IJAE
Iranian Journal of Applied Ecology
بوم‌شناسی کاربردی/ سال چهاردهم / شماره اول / ۱٤۰٤/ صفحات ٤٤ تا ٦٤

تعیین پراکنش جغرافیایی و دامنه بردباری گونه *Festuca ovina* L. تحت تغییر اقلیم با مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt)

آزاده بذرمنش[۱]، مصطفی ترکش[۲*]، حسین بشری[۲] و محدثه امیری[۳]

(تاریخ دریافت: ۱٤۰۰/۱۰/۰۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۹/۰۱)

چکیده

پیش‌بینی پراکنش مکانی گیاهان نقش مهمی در تبیین پایداری اکوسیستم‌های مرتعی، طراحی برنامه‌های مدیریتی و اجرای اقدامات اصلاح و احیاء دارد. در این مطالعه، پراکنش جغرافیایی گونه علف بره (*Festuca ovina* L.) و تأثیر تغییر اقلیم بر آن در استان اصفهان با مدل حداکثر آنتروپی بررسی شد. ارتباط حضور گونه با متغیرهای توپوگرافی (ارتفاع، شیب، جهت) و زیست‌اقلیمی (بارندگی و درجه حرارت) تحلیل شدند. تأثیر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه نیز تحت سناریوهای خوش‌بینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) مدل گردش عمومی CCSM4 برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ ارزیابی شد. طبق نتایج، مدل با سطح زیر منحنی ۰/۹۸، کارایی بالایی در تعیین رویشگاه گونه داشت و به‌طور معنی‌داری قوی‌تر از مدل تصادفی عمل کرد. آزمون جک‌نایف نشان داد، بارندگی گرم‌ترین فصل و ارتفاع، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر حضور گونه می‌باشند. بر اساس منحنی‌های پاسخ، گونه در ارتفاع ۳۸۰۰-۲۲۰۰ متر، بارندگی ٦-٤ میلی‌متر در گرم‌ترین فصل، بارش سالانه ۳۰۰-۲۵۰ میلی‌متر و دمای سالانه ۸-٦ درجه سانتی‌گراد احتمال حضور بالاتری دارد. پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش اندک رویشگاه‌های نامطلوب و جابجایی گونه به سمت ارتفاعات بالاتر تحت سناریوی اقلیمی بدبینانه است. نتایج، مبنایی ارزشمندی برای شناسایی رویشگاه‌های مناسب جهت کشت گونه در چارچوب طرح‌های مدیریت مرتع فراهم می‌آورند.

واژه‌های کلیدی: آشیان بوم‌شناختی بالقوه، حضور گونه، سناریوهای تغییر اقلیم، متغیرهای زیست‌اقلیمی

۱. دانشجوی دکتری علوم مرتع، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۲. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران
۳. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: amiri.m@uma.ac.ir

مقدمه

تغییر اقلیم عبارت است از تغییر در الگوهای آب و هوایی یک منطقه نسبت به الگویی که در طول یک دوره زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده شده یا ثبت شده در آن منطقه انتظار می‌رود (۲۰). این پدیده که عمدتاً ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن در جو است، با تغییر در الگو-های بارش، سرعت باد، تابش خورشید و افزایش درجه حرارت در سال‌های اخیر همراه بوده و پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی گسترده‌ای دارد (۳۰). انجام پژوهش‌های مرتبط، به‌ویژه در مراتع، برای افزایش آمادگی در سازگاری و کاهش خسارت‌های ناشی از آن ضروری است. مراتع به‌عنوان اکوسیستم‌های طبیعی تجدیدشونده به تغییرات محیطی حساس هستند؛ به طوری که عوامل فیزیوگرافی، تغییرات دما و رژیم بارندگی یا تغییر در فراوانی و مقادیر حدهای نهایی وقایع اقلیمی می‌توانند ترکیب و تولید آن‌ها را کاهش دهند (۱۷). واکنش گیاهان به تغییر اقلیم شامل تغییر محدوده پراکنش جغرافیایی، سازش‌های فنولوژیکی و فیزیولوژیکی، کاهش اندازه جمعیت و حتی انقراض است. جابجایی یا تغییر محدوده پراکنش موجودات زنده، راهبردی جهت پایدار ماندن آن‌ها در برابر تغییر اقلیم محسوب می‌شود (۳۳) و ویژگی‌های اقلیمی و پتانسیل‌ها و محدودیت‌های اقلیمی در بلندمدت نقش تعیین‌کننده‌ای در پراکنش گونه‌ها دارند (۵).

با توجه به نگرانی‌های موجود در ارتباط با اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش، مدل‌های پراکنش گونه‌ای با ایجاد ارتباط بین بوم‌شناسی، جغرافیایی زیستی و حفاظت، ابزاری مؤثر برای ارزیابی تغییرات پراکنش در پاسخ به سناریوهای اقلیمی هستند (۲۳). هسته این مدل‌ها بررسی ارتباط حضور گونه با شرایط محیطی است (۷). این مدل‌ها با پیشرفت تکنیک‌های آماری جدید، استفاده از داده‌های سنجش از دوری، میانیابی داده‌های اقلیمی و مدل رقومی ارتفاعی، غنی شده و به‌عنوان یک الگوریتم آماری-تحلیلی در عرصه علم بوم‌شناسی گیاهی می‌توانند دامنه پراکنش جغرافیایی یک گونه گیاهی معین را تعیین کنند (٤). شناسایی رویشگاه بالقوه گونه‌ها از ارکان مدیریت و حفاظت از آن‌ها نیز به شمار می‌رود. حتی بدون آگاهی از ویژگی‌های فیزیولوژیک، می‌توان با مدل‌سازی، دامنه بردباری و محدوده پراکنش گونه‌ها را به‌منظور معرفی گونه‌ها برآورد نمود و از سیر قهقرایی مراتع جلوگیری کرد. بنابراین، شناسایی صحیح رویشگاه بالقوه یک گونه گیاهی و اجرای اقداماتی مانند بذرکاری، کپه-کاری و بذرپاشی می‌تواند موفقیت برنامه‌های مدیریتی را افزایش دهد (١٤).

مدل‌های پراکنش گونه‌ای به‌عنوان سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری، تغییرات احتمالی پراکنش را تحت شرایط فعلی و آینده پیش‌بینی می‌کنند (٤٥). این مدل‌ها با ارزیابی تغییر در میدان بوم‌شناختی گونه‌ها، عوامل اقلیمی کلیدی را شناسایی کرده و به ارزیابی خطر انقراض و پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم کمک می‌کنند (۳۷). طی سه دهه گذشته، روش‌های مختلفی مبتنی بر مفهوم آشیان بوم‌شناختی و داده‌های حضور گونه‌ها در قالب مدل‌های پروفیل، مزایایی مانند حذف اُریبی داده‌های عدم حضور و تحلیل طیف وسیعی از داده‌ها را فراهم می‌کنند (٣٦). در میان مدل‌های پروفیل، حداکثر آنتروپی (Maximum Entropy, MaxEnt) به لحاظ کارکرد از بهترین روش‌ها شناخته می‌شود (۱۷ و ۲۵). اساس کار این مدل، مقایسه ویژگی‌های بوم‌شناختی نقاط حضور گونه با ویژگی‌های بوم‌شناختی کل منطقه مورد مطالعه است. اصل حداکثر آنتروپی در مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای بر قوانین ترمودینامیک حاکم بر فرآیندهای بوم‌شناختی استوار است؛ بدین معنا که در غیاب عوامل محدود کننده و با توجه به محدودیت-های اعمال شده در مدل، پراکنش جغرافیایی گونه تمایل به حداکثر بی‌نظمی یا نزدیک‌ترین وضعیت به واقعیت دارد (۹).

مدل‌سازی پراکنش گونه‌های با ارزش مرتعی تا کنون در مطالعات متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، غفاری و همکاران (۲۰۱۸) در مراتع مغان-سبلان، متغیرهای ارتفاع، شیب، تغییرات اندازه ضریب لکه، میزان آهک و پتاسیم خاک را عوامل مؤثر بر پراکنش گونه علف بره (*Festuca ovina* L.) معرفی نمودند (۱۳). اسفنجانی و همکاران (۲۰۱۸) در مراتع

ییلاقی چهارباغ استان گلستان، زیستگاه ترکیبی جومیش-علف بره (*Bromus tomentellus-Festuca ovina*) را با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی تحت تأثیر نیتروژن، شن، سیلت، رس و آهک گزارش کردند. کارگر و همکاران (۲۱) مدل افزایشی تعمیم‌یافته (Generalized Additive Model, GAM) را دقیق‌ترین روش برای پیش‌بینی پراکنش معرفی کرده و ارتفاع، فسفر و نیتروژن خاک را عوامل مؤثر بر پراکنش گونه *F. ovina* دانستند. بذرمنش و همکاران (۲۰۲۵) نیز با استفاده از مدل‌های الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm for Rule Set Production, GARP) و قلمرو (Domain) در مراتع استان اصفهان، زیستگاه بالقوه این گونه را عمدتاً ارتفاعات فریدونشهر و سمیرم شناسایی کردند (٦).

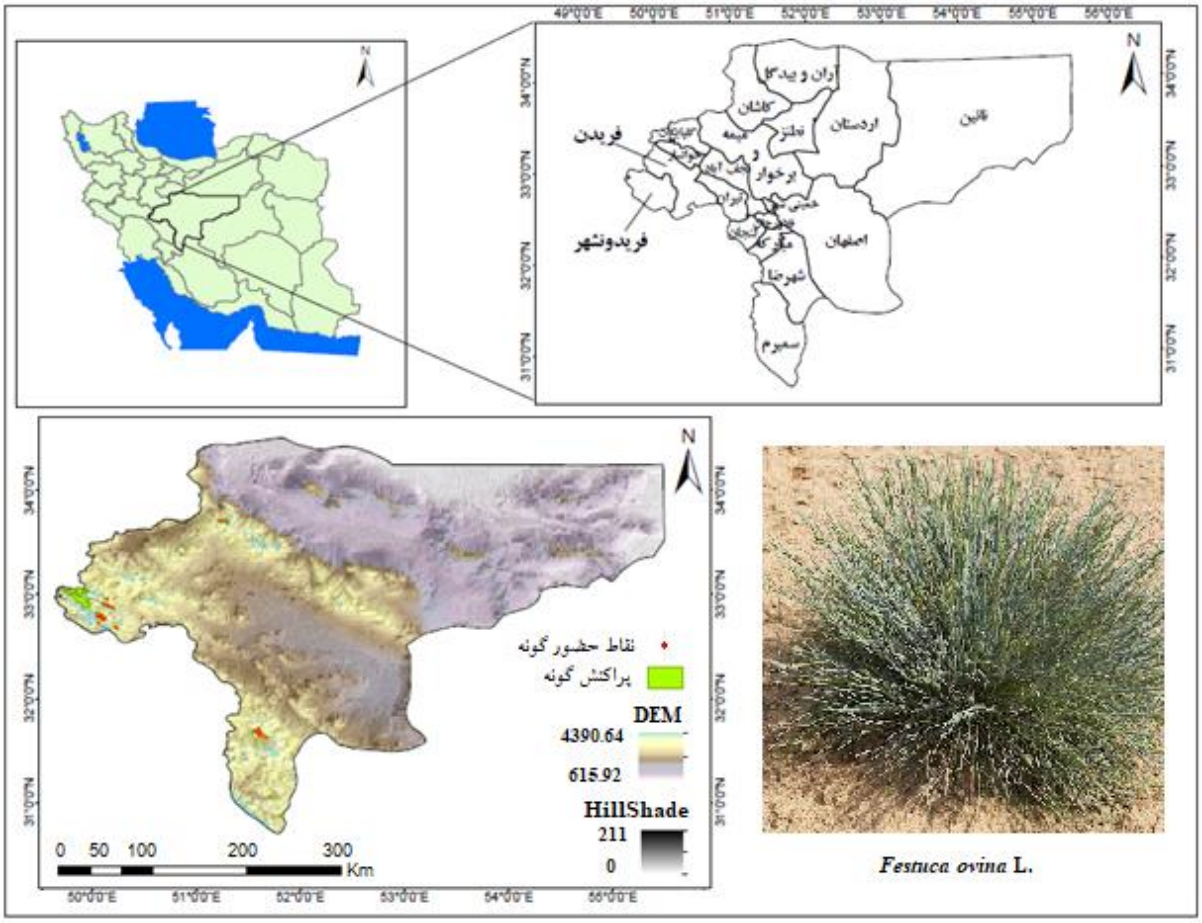
علف بره (*F. ovina*) یکی از گندمیان علوفه‌ای ارزشمند برای ایجاد چراگاه، تولید علوفه و حفاظت خاک است (١٦)، اما تاکنون در استان اصفهان مطالعه‌ای جامع در رابطه با واکنش آن به تغییرات اقلیمی انجام نشده است. از این‌رو، مطالعه حاضر با فرض تأثیر گرمایش جهانی بر پراکنش گونه‌ها، به مدل‌سازی پراکنش *F. ovina* در مراتع استان اصفهان و ارزیابی اثر تغییر اقلیم تحت دو سناریوی خوش‌بینانه (Representative Concentration Pathway 2.6, RCP2.6) و بدبینانه (Representative Concentration Pathway 8.5, RCP8.5) با استفاده از مدل حداکثر آنتروپی و داده‌های اقلیمی CCSM4 (Community Climate System Model version 4) می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

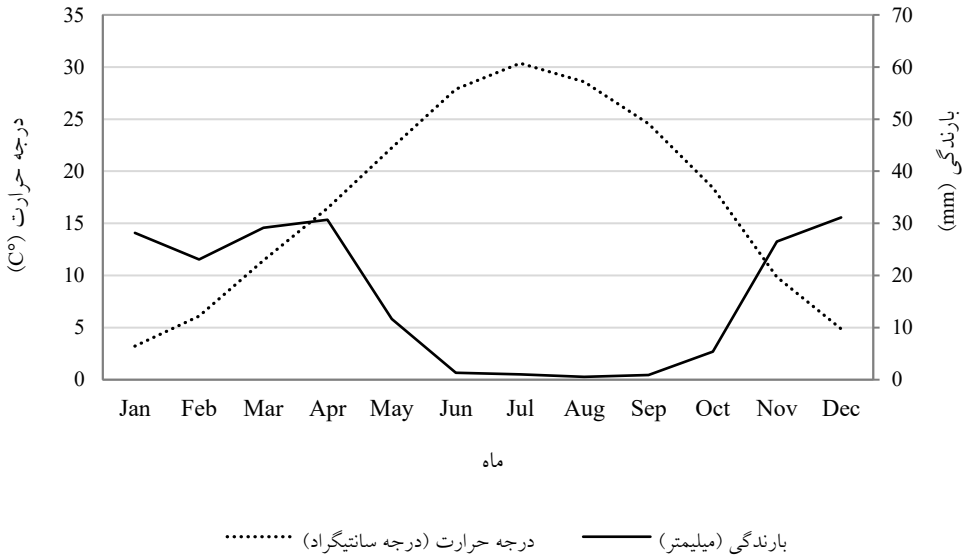
منطقه و گونه مورد مطالعه

این مطالعه در استان اصفهان با مساحت ۱۰۷۰۵۲ کیلومترمربع انجام شد. این استان با ارتفاع متوسط ١٦٠٥ متر از سطح دریا، بین عرض‌های جغرافیایی ´٤٢ °٣٠ تا ´٣٠ °٣٤ شمالی و طول‌های جغرافیایی ´٣٦ °٤٩ تا ´٥٤ °٥٥ شرقی در بخش مرکزی فلات ایران واقع شده است (شکل ١). دامنه تغییرات ارتفاعی از ٧٠٧ تا حدود ٤٠٠٠ متر و تأثیر آن بر عناصر اقلیمی، سبب تنوع قابل توجه اقالیم در سطح استان شده است. نظر به اینکه میزان بارندگی و دما در استان تابع وضعیت توپوگرافیک منطقه است، در نواحی کوهستانی غرب و جنوب، میانگین دمای سالانه حدود ٤ درجه سانتی‌گراد و در مناطق جلگه‌ای شرق استان تقریباً ٢٢ درجه سانتی‌گراد است. به‌طور کلی، میانگین دمای هوا در استان از شرق به غرب کاهش و میانگین بارندگی افزایش می‌یابد (١٠). میانگین بارش سالانه استان ١٥٠ میلی‌متر است که از حدود ١٣٠٠ میلی‌متر در ارتفاعات غربی تا ٦٠ میلی‌متر در نواحی پست شرق و شمال‌شرق متغیر است (٢٢). از میان مناطق استان، خور با میانگین دمای سالانه ٢١ درجه سانتی‌گراد گرم‌ترین و فریدونشهر با میانگین دمای سالانه ١٠ درجه سانتی‌گراد سردترین نقاط به‌شمار می‌روند. بررسی منحنی آمبروترمیک استان (شکل ٢) نشان می‌دهد که حدود هفت ماه از سال، از اواخر مارس تا نوامبر، خشکی و طی پنج ماه باقیمانده، شرایط نیمه مرطوب حاکم است.

گونه *Festuca ovina* L. گیاهی چندساله از خانواده گندمیان (Poaceae) است که معمولاً تا ارتفاع ٣٠ سانتی‌متر رشد می‌کند (٦). این گیاه دارای فرم پشته‌ای، ساقه ماشوره‌ای، ایستاده یا کمی زانودار، نسبتاً سخت و شکننده، صاف و بدون کرک است. گل-آذین آن از نوع پانیکول زبر و پهنک برگ خطی می‌باشد (٣٢). *F. ovina* از گونه‌های با ارزش مراتع نیمه‌استپی ایران با بارندگی بیش از ٣٠٠ میلی‌متر در سال است (١٦) که علاوه بر تأمین علوفه باکیفیت برای دام، به‌دلیل دارا بودن سیستم ریشه‌ای افشان، قدرت جوانه‌زنی خوب و سطح یقه حدود ١٧٦-٢٨ سانتی‌مترمربع، نقش مهمی در تثبیت خاک و کاهش رواناب سطحی ایفا می‌کند (١٦ و ٤٠). این گونه به‌دلیل خوشخوراکی نسبی، تولید بالای علوفه و سازگاری بوم‌شناختی، به‌طور گسترده برای بذرپاشی و بذرکاری در مناطق استپی و نیمه‌استپی کشور در چارچوب پروژه‌های مرتعکاری توصیه می‌شود (١٨ و ٣٩).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه شامل استان اصفهان، نقاط ثبت حضور گونه، تغییرات ارتفاعی و تصویری از گونه



شکل ۲. منحنی آمبروترمیک استان اصفهان

نمونه‌برداری

به‌منظور تعیین مکان‌های حضور گونه، از نقشه پوشش گیاهی تهیه شده توسط فیضی و همکاران (۱۲) به همراه بازدیدهای میدانی استفاده شد. برای یکنواختی در فرآیند نمونه‌برداری، روش تصادفی–طبقه‌بندی شده به کار رفت، بدین ترتیب که پس از شناسایی جمعیت‌های *F. ovina* در محدوده مطالعه، این جمعیت‌ها بر اساس خصوصیات فیزیوگرافی شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب و جهت جغرافیایی به زیرجمعیت‌هایی تقسیم شدند. سپس، در هر طبقه، مکان‌های نمونه‌برداری به‌صورت تصادفی انتخاب و مختصات آن‌ها با استفاده از سیستم موقعیت–یاب جهانی (Global Positioning System, GPS) ثبت گردید. مطابق با نظریه میلر (۲٦) به‌منظور تجزیه و تحلیل قوی، معیار نسبت ۱۰ به ۱ بین تعداد نقاط حضور گونه و تعداد متغیرهای مستقل رعایت شد. مکان‌های حضور گونه تنها در صورتی ثبت شدند که گونه مورد مطالعه حداقل یک لکه رویشی به مساحت یک کیلومترمربع را پوشانده باشد. در مجموع، طی پیمایش‌های میدانی، ۷۰ نقطه حضور ثبت شد که ۸۰ درصد آن‌ها (٥٦ نقطه) به‌منظور واسنجی و ۲۰ درصد باقیمانده (١٤ نقطه) برای ارزیابی عملکرد مدل مدل حداکثر آنتروپی مورد استفاده قرار گرفتند.

انتخاب متغیرهای محیطی

در این مطالعه، سه بازه زمانی شامل دوره پایه (حال حاضر) و دو دوره آینده (سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰) مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل‌سازی پراکنش *F. ovina*، علاوه بر متغیرهای توپوگرافی شامل ارتفاع از سطح دریا، درصد شیب و جهت جغرافیایی که از مدل رقومی ارتفاعی (SRTM, Shuttle Radar Topography Mission) با دقت مکانی ۹۰ متر (http://srtm.csi.cgiar.org) مشتق شده‌اند، از ۱۹ متغیر زیست–اقلیمی مستخرج از پایگاه اقلیم جهانی (www.worldclim.org) نیز استفاده گردید. این متغیرها با دقت مکانی ۳۰ ثانیه قوسی (تقریباً معادل یک کیلومتر) و بر اساس داده‌های بارش و درجه حرارت ماهانه طی دوره ۲۰۰۰–۱۹۵۰ میلادی محاسبه شده و به لحاظ بوم‌شناسی برای گونه هدف در منطقه مورد مطالعه حائز اهمیت هستند.

تمامی لایه‌های محیطی از نظر محدوده جغرافیایی، سیستم مختصات و ابعاد پیکسل در محیط ArcGIS 10.3 یکسان‌سازی و سپس به‌صورت نقشه‌های رقومی وارد فرآیند مدل‌سازی شدند. به‌منظور کاهش اثر هم‌خطی بین متغیرها، از تجزیه مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis, PCA) و آزمون همبستگی پیرسون استفاده شد. در مواردی که ضریب همبستگی بین دو متغیر محیطی بیش از ۰/۸ بود (۰/۸+ < r < ۰/۸-)، تنها یکی از آن‌ها که از منظر بوم‌شناختی ارتباط منطقی‌تر و قابل‌توجیه‌تری با پراکنش گونه داشت، در فرآیند مدلسازی لحاظ گردیدند (٤٤). پس از حذف متغیرهای غیرضروری و دارای همبستگی بالا، در نهایت ۹ متغیر به‌عنوان ورودی مدل انتخاب شدند.

مدل‌سازی

مدل حداکثر آنتروپی

مدل حداکثر آنتروپی با بهره‌گیری از متغیرهای پیوسته و گسسته، بهینه‌ترین تابع توزیع بین نقاط حضور گونه و متغیرهای محیطی را بر اساس اصل بیشینه‌سازی آنتروپی شانون تعیین نموده و سپس تابع مذکور را به‌صورت نقشه‌های پیوسته به سراسر منطقه مورد مطالعه تعمیم می‌دهد (۳٦). ایده کلی حاکم بر حداکثر آنتروپی این فرض است که در شرایط عدم قطعیت، توزیعی به واقعیت نزدیک‌تر است که بیشترین آشفتگی یا پخش‌شدگی را داشته باشد (۹). در عمل، این مدل یک روش یادگیری ماشین مبتنی بر بیشینه بی‌نظمی است که احتمال حضور گونه را با اتکا به محدودیت‌های استخراج شده از داده‌های موجود، در مکان‌های فاقد داده حضور بررسی می‌کند (۳٦). در این مطالعه، مدل‌سازی با نرم‌افزار MaxEnt v.3.3.3 (http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/) و با ۱۰ تکرار برای ارزیابی متقابل و ۵۰۰۰ اجرای مدل انجام شد. به‌جای استفاده از داده‌های عدم حضور، تعداد ۱۰۰۰۰ نقطه زمینه بر

اساس محدوده متغیرهای محیطی و توزیع احتمال حاصل از نقشه تراکم کرنل (Kernel density) انتخاب گردید. خروجی نهایی مدل به‌صورت نقشه‌ای پیوسته با مقادیر بین صفر تا یک ارائه شد که این مقادیر نشان‌دهنده احتمال حضور گونه یا میزان شایستگی رویشگاه هستند. برای طبقه‌بندی این نقشه‌ها به چهار طبقه کیفی شامل نامطلوب، نسبتاً مطلوب، مطلوب و بسیار مطلوب، از روش آستانه‌گذاری بر پایه برابرسازی حساسیت و ویژه‌انگاری (۳) استفاده شد. همچنین، به‌منظور ارزیابی اهمیت نسبی متغیرها در توسعه مدل، آزمون جک‌نایف به تعداد تکرارهای مدل اجرا و نتایج آن در سه حالت شامل: استفاده از تنها یک متغیر؛ استفاده از تمام متغیرها به جز آن متغیر مشخص، و استفاده همزمان از تمام متغیرها ارائه گردید.

ارزیابی مدل و بررسی عدم قطعیت مدل‌سازی

در این نرم‌افزار با استفاده از اعتبارسنجی متقابل (Cross-Validation) در ده تکرار و تحلیل منحنی مشخصه عامل دریافت کننده (Receiver Operating Characteristics, ROC) همراه با شاخص سطح زیر منحنی (Area Under Curve, AUC) که مستقل از آستانه است، به ارزیابی عملکرد مدل پرداخته شد. افزون بر این، شاخص‌های حساسیت و ویژه‌انگاری نیز بر اساس داده‌های ماتریس خطا محاسبه گردیدند. دامنه مقادیر AUC بین صفر تا یک است؛ مقدار ۰/۵ بیانگر عملکرد تصادفی، مقادیر ۰/۷–۰/٦ نشان‌دهنده توان پیش‌بینی ضعیف، ۰/۸–۰/۷ پیش‌بینی مناسب، ۰/۹–۰/۸ پیش‌بینی خوب و مقادیر بیش از ۰/۹ بیانگر توانایی بسیار بالای مدل در پیش‌بینی هستند (٤۱).

با توجه به ماهیّت تصادفی فرآیندهای بوم‌شناختی، محدودیت‌های ذاتی مدل‌ها و احتمال بروز اُریبی در نمونه‌برداری، وجود سطحی از عدم قطعیت در مدل‌سازی اجتناب‌ناپذیر است (۱۹). به‌منظور کمّی‌سازی این عدم قطعیت، از آماره انحراف معیار در سطح پیکسل به‌عنوان شاخصی برای سنجش ناسازگاری مدل استفاده شد. این شاخص با محاسبه پراکندگی پیش‌بینی‌های مدل در طول تکرارهای متعدد، ناسازگاری یا تفاوت نتایج مدل را به‌صورت کمّی بیان می‌کند. به‌عبارت دیگر، انحراف معیار بالا در یک پیکسل خاص نشانه این است که مدل در پیش‌بینی آن منطقه با قطعیت کمتری عمل کرده و نتایج آن در طول اجرای مجدد مدل، تغییرات زیادی را تجربه می‌کنند. در مقابل، انحراف معیار پایین نشان‌دهنده پیش‌بینی قابل اطمینان‌تری است.

منحنی پاسخ گونه به متغیرهای محیطی

به‌منظور تعیین آشیان بالقوه و بالفعل گونه، منحنی‌های پاسخ آن در برابر تغییرات عوامل محیطی ترسیم گردید. بر اساس دیدگاه کلاسیک بوم‌شناسی گیاهی، انتظار می‌رود منحنی پاسخ گونه در امتداد گرادیان‌های محیطی، شکلی متقارن و تک‌نمایی داشته باشد. با این حال، این الگو همواره در طبیعت مشاهده نمی‌شود و در برخی موارد، منحنی‌هایی با شکل‌های متفاوت نظیر دونمایی یا چوله‌دار نیز ممکن است وجود داشته باشند (۱). منحنی‌های پاسخ حاصل از مدل‌سازی در این مطالعه از نوع فیزیولوژیک بوده و عکس‌العمل گونه را نسبت به متغیرهای محیطی و بدون در نظر گرفتن اثر گونه‌های همراه، نمایش می‌دهند. در این نمودارها، محور افقی بیانگر مقادیر متغیر محیطی و محور عمودی نشان‌دهنده احتمال حضور گونه در شرایط محیطی متناظر می‌باشد (۳۵).

بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه

جهت ارزیابی اثر تغییرات اقلیمی بر پراکنش گونه، از سناریوهای نمایه مسیر غلظت (RCP) شامل سناریوی انتشار خوش‌بینانه RCP2.6 و سناریوی انتشار بدبینانه RCP8.5 استفاده شد. داده‌های اقلیمی آینده بر اساس خروجی مدل گردش عمومی جو CCSM4 برای دو دوره زمانی میانی قرن (۲۰۵۰) و اواخر قرن (۲۰۷۰) استخراج گردید. به‌منظور طبقه‌بندی نقشه‌های شایستگی رویشگاه گونه به دو طبقه مطلوب و نامطلوب، از آستانه بهینه تعیین‌شده بر اساس معیار ROC بهره گرفته شد (٤). انتخاب سناریوهای مذکور به‌دلیل پوشش دو حداقل و حداکثر

جدول ۱. آنالیز مشارکت و اهمیت جایگشتی متغیرهای زیست‌محیطی منتخب در مدل‌سازی رویشگاه گونه *F. ovina*

متغیر محیطی	واحد اندازه‌گیری	درصد مشارکت	اهمیت جایگشتی
بارش گرم‌ترین فصل (Bio18)	میلی‌متر	۷۵/٤	۱۵/٦
ارتفاع	متر	۷/٤	۰
دامنه میانگین دمای روزانه (Bio2)	درجه سانتی‌گراد	۷	۱۰/٦
همدمایی (Bio3)	–	۳	۳/۷
بارش سالانه (Bio12)	میلی‌متر	۲/۷	۱/٦
دمای متوسط سالانه (Bio1)	درجه سانتی‌گراد	۲	۳۷/۵
شیب	درجه	۱/٦	۳/۷
محدوده سالانه دما (Bio7)	درجه سانتی‌گراد	۰/۸	۵/۳
میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل (Bio8)	درجه سانتی‌گراد	۰/۲	۲۲/۱

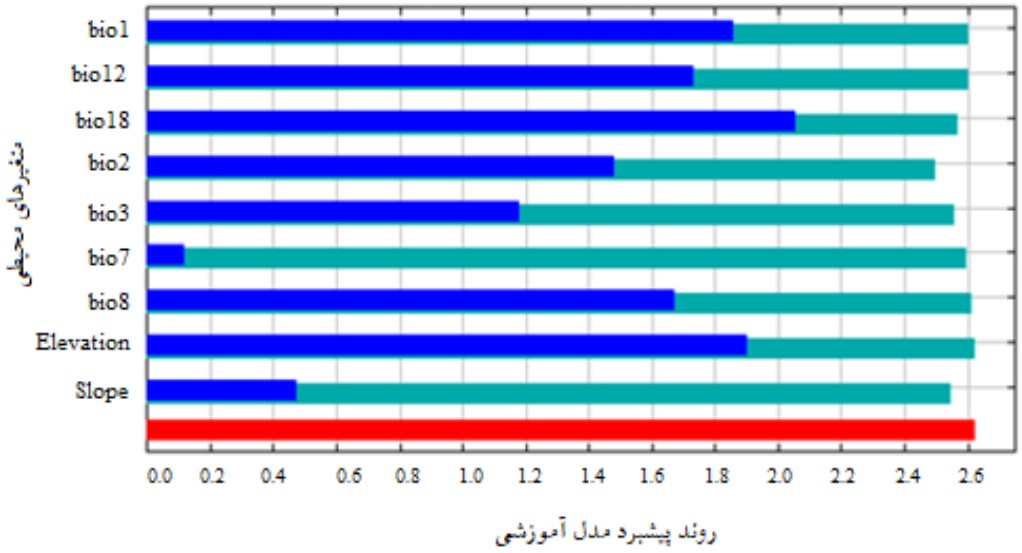
دامنه تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده در آینده صورت گرفت. مطابق حد پایین یعنی سناریوی انتشار خوش‌بینانه RCP2.6، تا سال ۲۱۰۰ جمعیت جهان حدود ۹ میلیارد نفر، غلظت دی‌اکسیدکربن حدود ۴۹۰ ppm و واداشت تابشی تا ۲/٦ وات بر مترمربع برآورد می‌شود. در مقابل، ادامه روند فعلی بدون اتخاذ سیاست‌های کاهشی منجر به تحقق سناریوی بدبینانه RCP8.5 با جمعیت حدود ۱۲ میلیارد نفر، غلظت دی‌اکسیدکربن ۱۹٦۰ ppm تخمین زده شده است. ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ خواهد شد (۲۰ و ٤۳). پس از شبیه‌سازی پراکنش گونه تحت این دو سناریو، اختلاف بین نقشه‌های پراکنش حال حاضر و آینده محاسبه و برای برآورد تغییرات سطح رویشگاه گونه مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج

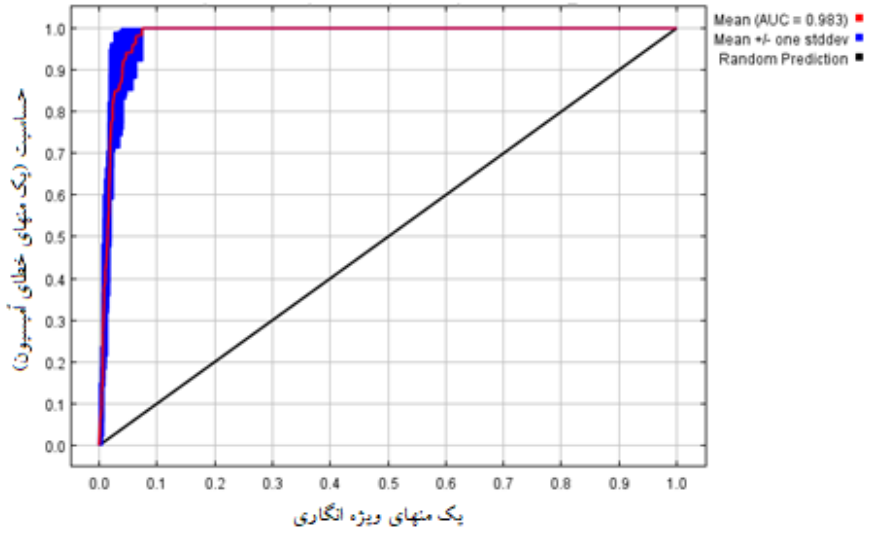
نتایج تحلیل درصد مشارکت و و آزمون جک‌نایف، به‌منظور ارزیابی نقش متغیرهای محیطی در پیش‌بینی پراکنش گونه، به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۳ ارائه شده‌اند. از میان متغیرهای اقلیمی مورد بررسی، بارش گرم‌ترین فصل (Bio18) سهم مشارکتی معادل ۷۵/٤ درصد در شکل‌گیری مدل داشته است. این نتیجه نشان‌دهنده نقش کلیدی این متغیر در تعیین مطلوبیت رویشگاه *F. ovina* است. پس از Bio18، متغیرهای ارتفاع، دامنه میانگین دمای روزانه (Bio2)، همدمایی (Bio3)، بارش سالانه (Bio12) و دمای متوسط سالانه (Bio1) به ترتیب بیشترین سهم را در پیش‌بینی پراکنش گونه داشته‌اند. بر اساس آزمون جک‌نایف نیز متغیری اهمیت بیشتری دارد که بیشترین افزایش را در معیار دقت مدل ایجاد کند.

شاخص AUC به‌دست آمده (بیش از ۰/۹۸) نشان از عملکرد عالی و دقت بالای مدل در پیش‌بینی پراکنش گونه *F. ovina* در منطقه دارد (شکل ٤). به‌عبارتی، این مدل به‌طور معناداری و با اطمینان آماری بالا توانسته است نقاط حضور گونه را در داده‌های آزمون با دقتی به مراتب بیشتر از مدل تصادفی پیش‌بینی نماید.

برای درک بهتر پراکنش مکانی گونه، نقشه‌های مطلوبیت رویشگاه با مقادیر احتمال حضور در بازه ۱–۰ در شکل ۵ ارائه شده‌اند. بر اساس نتایج این نقشه‌ها، رویشگاه بالقوه *F. ovina* در شرایط اقلیم کنونی، عمدتاً در مناطق فریدن، فریدونشهر، سمیرم و همچنین ارتفاعات کاشان و نطنز متمرکز هستند. این الگو نشان‌دهنده ترجیح گونه برای مناطق کوهستانی و نیمه‌مرطوب با شرایط اقلیمی خاص می‌باشد. بررسی میزان و درصد هر طبقه از احتمال حضور گونه یا طبقات شایستگی رویشگاه آن (جدول ۲) نشان می‌دهد که بیشترین مساحت استان اصفهان در طبقه احتمال



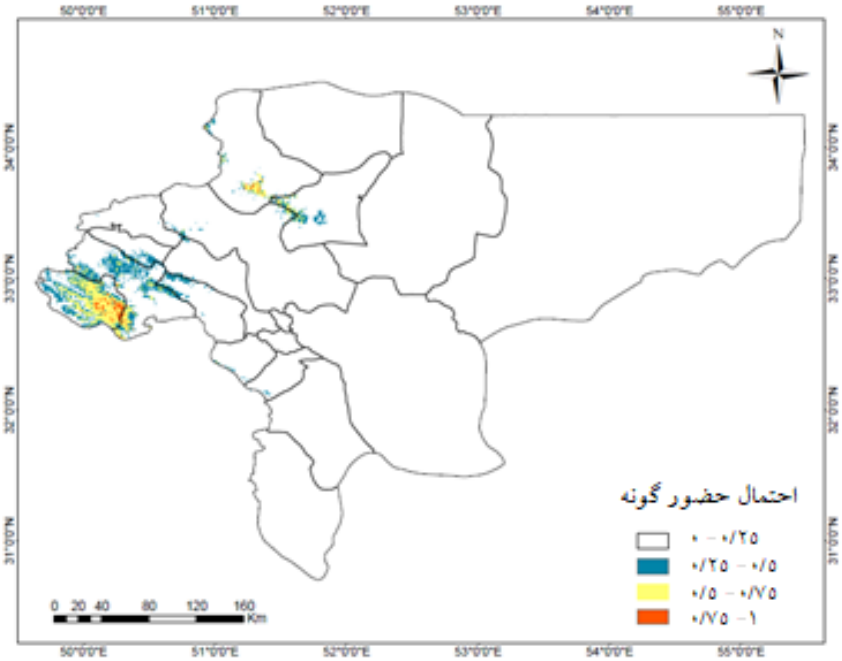
شکل ۳. نمودار آزمون جک‌نایف جهت برآورد نسبی اثرات متغیرهای محیطی در پیش‌بینی پراکنش گونه *F. ovina* (مقادیر بیانگر میانگین ده مرتبه اجرای مدل هستند). بدون متغیر (آبی روشن)، سهم مستقل متغیر در مدل (آبی پررنگ)، با همه متغیرها (قرمز).



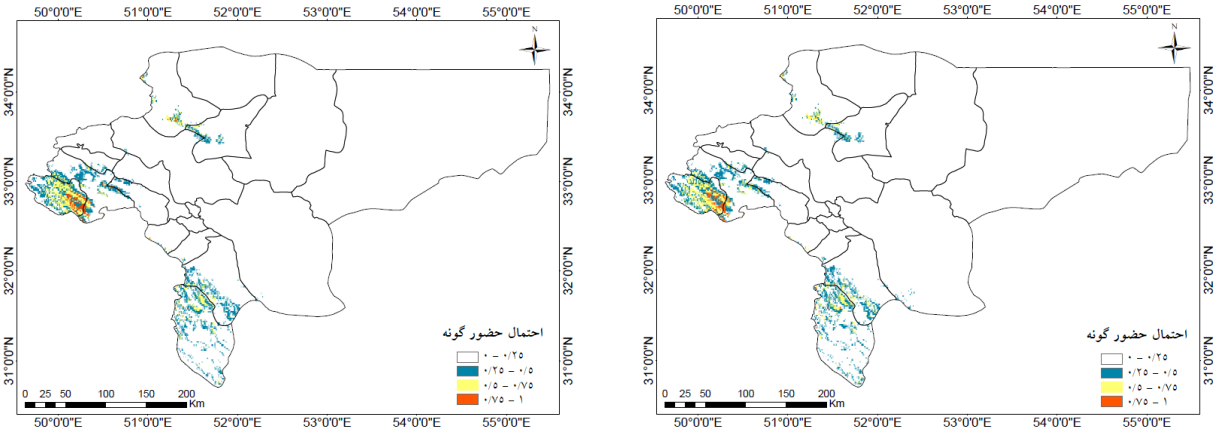
شکل ٤. منحنی ROC و مقدار مساحت زیر منحنی (AUC) استخراج شده از مدل

جدول ۲. مساحت تناسب طبقات رویشگاه حال حاضر گونه *F. ovina*

مساحت (٪)		مساحت (Km^2)		
فریدونشهر و سمیرم	استان اصفهان	فریدونشهر و سمیرم	استان اصفهان	طبقات (احتمال حضور)
٥٤/٤	۹٥	٤۳۲۷	۱۰۱۷٥۷	۰ – /۲٥
۲٦/۷	۳	۱۹۷۷	۳٦۱٤	۰/۲٥ – ۰/٥
۱۳/۳	۱	۹۸۸	۱٥۲۷	۰/٥ – ۰/۷٥
۱/٥	۰/۱	۱۱۲	۱٥٥	۰/۷٥ – ۱
		۷٤۰٥	۱۰۷۰٥۳	کل



شکل ۵. نقشه پتانسیل رویشگاه گونه *F. ovina* در شرایط حال حاضر



(ب) (الف)

شکل ٦. نقشه پتانسیل رویشگاه گونه *F. ovina* تحت سناریوی RCP2.6 و (ب) سناریوی RCP8.5 در سال ۲۰۵۰

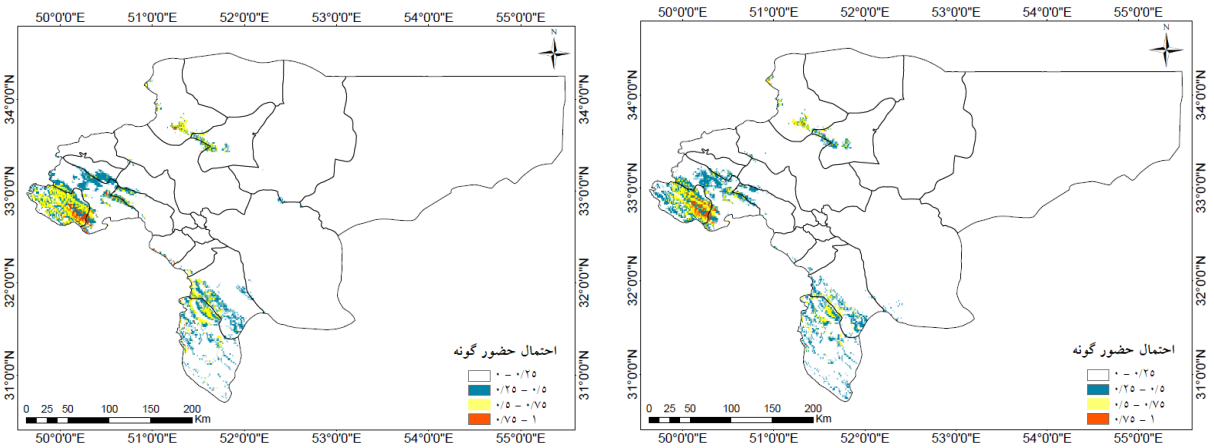
حضور بسیار پایین (۰/۲۵–۰) قرار داد. این الگو بیانگر پراکنش محدود و تراکم اندک *F. ovina* در بخش عمده استان است.

پس از اعمال سناریوهای تغییر اقلیم و شبیه‌سازی با استفاده از مدل گردش عمومی CCSM4، تغییرات پیش‌بینی شده برای گستره جغرافیایی رویشگاه گونه در افق زمانی ۲۰۵۰ در شکل ٦ ارائه شده است. این نتایج مبنایی برای تحلیل پویایی پراکنش گونه تحت سناریوهای اقلیمی آینده فراهم می‌آورد.

بر اساس داده‌های جدول ۳، در سناریوی انتشار خوش‌بینانه (RCP2.6)، مساحت رویشگاه بالقوه *F. ovina* در سال ۲۰۵۰، در بالاترین طبقه احتمال حضور (۱ – ۰/۷۵) به میزان ٧٦ کیلومترمربع در سطح استان و ٥٦ کیلومترمربع در محدوده شهرستان‌های سمیرم و فریدونشهر افزایش خواهد یافت. در مقابل، تحت سناریوی انتشار بدبینانه، وسعت رویشگاه بالقوه در

جدول ۳. مساحت تناسب طبقات رویشگاه گونه در سال ۲۰۵۰

طبقات (احتمال حضور)	RCP2.6				RCP8.5			
	مساحت (Km^2)		مساحت (٪)		مساحت (Km^2)		مساحت (٪)	
	سطح استان	فریدونشهر و سمیرم	سطح استان	فریدونشهر و سمیرم	سطح استان	فریدونشهر و سمیرم	سطح استان	فریدونشهر و سمیرم
۰ – ۰/۲۵	۱۰۲۶۰۷	٤۹۹۱	۹۵/۸	٦۷/٤	۱۰۲۵۳۹	٤۹۲۸	۹۵/۷	٦٦/۵
۰/۲۵ – ۰/۵	۲۷٦٦	۱۳۱۷	۲/۵	۱۷/۷	۲۹۰٦	۱۳۹۵	۲/۷	۱۸/۸
۰/۵ – ۰/۷۵	۱٤٤۵	۹۲٦	۱/۳	۱۲/۵	۱۳۳۱	۸۹٦	۱/۲	۱۲/۱
۰/۷۵ – ۱	۲۳۱	۱٦۸	۰/۲	۲/۲	۲۷٤	۱۸۵	۰/۲	۲/۵
مجموع	۱۰۷۰٤۹	۷٤۰٤			۱۰۷۰۵۲	۷٤۰٤		



(الف) (ب)

شکل ۷. نقشه پتانسیل رویشگاه گونه *F. ovina* تحت سناریوهای (الف) RCP2.6 و (ب) RCP8.5 در سال ۲۰۷۰

همین طبقه احتمال حضور به ۱۱۹ کیلومترمربع در سطح استان و ۷۳ کیلومترمربع در سطح شهرستان‌های مذکور خواهد رسید. این یافته‌ها بیانگر آن است که در هر دو سناریو، مناطق مرتفع و سردسیر استان، به‌ویژه در غرب و جنوب‌غرب، ظرفیت بالایی برای حفظ و گسترش جمعیت گونه در آینده خواهد داشت.

شکل ۷، الگوی پراکنش مکانی پیش‌بینی شده گونه در افق زمانی ۲۰۷۰ را بر اساس متغیرهای زیست‌اقلیمی و خروجی مدل گردش عمومی CCSM4 به تصویر می‌کشد و چارچوبی برای مقایسه تغییرات زمانی و مکانی رویشگاه در دو دوره آینده فراهم می‌سازد.

مطابق داده‌های جدول ٤، در افق زمانی ۲۰۷۰ و تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP2.6)، مساحت رویشگاه بالقوه *F. ovina* در بالاترین طبقه احتمال حضور (۱–۰/۷۵) نسبت به شرایط فعلی، به میزان ۷٦ کیلومترمربع در سطح استان و ٦۳ کیلومترمربع در محدوده شهرستان‌های سمیرم و فریدونشهر افزایش می‌یابد. تحت سناریوی بدبینانه (RCP8.5)، این افزایش به ترتیب معادل ۱۰٤ کیلومترمربع در سطح استان و ٤۷ کیلومترمربع در محدوده شهرستان‌های مذکور خواهد بود. این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده در آینده، پتانسیل ایجاد زیستگاه‌های مساعدتر برای گونه را در استان

جدول ٤. مساحت تناسب طبقات رویشگاه گونه در سال ۲۰۷۰

طبقات (احتمال حضور)	RCP2.6 مساحت (Km^2) سطح استان	RCP2.6 مساحت (Km^2) فریدونشهر و سمیرم	RCP2.6 مساحت (٪) سطح استان	RCP2.6 مساحت (٪) فریدونشهر و سمیرم	RCP8.5 مساحت (Km^2) سطح استان	RCP8.5 مساحت (Km^2) فریدونشهر و سمیرم	RCP8.5 مساحت (٪) سطح استان	RCP8.5 مساحت (٪) فریدونشهر و سمیرم
۰ – /۲۵	۱۰۲٤٤۲	۵۰۵۹	۹۵/٦	٦۸/۳	۱۰۱۸۲۱	٤۸٤۲	۹۵/۱	٦۵/۳
۰/۲۵ – ۰/۵	۳۰۰۵	۱۳۲۲	۲/۸	۱۷/۸	۳۰۲۰	۱۱۹۱	۲/۸	۱٦
۰/۵ – ۰/۷۵	۱۳۷۳	۸٤۷	۱/۲	۱۱/٤	۱۹۵۱	۱۲۱۰	۱/۸	۱٦/۳
۰/۷۵ – ۱	۲۳۱	۱۷۵	۰/۲	۲/۳	۲۵۹	۱۵۹	۰/۲	۲/۱
مجموع	۱۰۷۰۵۲	۷٤۰۵			۱۰۷۰۵۲	۷٤۰٤		

جدول ۵. مساحت مناطق مطلوب و نامطلوب رشد گونه در سطح استان

تناسب رویشگاه	مساحت	سال جاری	سال ۲۰۵۰ RCP2.6	سال ۲۰۵۰ RCP8.5	سال ۲۰۷۰ RCP2.6	سال ۲۰۷۰ RCP8.5
مطلوب	کیلومترمربع	۱۵۵/۲	۲۵۹/۱	۲۷٤/٦	۲۳۱/۲	۲۳۱/٤
	درصد	۰/۱	۰/۲٤	۰/۲	۰/۲	۰/۲
نامطلوب	کیلومترمربع	۱۰۱۷۵۷/۲	۱۰۱۸۲۱/۳	۱۰۲۵۳۹	۱۰۲٤٤۲	۱۰۲٦۰۷/۲
	درصد	۹۵	٦۵/۳	۹۵/۷	۹۵/٦	۹۵/۸

اصفهان دارد. چنین روندی می‌تواند با فراهم‌سازی شرایط زیست‌اقلیمی مطلوب، پراکنش جغرافیایی گونه را در دهه‌های آتی تسهیل کند.

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۵، مقایسه سه بازه زمانی مدل‌سازی حاکی از روند افزایشی تناسب رویشگاه *F. ovina* در سطح استان بوده است. با این حال، در سناریوی انتشار بدبینانه (RCP8.5)، مساحت رویشگاه‌های نامطلوب در سال ۲۰۷۰ نسبت به سال ۲۰۵۰ اندکی افزایش یافته است. این تغییر می‌تواند ناشی از افزایش دمای متوسط سالانه در افق زمانی ۲۰۷۰ باشد که منجر به کاهش کیفیت زیستگاه در برخی مناطق می‌شود. مقادیر دقیق این تغییرات در جداول ۵ و ٦ ارائه شده است.

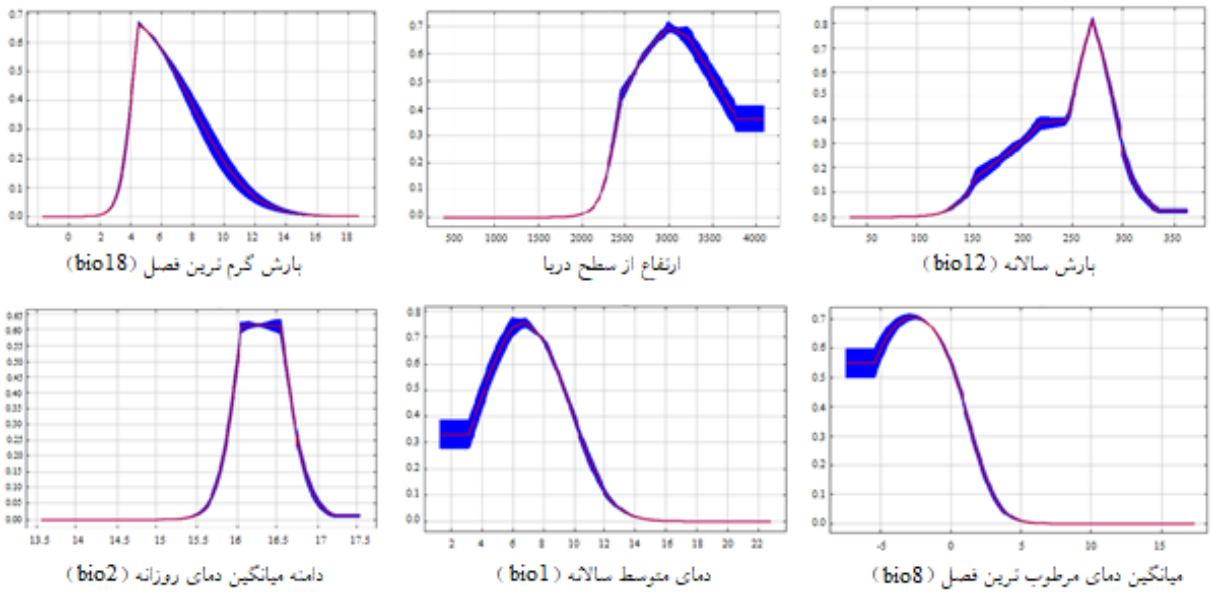
در جدول ٦ مشاهده می‌شود که گونه *F. ovina* در افق زمانی ۲۰۷۰، تحت شرایط افزایش دما، تمایل بیشتری به زیستگاه‌هایی با دمای متوسط سالانه پایین‌تر، بارش سالانه بیشتر و واقع در ارتفاعات بیشتر نشان می‌دهد. این الگوی ترجیح زیستگاهی با یافته‌های ترسیمی در شکل ۹ مطابقت کامل دارد و بیانگر سازگاری گونه با شرایط خنک‌تر و مرطوب‌تر در مناطق مرتفع به‌عنوان راهبردی برای مقابله با تنش‌های ناشی از گرمایش اقلیمی است.

با توجه به درصد مشارکت و اهمیت جایگشتی متغیرهای ورودی مدل، منحنی‌های پاسخ گونه نسبت به عوامل محیطی مؤثر بر پراکنش گونه ترسیم گردید (شکل ۸). نتایج نشان می‌دهد که احتمال حضور *F. ovina* زمانی‌که میانگین بارش گرم‌ترین فصل

جدول ٦. روند تغییرات مهم‌ترین متغیرهای محیطی در پراکنش گونه در سه دوره حال حاضر، سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰

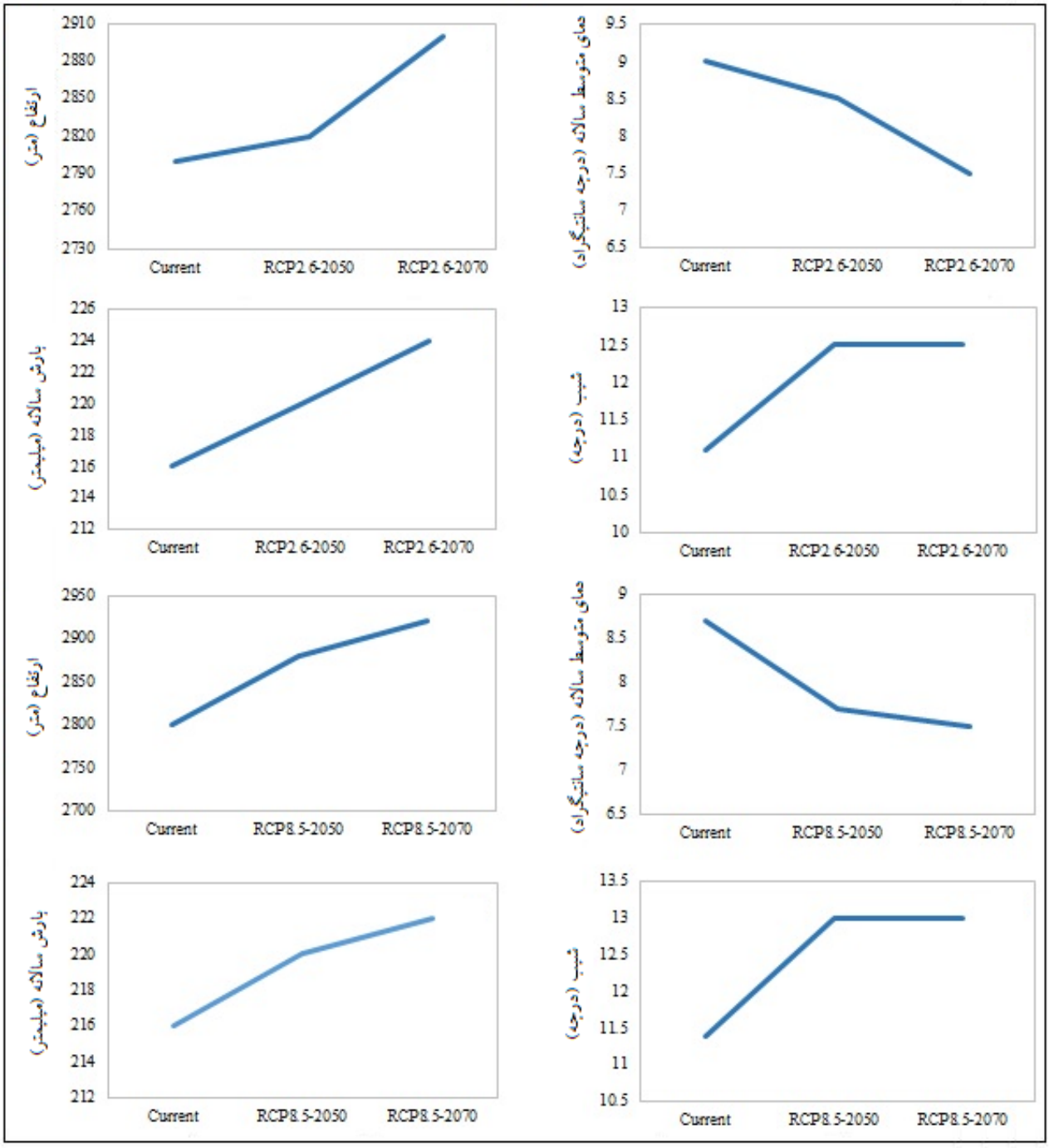
متغیر محیطی	حال حاضر	سال ۲۰۵۰		سال ۲۰۷۰	
		RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5
بارش سالانه (Bio12)	۱٤۹ – ۲۷۷	۱٦۹ – ۲۷۹	۱٥٦ – ۲۸۸	۱٦۲ – ۲۷۹	۱٥٦ – ۲۸۹
دمای متوسط سالانه (Bio1)	٥/۹ – ۱۱/۷	٥/۱ – ۱۰/۸	٤/۷ – ۱۱	٤/۷ – ۱۱/۲	٥/۸ – ۱۱/۲
شیب	۰/۰۷ – ۲۲/۲٤	۰/۳۹ – ۲٤/٤٥	۰/۳۹ – ۲٦	۰/۳۹ – ۲٤/٤٥	۰/۳۹ – ۲٦
ارتفاع	۲٤۳۹ – ۳۲۲۲	۲٤۱۸ – ۳۲٤۸	۲٤٥٤ – ۳٤۰٤	۲٤٥٥ – ۳۳۷۳	۲٤۱۸ – ۳٤۰٤

* شیب بر حسب درجه می‌باشد.



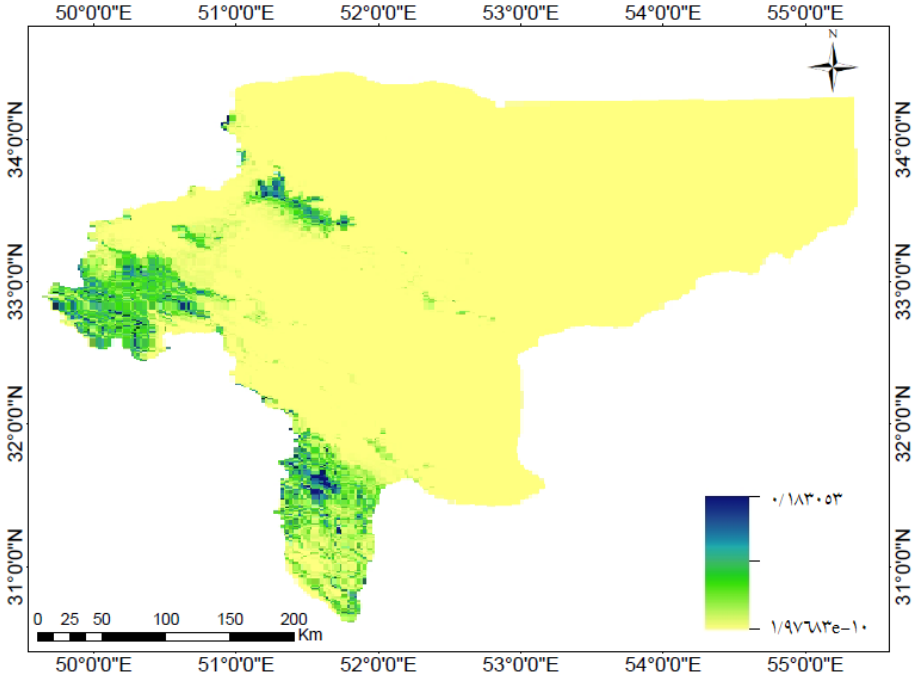
شکل ۸. منحنی‌های پاسخ گونه به مهم‌ترین متغیرهای محیطی. سایه‌های آبی، نشان‌دهنده انحراف معیار و خط قرمز رنگ نشان‌دهنده میانگین منحنی‌های پاسخ می‌باشد (محور عمودی احتمال حضور را نشان می دهد)

سال (Bio18) در بازه ٤ تا ٦ میلی‌متر قرار دارد، به مقدار حداکثر (نزدیک به ۱) می‌رسد. در مقادیر بارش کمتر از ۲ میلی‌متر و بیش از ۱٤ میلی‌متر در گرم‌ترین فصل، احتمال حضور گونه صفر است. از نظر گرادیان ارتفاعی، محدوده بهینه برای حضور گونه بین ۲۲۰۰ تا ۳۸۰۰ متر از سطح دریا تعیین شد و در ارتفاعات کمتر از ۲۰۰۰ متر هیچ رخدادی ثبت نگردید. با توجه به شکل، گونه در مواقعی که بارش سالانه (Bio12) در محدوده ۲٥۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر باشد، بیشترین احتمال حضور را دارد، در حالی‌که در بارش کمتر از ۱٥۰ میلی‌متر حضور گونه ناچیز است. الگوی پاسخ گونه به دامنه میانگین دمای روزانه (Bio2) شکل زنگوله‌ای دارد و در بازه ۱٦/٥–۱٦ درجه سانتی‌گراد اوج احتمال حضور آن پیش‌بینی می‌شود. منحنی پاسخ گونه به متوسط دمای سالانه (Bio1) روند نزولی نمایی را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که در محدوده دمایی ٦ تا ۸ درجه سانتی‌گراد بیشترین احتمال حضور وجود دارد، اما در دمای بالاتر از ۱٤ درجه سانتی‌گراد حضور گونه به‌طور کامل از بین می‌رود. همچنین، بررسی منحنی پاسخ به میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل (Bio8) نشان می‌دهد که افزایش دما در این فصل با کاهش احتمال حضور گونه همراه است.



شکل ۹. روند تغییرات دامنه بردباری گونه تحت سناریوهای فعلی، خوش‌بینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰

شکل ۹ روند تغییرات دامنه بردباری *F. ovina* را تحت دو سناریوی اقلیمی خوش‌بینانه (RCP2.6) و بدبینانه (RCP8.5) با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی CCSM4 در دوره‌های زمانی ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰ نشان می‌دهد. نتایج هر دو سناریو حاکی از جابجایی مکانی رویشگاه‌های بهینه گونه به سمت مناطق با ارتفاعات بالاتر است. این تغییر مکانی، بیانگر پاسخ سازگاری گونه به گرادیان‌های حرارتی جدید و تغییر الگوی بارش ناشی از تغییر اقلیم می‌باشند.



شکل ۱۰. نقشه عدم قطعیت که مقادیر انحراف معیار ده مرتبه تکرار مدل را در پیش‌بینی رویشگاه گونه نشان می‌دهد. رنگ‌های تیره‌تر نشان‌دهنده انحراف معیار (عدم قطعیت) بیشترهستند

از آنجایی‌که اُریبی مکانی در داده‌های نمونه‌برداری سبب ایجاد عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های مدل می‌شود، برای ارزیابی این عدم قطعیت و برآورد میزان خطای عملکرد در تکرارهای مدل، مقادیر انحراف معیار به‌عنوان معیاری از پراکندگی نتایج استخراج شدند. بر اساس شکل ۱۰، مقادیر انحراف معیار در مجموع عدم قطعیت پایینی در ارتباط با پیش‌بینی داشتند. بیشترین عدم قطعیت در طبقات با احتمال بالای حضور گونه مشاهده شد، در حالی‌که طبقات با احتمال حضور کم عدم قطعیت کمتری داشتند. میانگین کلی عدم قطعیت در سطح منطقه حدود ۰/۱ برآورد گردید که بیانگر پایداری و دقت قابل قبول مدل در شرایط بوم‌شناختی متنوع منطقه مورد مطالعه است.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که حدود ٤/٩٤ درصد از مساحت استان اصفهان، معادل ٥٢٩٦ کیلومترمربع به‌عنوان رویشگاه بالقوه *F. ovina* شناسایی شد. این محدوده، معرف آشیان بوم‌شناختی بالقوه گونه بوده که در مقایسه با آشیان بوم‌شناختی واقعی، گستره وسیع‌تری را در بر می‌گیرد. از میان متغیرهای فیزیوگرافی، ارتفاع و پس از آن شیب بیشترین سهم را در تبیین پراکنش گونه داشتند، در حالی‌که از بین متغیرهای زیست‌اقلیمی، بارش گرم‌ترین فصل (Bio18) و سپس دامنه میانگین دمای روزانه (Bio2) نقش مؤثرتری ایفا نمودند. این یافته‌ها با نتایج میرزایی موسیوند و همکاران (۲۰۱۷) که بر اساس آنالیز تشخیصی، ارتفاع و بارندگی را به‌عنوان عوامل غالب در پراکنش گونه معرفی کردند، همخوانی دارد (۲۹). نتایج مشابهی نیز در مطالعه اسفنجانی و همکاران (۲۰۱۸) گزارش شده است؛ به طوری که در مراتع چهارباغ، الگوریتم حداکثر آنتروپی، ارتفاع را عامل کلیدی تعیین پراکنش *F. ovina* شناسایی نمود (۱۰).

تحلیل منحنی پاسخ گونه نسبت به متغیر ارتفاع نشان داد که دامنه بهینه برای حضور گونه بین ۲۲۰۰ تا ۳۸۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. در ارتفاعات پایین‌تر، علاوه بر فشار چرای دام به‌ویژه گاو (٦)، افزایش فعالیت‌های انسانی نظیر دامداری، کشاورزی، باغداری و توسعه مراکز جمعیتی، موجب تخریب و

تبدیل زیستگاه‌های طبیعی شده است (٤٠). نتایج بذرمنش و همکاران (٢٠٢٥) بر اساس دو روش مدلسازی قلمرو (Domain) و الگوریتم ژنتیک (GARP) در مراتع استان اصفهان، ارتفاع بهینه حضور گونه را بین ٢٥٠٠ تا ٤٠٠٠ متر پیش‌بینی کردند که تا حدودی با این مطالعه متفاوت است. این اختلاف را می‌توان ناشی از تفاوت در ماهیّت و منطق محاسباتی الگوریتم‌های به‌کار رفته دانست (٦).

در پژوهش شریفی و شاهمرادی (٢٠٠٨) و نیز قربانی و همکاران (٢٠١٣)، دامنه پراکنش ارتفاعی *F. ovina* به ترتیب ٩٠٠-٤٢٢٠ متر و ١٣٠٠-٣٥٠٠ متر گزارش شد (١٦ و ٣٨). همچنین، شریفی و همکاران (٢٠١٥) با استفاده از تابع HOF، بیشترین احتمال حضور *F. ovina* را در ارتفاعات ٢٢٤٤ تا ٣٠٣٧ متر ثبت کردند (٣٩).

در شرایط اقلیمی فعلی، گونه *F. ovina* عمدتاً در دامنه‌های شیب ٠/٠٧ تا ٢٢ درجه (معادل ٤٠-٠/١ درصد) پراکنش دارد. تأثیر شیب بر پراکنش این گونه، پیش‌تر در مطالعه قربانی و اصغری (٢٠١٤) که از تحلیل متمایز کننده (Discriminant Analysis, DA) برای تعیین اهمیت پارامترهای محیطی در رویشگاه‌های گروه‌بندی شده استفاده کرده بودند، نیز تأیید شده است (١٥). شیب با تأثیر بر ویژگی‌های خام به‌ویژه عمق مؤثر خاک، می‌تواند کیفیت زیستگاه و رشد گیاهان مرتعی را تحت تأثیر قرار دهد؛ به گونه‌ای که افزایش شیب معمولاً سبب کاهش مطلوبیت رویشگاه می‌شود. نقش عامل شیب در گسترش جغرافیایی *F. ovina* با گزارش‌های مهدوی و همکاران (٢٠١٠) و تقی‌پور و همکاران (٢٠٠٧) نیز مطابقت دارد (٢٤ و ٤٢). همچنین، بررسی انجام شده توسط قربانی و همکاران (٢٠١٣) نشان داد که بیشترین تراکم گونه در شیب‌های ١٠ تا ١٥ درصد مشاهده می‌شود و در شیب‌های بیش از ٤٠ درصد، پراکنش آن محدودتر و به‌صورت لکه‌ای است (١٦). در مقابل، مطالعه میرزایی موسیوند و همکاران (٢٠١٧) بر روی مراتع دلفان در استان لرستان، بیشترین فراوانی گونه را در شیب‌های بالاتر از ٤٠ درصد گزارش کرده است (٢٩). این تفاوت‌ها گویای آن است که شرایط بوم‌شناختی منطقه شامل اقلیم، بافت و عمق خاک، و کاربری اراضی، نقش بسزایی در پراکنش گونه ایفا می‌کند. از این‌رو، در تدوین برنامه‌های احیا و اصلاح مراتع، در نظر گرفتن شرایط توپوگرافیک منطقه به‌ویژه دامنه شیب ضروری است تا موفقیت در استقرار گونه به حداکثر برسد.

تحلیل منحنی‌های پاسخ گونه نسبت به دمای متوسط سالانه (Bio1) و میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل سال (Bio8) بیانگر آن است که *F. ovina* دامنه تحمل بالایی به دماهای پایین دارد. بر اساس نتایج، بیشترین احتمال حضور گونه در شرایطی مشاهده شد که دمای متوسط سالانه در محدوده ٦ تا ١٠ درجه سانتی‌گراد و میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل بین ٥- تا صفر درجه سانتی‌گراد قرار داشت. این الگو، نشان‌دهنده تطابق بوم‌شناختی گونه با اقلیم‌های سرد و مرطوب است. یافته‌های حاضر با نتایج مطالعات قبلی از جمله قربانی و همکاران (٢٠١٣) و میرحاجی و سندگل (٢٠٠٦) هم‌راستاست که در آن‌ها، *F. ovina* به‌عنوان گونه‌ای مقاوم به سرمای زودرس و دیررس در طول فصل رشد معرفی شده است (١٦ و ٢٧). در این مطالعات اشاره شده که اندام‌های هوایی گیاه حتی در معرض دمای انجمادی، دچار یخ‌زدگی یا آسیب ساختاری قابل توجه نمی‌شوند. همچنین، نتایج میرزایی موسیوند و همکاران (٢٠١٧) تأیید می‌کند که بیشترین تراکم و احتمال حضور گونه در مناطقی با میانگین دمای سالانه حدود ١٠ درجه سانتی‌گراد رخ داده است (٢٠٠٩).

از منظر متغیر بارش سالانه (Bio12)، بیشترین احتمال حضور *F. ovina* در محدوده ٢٥٠ تا ٣٠٠ میلی‌متر بارندگی سالانه مشاهده گردید. در واقع، برخی ویژگی‌های مورفولوژیک گونه از جمله سیستم ریشه‌ای افشان و قدرت جوانه‌زنی بالا، امکان استقرار آن را در مناطقی با بارندگی سالانه حدود ٢٠٠ تا ٥٠٠ میلی‌متر فراهم می‌کند (٤٠). در مطالعه‌ای دیگر که در استان اردبیل انجام شد (١٦)، محدوده بارندگی در زیستگاه‌های طبیعی این گونه، بین ٢٩٩ تا ٥٦٥ میلی‌متر متغیر بود.

تحلیل منحنی پاسخ گونه نشان می‌دهد که اگرچه مقادیر متغیر بارندگی در گرم‌ترین فصل سال (Bio18) در محدوده مورد

مطالعه نسبتاً پایین است، حتی وقوع مقادیر اندک بارش در این فصل می‌تواند شرایط زیست‌اقلیمی نسبتاً مطلوبی را برای جوانه‌زنی بذر و استقرار گونه فراهم سازد. در مقابل، در مناطق فاقد هر گونه بارش تابستانه، شرایط به‌طور محسوسی نامساعدتر خواهد بود. یافته‌های موسوی و همکاران (۲۰۱٦) نیز مؤید این مطلب می‌باشد که بارش‌های بهاری (به‌ویژه فروردین و اردیبهشت) نسبت به بارش‌های زمستانی و حتی مجموع بارش سالانه، نقش مؤثرتری در تکمیل فنولوژی و تشکیل بذر *F. ovina* دارند (۳۱).

ویژگی ریشه افشان *F. ovina*، مشابه سایر گونه‌های خانواده گرامینه، که عمدتاً در خاک‌های سطحی گسترش دار، موجب حساسیت بالای گونه به هر میزان رطوبت موجود در این لایه خاکی می‌شود (۱۵). این امر با نتایج بذرمنش و همکاران (۲۰۲۵) نیز همخوانی دارد که رابطه معناداری میان حضور این گونه و بارندگی فصل گرم گزارش کرده‌اند (٦).

از نظر عوامل غیرمستقیم مرتبط با بارندگی، در ارتفاعات بالاتر، به‌دلیل افزایش شیب، فرسایش سطحی تشدید شده و ذرات ریز خاک (رس و سیلت) شسته می‌شوند و در نتیجه، درصد شن در بافت خاک افزایش می‌یابد. این تغییر در بافت خاک، محیطی مناسب‌تر برای گونه‌هایی با سیستم ریشه‌ای قوی مانند *F. ovina* ایجاد کرده و توانایی آن در تثبیت ذرات درشت‌تر خاک و افزایش یکپارچگی ساختاری خاک را تقویت می‌کند (۱۸).

تحلیل نتایج مدل‌سازی تحت سناریوهای تغییر اقلیم نشان داد که در آینده، رویشگاه‌های مطلوب *F. ovina* به‌طور چشمگیری به سمت مناطق مرتفع‌تر با میانگین دمای سالانه پایین‌تر، بارندگی سالانه بیشتر و شیب کمی بالاتر جابجا خواهند شد. این جابجایی عمدتاً به تطابق بوم‌شناختی گونه با آشیان اقلیمی مطلوب (ترکیب بهینه درجه حرارت و بارندگی) برمی‌گردد؛ به این ترتیب که تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده موجب کاهش کیفیت زیستگاه‌های ارتفاعات پایین و در نتیجه نامطلوب شدن آن‌ها برای استقرار گونه می‌شود. نتایج مشابهی در پژوهش‌های امیری و همکاران (۲۰۱۹) و نقی‌پور برج و همکاران (۲۰۲۱) نیز گزارش شده است که بر جابجایی ارتفاعی گونه‌های مرتعی در پاسخ به تغییرات اقلیمی تأکید کرده‌اند (٤ و ۳۳).

از منظر عامل توپوگرافی، افزایش احتمال حضور گونه در شیب‌های بالاتر، می‌تواند به‌دلیل بهبود زهکشی خاک و جلوگیری از ماندابی شدن این مناطق باشد (۳۹). مطالعه غفاری و همکاران (۲۰۱۸) نیز مبیّن این بود که شیب به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در تعیین پراکنش *F. ovina* نقش دارد. آن‌ها گزارش کردند که درصد شیب به‌ویژه در ارتفاعات، تأثیر قابل‌توجهی بر استقرار و ساختار جوامع گیاهی دارد که با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی کامل دارد (۱۳).

مطالعه فراشی و کرمیان (۲۰۲۱) نشان داد که *F. ovina* در برابر تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده مصون نبوده و پراکنش فعلی آن می‌تواند در اثر این تغییرات دستخوش جابجایی و تغییرات قابل توجهی شود (۱۱). مطابق با یافته‌های میری و رستگار (۲۰۱۲)، افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن در آینده موجب افزایش توان رقابتی گیاهان با مسیر فتوسنتزی C3 در برابر گونه‌های C4 خواهد شد (۲۸). با توجه به اینکه *F. ovina* از گراس‌های C3 به‌شمار می‌آید، این پدیده می‌تواند گسترش بالقوه رویشگاه آن را تحت سناریوهای اقلیمی آینده توجیه کند. علاوه بر این، ویژگی‌های بوم‌شناختی خاص گونه شامل دامنه بردباری وسیع نسبت به شرایط محیطی، مقاومت بالا در برابر سرما، چرا و لگدکوبی و سازگاری زیاد با تنوع زیستگاهی، از عوامل کلیدی مؤثر بر گسترش زیستگاه آن محسوب می‌شوند (۱٦). افزایش مساحت گونه‌های گیاهی در اثر تغییرات اقلیمی در مطالعات پاندا و همکاران (۲۰۱۸) و الماسیه و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش شده است (۲ و ۳٤).

مقادیر پایین عدم قطعیت نشان‌دهنده این است که مدل حداکثر آنتروپی در پیش‌بینی رویشگاه بالقوه گونه، از ثبات و اطمینان بالایی برخوردار بوده و نتایج حاصل از تکرارهای مدل، همگرایی بالایی را نشان می‌دهند. مطالعات مشابه نیز رویکردهایی برای ارزیابی عدم قطعیت در فرآیند مدل‌سازی به‌کار رفته است؛ به‌عنوان مثال، دوان و همکاران (۲۰۱٤) با

استفاده از انحراف معیار و ضریب تغییرات، میزان عدم قطعیت مدل اجماعی را در پیش‌بینی پراکنش پنج گونه درختی در چین نشان دادند (۸).

شایان ذکر است که این مطالعه پراکنش گونه را صرفاً بر اساس شرایط اقلیمی پیش‌بینی نموده است. در صورت وجود مدیریت نامناسب چرا، به‌ویژه با توجه به خوشخوراکی گونه، احتمال حذف آن و جایگزینی با گونه‌های دارای ارزش غذایی کمتر وجود دارد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، متغیرهای تکمیلی نظیر ویژگی‌های خاک، عوامل انسانی (اجتماعی-اقتصادی) و دیگر متغیرهای بوم‌شناختی نیز مد نظر قرار گیرند.

با توجه به اینکه هر مدل دارای فرضیات و حساسیت‌های خاص خود است، استفاده از یک روش مدل‌سازی به تنهایی ممکن است دقت و قابلیت تعمیم نتایج را محدود کند. از این‌رو، توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده از رویکردهای مختلف مدل‌سازی به‌صورت همزمان استفاده شود تا با بهره‌گیری از اجماع نتایج، پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تری ارائه گردد. چنین مطالعاتی می‌توانند به متخصصان منابع طبیعی در ارائه راهکارهای مؤثر حفاظتی، تحلیل روندهای تاریخی پراکنش و شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات آن کمک شایانی نمایند.

منابع

1. Alavi, S. J., Noori, Z. and Zahedi Amiri, G., 2017. The response curve of Beech tree (*Fagus Orientalis* Lipsky.) in relation to environmental variables using generalized additive model in Khayroud Forest, Nowshahr. *Journal of Wood and Forest Science and Technology* 24(1): 29-42. (In Persian)
2. Almasieh, K., Zoratipour, A., Negaresh, K. and Delfan-Hasanzadeh, K., 2018. Habitat quality modelling and effect of climate change on the distribution of *Centaurea pabotii* in Iran. *Spanish Journal of Agricultural Research* 16(3): e0304.
3. Amiri, M., Shafiezadeh, M., Tarkesh Esfahani, M. and Moslemi, S. M., 2023. Ensemble modeling of the potential invasion of *Prosopis juliflora* (SW.) DC in the Makuran region. *Environmental Sciences* 21(1): 205-224. (In Persian)
4. Amiri, M., Tarkesh, M. and Jafari, R., 2019. Predicting the climatic ecological niche of *Artemisia aucheri* Boiss in central Iran using species distribution modeling. *Applied Ecology* 8(2): 61-79. (In Persian)
5. Bazrmanesh, A., Tarkesh, M., Bashari, H. and Pourmanafi, S., 2019. Effect of climate change on the ecological niches of the climate of *Bromus tomentellus* Boiss using MaxEntin Isfahan province. *Journal of Rangeland and Watershed Management* 71(4): 857-867. (In Persian)
6. Bazrmanesh, A., Tarkesh Esfahani, M., Bashari, H., Pourmanafi, S. and Amiri, M., 2025. Determining the potential ecological niche of *Festuca ovina* L. using Genetic Algorithm (GARP) and DOMAIN models in rangelands of Isfahan province. *Journal of Rangeland* 18(4): 505-519. (In Persian)
7. Borna, F., Tamartash, R., Tatian, M. R. and Gholami, V., 2017. Habitat potential modeling of *Astragalus gossypinus* using ecological niche factor analysis and logistic regression (Case study: summer rangelands of Baladeh, Nour). *Journal of RS and GIS for Natural Resources* 7(4): 45-61. (In Persian)
8. Duan, R. Y., Kong, X. Q., Huang, M.Y., Fan, W. Y. and Wang, Z. G., 2014. The predictive performance and stability of six species distribution models. *PLoS One* 9, e112764.
9. 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: 43-57.
10. Esfanjani, J., Ghorbani, A. and Zare Chahouki, M. A., 2018. MaxEnt modeling for predicting impacts of environmental factors on the potential distribution of *Artemisia aucheri* and *Bromus tomentellus-Festuca ovina* in Iran. *Polish Journal of Environmental Studies* 72(3): 1041-1047.
11. Farashi, A. and Karimian, Z., 2021. Assessing climate change risks to the geographical distribution of grass species. *Plant Signaling and Behavior* 16(7): 1913311.
12. Feizi, M.T., Jaberolansar, Z., Alijani, V., Shirani, K. and Khodagholi, M., 2013. Plan for Recognizing the Ecological Regions of the Country, Vegetation Types of Isfahan Province. Research Institute of Forest and Rangelands Press, Tehran. (In Persian)
13. Ghafari, S., Ghorbani, A., Moameri, M., Mostafazadeh, R. and Bidarlord. M., 2018. Composition and structure of species along altitude gradient in Moghan-Sabalan rangelands, Iran. *Journal of Mountain Science* 15(6): 1209-1228.

14. Ghasemi, A., Tatian, M. R. and Tamartash, R., 2015. Autecology of *Festuca ovina* L. in summer rangeland of Mazandaran province (case study: summer rangelands of Galoogah). The First National Conference on Medicinal Plants and Herbal Medicines. Shahid Beheshti University, Tehran. (In Persian)
15. Ghorbani, A. and Asghari, A., 2014. Ecological factors affecting the distribution of *Festuca ovina* in Southeastern rangelands of Sabalan. *Range and Desert Researches* 21(2): 368-381. (In Persian)
16. Ghorbani, A., Sharifi Niaragh, J., Kavianpour, A. H., Malekpour, B. and Mirzaie Aghche Gheshlagh, F., 2013. Investigation on ecological characteristics of *Festuca ovina* L. in south eastern rangelands of Sabalan. *Iranian Journal of Range and Desert Research* 20: 379-396. (In Persian)
17. Guisan, A. and Zimmermann, N. E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147-186.
18. Heidari, F., Dianati Tilaki, G. A. and Alavi, S. J., 2017. Evaluation on the response of *Bromus tomentellus* Boiss and *Festuca ovina* L., to some environmental variables using the Generalized Additive Model (GAM) in the rangeland of Galandrood watershed in Mazandaran province, Iran. *Iranian Journal of Plant Biology* 9(3): 79-94. (In Persian)
19. Jafari, R., Amiri, M., Asgari, F. and Tarkesh. M., 2022. Dust source susceptibility mapping based on remote sensing and machine learning techniques. *Ecological Informatics* 72: 101872.
20. Jafarpour, Sh. and Kanooni, A., 2016. Climate change scenarios in fifth report of the Intergovernmental Panel on Climate Change and its comparison with the previous report. Second National Conference on Conservation of Natural Resources and Environment, University of Mohaghegh Ardabili, Iran. (In Persian)
21. Kargar, M., Akhzari, D. and Saadatfar, A., 2019. Comparing different modeling techniques for predicting presence-absence of some dominant plant species in mountain rangelands, Mazandaran province. *Journal of Rangeland Science* 9(3): 219-223.
22. Khodagholi, M., Saboohi, R. and Eskandari, Z., 2014. Analyzing drought past trend and forecasting its future in Isfahan province. *Journal of Water and Soil Science* 18(67): 367-379. (In Persian)
23. Lembrechts, J. J., Nijs, I. and Lenoir, J., 2019. Incorporating microclimate into species distribution models. *Ecography* 42(7): 1267-1279.
24. Mahdavi, A., Heydari, M., Bastam, R. and Abdollah, H., 2010. Vegetation in relation to some edaphic characteristics of site (Case study: Zagros Forest ecosystem, Kabirkooh protected area, Ilam). *Forest and Poplar Research* 17(4): 581-593. (In Persian)
25. Mandleberg, L., 2004. A comparison of the predictive abilities of four approaches for modelling the distribution of cetaceans. MSc Thesis. University of Aberdeen, UK.
26. Miller, J., 2010. Species distribution modeling. *Geography Compass* 4(6): 490-509.
27. Mirhaji, T. and Sanadgol, A., 2006. Study the growth degree days requirement for phonological stages of important range species in Homand Absard. *Iranian Journal of Range and Desert Research* 13(3): 212-221. (In Persian)
28. Miri, H.R. and Rastegar, A., 2012. Effect of CO_2 enrichment on growth and competitiveness of soybean and millet against lambs quarters and pigweed. *Crop Production* 5(1): 1-18. (In Persian)
29. Mirzaei Mossivand, A., Keivan Behjou, F., Ramak, P. and Zandi Esfahan, E., 2017. The study of some ecological factors affecting distribution of *Festuca ovina* in rangelands, Lorestan Province- County Delfan. *Natural Ecosystems of Iran* 20(2): 379-396. (In Persian)
30. Mohammadlou, M., Haghizadeh, A., Zeynivand, H. and Tahmasebipour. N., 2016. Evaluation of climate change on temperature and precipitation trends in Barandozchay watershed, In the West Azerbaijan, using General Circulation Models (GCM). *Geographic Space* 56: 151-168. (In Persian)
31. Mousavi, A., Ehsani, A. and Aghajanlou. F., 2016. Effects of rainfall periods on phenology of *Festuca ovina*. *Range and Desert Research* 23(2): 197-208. (In Persian)
32. Mozaffarian, V., 2013. A Dictionary of Iranian Plant Names. Farhang-e-Moaser Press, Tehran, Iran. (In Persian)
33. Naghipour Borj, A. A., Ashrafzadeh, M. R. and Haidarian, M., 2021. Modeling the current and future potential distribution of *Fritillaria imperialis* under climate change scenarios and using three general circulation models in Iran. *Plant Ecosystem Conservation* 17: 219-235. (In Persian)
34. Panda, R.P., Behera, M. D. and Roy, P.S., 2018. Assessing distributions of two invasive species of contrasting habits in future climate. *Journal of Environmental Management* 213: 478-488.
35. Peterson, A. T., Sobreón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M. and Araújo, M. B., 2011. Ecological niches and geographic distributions. *Monographs in Population Biology* 49(49): 51-81.
36. Phillips, S. J., Anderson, R. P. and Schapire. R. E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographical distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
37. Pliscoff, P., Luebert, F., Hilger, H. and Guisan, A., 2014. Effects of alternative sets of climatic predictors on species distribution models and associated estimates of extinction risk: A test with plants in an arid environment. *Ecological Modelling* 288: 166-177.

38. Sharifi, J. and Shahmoradi, A. A., 2008. Research of ecological characteristics *Poa araratica* (Case study in Gharehsu watershed of Ardabil province). *Pajouhesh and Sazandegi* 78(3): 2-10. (In Persian)
39. Sharifi, M. A., Dianatitilaki, G. and Alavi, S. J., 2015. Investigating the response of *Festuca ovina* L. to some environmental variables using HOF function in Galandrood watershed rangeland. *Rangeland* 8(4): 328-341. (In Persian)
40. Souri, M., Zandi Esfahan, E. and Kamali, N., 2018. The feasibility study of *Festuca ovina* cultivation to improve saline and polluted rangelands. *Iranian Journal of Range and Desert Research* 25(3): 524-535. (In Persian)
41. Swets, J., 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240: 1285-1293.
42. Taghipour, A., Mesdaghi, M., Heshmati, Gh. A. and Rastegar, Sh., 2007. The effect environmental factors on distribution of range species at Hezar Jarib area of Behshahr, Iran (Case study: Village Sorkhgriveh). *Agriculture and Natural Resources Sciences* 15(4): 195-205. (In Persian)
43. Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K. and Masui, T., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109: 5-31.
44. Wilson, C. D., Roberts, D. and Reid, N., 2011. Applying species distribution modelling to identify areas of high conservation value for endangered species: a case study using *Margaritifera margaritifera* (L.). *Biological Conservation* 144: 821-829.
45. Yadav, N., Rakholia, S. and Yosef, R., 2024. Decision support systems in forestry and tree-planting practices and the prioritization of ecosystem services: A review. *Land* 13: 230.

Iranian Journal of Applied Ecology

Determining the Geographical Distribution and Tolerance Range of *Festuca ovina* L. under Climate Change Using Maximum Entropy (MaxEnt) Model

Azade Bazrmanesh[1], Mostafa Tarkesh[*2], Hossein Bashari[2] and Mohadeseh Amiri[3]

(Received: December 29-2021; Accepted: November 22-2025)

Abstract

Predicting the distribution of plant species plays a critical role in understanding rangeland ecosystem sustainability, management planning, and the implementation of restoration and rehabilitation programs. This study modeled the geographic distribution of sheep fescue (*Festuca ovina* L.) and investigated the potential impacts of climate change on its habitat in Isfahan Province using the MaxEnt model. Relationships between species presence and topographic variables (elevation, slope, aspect), as well as bioclimatic variables (precipitation, temperature), were analyzed. The effects of climate change were examined under optimistic (RCP 2.6) and pessimistic (RCP 8.5) scenarios using the CCSM4 model for 2050 and 2070. Results indicated that MaxEnt performed efficiently, with an area under the curve (AUC) of 0.98, outperforming random predictions. Jackknife analysis identified precipitation during the warmest season and elevation as the most influential variables affecting species presence. Response curves indicated the highest presence probability at elevations of 2,200–3,800 m, with 4–6 mm precipitation during the warmest season, 250–300 mm of annual precipitation, and a mean annual temperature of 6–8 °C. Projections showed a slight increase in unsuitable habitats and an upward shift toward higher elevations under the pessimistic scenario. The findings provide a valuable basis for identifying suitable habitats for species establishment and for developing evidence-based rangeland management and restoration strategies.

Keywords: Potential ecological niche, Species presence, Climate change scenarios, Bioclimatic variables

1. PhD. Student of Rangeland Sciences, Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2. Associated professor, Departmentg of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
3. Assistant professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Corresponding Author, Email: amiri.m@uma.ac.ir