

Identifying Conservation Hotspots for the Medicinal Plant *Teucrium orientale* under the Interactive Effects of Climate Change and Human Pressures

Elham Ghehsareh Ardestani^{1*}, Asadollah Maghzi², Ataollah Ebrahimi¹, Masood Borhani³, Nasrin Gharahi⁴

- *1. Associate Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
2. MS graduate, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
3. Isfahan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, Isfahan, Iran.
4. Associate Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

*Email Address: elham.ghehsareh@sku.ac.ir

Article Info

Article Type:

Research Paper

Article History:

Received Date:

2026/05/16

Revised Date:

2026/06/24

Accepted Date:

2026/08/16

Published Date:

2026/10/27

Keywords:

Climate change,
Species Distribution Modeling,
Habitat Suitability,
Ensemble model,
Human pressures.

ABSTRACT

Given the high vulnerability of arid regions to climate change and human pressures, this study investigated the current and future habitat suitability of *Teucrium orientale* in Isfahan Province to provide a scientific basis for conservation planning in these environmentally stressed ecosystems. To achieve the objectives of the study, a comprehensive set of advanced species distribution modeling algorithms was implemented within an ensemble modeling framework. The models predicted species distribution using CHELSA bioclimatic variables in combination with topographic parameters. Future habitat changes were assessed using outputs from the GFDL-ESM4 and MRI-ESM2.0 climate models under the SSP126, SSP370, and SSP585 emission scenarios, while also incorporating human pressure indices into the analysis. The results demonstrated that climatic factors, particularly temperature and precipitation, exert the strongest influence on the occurrence and distribution of this species. Simulations of future conditions further indicated that, under most scenarios, the extent of suitable habitats for the species is expected to decline, although the spatial pattern of these changes varies among climate models across the province. Among different regions, the western and southern parts of the province, especially high-elevation areas, showed greater potential for maintaining favorable environmental conditions in the future and were therefore identified as potential climatic refugia. However, spatial analysis revealed that a considerable proportion of these areas overlaps with regions experiencing substantial human activity, which may threaten the long-term stability of the remaining suitable habitats. Accordingly, effective land-use management, reduction of anthropogenic pressures, and targeted conservation of climatically stable areas could play a crucial role in preserving both the species and its habitats. The findings of this study also highlight the necessity of simultaneously considering climatic and human-related factors in conservation planning in order to support more scientifically robust decision-making processes.

Cite this article:

Elham Ghehsareh Ardestani, Asadollah Maghzi, Ataollah Ebrahimi, Masood Borhani, Nasrin Gharahi (2026) Identifying Conservation Hotspots for the Medicinal Plant *Teucrium orientale* under the Interactive Effects of Climate Change and Human Pressures, Journal of Environmental Sciences Studies, 11(3), Pages 11372-11387.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Climate change significantly alters ecosystem structures and plant distribution patterns, forcing species to shift their geographic ranges in response to changing temperature and precipitation regimes. Rangeland ecosystems in arid and semi-arid regions are particularly susceptible to these shifts, as existing water limitations are often exacerbated by both climatic stress and anthropogenic factors like overgrazing and land-use change. Consequently, utilizing predictive modeling to assess future habitat suitability has become a crucial tool for identifying areas where species can survive, which is essential for developing effective conservation strategies. This specific study evaluates the current and projected habitat of *Teucrium orientale* in Isfahan Province to provide a scientific foundation for sustainable rangeland management and biodiversity preservation in environmentally stressed landscapes.

Materials and methods

In this study, 30 occurrence records of *T. orientale* were used to model its habitat suitability. Nineteen bioclimatic variables for three time periods (current conditions, 2050, and 2080) were obtained from the CHELSA database. These climatic data were derived from two general circulation models, GFDL-ESM4 and MRI-ESM2-0. Future projections were evaluated under three emission scenarios: SSP126, SSP370, and SSP585. All variables were prepared at a high spatial resolution to improve modeling accuracy. In addition to climatic variables, physiographic factors including elevation, slope, and aspect were incorporated. Pearson's correlation analysis was used to identify and remove highly collinear variables. This step helped reduce redundancy and improve model performance. After variable selection, ten predictors (nine bioclimatic variables and one physiographic variable) were retained. These predictors were used to run species distribution models using eight different algorithms. The outputs of these algorithms were combined within an ensemble modeling framework. Finally, the human pressure index map was overlaid with the predicted optimal habitat map of *T. orientale* to assess potential human impacts.

Results and discussion

The results indicated that climatic variables, particularly temperature and precipitation, play the most important role in determining the occurrence and distribution of this species. The net rate of change in habitat extent relative to current conditions was estimated to range from -24.21% to -89.84%. Simulations of future conditions suggested that under most scenarios the area of suitable habitats for this species will decline, although the spatial pattern of these changes varies across the province depending on the climate model used. Among different regions, the western and southern parts of the province, especially high-elevation areas, demonstrated a greater capacity to maintain favorable environmental conditions in the future and were therefore identified as potential habitat refugia. However, spatial analysis revealed that a considerable portion of these areas overlaps with regions experiencing substantial human activities, which may pose challenges for the persistence of the remaining suitable habitats.

Conclusion

Effective land use management is vital for mitigating climate change impacts on vulnerable species and rangelands. By reducing anthropogenic pressures and protecting climatically stable refugia, conservationists can enhance ecosystem resilience and ensure long-term biodiversity. Achieving successful outcomes requires integrating ecological modeling into land-use planning and fostering collaboration between policymakers and local communities. Ultimately, robust conservation strategies must account for both climatic and human-related drivers to ensure scientifically informed and sustainable management.

شناسایی کانون‌های حساس حفاظتی برای گیاه دارویی *Teucrium orientale* در

مواجهه با اثرات متقابل تغییر اقلیم و فشارهای انسانی

الهام قهساره اردستانی^{۱*}، اسدالله مغزی^۲، عطاله ابراهیمی^۱، مسعود برهانی^۳، نسرين قرهی^۴^{۱*} - دانشیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران^۲ - دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران^۳ - استادیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، اصفهان، ایران^۴ - دانشیار، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: elham.ghesareh@sku.ac.ir

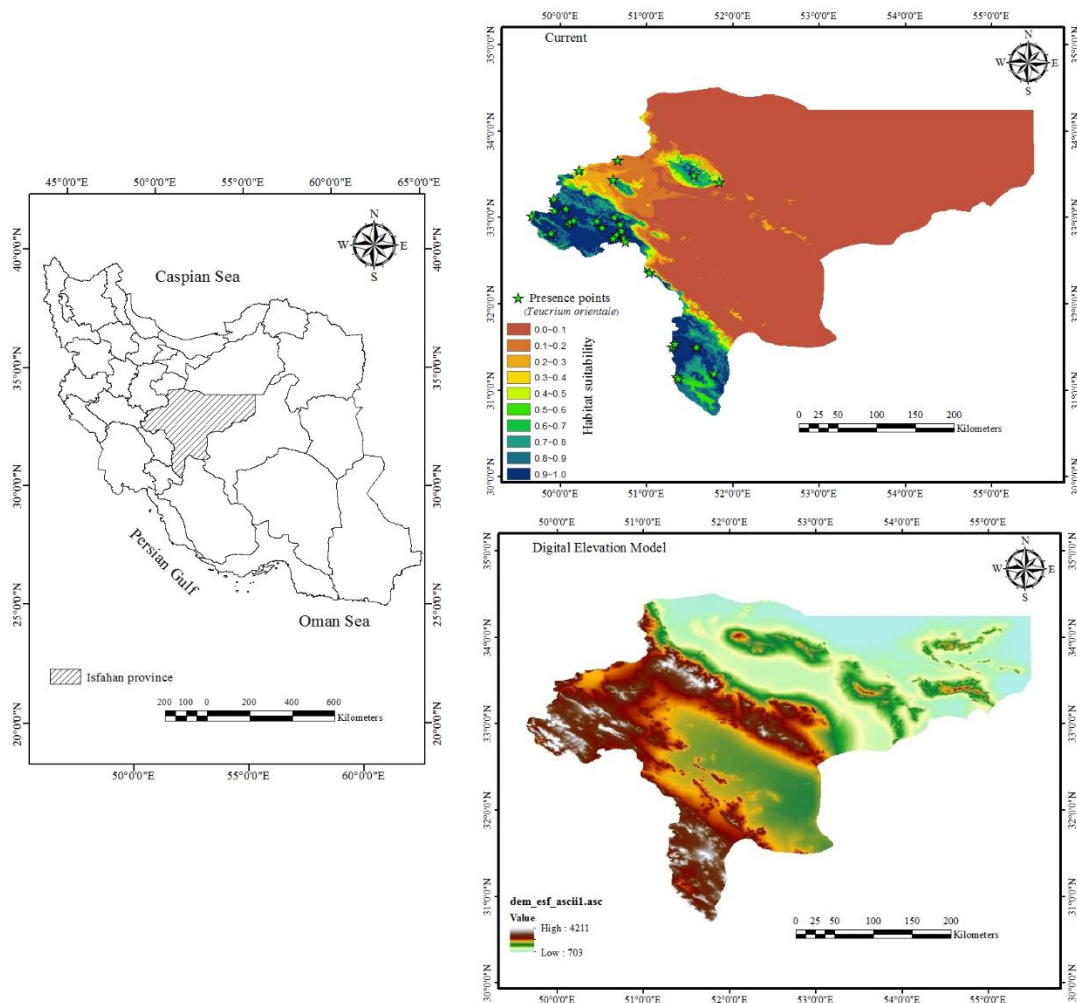
چکیده	اطلاعات مقاله
با توجه به آسیب‌پذیری مناطق خشک در برابر تغییر اقلیم و بهره‌برداری‌های انسانی، این مطالعه وضعیت فعلی و آینده رویشگاهی <i>Teucrium orientale</i> را در استان اصفهان بررسی کرده است تا مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی در این محیط‌های تحت فشار فراهم کند. به‌منظور دستیابی به اهداف مطالعه، از مجموعه گسترده‌ای از الگوریتم‌های پیشرفته مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها در چارچوب یک مدل اجماعی استفاده شد. این مدل‌ها با تکیه بر متغیرهای اقلیمی پایگاه CHELSA و پارامترهای توپوگرافی اقدام به پیش‌بینی پراکنش گونه کردند. برای ارزیابی تغییرات آتی رویشگاه‌ها، داده‌های خروجی مدل‌های اقلیمی بر اساس سه سناریوی انتشار همراه با لحاظ کردن شاخص‌های فشار انسانی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. تحلیل نتایج نشان داد که پارامترهای اقلیمی، به‌ویژه دما و بارندگی، بیشترین تأثیر را بر حضور و پراکنش این گونه دارند. شبیه‌سازی شرایط آینده نیز حاکی از آن بود که در اغلب سناریوها مساحت رویشگاه‌های مناسب برای این گونه با روندی کاهشی مواجه خواهد شد، هرچند نحوه پراکندگی این تغییرات در سطح استان بسته به مدل اقلیمی متفاوت است. در میان مناطق مختلف، بخش‌های غربی و جنوبی و نواحی مرتفع استان ظرفیت بیشتری برای حفظ شرایط مطلوب زیستی در آینده نشان دادند و به‌عنوان مناطق دارای پتانسیل رویشگاهی شناخته شدند. با این حال، بررسی فضایی نشان داد که بخش قابل توجهی از این نواحی با مناطقی که در آن‌ها میزان فعالیت‌های انسانی در سطح قابل توجهی قرار دارد هم‌پوشانی دارد؛ موضوعی که می‌تواند پایداری رویشگاه‌های باقی‌مانده را با چالش مواجه کند. بر این اساس، توجه به مدیریت کاربری اراضی، کاهش فشارهای انسانی و حفاظت هدفمند از نواحی دارای شرایط پایدار اقلیمی‌ست می‌تواند در حفظ این گونه و رویشگاه‌های آن نقش تعیین‌کننده‌ای داشته باشد. یافته‌های این مطالعه همچنین نشان می‌دهد که در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی لازم است عوامل اقلیمی و انسانی به‌صورت توأمان مورد توجه قرار گیرند تا تصمیم‌گیری‌ها از پشتوانه علمی دقیق‌تری برخوردار باشند.	نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۵ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵ کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، مدل‌سازی توزیع گونه، مطلوبیت رویشگاه، مدل اجماعی، فشارهای انسانی.

ایران به دلیل شرایط جغرافیایی و اقلیمی متنوع، یکی از مناطق دارای غنای بالای پوشش گیاهی در جهان به شمار می‌آید. قرار گرفتن این کشور در مرز چند قلمرو زیست‌جغرافیایی سبب شده است که هزاران گونه گیاهی در آن پراکنش داشته باشند و بخش قابل توجهی از آن‌ها در گروه گیاهان دارویی و معطر طبقه‌بندی شوند (Noroozi et al., 2016; Noroozi et al., 2019). این منابع گیاهی افزون بر ارزش اقتصادی، در حفظ دانش بومی، تأمین مواد اولیه برای درمان‌های سنتی و تداوم عملکردهای طبیعی اکوسیستم‌ها اهمیت زیادی دارند. با وجود این ظرفیت زیستی ارزشمند، جمعیت بسیاری از این گونه‌ها در سال‌های اخیر با روندی کاهشی روبه‌رو شده است. گسترش فعالیت‌های انسانی، تخریب رویشگاه‌های طبیعی، بهره‌برداری ناپایدار از منابع گیاهی، بروز آتش‌سوزی‌ها، چرای شدید دام، ورود گونه‌های غیربومی و همچنین پیامدهای ناشی از تغییرات اقلیمی از جمله عواملی هستند که پایداری این گیاهان را تهدید می‌کنند (Cahyaningsih et al., 2021). در چنین شرایطی، اتخاذ رویکردهای مدیریتی مبتنی بر حفاظت از رویشگاه‌های طبیعی در کنار توسعه سامانه‌های کشت هدفمند و پایدار می‌تواند به کاهش فشار وارده بر جمعیت‌های طبیعی و صیانت از تنوع ژنتیکی این گیاهان کمک کند. همچنین برنامه‌ریزی حفاظتی بر پایه اصول بوم‌شناسی خاک و منابع آب، نقش مهمی در حفظ و بهره‌برداری پایدار از این سرمایه‌های طبیعی خواهد داشت. تیره نعناعیان (Lamiaceae) با دارا بودن حدود ۲۲۰ جنس و بیش از ۴۰۰۰ گونه، یکی از وسیع‌ترین و شناخته‌شده‌ترین خانواده‌های گیاهان گل‌دار در سطح جهان به شمار می‌رود که کانون تنوع آن در ایران، عمدتاً در منطقه زاگرس مرکزی است. جنس مریم‌نخودی (*Teucrium*) متعلق به زیرخانواده *Ajugoideae* بالغ بر ۳۴۰ گونه است که پراکنش آن‌ها عمدتاً در نواحی مدیترانه‌ای و خاورمیانه متمرکز است. در فلور ایران، ۱۳ گونه علفی و بوته‌ای از این جنس شناسایی شده است که ۳ مورد آن انحصاری کشور محسوب می‌شوند. گونه‌های این جنس به دلیل دارا بودن ترکیبات ثانویه ارزشمند، از دیرباز در طب سنتی جایگاه ویژه‌ای داشته‌اند (خداحامی و رضایی، ۱۳۹۳؛ مظفریان، ۱۳۹۶). گونه مریم‌نخودی شرقی (*Teucrium orientale*) یک گیاه علفی چندساله و پوشیده از کرک است که ارتفاع آن معمولاً بین ۲۰ تا ۷۰ سانتی‌متر متغیر است. برگ‌های این گیاه دارای پهنکی با بریدگی‌های عمیق بوده و گل‌های آن با جامی به رنگ آبی، آبی‌مایل به سفید یا بنفش دیده می‌شوند. پراکنش جغرافیایی این گونه در مناطقی از قفقاز، ترکیه و ایران گزارش شده است. این گیاه بیشتر در رویشگاه‌های کوهستانی و دامنه‌های سنگی می‌روید و در نواحی ایران-تورانی و همچنین مناطق گذر خزری-ایران-تورانی گسترش دارد. علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که این گونه دارای ویژگی‌های دارویی قابل توجهی از جمله اثرات ضد میکروبی، ضد توموری، ضد التهابی، آنتی‌اکسیدانی و همچنین نقش در کاهش قند و چربی خون است (امیری، ۱۳۸۷؛ حیدری و همکاران، ۱۳۹۴). نتایج سناریوهای اقلیمی بیانگر آن است که تداوم افزایش دمای جهانی تا انتهای قرن حاضر می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر یا حذف بخش قابل توجهی از رویشگاه‌های بالقوه مناسب برای استقرار گیاهان دارویی و معطر در ایران شود. در این چارچوب، مدل‌های پراکنش گونه‌ها به‌عنوان ابزارهای تحلیلی کارآمد، امکان ارزیابی پاسخ گونه‌ها به تغییرات اقلیمی و شناسایی الگوهای احتمالی انتقال دامنه پراکنش در آینده را فراهم می‌سازند (زهیری و همکاران، ۱۴۰۴؛ فخمی و خداحامی، ۱۴۰۲؛ قلیچ‌نیا، ۱۴۰۳؛ معتمدی و همکاران، ۱۴۰۴؛ Wang et al., 2018; Moraitis et al., 2019). در سال‌های اخیر، به‌کارگیری رویکردهای مدل‌سازی اجماعی که بر تلفیق خروجی چندین الگوریتم پیش‌بینی مبتنی هستند، به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش عدم قطعیت‌های روش‌شناختی و افزایش قابلیت اعتماد نتایج پیش‌بینی مورد توجه قرار گرفته است (Rew et al., 2019; Lin and Chiu, 2018; Hao et al., 2020). با وجود جایگاه تثبیت‌شده این مدل‌ها در مطالعات بوم‌شناسی و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، کاربرد آن‌ها در حوزه گیاهان دارویی و معطر همچنان محدود باقی مانده است. بررسی منابع نشان می‌دهد که پژوهش‌های موجود عمدتاً به تعداد محدودی از گونه‌های دارویی، از جمله *Allium wallichii*, *Aconitum spicatum*, *Bergenia ciliata*, *Nardostachys jatamansi*, *Valeriana jatamansi* (Kunwar et al., 2023). افزون بر این، مطالعات جداگانه‌ای بر روی گونه‌های *Nepeta glomerulosa* (Karami et al., 2022) و *Salvia hydrangea* (Ghehsareh Ardestani and Heidari) (Ghahfarrokhi, 2021) گزارش شده است. با توجه به گستره بوم‌شناختی قابل توجه، اهمیت اقتصادی و همچنین افزایش حساسیت گونه *T. orientale* نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم، شناسایی و پیش‌بینی دقیق نواحی مستعد حضور این گونه در شرایط فعلی و آینده از اهمیت بالایی برخوردار است. چنین اطلاعاتی می‌تواند مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و مدیریت پایدار این گیاه فراهم کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف برآورد الگوی پراکنش بالقوه گونه *T. orientale* در استان اصفهان در شرایط اقلیمی کنونی و همچنین در سناریوهای اقلیمی آینده برای افق‌های زمانی ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ انجام شد. در این مطالعه، به منظور افزایش دقت پیش‌بینی‌ها، از رویکرد مدل‌سازی اجماعی بهره گرفته شد و داده‌های اقلیمی حاصل از دو مدل گردش عمومی جو شامل GFDL-ESM4 و MRI-ESM2.0 تحت سه مسیر انتشار SSP126، SSP370 و SSP585 مورد استفاده قرار گرفت. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به عنوان پشتوانه‌ای علمی برای طراحی راهبردهای حفاظت مبتنی بر شواهد و نیز برنامه‌ریزی مدیریتی بلندمدت در راستای صیانت از این گونه دارویی ارزشمند مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش انجام تحقیق

• محدوده مورد مطالعه

استان اصفهان با گستره‌ای نزدیک به ۱۰۷ هزار کیلومترمربع، یکی از پهناورترین استان‌های ایران به شمار می‌رود و حدود شش درصد از مساحت کشور را شامل می‌شود. این استان در بخش مرکزی ایران قرار گرفته و از نظر جغرافیایی در محدوده طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۵ درجه و ۵۰ دقیقه شرقی و عرض ۳۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۲۶ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). موقعیت قرارگیری اصفهان سبب شده است که این منطقه حد واسطی میان ارتفاعات زاگرس در نواحی غربی و دشت‌ها و بیابان‌های خشک شرق کشور باشد. تفاوت زیاد ارتفاع در نقاط مختلف استان، سیمای طبیعی متنوعی را ایجاد کرده و شرایط متفاوتی از نظر اقلیم و رویشگاه‌های طبیعی به وجود آورده است. بلندترین نواحی در غرب استان و در امتداد رشته‌کوه‌های زاگرس قرار دارند که ارتفاع آن‌ها به حدود ۴۰۰۰ متر از سطح دریا می‌رسد، در حالی که مناطق شرقی استان عمدتاً شامل دشت‌های خشک و کم‌ارتفاعی با ارتفاع تقریبی ۷۰۰ متر هستند. میانگین ارتفاع استان بیش از ۱۶۰۰ متر گزارش شده و همین اختلاف ارتفاع گسترده، عامل اصلی شکل‌گیری تنوع اکولوژی، تغییرات آب‌وهوایی محلی و گوناگونی پوشش گیاهی در این منطقه محسوب می‌شود (Ardestani et al., 2014). شرایط آب‌وهوایی استان اصفهان عمدتاً در گروه اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک قرار می‌گیرد. کمبود بارش و اختلاف محسوس دما میان فصل‌های مختلف سال از ویژگی‌های اصلی اقلیم این منطقه است. متوسط دمای سالانه حدود ۱۶ درجه سانتی‌گراد برآورد شده، اما در ماه‌های گرم سال دما در برخی مناطق از ۴۰ درجه سانتی‌گراد نیز فراتر می‌رود و در فصل زمستان کاهش شدید دما و یخبندان مشاهده می‌شود. میزان بارندگی سالانه در حدود ۱۲۰ میلی‌متر است و عمده نزولات جوی در ماه‌های سرد سال، به‌ویژه پاییز و زمستان، رخ می‌دهد. در مقابل، بخش زیادی از سال با خشکی و کم‌آبی همراه است. این ویژگی‌های اقلیمی تأثیر مستقیمی بر میزان رطوبت خاک، تراکم و نوع پوشش گیاهی و همچنین پراکنش گونه‌های مقاوم به خشکی و گونه‌های سازگار با مناطق کوهستانی در سطح استان دارند (Tarkesh and Jetschke, 2016).



شکل ۱. نقشه پراکنش رویشگاه‌های مناسب گونه *Teucrium orientale* به همراه نقشه مدل ارتفاع رقومی (DEM) استان اصفهان

• گردآوری داده‌های حضور

اطلاعات مربوط به حضور گونه *T. orientale* در جریان بازدیدها و برداشت‌های میدانی ثبت شد. مختصات جغرافیایی تمامی نقاط مشاهده شده با استفاده از دستگاه GPS ثبت گردید تا از صحت مکانی داده‌ها اطمینان حاصل شود. به منظور کاهش اثر خودهمبستگی مکانی و افزایش استقلال داده‌ها - که از پیش فرض‌های مهم در مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها به شمار می‌آید - نقاط ثبت‌شده غربال شدند، به گونه‌ای که فاصله میان نزدیک‌ترین نقاط حداقل یک کیلومتر باشد. پس از اعمال این فیلتر مکانی، در مجموع ۳۰ نقطه حضور مستقل برای انجام مدل‌سازی انتخاب شد (Moraitis et al., 2019).

• متغیرهای محیطی

برای توصیف شرایط محیطی منطقه، متغیرهای توپوگرافی شامل ارتفاع، شیب و جهت شیب از مدل رقومی ارتفاعی پایگاه داده WorldClim با قدرت تفکیک ۳۰ ثانیه قوسی استخراج شد (Fick and Hijmans, 2017). همچنین ۱۹ متغیر زیست‌اقليمی که بیانگر الگوهای دما و بارش هستند، از پایگاه داده CHELSA (Climatologies at High Resolution for Earth Land Surface Areas) دریاقت گردید. تمامی لایه‌های رستری مورد استفاده با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ ثانیه قوسی (تقریباً معادل یک کیلومتر) استانداردسازی شدند (Hijmans et al., 2005). برای بررسی تغییرات احتمالی اقلیم در آینده، خروجی دو مدل گردش عمومی از مجموعه CMIP6 شامل GFDL-ESM4 متعلق به آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی و MRI-ESM2.0 مربوط به مؤسسه هواشناسی ژاپن به کار گرفته شد. انتخاب این مدل‌ها به دلیل توانایی مناسب آن‌ها در بازنمایی الگوهای اقلیمی گذشته در فلات ایران انجام گرفت. پیش‌بینی‌ها برای دو بازه زمانی شامل میانه قرن - ۲۰۵۰ (۲۰۴۱ تا ۲۰۷۰) و اواخر قرن - ۲۰۸۰ (۲۰۷۱ تا ۲۱۰۰) استخراج شدند. افزون بر این، سه مسیر سناریوی اجتماعی-اقتصادی مشترک شامل SSP126، SSP370 و SSP585 در نظر گرفته شد که دامنه گسترده‌ای از عدم قطعیت‌های اقلیمی آینده را پوشش می‌دهند (Fick and Hijmans, 2017; Tang et al., 2017; Salas et al., 2018; Wei et al., 2018).

• بررسی هم‌خطی و گزینش متغیرها

برای شناسایی همبستگی میان متغیرهای محیطی از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. در مواردی که مقدار قدر مطلق ضریب همبستگی بیش از ۰/۸ بود - که معمولاً به عنوان آستانه تشخیص هم‌خطی شدید در مطالعات بوم‌شناختی در نظر گرفته می‌شود - یکی از متغیرهای همبسته حذف گردید. در هر جفت متغیر همبسته، متغیری که ارتباط بوم‌شناختی مناسب‌تری با رویشگاه گونه داشت حفظ شد و دیگری کنار گذاشته شد. بدین ترتیب مجموعه‌ای از متغیرهای نسبتاً مستقل برای ورود به مدل تهیه شد (Ghehsareh Ardestani and Heidari, 2021).

• چارچوب مدل‌سازی مطلوبیت رویشگاه

برای پیش‌بینی مطلوبیت رویشگاه از رویکرد مدل‌سازی اجماعی چندالگوریتمی با استفاده از بسته biomod2 در محیط نرم‌افزار R بهره گرفته شد (Thuiller et al., 2005; Thuiller, 2007). در این چارچوب ده الگوریتم مختلف که طیفی از روش‌های آماری و یادگیری ماشین را پوشش می‌دهند مورد استفاده قرار گرفتند؛ از جمله شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، درخت تصمیم‌گیری طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)، تحلیل ممیزی انعطاف‌پذیر (FDA)، مدل افزایشی تعمیم‌یافته (GAM)، مدل تقویتی تعمیم‌یافته (GBM)، مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)، رگرسیون تطبیقی چندمتغیره (MARS)، روش بیشینه آنتروپی (MaxEnt)، جنگل تصادفی (RF) و مدل پاکت دامنه سطحی (SRE). استفاده هم‌زمان از چند الگوریتم سبب کاهش سوگیری مدل‌های منفرد و افزایش پایداری نتایج پیش‌بینی می‌شود (Thuiller et al., 2009).

• ارزیابی عملکرد مدل

برای هر یک از الگوریتم‌ها، داده‌های حضور به صورت تصادفی به دو مجموعه تقسیم شد؛ به طوری که ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش یا کالیبراسیون مدل و ۲۰ درصد برای آزمون مستقل در نظر گرفته شد. کارایی مدل‌ها با سه شاخص متداول شامل مساحت زیر منحنی ROC (AUC)، آماره مهارت واقعی (TSS) و ضریب کاپا (Kappa) سنجیده شد. این معیارها اطلاعات مکملی درباره قدرت تفکیک و دقت پیش‌بینی مدل‌ها ارائه می‌دهند (Ghehsareh Ardestani and Heidari Ghahfarrokhi, 2021).

• پیش‌بینی پراکنش در شرایط اقلیمی آینده

مدل‌های آموزش‌دیده بر روی لایه‌های زیست‌اقلیمی آینده حاصل از مدل‌های گردش عمومی منتخب و تحت هر یک از سناریوهای اقلیمی اعمال شدند. این پیش‌بینی‌ها برای دو دوره زمانی میانه قرن و پایان قرن انجام گرفت. بهره‌گیری از چند مدل اقلیمی، چند سناریوی انتشار و تکرارهای مختلف مطابق توصیه‌های رایج در مطالعات مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها است و به کاهش عدم قطعیت در نتایج کمک می‌کند (Lee et al., 2013).

• تهیه نقشه‌های اجماعی

برای ادغام نتایج الگوریتم‌های مختلف از روش اجماع وزن‌دار استفاده شد. در این روش، میانگین وزنی خروجی مدل‌ها بر اساس مقدار شاخص TSS محاسبه گردید تا مدل‌هایی با عملکرد بهتر سهم بیشتری در نقشه نهایی داشته باشند. مقادیر پیوسته مطلوبیت رویشگاه که در بازه صفر تا یک قرار داشتند، جهت سهولت در تفسیر به پنج طبقه تقسیم شدند: بسیار مناسب (بیش از ۰/۸)، مناسب (۰/۶ تا ۰/۸)، متوسط (۰/۴ تا ۰/۶)، ضعیف (۰/۲ تا ۰/۴) و نامناسب (کمتر از ۰/۲). استفاده از چنین نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی مکانی رایج است (Guisan et al., 2017).

• همپوشانی با شاخص فشار انسانی و تعیین اولویت‌های حفاظتی

برای ارزیابی میزان تأثیر فعالیت‌های انسانی از پایگاه داده جهانی «ردپای انسان» (Human Footprint) مربوط به سال ۲۰۱۸ استفاده شد. این شاخص عواملی نظیر تراکم جمعیت، تغییرات کاربری اراضی، شدت چرای دام و شبکه‌های حمل‌ونقل را در بر می‌گیرد و به‌طور گسترده در مطالعات اولویت‌بندی حفاظتی کاربرد دارد (Mu et al., 2022). مقادیر این شاخص بر اساس طبقه‌بندی پیشنهادی Mu و همکاران (۲۰۲۲) به هفت سطح شامل: بکر (۰-۱)، فشار کم (۱-۴)، فشار متوسط (۴-۱۰)، فشار زیاد (۱۰-۲۰)، بسیار زیاد (۲۰-۳۰)، شدید (۳۰-۴۰) و بحرانی (۴۰-۵۰) تقسیم شد. مناطق دارای اولویت حفاظتی بالا با همپوشانی دو معیار شناسایی شدند: مطلوبیت رویشگاه بیش از ۰/۶ که نشان‌دهنده ارزش بوم‌شناختی بالا است و شاخص فشار انسانی کمتر از ۱۰ که بیانگر سطح تهدید پایین تا متوسط است. این روش دو مرحله‌ای با رویکردهای رایج در برنامه‌ریزی حفاظت که بر ترکیب ارزش تنوع زیستی و شدت فشارهای انسانی تأکید دارند، همخوانی دارد (Mu et al., 2022).

۳- نتایج

• گزینش متغیرهای محیطی و کنترل هم خطی چندگانه

به منظور جلوگیری از بروز هم‌خطی میان متغیرهای محیطی و در عین حال بهبود کارایی و سادگی مدل، فرایند انتخاب متغیرها در دو مرحله بر روی مجموعه اولیه شامل ۲۲ متغیر محیطی انجام گرفت. در گام نخست، ضریب همبستگی پیرسون برای بررسی میزان ارتباط جفتی میان متغیرها محاسبه شد تا متغیرهایی که همبستگی بالایی با یکدیگر داشتند شناسایی شوند. در مواردی که مقدار قدر مطلق ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۸ بود، یکی از متغیرهای آن جفت - بر اساس اهمیت کمتر از دیدگاه بوم‌شناختی - حذف گردید. در پایان این فرایند غربالگری، مجموعه‌ای شامل ۱۰ متغیر برای استفاده در مدل انتخاب شد که از میان آن‌ها ۹ متغیر مربوط به شاخص‌های زیست‌اقلیمی و یک متغیر نیز بیانگر ویژگی فیزیوگرافی منطقه یعنی ارتفاع از سطح دریا بود. این مجموعه نهایی با کاهش وابستگی میان متغیرها، چارچوبی مناسب و قابل اعتماد برای انجام مدل‌سازی فراهم ساخت و امکان تفسیر دقیق‌تر روابط محیطی را مهیا کرد (جدول ۱).

جدول ۱- لایه‌های انتخابی در ورود به مدل‌سازی اجماعی به منظور تعیین رویشگاه‌های مناسب گونه‌ی *T. orientale* و اهمیت نسبی آن‌ها

علامت اختصاری	متغیرهای محیطی	عنوان به انگلیسی	اهمیت نسبی
Bio12	بارندگی سالیانه	Annual precipitation	۳۴/۹۷
Bio1	میانگین دمای سالیانه	Annual mean temperature	۱۶/۶۱
Bio13	بارندگی پربارش‌ترین ماه	Precipitation of wettest period	۱۴/۴۲
El	ارتفاع از سطح دریا	Elevation	۱۰/۳۳
Bio10	میانگین دمای گرم‌ترین فصل سال	Mean temperature of warmest quarter	۸/۱۴
Bio9	میانگین دمای خشک‌ترین فصل سال	Mean temperature of driest quarter	۷/۹۲
Bio8	میانگین دمای پربارش‌ترین فصل سال	Mean temperature of wettest quarter	۶/۷۲
Bio5	حداکثر دمای گرم‌ترین ماه سال	Maximum temperature of warmest month	۶/۷۲
Bio7	دامنه سالیانه دما (Bio5-Bio6)	Temperature annual range (Bio5-Bio6)	۲/۶۹
Bio2	میانگین دامنه دمای روزانه (حداکثر دما-حداقل دما) (متوسط ماهانه)	Mean diurnal range (mean of monthly max. and min. temp.)	۱/۷۱

• انتخاب الگوریتم‌ها و مدل اجماعی

در گام نخست، ده الگوریتم مختلف مدل‌سازی به منظور سنجش میزان سازگاری آن‌ها با ویژگی‌های بوم‌شناختی گونه مورد مطالعه ارزیابی شد. بررسی‌های تشخیصی شامل ارزیابی پایداری همگرایی، میزان حساسیت پاسخ و قابلیت اطمینان در مرحله آموزش نشان داد که ۸ الگوریتم از عملکردی پایدار و قابل اتکا برخوردارند؛ از این رو این الگوریتم‌ها برای تشکیل مدل اجماعی انتخاب و حفظ شدند (جدول ۲). دو الگوریتم به دلیل ناپایداری در نتایج و احتمال کاهش اعتبار پیش‌بینی‌ها کنار گذاشته شد تا استحکام روش‌شناسی و دقت تحلیل‌ها حفظ گردد.

• ارزیابی عملکرد مدل

دقت پیش‌بینی ۸ الگوریتم منتخب با استفاده از شاخص‌های AUC، TSS و KAPPA ارزیابی شد. نتایج اعتبارسنجی متقابل نشان داد میانگین مقادیر AUC برابر با 0.58 ± 0.869 ، TSS برابر با 0.114 ± 0.733 و KAPPA برابر با 0.101 ± 0.704 است که بیانگر قدرت تفکیک مناسب مدل‌های منفرد در شناسایی رویشگاه‌های مطلوب می‌باشد (جدول ۲). با ترکیب الگوریتم‌ها در قالب یک مدل اجماعی وزن دار، عملکرد پیش‌بینی به طور قابل توجهی بهبود یافت و مقادیر AUC، TSS و KAPPA به ترتیب به 0.991 ، 0.937 و 0.920 افزایش یافت. این نتایج نشان‌دهنده پایداری و قابلیت اعتماد بالاتر مدل اجماعی نسبت به مدل‌های مبتنی بر یک الگوریتم منفرد است.

جدول ۲- ارزیابی عملکرد مدل‌ها با برآورد معیارهای AUC، TSS و KAPPA در مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی پراکنش گونه‌ی *T. orientale* (مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی: ANN، رگرسیون و طبقه‌بندی درختی: CART، تحلیل ممیزی انعطاف‌پذیر: FDA، روش افزایشی تعمیم یافته: GBM، مدل خطی تعمیم یافته: GLM، جنگل تصادفی: RF، مدل رگرسیون سازشی چند متغیره اسپلاین: MARS و پاکت محدوده سطح: SRE)

شاخص‌ها	ANN	CART	FDA	GBM	GLM	MARS	RF	SRE	میانگین
AUC	0.921	0.903	0.906	0.737	0.860	0.894	0.884	0.850	0.869
TSS	0.816	0.815	0.807	0.474	0.712	0.783	0.753	0.704	0.733
KAPPA	0.769	0.789	0.781	0.479	0.663	0.732	0.725	0.692	0.704

• مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

در میان الگوریتم‌های مورد بررسی، مدل‌های شبکه عصبی (ANN) و تحلیل ممیزی انعطاف‌پذیر (FDA) بالاترین میانگین AUC را به ترتیب با مقادیر 0.921 و 0.906 ثبت کردند. از نظر شاخص TSS، مدل‌های شبکه عصبی (ANN) و تجزیه و تحلیل طبقه‌بندی درختی (CART) با مقادیر میانگین 0.816 و 0.815 بهترین عملکرد را نشان دادند. همچنین بیشترین مقادیر KAPPA مربوط به مدل‌های تجزیه و تحلیل طبقه‌بندی درختی (CART)، تحلیل ممیزی انعطاف‌پذیر (FDA) با مقدار 0.789 و 0.781 بود. در مقابل، روش افزایشی تعمیم یافته (GBM) کمترین میانگین AUC، TSS و KAPPA (0.737 ، 0.474 ، 0.479) را ثبت کرد که بیانگر کارایی محدودتر این الگوریتم در تعیین جایگاه اقلیمی گونه است (جدول ۲).

• پراکنش کنونی رویشگاه مناسب

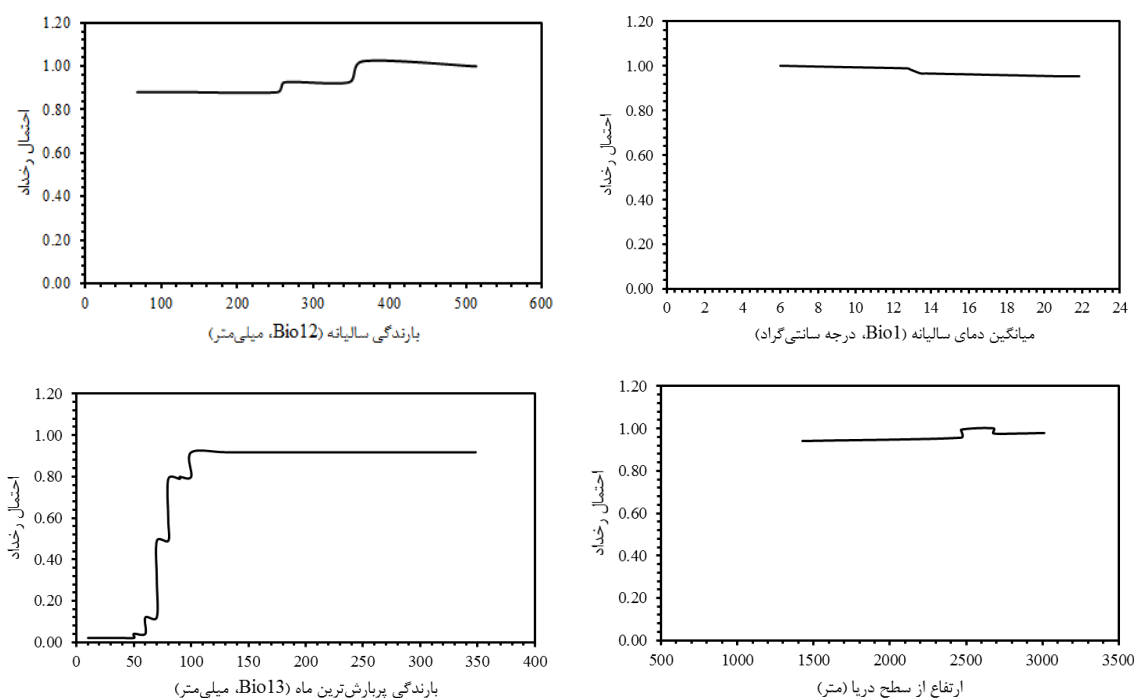
مدل اجماعی پراکنش فعلی رویشگاه‌های دارای شرایط اقلیمی مناسب برای گونه *T. orientale* را در استان اصفهان شناسایی کرد. رویشگاه‌های با مطلوبیت بالا شامل کلاس‌های «بسیار مناسب» و «مناسب» در مجموع $12/77$ درصد از مساحت استان، معادل $13678/80$ کیلومتر مربع را شامل می‌شوند. از این میزان، 10438 کیلومتر مربع ($9/74$ درصد) در کلاس بسیار مناسب و $3240/84$ کیلومتر مربع ($3/02$ درصد) در کلاس مناسب قرار دارد. این رویشگاه‌های با کیفیت عمدتاً در بخش‌های جنوبی، غربی و اندکی در شمال غربی استان متمرکز هستند و با مناطق دارای بیشترین تراکم حضور ثبت‌شده در مطالعات میدانی همخوانی دارند؛ امری که اعتبار پیش‌بینی‌های مدل را تقویت کرده و این نواحی را به عنوان کانون‌های اصلی پراکنش فعلی گونه معرفی می‌کند (شکل ۱).

• عوامل محیطی موثر بر مطلوبیت رویشگاه

تحلیل اهمیت متغیرها نشان داد که میانگین بارندگی سالیانه (Bio12)، میانگین دمای سالیانه (Bio1)، بارندگی پربارش‌ترین ماه (Bio13) و ارتفاع از سطح دریا مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده مطلوبیت رویشگاه این گونه دارویی هستند. این چهار متغیر در مجموع $66/33$ درصد از واریانس کل مدل را تبیین کردند که بیانگر وابستگی قابل توجه گونه به رژیم‌های بلندمدت دما و رطوبت تحت تأثیر گرادیان‌های توپوگرافی است. در مقابل، متغیرهای مرتبط با نوسانات کوتاه‌مدت دمایی سهم محدودی در مدل داشتند؛ به گونه‌ای که میانگین دما در روزانه (Bio2) و دامنه سالیانه دما (Bio7) مجموعاً تنها $4/40$ درصد از واریانس تبیین‌شده را شامل می‌شوند (جدول ۱). این الگو نشان می‌دهد که حضور گونه بیشتر به شرایط میانگین اقلیمی وابسته است تا نوسانات فصلی.

• دامنه‌های محیطی بهینه

تحلیل منحنی‌های پاسخ، دامنه‌های محیطی مرتبط با مطلوبیت بالای رویشگاه (بیش از ۰/۸) را مشخص کرد. بر این اساس، شرایط بهینه برای حضور گونه شامل میانگین بارندگی سالیانه (Bio12) از ۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر، میانگین دمای سالیانه (Bio1) از ۶ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد، میانگین بارندگی پربارش‌ترین ماه (Bio13) بیش از ۸۰ میلی‌متر و ارتفاع حضور بین ۱۴۰۰ تا ۳۱۰۰ متر است. این محدوده‌ها بیانگر دامنه اقلیمی هسته‌ای گونه هستند که در آن احتمال حضور به بیشترین میزان می‌رسد (شکل ۲).



شکل ۲- احتمال حضور گونه‌ی *T. orientale* بر اساس اصلی‌ترین متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر پراکنش آن

• مطلوبیت رویشگاه در آینده تحت تغییر اقلیم

پیش‌بینی‌های آینده بر اساس ترکیب‌های مختلف مدل‌های اقلیمی (CMIP6 (GCM-SSP) نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در مطلوبیت رویشگاه هستند. در تمام سناریوها کاهش رویشگاه‌های بهینه مشاهده می‌شود، در حالی که کلاس‌های با مطلوبیت پایین‌تر پاسخ‌های متفاوتی نشان می‌دهند.

- کاهش رویشگاه‌های بسیار مناسب

تمام سناریوها کاهش قابل توجه رویشگاه‌های بسیار مناسب (< 0.8) را پیش‌بینی می‌کنند. بین ۸۸/۲۷ درصد (GFDL-ESM4)، ۳۷۰/۲۰ (SSP370، ۲۰۸۰) تا ۹۵/۸۲ درصد (GFDL-ESM4، SSP585، ۲۰۸۰) در دو گردش عمومی GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 در مقایسه با توزیع فعلی تحت سناریوهای اقلیمی مختلف در آینده (۲۰۵۰ و ۲۰۸۰) کاهش چشمگیری می‌یابد (شکل ۳ و جدول ۳).

- افزایش رویشگاه‌های مناسب

مساحت رویشگاه‌های مناسب در کلیه سناریوها افزایش می‌یابد. بین ۱/۰۶ درصد (MRI-ESM2-0، SSP585، ۲۰۸۰) تا ۹۹/۲۸ درصد (GFDL-ESM4، SSP370، ۲۰۵۰) افزایش می‌یابد (شکل ۳ و جدول ۳).

- افزایش رویشگاه‌های متوسط

مساحت رویشگاه متوسط در اکثر سناریوها افزایش می‌یابد. بین ۱۹/۳۶ درصد (GFDL-ESM4، SSP126، ۲۰۵۰) تا ۲۴۹/۴۸ درصد (GFDL-ESM4، SSP585، ۲۰۸۰) افزایش می‌یابد. کاهش فقط در سناریوی SSP126 در سال ۲۰۸۰ (۳/۶۶ درصد) تحت GFDL-ESM4 مشاهده می‌شود. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده عدم قطعیت قابل توجه در پیش‌بینی گستره آینده رویشگاه‌های حاشیه‌ای است (شکل ۳ و جدول ۳).

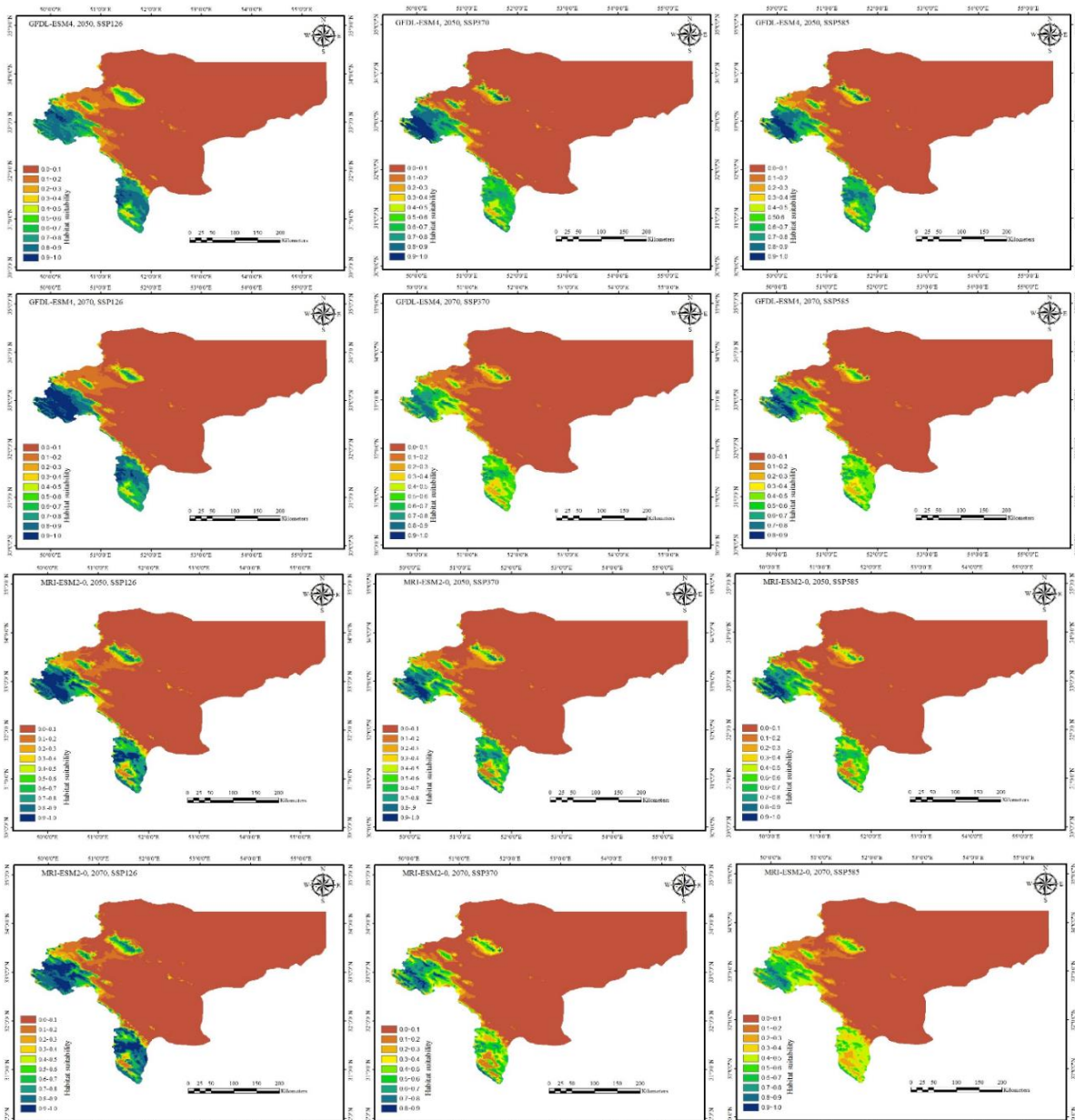
- کاهش رویشگاه‌های ضعیف

اکثر سناریوها کاهش قابل توجه رویشگاه‌های ضعیف را پیش‌بینی می‌کنند. بین ۹/۳۲ درصد (MRI-ESM2-0، SSP370، ۲۰۵۰) تا ۳۳/۰۵ درصد (GFDL-ESM4، SSP126، ۲۰۸۰) کاهش می‌یابد. افزایش فقط در سناریوهای SSP370 (۱۱/۶۶، ۱۷/۵۶ درصد)

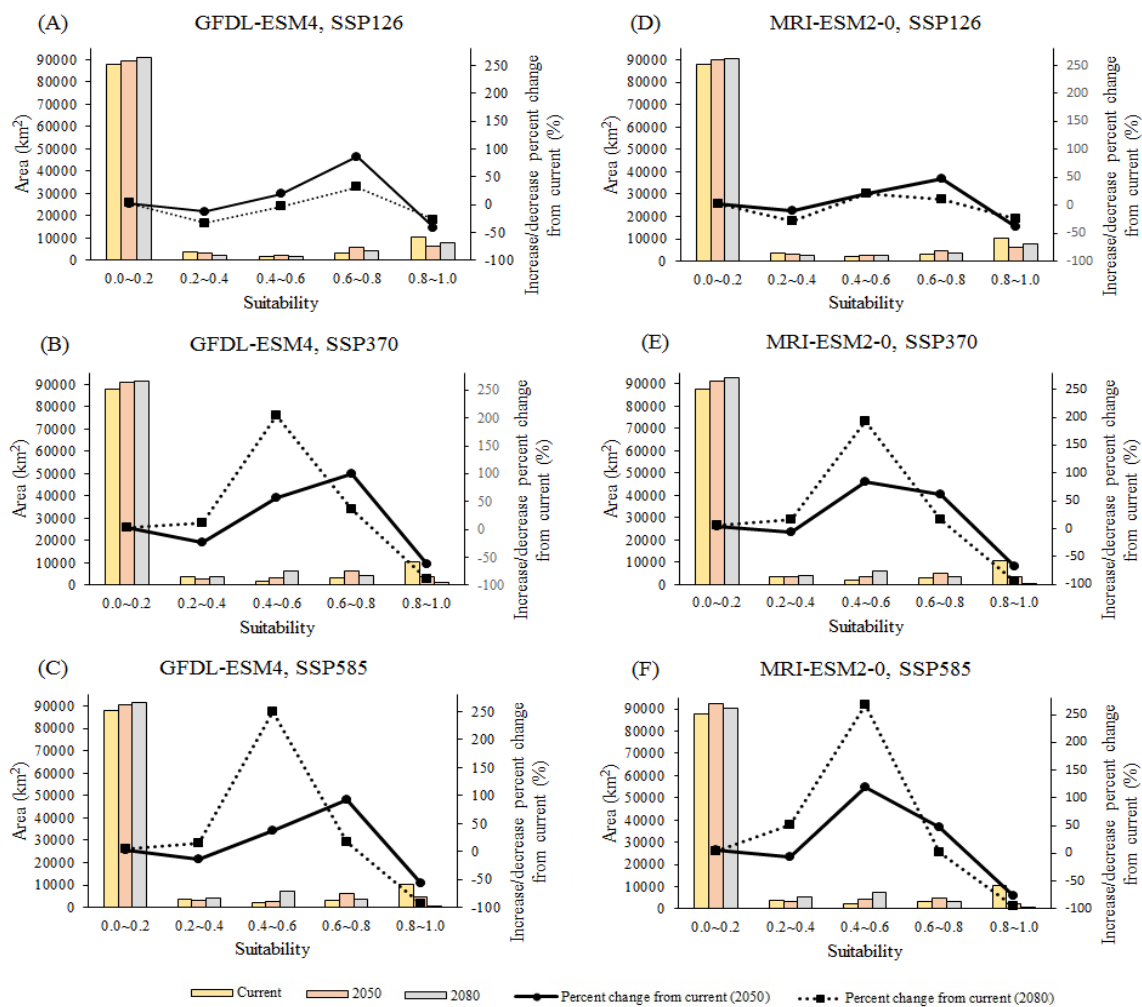
و SSP585 (۱۳/۹۴، ۵۱/۰ درصد) در سال ۲۰۸۰ تحت GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 مشاهده می‌شود. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده عدم قطعیت قابل توجه در پیش‌بینی گستره آینده رویشگاه‌های حاشیه‌ای است (شکل ۳ و جدول ۳).
– افزایش محدود رویشگاه‌های نامناسب
 بین ۱/۸۱ درصد (GFDL-ESM4، SSP126، ۲۰۵۰) تا ۵/۵۲ درصد (MRI-ESM2-0، SSP370، ۲۰۸۰) افزایش می‌یابد (شکل ۳ و جدول ۳).

• پیامدهای تغییر اقلیم بر تغییر خالص رویشگاه

با در نظر گرفتن مجموع افزایش‌ها و کاهش‌ها، روند کلی تغییر رویشگاه منفی است. به طور کلی، نرخ خالص تغییرات وسعت رویشگاه بهینه این گونه تحت پیش‌بینی اقلیمی GFDL-ESM4 بین ۲۴/۲۱– درصد (SSP126، ۲۰۸۰) تا ۸۵/۴۴– درصد (SSP585، ۲۰۸۰) و تحت پیش‌بینی اقلیمی MRI-ESM2-0 بین ۵۱/۴۷– درصد (SSP126، ۲۰۵۰) تا ۸۹/۸۴– درصد (SSP585، ۲۰۸۰) برآورد شد. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش محدود در کلاس‌های با مطلوبیت پایین نمی‌تواند کاهش شدید رویشگاه‌های بهینه را جبران کند (جدول ۴ و شکل ۴).



شکل ۳– وسعت رویشگاه‌های مناسب گونه‌ی *T. orientalis* تحت سه سناریوی اقلیمی SSP126، SSP370 و SSP585 در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ بر اساس مدل گردش عمومی GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0

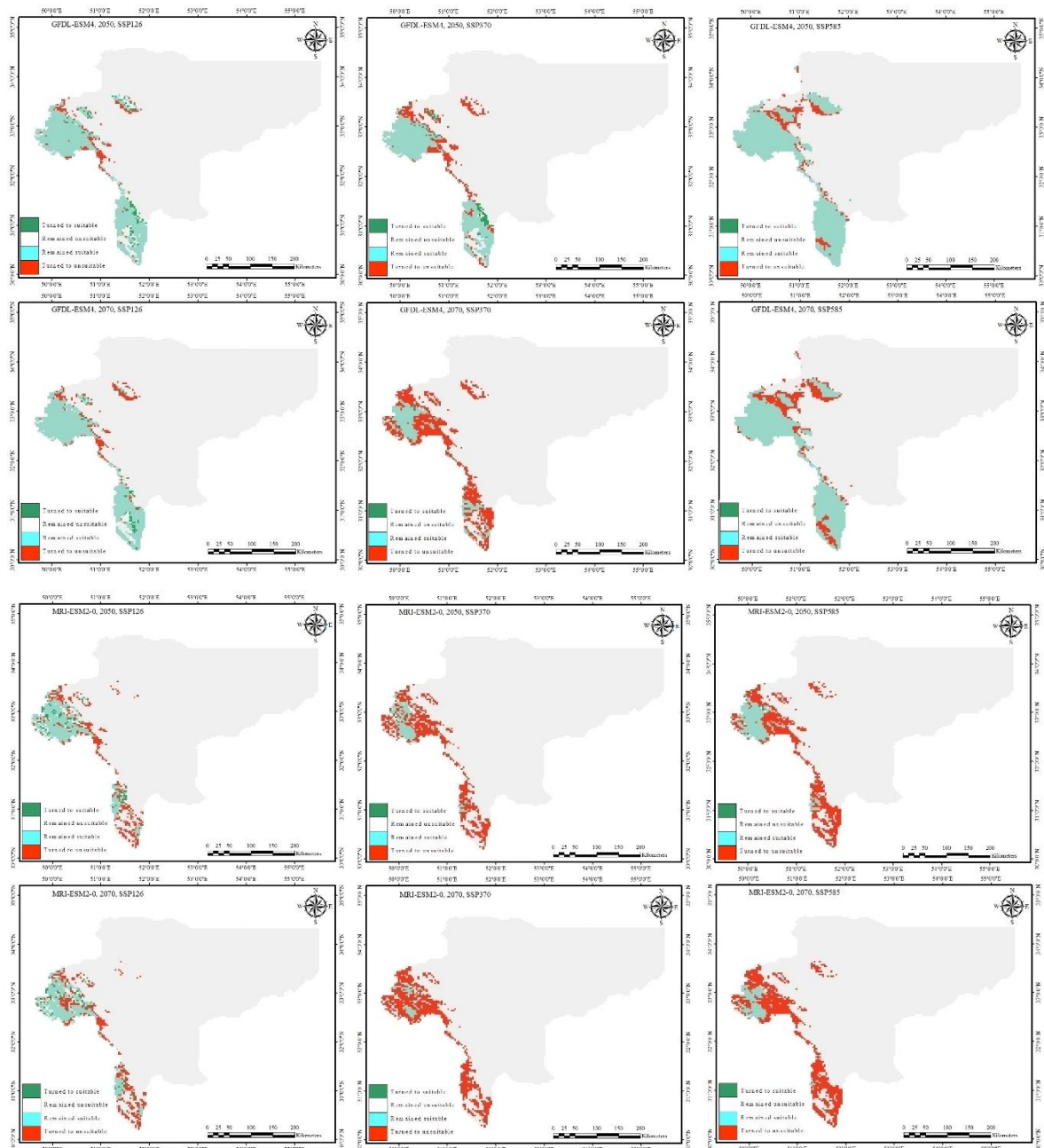


شکل ۳- بررسی روند تغییرات طبقات رویشگاه‌های مناسب گونه‌ی *T. orientale* در حال حاضر و تحت تغییر اقلیم سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰

گردش عمومی هوا	سال	سناریو	حضور پایدار (کیلومتر مربع)	غیاب پایدار (کیلومتر مربع)	رویشگاه از دست رفته (درصد)	رویشگاه جدید (درصد)	تغییرات در سطح رویشگاه (درصد)
GFDL-ESM4	2050	SSP126	۸۹۱۱	۱۳۳۳۳۲	۴۰/۴۷	۴/۰۳	-۳۶/۴۳
		SSP370	۸۴۲۱	۱۳۰۱۳۹	۵۴/۹۳	۰/۴۲	-۵۴/۵۱
		SSP585	۹۲۹۹	۱۳۰۱۳۱	۵۰/۲۳	۰/۴۷	-۴۹/۷۷
	2080	SSP126	۱۰۵۸۲	۱۳۳۱۷۴	۲۹/۳۰	۵/۰۹	-۲۴/۲۱
		SSP370	۳۶۶۷	۱۳۰۱۸۴	۸۰/۳۸	۰/۱۸	-۸۰/۱۹
		SSP585	۲۷۰۲	۱۳۰۲۰۰	۸۵/۵۴	۰/۱	-۸۵/۴۴
MRI-ESM2-0	2050	SSP126	۶۱۴۵	۱۳۵۳۶۹	۵۳/۶۲	۲/۱۵	-۵۱/۴۷
		SSP370	۷۵۳۵	۱۳۰۱۷۰	۵۹/۶۸	۰/۲۶	-۵۹/۴۲
		SSP585	۵۴۹۲	۱۳۰۱۷۲	۷۰/۶۵	۰/۰۹	-۷۰/۵۶
	2080	SSP126	۴۱۶۱	۱۳۵۵۸۲	۶۸/۶۰	۰/۵۴	-۶۸/۰۵
		SSP370	۲۲۷۹	۱۳۰۱۸۲	۸۷/۸۰	۰/۱۹	-۸۷/۶۱
		SSP585	۱۸۸۳	۱۳۰۱۷۱	۸۹/۹۴	۰/۱۰	-۸۹/۸۴

جدول ۴- تغییر سطح رویشگاه‌های مناسب گونه‌ی *T. orientale* تحت سناریوهای اقلیمی SSP126، SSP370 و SSP585 بر اساس پیش‌بینی اقلیمی

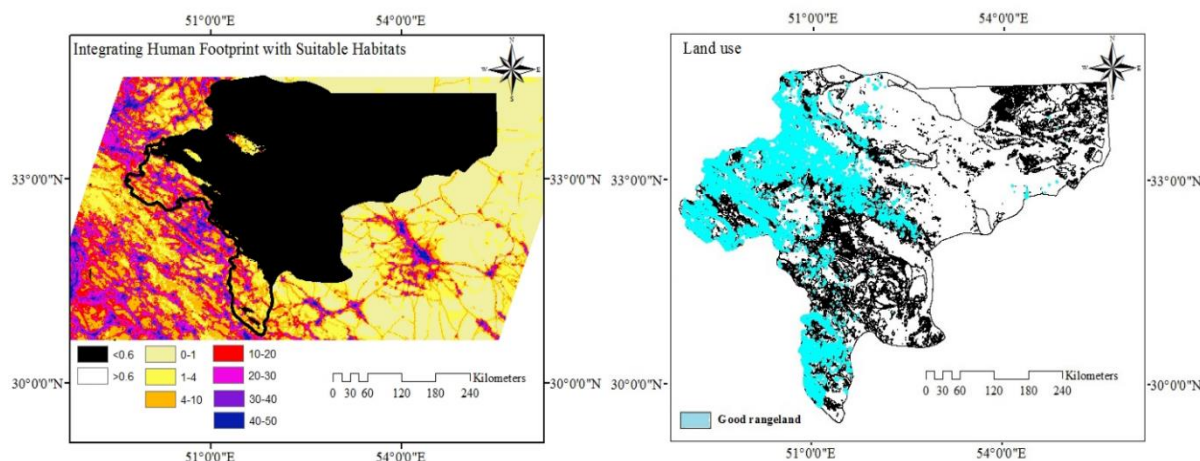
GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰



شکل ۴- تغییرات وسعت جغرافیایی مناسب برای گونه‌ی *T. orientale* براساس پیش‌بینی اقلیمی GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 در شرایط حال حاضر در مقایسه با آینده (۲۰۵۰ و ۲۰۸۰) بر اساس سناریوهای اقلیمی SSP126، SSP370، و SSP585 (Turned to suitable: گرایش به رویشگاه مناسب، Remained unsuitable: رویشگاه نامناسب پایدار، Remained suitable: رویشگاه مناسب پایدار و Turned to unsuitable: گرایش به رویشگاه نامناسب)

• پیامدهای حفاظتی بر اساس همپوشانی با فشار انسانی

بررسی همپوشانی رویشگاه‌های با مطلوبیت بالا (بیش از ۰/۶) با شاخص فشار انسانی نشان داد که بخش عمده‌ای از نواحی غربی در محدوده‌های دارای فشار انسانی بالا قرار گرفته‌اند، در حالی که مناطق جنوبی بیشتر در طبقات فشار کم تا متوسط مشاهده شدند. همچنین، کانون‌های اصلی رویشگاه‌های مناسب عمدتاً در کلاس‌های میانی تا نسبتاً بالای شاخص فشار انسانی، یعنی محدوده‌های زرد و نارنجی، پراکنش داشتند (شکل ۵). این وضعیت نشان می‌دهد که بخش زیادی از پناهگاه‌های اقلیمی کنونی و آینده گونه، هم‌اکنون تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته و در برابر تغییر کاربری اراضی و تخریب رویشگاه حساس هستند. بنابراین، این نواحی باید در اولویت اقدامات حفاظتی قرار گیرند و برای کاهش اثرات انسانی و صیانت از پناهگاه‌های اقلیمی باقی‌مانده، راهکارهای مدیریتی مؤثر در آن‌ها اجرا شود.



شکل ۵- ادغام نقشه رویشگاه‌های با کیفیت گونه‌ی *T. polycephalum* با نقشه شاخص فشار انسانی (نقشه سمت چپ)، نقشه سمت راست مراتع خوب در استان

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با بهره‌گیری از چارچوب مدل‌سازی اجماعی توزیع گونه‌ها، پراکنش کنونی و آینده گونه *T. orientale* را در سناریوهای مختلف تغییر اقلیم شبیه‌سازی کرد. نتایج نشان داد که متغیرهایی مانند میانگین بارندگی سالیانه، میانگین دمای سالیانه، بارندگی پربارش‌ترین ماه و ارتفاع از سطح دریا از مهم‌ترین عوامل پیش‌بینی‌کننده پراکنش این گونه هستند. این یافته با مطالعات پیشین هم‌راستا است که نشان می‌دهند گرادین‌های دما و بارش از عوامل کلیدی تعیین‌کننده محدوده‌های اقلیمی گونه‌ها به شمار می‌روند (Fick and Hijmans, 2017). برجسته بودن نقش این متغیرها را می‌توان تا حد زیادی به ناهمواری‌ها و تغییرات شدید توپوگرافی در بخش‌های جنوبی و غربی استان نسبت داد. تمرکز مکانی رویشگاه‌های باکیفیت در این نواحی نیز با مشاهدات میدانی همخوانی داشته و بیانگر وجود شرایط محیطی نسبتاً پایدار برای گونه‌های سازگار با اقلیم‌های خشک در ایران است (قهساره اردستانی و همکاران، ۱۴۰۴). همچنین نتایج این تحقیق با پژوهش‌هایی که بر نقش تعیین‌کننده الگوی فصلی بارش و محدودیت‌های دمایی در شکل‌دهی به پراکنش گیاهان، به‌ویژه در زیست‌بوم‌های خشک و نیمه‌خشک، تأکید دارند، همسو است (Zhang et al., 2018). در این مطالعه، اهمیت بالای بارندگی سالانه و بارندگی پربارش‌ترین ماه با نتایج مطالعاتی مطابقت دارد که نشان می‌دهند تغییرات در میزان دسترسی به رطوبت می‌تواند یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده گونه‌های مناطق خشک در شرایط تغییر اقلیم باشد (Mohapatra et al., 2019). علاوه بر این، متغیرهای میانگین دمای سالیانه و ارتفاع نیز اثر قابل‌توجهی بر الگوی پراکنش گونه نشان داد؛ نتیجه‌ای که با یافته‌های Cahyaningsih و همکاران (۲۰۲۱) و نیز Heidari Ghahfarroki و Ghehsareh Ardestani (۲۰۲۱) در پژوهش‌های مربوط به پراکنش گیاهان دارویی همخوانی دارد. هرچند در برخی پژوهش‌ها متغیرهای محیطی متفاوتی به‌عنوان عوامل کلیدی گزارش شده‌اند، این اختلاف‌ها غالباً به تفاوت در مقیاس مطالعه یا قدرت تفکیک مکانی داده‌های محیطی مورد استفاده بازمی‌گردد. همچنین عملکرد مناسب مدل شبکه عصبی (ANN) در چارچوب مدل‌سازی اجماعی، با مطالعاتی که این روش را به‌عنوان ابزاری با قدرت پیش‌بینی بالا در مدل‌های توزیع گونه معرفی کرده‌اند، مطابقت دارد (Lin and Chiu, 2018). نتایج پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که در بیشتر سناریوهای اقلیمی، مساحت رویشگاه‌های باکیفیت این گونه کاهش خواهد یافت؛ موضوعی که بیانگر خطر قابل توجه کوچک‌شدن و قطعه‌قطعه شدن محدوده پراکنش آن است. چنین الگویی با گزارش‌های جهانی همخوانی دارد که نشان می‌دهند گونه‌هایی با دامنه تحمل اقلیمی محدود نسبت به افزایش دما حساس‌تر بوده و بیشتر در معرض پیامدهای گرمایش قرار می‌گیرند (Gaisberger et al., 2020; Vincent et al., 2019; Robiansyah, 2018). همچنین تفاوت در نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های اقلیمی GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 بیانگر عدم قطعیت ذاتی در خروجی مدل‌های اقلیمی است؛ مسئله‌ای که در بسیاری از مطالعات به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی پیش‌بینی تغییرات تنوع زیستی مطرح شده است (Thuiller et al., 2005). با وجود این عدم قطعیت‌ها، منفی بودن تغییر خالص مساحت رویشگاه در تمامی سناریوها نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالای گونه *T. orientale* است و با روندهای جهانی کاهش رویشگاه گونه‌های مناطق خشک در نتیجه تغییرات اقلیمی مطابقت دارد (Asase and Peterson, 2019). بر اساس نتایج این مطالعه، انتظار می‌رود تغییرات اقلیمی موجب جابه‌جایی مکانی رویشگاه‌های مناسب این گونه در محدوده منطقه مورد مطالعه شود؛ به‌طوری‌که بخشی از رویشگاه‌ها از نواحی شرقی به سمت بخش‌های غربی منتقل شوند و همزمان در امتداد شیب ارتفاعی به سوی ارتفاعات بالاتر گسترش یابند، جایی که شرایط دمایی خنک‌تر است. چنین جابه‌جایی‌هایی می‌تواند رقابت میان گونه‌های گیاهی را برای دسترسی به فضا و منابع محدود افزایش دهد (Mohapatra et al., 2019; Thuiller et al., 2009). یکی از نتایج قابل توجه این پژوهش، همپوشانی چشمگیر میان رویشگاه‌های اقلیمی با کیفیت بالا و مناطقی است که در معرض فشار انسانی کم تا متوسط قرار دارند. چنین الگویی با مفهوم «نقاط داغ» جهانی شباهت دارد؛ نواحی‌ای که در آن‌ها ارزش بالای تنوع زیستی هم‌زمان با وجود تهدیدهای انسانی مشاهده می‌شود (Mu et al., 2022). حفظ این رویشگاه‌های بالقوه

از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا تداوم تخریب‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی می‌تواند ظرفیت سازگاری اقلیمی را کاهش داده و به تدریج کیفیت رویشگاه‌های باقی‌مانده را نیز تنزل دهد. بر این اساس، برنامه‌های حفاظتی باید بر چند محور اصلی تمرکز داشته باشند: نخست، شناسایی و اولویت‌بندی رویشگاه‌های باکیفیتی که در معرض خطر بیشتری قرار دارند و گسترش یا تقویت پوشش‌های حفاظتی قانونی در آن‌ها؛ دوم، اجرای اقدامات مدیریتی و برنامه‌های احیای رویشگاه با هدف افزایش پایداری و تاب‌آوری بوم‌شناختی و سوم، به‌کارگیری نتایج مدل‌های توزیع گونه در فرآیند برنامه‌ریزی کاربری اراضی در مقیاس منطقه‌ای، به‌منظور کاهش اثرات گسترش فعالیت‌های انسانی. اتخاذ چنین رویکرد یکپارچه‌ای می‌تواند در حفظ کارکردهای اکوسیستمی و پایداری بلندمدت این گونه در برابر فشارهای ناشی از تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی نقش مهمی ایفا کند (Gaisberger et al., 2020). با وجود کارایی چارچوب مدل‌سازی به‌کاررفته در این مطالعه، توجه به برخی محدودیت‌ها ضروری است. در این پژوهش تنها از متغیرهای زیست‌اقلیمی استفاده شد و بنابراین عواملی که در مقیاس‌های ریزتر بر پراکنش گونه‌ها اثر می‌گذارند، مانند ویژگی‌های خاک، تغییرات پوشش اراضی و تعاملات زیستی، در تحلیل‌ها لحاظ نشدند؛ در حالی که این عوامل می‌توانند نقش مهمی در تعیین الگوی توزیع گونه‌ها داشته باشند (Wisiz et al., 2013). همچنین، فرایندهای مربوط به پراکنش گونه به‌طور مستقیم در مدل‌ها در نظر گرفته نشدند، در حالی که این فرایندها در توانایی گونه‌ها برای دنبال کردن جابه‌جایی نواحی اقلیمی مناسب اهمیت زیادی دارند (Travis et al., 2013). از این رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از داده‌های محیطی با تفکیک مکانی بالاتر استفاده شده و رویکردهای مکانیکی یا مدل‌های ترکیبی همراه با اطلاعات مربوط به تحمل‌های فیزیولوژیک گونه‌ها در مدل‌سازی ادغام شوند تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش یابد. علاوه بر این، استفاده از برون‌یابی‌های اقلیمی جدیدتر یا داده‌های اقلیمی با وضوح مکانی بیشتر می‌تواند در کاهش عدم قطعیت نتایج مؤثر بوده و مبنای مطمئن‌تری برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری‌های حفاظتی فراهم کند (Araújo et al., 2019). در مجموع، رویکرد مدل‌سازی اجماعی به‌کاررفته در این پژوهش تصویری قابل اعتماد از وضعیت فعلی و آینده مطلوبیت اقلیمی برای گونه *T. orientale* فراهم می‌کند. به‌طور کلی این گونه نسبت به تغییرات الگوهای دما و رطوبت حساسیت بالایی دارد و همزمان بخش قابل توجهی از رویشگاه‌های بالارزش آن با نواحی دارای فشار انسانی همپوشانی دارند. این شرایط ضرورت اجرای اقدامات حفاظتی هدفمند و مبتنی بر مکان را برجسته می‌کند. در این راستا، برنامه‌ریزی کارآمد نیازمند آن است که اهداف حفاظت از تنوع زیستی با طرح‌های توسعه منطقه‌ای هماهنگ شود تا امکان حفاظت مؤثر از این گونه در برابر تغییرات سریع محیطی فراهم گردد.

منابع

- Araújo, M.B., Anderson, R.P., Barbosa, A.M., Beale, C.M., Dormann, C.F., Early, R., Garcia, R.A., Guisan, A., Maiorano, L., Naimi, B., O'Hara, R.B., Zimmermann, N.E., Rahbek, C. 2019. Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Science Advances*, 5(1), eaat4858. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat4858>
- Ardestani, E.G., Tarkesh, M., Bassiri, M., Vahabi, M.R. 2014. Potential habitat modeling for reintroduction of three native plant species in central Iran. *Arid Land*, 7: 381–390.
- Asase, A., Peterson, A.T. 2019. Predicted impacts of global climate change on the geographic distribution of an invaluable African medicinal plant resource, *Alstonia boonei* De Wild. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 14: 100206.
- Cahyaningsih, R., Phillips, J., Brehm, J.M., Gaisberger, H., Maxted, N. 2021. Climate change impact on medicinal plants in Indonesia. *Global Ecology and Conservation*, 30: e01752.
- Fick, S.E., Hijmans, R.J. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37: 4302–4315.
- Gaisberger, H., Legay, S., Andre, C., Loo, J., Azimov, R., Aaliev, S., Bobokalonov, F., Mukhsimov, N., Kettle, C., Vinceti, B. 2020. Diversity under threat: connecting genetic diversity and threat mapping to set conservation priorities for *Juglans regia* L. populations in Central Asia. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8: 171.
- Ghehsareh Ardestani, E., Heidari Ghahfarrokhi, Z. 2021. Ensemble species distribution modeling of *Salvia hydrangea* under future climate change scenarios in Central Zagros Mountains Iran. *Glob. Ecol. Conserv.*, 26: e01488.
- Guisan, A., Thuiller, W., Zimmermann, N. 2017. *Habitat suitability and distribution models: with applications in R*. Cambridge, United Kingdom, 462p.
- Hao, T., Elith, J., Lahoz-Monfort, J.J., Guillera-Aroita, G. 2019. A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD. *Diversity and Distributions*, 25(5): 839–852. <https://doi.org/10.1111/ddi.12892>

- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(15): 1965-1978.
- Karami, S., Ejtehadi, H., Moazzeni, H., Vaezi, J. Behroozian, M. 2022. Minimal climate change impacts on the geographic distribution of *Nepeta glomerulosa*, medicinal species endemic to southwestern and central Asia. *Scientific Reports*, 12: 19893.
- Kunwar, R.M., Thapa-Magar, K.B., Subedi, S.C., Kutal, D.H., Baral, B., Joshi, N.R., Adhikari, B., Upadhyaya, K.S., Thapa-Magar, S., Ansari, A.S., Thapa, G.J. and Bhandari, A. R., 2023. Distribution of important medicinal plant species in Nepal under past, present, and future climatic conditions. *Ecological Indicators*. 146: 1-12, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109879>
- Lee, C.O., Arge, C.N., Odstril, D., Millward, G., Pizzo, V., Quinn, J.M., Henney, C.J. 2013. Ensemble modeling of CME Propagation. *Solar Physics*, 285(1-2): 349 368.
- Lin, C.T., Chiu, C.A. 2018. The relic *Trochodendron aralioides* Siebold & Zucc. (Trochodendraceae) in Taiwan: Ensemble distribution modeling and climate change impacts. *Forests*, 9(10): 1–17. <https://doi.org/10.3390/f9100620>
- Mohapatra, J., Singh, C.P., Hamid, M., Verma, A., Semwal, S.C., Gajmer, B., Khuroo, A.A., Kumar, A., Nautiyal, M.C., Sharma, N., Pandya, H.A. 2019. Modelling *Betula utilis* distribution in response to climate-warming scenarios in Hindu-Kush Himalaya using random forest. *Biodiversity and Conservation*, 28 (8): 2295-2317.
- Moraitis, M.L., Valavanis, V.D., Karakassis, I. 2019. Modelling the effects of climate change on the distribution of benthic indicator species in the Eastern Mediterranean Sea. *Science of The Total Environment*, 667:16–24.
- Mu H. Li, X. Wen Y. Huang J. Du P. SuW. Miao S. Geng M. 2022. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Scientific Data*, 9(1): 1-26.
- Noroozi, J., Körner, C., Doostmohammadi, M., Akbarinia, M., Khoshnazar, H., Mosadegh, H. 2019. Endemic diversity and distribution of the Iranian vascular flora across phytogeographical regions, biodiversity hotspots and areas of endemism. *Scientific Reports*, 9: 12991. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49417-1>
- Noroozi, J., Moser, D., Essl, F. 2016. Diversity, distribution, ecology and description rates of alpine endemic plant species from Iranian mountains. *Alpine Botany*, 126: 1–9.
- Rew, J., Cho, Y., Hwang, J., Kim, S., Lee, W. 2020. Habitat suitability estimation using a two-stage ensemble approach. *Remote Sensing*, 12(9): 1475. <https://doi.org/10.3390/rs12091475>
- Robiansyah, I. 2018. Assessing the impact of climate change on the distribution of endemic subalpine and alpine plants of new Guinea. *S ongklanakar in. Journal of Science & Technology*, 40(3): 701–709.
- Salas, E.A.L., Valdez, R., Michel, S., Boykin, K.G. 2018. Habitat assessment of Marco Polo sheep (*Ovis ammon polii*) in Eastern Tajikistan: Modeling the effects of climate change. *Ecology and Evolution*, 8(10): 5124-5138.
- Tang, C.Q., Dong, Y.F., Herrando-Moraira, S., Matsui, T., Ohashi, H., He, L.Y., Nakao, K., Tanaka, N., Tomita, M., Li, X.S., Yan, H.Z. 2017. Potential effects of climate change on geographic distribution of the tertiary relict tree species *Davidia involucrata* in China. *Scientific Reports*, 7: 43822.
- Tarkesh, M., Jetschke, G. 2016. Investigation of current and future potential distribution of *Astragalus gossypinus* in Central Iran using species distribution modelling. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(1): 1-11.
- Thuiller, W. 2007. Biodiversity: Climate Change and the Ecologist. *Nature*, 448, 550-552.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R. Araújo, M. B. 2009. BIOMOD - a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography (Cop.)*, 32: 369–373.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araujo, M. B., Sykes, M. T., Prentice, I. C. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(23): 8245-8250. <https://doi.org/10.1073/pnas.0409902102>

- Travis, J.M.J., Delgado, M., Bocedi, G., Baguette, M., Barton, K., Bonte, D., Boulangeat, I., Hodgson, J.A., Kubisch, A., Penteriani, V., Saastamoinen, M., Stevens, V.M., Bullock, J.M. 2013. Dispersal and species' responses to climate change. *Oikos*, 122(11), 1532–1540. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2013.00399.x>
- Vincent, H., Amri, A., Castañeda Álvarez, N.P., Dempewolf, H., Dulloo, E., Guarino, L., Hole, D., Mba, C., Toledo, A., Maxted, N. 2019. Modeling of crop wild relative species identifies areas globally for in situ conservation. *Communications Biology*, 2 (1): 136.
- Wang, R., Li, Q., He, S., Liu, Y., Wang, M., Huang, J. 2018. Modeling and mapping the current and future distribution of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* under climate change in China. *PLOS ONE*, 13(1): e0192153. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192153>
- Wei, B., Wang, R., Hou, K., Wang, X., Wu, W. 2018. Predicting the current and future cultivation regions of *Carthamus tinctorius* L. using MaxEnt model under climate change in China. *Global Ecology and Conservation*, 16: e00477.
- Wisz, M.S., Pottier, J., Kissling, W.D., Pellissier, L., Lenoir, J., Damgaard, C.F., Dormann, C.F., Forchhammer, M.C., Grytnes, J.A., Guisan, A., Heikkinen, R.K., Høye, T.T., Kühn, I., Luoto, M., Maiorano, L., Nilsson, M.C., Normand, S., Öckinger, E., Schmidt, N. M., Svenning, J.C. 2013. The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: implications for species distribution modelling. *Biological Reviews*, 88(1), 15–30. <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2012.00235.x>
- Zhang, K., Yao, L., Meng, J., Tao, J. 2018. Maxent modeling for predicting the potential geographical distribution of two peony species under climate change. *Science of the Total Environment*, 634: 1326-1334.
- امیری، ح. ۱۳۸۷. شناسایی مواد تشکیل دهنده روغن اسانسی گیاه *Teucrium orientale* L. subsp. *talori* (Boiss.) Rech.f. فصلنامه گیاهان دارویی، ۷(۴): ۱-۴.
- حیدری، ر.، خداقلی، م.، زارعان، م. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی زیست اقلیم مریم نخودی شرقی (*Teucrium orientale*) در استان اصفهان با استفاده از روش‌های آماری چند متغیره و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS). دوماهانامه علمی-پژوهشی تحقیقات گیاهان دارویی و معطر ایران، ۳۱(۴): ۶۳۷-۶۵۰.
- خداحامی، ق.، رضایی، م. ۱۳۹۳. پهنه‌بندی گیاه دارویی *Teucrium polium* L. در رویشگاه‌های مختلف حوزه آبخیز مهارلو استان فارس. فصلنامه اکوفیتوشیمی گیاهان دارویی ۸(۴): ۲۷-۳۵.
- زهیری، م.، صالحی سلمی، م.ر.، نگارش، ک.، الماسیه، ک. ۱۴۰۴. مدلسازی مناطق مطلوب رویشگاهی گونه *Euphorbia hypericifolia* در استان خوزستان. مطالعات علوم محیط زیست، ۱۰(۲): ۱۰۱۴۷-۱۰۱۵۶. <https://doi.org/10.22034/jess.2025.470407.2283>
- فخمی، ا.، خداقلی، م. ۱۴۰۲. اثر تغییر اقلیم بر گستره رویشی گونه *Bromus tomentellus* Boiss در رویشگاه‌های مرتعی زاگرس مرکزی، استان چهارمحال و بختیاری. مطالعات علوم محیط زیست، ۸(۲): ۶۷۳۰-۶۷۴۰. <https://doi.org/10.22034/jess.2023.380017.1949>
- قلیچ نیا، ح. ۱۴۰۳. اثر تغییر اقلیم بر رویشگاه گونه *Artemisia Aucheri* Boiss. بر پایه مدل پیش‌بینی اقلیم در رویشگاه‌های مرتعی البرز، استان مازندران. مطالعات علوم محیط زیست، ۹(۴): ۹۷۲۸-۹۷۱۹. <https://doi.org/10.22034/jess.2024.434233.2206>
- قهساره اردستانی، ا.، یادگاری، ح.، اسدی، ا.، بهمنی، ب. ۱۴۰۴. تاثیر تغییر اقلیم بر رویشگاه‌های مطلوب زین گیاه (*Dracocephalum kotschy*) در ایران مرکزی. فصلنامه علوم محیطی نوین، ۲۳(۲): ۴۷۷-۴۹۰.
- مظفریان، و. (۱۳۹۶). فلور چهارمحال و بختیاری. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ۸۹۵ ص.
- معتمدی، ج.، خداقلی، م.، خلیفه زاده، ر. ۱۴۰۱. پیش‌بینی گستره کنونی و گستره بالقوه آینده گونه *Artemisia aucheri* تحت دو مدل هشدار اقلیمی Rcp4.5 و Rcp8.5 در رویشگاه‌های مرتعی البرز جنوبی، استان قزوین. مطالعات علوم محیط زیست، ۷(۴): ۵۰۱۵-۵۰۲۳. <https://doi.org/10.22034/jess.2022.331331.1732>