پیش‌بینی دارد.

نتایج این مطالعه پیامدهای مهمی برای مدیریت منابع طبیعی و حفاظت از تنوع زیستی در مناطق شمال‌غربی ایران دارد. یکی از مهمترین یافته‌ها، روند تغییر در مساحت رویشگاه‌های مناسب برای گونه آویشن ایرانی است که به دلیل تغییرات اقلیمی به وضوح در مدل‌ها مشاهده می‌شود. با توجه به این روند، پیشنهاد می‌شود که اقداماتی هدفمند برای حفاظت از این گونه و رویشگاه‌های آن در نظر گرفته شود. اولین پیشنهاد، معرفی مناطق با ظرفیت بالای رویش گونه، مانند ارتفاعات ماهنشان و تکاب، به عنوان مناطق حفاظت‌شده یا ذخیره‌گاه‌های زیستی است. این مناطق به دلیل داشتن شرایط اکولوژیکی مطلوب‌تر، می‌توانند نقش کلیدی در حفظ این گونه بومی و ارزشمند ایفا کنند. همچنین، برنامه‌ریزی برای احیای رویشگاه‌های تخریب‌شده، ازجمله کاهش اثر فعالیت‌های انسانی و ترمیم اکوسیستم‌های آسیب‌دیده، به شدت ضروریست. این اقدامات می‌تواند به بازیابی و تثبیت پراکنش گونه‌های حساس کمک و در برابر تهدیدات ناشی از تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی مقاومت ایجاد کند.

یکی دیگر از پیشنهادها، پایش مداوم و نظارت دوره‌ای بر شرایط اکولوژیکی رویشگاه‌ها و وضعیت پراکنش گونه‌هاست. با توجه به سرعت تغییرات اقلیمی، نظارت دقیق و پیوسته می‌تواند به مدیران منابع طبیعی این امکان را بدهد تا به موقع تصمیمات مناسبی برای حفاظت و مدیریت رویشگاه‌ها اتخاذ کنند. این پایش باید شامل ارزیابی‌های مستمر از عوامل مختلف مؤثر بر پراکنش گونه‌ها، ازجمله شرایط اقلیمی، خاک و آلودگی‌های محیطی مانند سرب و روی باشد. به علاوه، یکی از نقاط قوت این مطالعه استفاده از مدل حداکثر آنتروپی برای پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها بود. با این حال، برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر، پیشنهاد می‌شود که از مدل‌های دیگر ازجمله مدل اجماعی نیز استفاده شود. این مدل‌ها ممکن است قابلیت‌های پیش‌بینی بهتری در شرایط پیچیده و متغیر اقلیمی و اکولوژیکی ارائه دهند. علاوه بر این، گنجاندن

داده‌های مربوط به آلودگی‌های فلزی مانند سرب و روی در مدل‌سازی می‌تواند تأثیرات این آلاینده‌ها را بر پراکنش گونه آویشن ایرانی به دلیل قرارگیری آن در کنار معدن سرب انگوران بهتر شبیه‌سازی کند و به درک عمیق‌تری از چالش‌های زیست‌محیطی کمک نماید.

در نهایت، با توجه به اهمیت حفظ گونه‌های بومی و ارزشمند مانند آویشن ایرانی، این مطالعه بر لزوم همکاری‌های مشترک بین نهادهای مختلف محیط‌زیست، منابع طبیعی و پژوهشی تأکید دارد. برنامه‌ریزی دقیق و استفاده از ابزارهای علمی برای پیش‌بینی اثر آینده تغییرات اقلیمی و آلودگی‌های محیطی می‌تواند راهکار مؤثری برای حفاظت از گونه‌های در معرض خطر باشد و نقش کلیدی در مدیریت بهینه منابع طبیعی ایفا کند.

Refrences

- Alinejad, F., Mehrabian, A. R., Ahmadikhah, A., Akbari Azirani, T. and Minai-Tehrani, D., 2022. Predicting effects of climate change on the distribution of nectar and pollen plants species Teucrium polium L. and Thymus kotschyanus Boiss. & Hohen. Journal of Arid Biome, 11(2): 75-86. 10.29252/ARIDBIOM.2022.18118.1884.
- Asghari, B., Habibzadeh, F. and Qorbani Nahouji, M., 2019. *Persian Thyme (Thymus persicus*): A plant containing active metabolites with antioxidant, anti-diabetic and anti-Alzheimer effects. Iranian Journal of Medicinal Plants, 7(2): 56-65. 10.29252/jmp.2.70.97.(In Persian)
- Bakhtiar, Z. and Mirjalili, M. H., 2024. Evaluation of diversity and stability of morphological traits and essential oil in the conservation and domestication process of four native Iranian Thymus species. Research in Ethnobiology and Conservation, 1(2): 1-14. 10.22091/ethc.2023.9913.1008. (In Persian)
- Bakhtiar, Z., Mirjalili, M. H. and Sonboli, A., 2016. In vitro callus induction and micropropagation of Thymus persicus (Lamiaceae), an endangered medicinal plant. Crop Breeding and Applied Biotechnology, 16(1): 48-54. 10.1590/1984-70332016v16n1a8.
- Bakhtiar, Z., Mirjalili, M. H., Selseleh, M., Yavari, A. and Ghorbanpour, M., 2023. Characterization of essential oil profiles, triterpenic acids, and biological assay in aerial parts of various Thymus persicus Jalas (Ronniger ex Rech. f.) populations. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 10(1): 1-22.
- Bakhtiar, Z., Sonboli, A. and Mirjalili, M. H., 2019. The anatomical and micromorphological characteristics of Thymus persicus (Lamiaceae). The Iranian Journal of Botany, 25(2): 145-150. 10.22092/IJB.2019.128035.1259. (In Persian)
- Bianchini, M., et al., 2025. Modeling climate-driven vegetation changes under contrasting temperate and arid conditions in the Mediterranean Basin. Ecology and Evolution. 10.1002/ece3.70753.
- Borymski, S., Cycoń, M., Beckmann, M., Mur, L. A. and Piotrowska-Seget, Z., 2018. Plant species and heavy metals affect biodiversity of microbial communities associated with metal-tolerant plants in metalliferous soils. Frontiers in Microbiology, 9: 14-25. 10.3389/fmicb.2018.01425.
- Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G. and Lautenbach, S., 2013. Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. Ecography, 36(1): 27-46. 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.
- Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E. and Yates, C. J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. Diversity and Distributions, 17(1): 43-57. 10.1111/j.1472-4642.2010.00725.
- Emami Bistgani, Z., Mamedov, N. and Lotfy Ashour, M., 2022. Genus Thymus in Iran—Ethnobotany, phytochemical, molecular, and pharmacological features. In: Biodiversity, Conservation and Sustainability in Asia, 1(2): 817-848.
- Ghani, A., Azizi, M. and Tehranifar, A., 2009. Response of Achillea species to drought stress induced by polyethylene glycol in germination stage. Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants, 25(2): 271-281.
- Hassanpouraghdam, M. B., Ghorbani, H., Esmaeilpour, M., Alford, M. H., Strzemski, M. and Dresler, S., 2022. Diversity and distribution patterns of endemic medicinal and aromatic plants of Iran: Implications for conservation and habitat management. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(3): 1-27. 10.3390/ijerph19031552.
- Hosseini, N., Ghorbanpour, M. and Mostafavi, H., 2024a. Habitat potential modelling and the effect of

Agricultural Jihad Organization, Spring: 1-30. (In Persian)
– Salari, A., Bani Wahab, A. and Golkar, M., 2013. Study on the effect of climatic elements on the distribution of Thymus vulgaris in Torbat Heydarieh County. Third National Conference on Medicinal Plants, Amol. (In Persian)
– Sharafi, A., Beigi, H., Rezaei, B. and Sargheini, J., 2020. The spatial modeling of hazardous elements in one of the Angouran mine waste dumps using a geostatistical approach. Iranian Journal of Mining Engineering, 15(46): 40-49. 10.22034/ijme.2020.104306.1705. (In Persian)
– Sharma, J. and Chakraverty, N., 2013. Mechanism of plant tolerance in response to heavy metals. In: Molecular Stress Physiology of Plants, 289-308.
– Shidayi, F., Akbari, I., Elahiari, M. S., Choubchian, S. and Abbasi, E., 2023. Climate change, water management, and food security. National Conference on Knowledge-based Agriculture, Climate Change and Food Security, Karaj, 9 October 2023: 1-5. (In Persian)
– Sonboli, A., Mirjalili, M. H., Bakhtiar, Z. and Jamzad, Z., 2013. Molecular authentication of Thymus persicus based on nrDNA ITS sequences data. The Iranian Journal of Botany, 19(2): 179-185.
– Teimoori Asl, S., Naghipour Borj, A., Ashrafzadeh, M. and Haidarian Aghakhani, M., 2020. Predicting the effects of climate change on the geographical distribution of Astragalus verus Olivier in the Central Zagros region, Iran. Journal of Remote Sensing and GIS in Natural Resources, 2(1): 11-20. (In Persian)
– Toghranegar, Z., Vafadar, M. and Ghorbani Nohooji, M., 2020. Ethnopharmacological study of medicinal plants effective in the treatment of gastro-intestinal diseases in Mahneshan County. Journal of Medicinal Plants, 19(75): 266-290. 10.29252/jmp.19.75.266. (In Persian)
– Zareian, M. J., Dehban, H., Gohari, A. and Torabi Haghighi, A., 2024. Assessment of CMIP6 models performance in simulation precipitation and temperature over Iran and surrounding regions. Environmental Monitoring and Assessment, 196(8): 701-712.

climate change on the current and future distribution of three Thymus species in Iran using MaxEnt. Scientific Reports, 14(1): 1-14.
– Hosseini, N., Ghorbanpour, M. and Mostafavi, H., 2024b. The influence of climate change on the future distribution of two Thymus species in Iran: MaxEnt model-based prediction. BMC Plant Biology, 24(1): 269.
– Hosseini, N., Mostafavi, H. and Ghorbanpour, M., 2024c. The future range of two Thymus daenensis subspecies in Iran under climate change scenarios: MaxEnt model-based prediction. Genetic Resources and Crop Evolution, 15(1): 1-18.
– Jia, L., Xu, N., Xia, B., Gao, W., Meng, Q., Li, Q., Sun, Y., Xu, S., He, M. and Gu, H., 2024. Chromosome-level genome of Thymus mandschuricus reveals molecular mechanism of aroma compounds biosynthesis. Frontiers in Plant Science, 15(1): 1-11. 10.3389/fpls.2024.1368869.
– Khajoei Nasab, F., Mehrabian, A. and Nemati Parshkouh, A., 2022. Predicting the effect of climate change on the distribution of Echium amoenum and Echium italicum in Iran. Iranian Journal of Applied Ecology, 10(4): 1-21. 10.47176/ijae.10.4.12555. (In Persian)
– Latifi, M., Zakeri-Nairy, M. and Moazami-Goudarzi, S., 2019. Investigating the effects of climate change on Takab and Saqez climatic stations in the Zarineh Rood basin using the LARS-WG model. Water Resources Engineering, 12(43): 37-48. (In Persian)
– Mehrnia, M. and Hosseini, Z., 2024. Ethnobotanical study of native medicinal plants of Bluman region (Lorestan). Research in Ethnobiology and Conservation, 1(4): 1-21. 10.22091/ethc.2024.10592.1024. (In Persian)
– Nazari, S., Jafarian, Z., Alavi, S. J. and Naghipour, A. A., 2021. The impact of climate change on the geographic distribution of Thymus kotschyanus (Boiss. & Hohen.) using ensemble modelling. Original Article, 9(3): 1-16. 10.22034/JDMAL.2021.526831.1338. (In Persian)
– Nazarli, H., Moradi, P. and Mohibi, M., 2017. Thyme. Technical Bulletin, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Zanjan