

تحلیل بوم‌شناختی و مدل‌سازی مطلوبیت رویشگاه گونه دارویی آویشن کوهی (*Thymus kotschyanus*) در حوزه آبخیز طالقان با استفاده از

مدل آنتروپی بیشینه (Maxent)

مجتبی اخوان ارمکی^{*} و ملیکا هاشمی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۸)

چکیده

هدف این پژوهش تحلیل بوم‌شناختی و مدل‌سازی مطلوبیت رویشگاه گونه دارویی *Thymus kotschyanus* در حوزه آبخیز طالقان با استفاده از مدل آنتروپی بیشینه (Maxent) بود. تعداد ۴۸ نقطه حضور گونه پس از اعمال فرایند پالایش مکانی به‌منظور کاهش سوگیری نمونه‌برداری در مدل استفاده شد. متغیرهای محیطی شامل عوامل توپوگرافی (ارتفاع، شیب و جهت)، ویژگی‌های خاک، اقلیم و زمین‌شناسی تهیه و کلیه لایه‌ها به قدرت تفکیک مکانی ۳۰×۳۰ متر هم‌مقیاس‌سازی شدند. داده‌های اقلیمی بر اساس میانگین بلندمدت ۳۰ ساله استخراج و دقت درونی‌یابی با شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تعیین ارزیابی شد. مدل با ترکیب ویژگی‌های خطی، درجه دوم و لولا، ضریب منظم‌سازی برابر ۱، تعداد ۱۰ تکرار و روش اعتبارسنجی متقابل اجرا گردید. عملکرد مدل خوب ارزیابی شد (سطح زیر منحنی = ۰/۸۴۴) و ضریب کاپا برابر ۰/۸۷ به‌دست آمد. آستانه بهینه ۰/۴۳ تعیین شد (حساسیت = ۰/۸۱، ویژگی = ۰/۷۸). بر اساس شاخص‌های درصد مشارکت و اهمیت جایگشتی، جهت، ارتفاع، رس و ماده آلی بیشترین تأثیر را در پراکنش گونه داشتند. نتایج بیانگر اهمیت عوامل توپوگرافی و اداپتیکی در تعیین مطلوبیت رویشگاه گونه در مقیاس حوزه آبخیز است.

واژه‌های کلیدی: Maxent، مدل‌سازی توزیع گونه، آویشن کوهی، آنتروپی بیشینه، مطلوبیت رویشگاه

۱. دانش‌آموخته علوم مرتع، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران.

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mtakhavan@ut.ac.ir

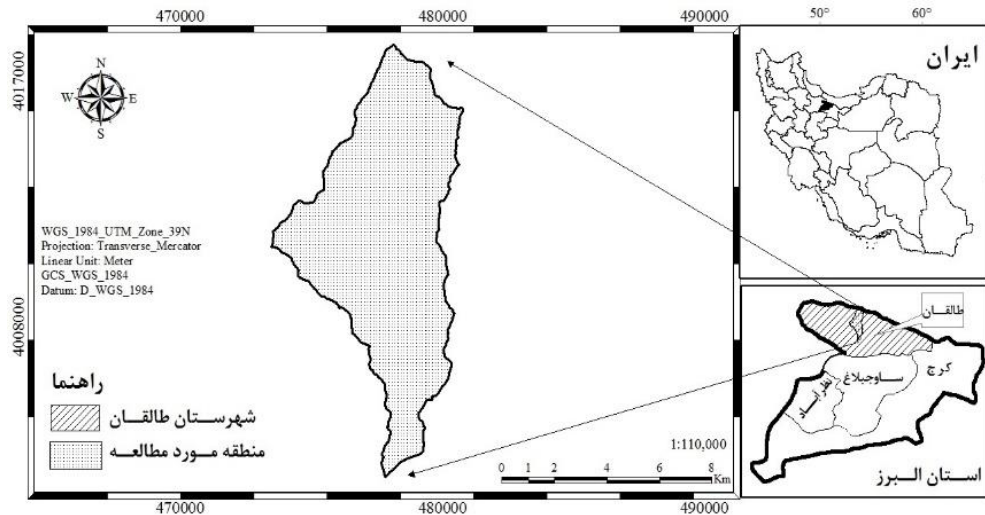
مقدمه

در سال‌های اخیر تعیین وضعیت پراکنش گونه‌های گیاهی و وضعیت رویشگاه‌های تحت اشغال آنها از اهمیت بسزایی در برنامه‌های حفاظتی و مدیریت گونه‌ها برخوردار شده است (۲۱). بدین منظور مدل‌های پراکنش گونه‌ها به طور فزاینده‌ای در محیط زیست استفاده شده است (۷ و ۲۲). مدل‌های زیادی هم اکنون برای بررسی روابط میان گونه و رویشگاه به کار می‌روند. این مدل‌ها معمولاً وابسته به نقاط حضور و عدم حضور گونه و متغیرهای رویشگاهی هستند که تداعی‌کننده عناصر تشکیل‌دهنده آشیان بوم‌شناختی آن گونه می‌باشند. در صورتی که هم داده‌های حضور و هم داده‌های عدم حضور برای ساخت مدل‌ها در دسترس باشند روش‌های رگرسیونی از معروفترین روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها هستند (۶ و ۲۰). در حالی که در بیشتر پژوهش‌ها اطلاعات در دسترس، بیشتر داده‌های مربوط به حضور گونه‌ها هستند. به همین دلیل، روش‌های مدل‌سازی که فقط به داده‌های حضور گونه‌ها نیاز دارند، از اهمیت بیشتری برخوردارند (۹). درک توزیع مکانی گونه‌های گیاهی برای حفاظت مؤثر، مدیریت مراتع و گونه‌های دارویی آن، و پیش‌بینی پاسخ‌ها به تغییرات محیطی حیاتی است (۲). مدل‌های توزیع گونه‌ها به ابزارهای ضروری برای نقشه‌برداری از زیستگاه‌های بالقوه و شناسایی عوامل محیطی کلیدی مؤثر بر حضور گونه‌ها تبدیل شده‌اند (۳۴). در میان روش‌های مختلف مدل‌سازی توزیع گونه‌ها، مدل حداکثر آنتروپی به دلیل عملکرد قوی با داده‌های فقط حضور و توانایی مدیریت روابط اکولوژیکی پیچیده، برجسته شده است (۷ و ۲۷). مدل مکسنت از متغیرهای محیطی مانند توپوگرافی، اقلیم، و ویژگی‌های خاک برای پیش‌بینی زیستگاه‌های مناسب استفاده می‌کند، که این امر آن را به ویژه برای گونه‌های مرتعی مانند آویشن کوهی، یک گونه دارویی کلیدی در کشور ایران، مناسب می‌سازد (۱۷).

مدل Maxent یکی از روش‌های پرکاربرد در مدل‌سازی پراکنش گونه‌هاست که بر اساس داده‌های حضور و پیشینه‌سازی

آنتروپی عمل می‌کند. این مدل به دلیل دقت مناسب و نیاز حداقلی به داده‌های ورودی، به‌طور گسترده در مطالعات اکولوژیک استفاده شده است (۱۳ و ۱۶). گیاهان دارویی در کشور، به شدت به عوامل محیطی مانند بافت خاک، ارتفاع، و بارندگی حساس هستند، که به‌طور قابل توجهی بر ترکیب جوامع گیاهی تأثیر می‌گذارند (۲۶). مطالعات پیشین نقش عوامل توپوگرافی و خاکی را در شکل‌دهی به توزیع گونه‌های دارویی برجسته کرده‌اند، به‌طوری‌که محتوای ماسه و غلظت آهک اغلب به‌عنوان عوامل محدودکننده عمل می‌کنند (۳۳). علاوه بر این، تغییرات اقلیمی مطلوبیت زیستگاه برای بسیاری از گونه‌ها را تغییر می‌دهد و نیاز به مدل‌های به‌روز برای پیش‌بینی توزیع‌های آینده را ضروری می‌سازد (۲۴). گونه آویشن کوهی (*Thymus kotschyanus*) یکی از مهمترین گونه‌های جنس آویشن می‌باشد که کاربردهای وسیعی در زمینه بهداشتی، دارویی و صنایع غذایی دارد. این گیاه سرشار از تانن‌های نعنایان، پلی‌متوکسی فلاوون‌ها، تریترپن‌ها و پلی‌ساکاریدها می‌باشد. مهمترین ترکیبات موجود در اسانس آویشن‌ها تیمول و کارواکرول هستند. این ترکیبات دو ترپنوید هستند که تنها در تعداد محدودی از گونه‌های گیاهی از جمله آویشن‌ها وجود دارند. اسانس آویشن آنتی‌بیوتیک بسیار قوی است. پلی‌متوکسی فلاوون‌ها و مونوترپن‌های موجود در این گیاه نیز دارای اثرات ضدتشنجی، ضدالتهاب و ضدسرطان هستند (۴).

با وجود گسترش زیاد این گونه در مراتع کشور تاکنون پژوهش‌های کاملی بر رویشگاه‌های بالقوه آن انجام نشده است؛ بنابراین لازم است که برای پرورش و به‌کارگیری این گونه مهم دارویی شناخت کاملی نسبت به رویشگاه‌های بهینه این گونه با استفاده از روش‌های نوین و کارآمد داشت. با وجود انجام مطالعات مشابه در زمینه مدل‌سازی پراکنش گونه‌های آویشن، تمرکز بسیاری از این پژوهش‌ها بر متغیرهای اقلیمی و مقیاس‌های کلان بوده است و نقش ویژگی‌های ادافیکی در مقیاس حوزه آبخیز کمتر به‌صورت یکپارچه بررسی شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان البرز و کشور

سطح دریا ۴۰۰۰ متر و حداقل آن ۱۸۰۰ متر است. بر اساس اطلاعات هواشناسی ایستگاه‌های طالقان در یک دوره ۳۰ ساله، متوسط بارندگی ۵۸۰ میلی‌متر در سال است و اقلیم آن بر اساس روش آمبرژه نیمه‌مرطوب سرد است (۲۳). داده‌های اقلیمی بر اساس میانگین بلندمدت ۳۰ ساله استخراج و دقت درونیابی با شاخص‌های $RMSE$ و R^2 ارزیابی گردید. به منظور بررسی تأثیر عوامل محیطی بر پراکنش پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه، نقشه پوشش گیاهی در مقیاس ۱/۲۵۰۰۰ تهیه شد (بر اساس روش تفسیر تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 با تاریخ برداشت ۲۰۲۰ و بازدید میدانی؛ منبع: سازمان جنگل‌ها و مراتع ایران). بر این اساس در محدوده منطقه مطالعاتی ۶ تیپ رویشی تشخیص داده شد. برای نمونه‌برداری از پوشش گیاهی در هر تیپ رویشی، ۴ ترانسکت ۱۰۰ متری مستقر و در هر ترانسکت ۱۰ پلات با فواصل ۱۰ متر از هم مستقر شد. اندازه پلات‌ها با توجه به روش حداقل سطح (منحنی گونه-سطح؛ حداقل سطح ۱ متر مربع) و تعداد آنها با روش آماری t -test (برای واریانس پوشش؛ حداقل تعداد ۱۰ بر اساس واریانس کمتر از ۱۰ درصد) تعیین شد. در ابتدا و انتهای هر ترانسکت یک پروفیل خاک حفر و تا عمق موثر ریشه‌دوانی گیاهان نمونه خاک برداشت شد (در هر تیپ ۸ نمونه خاک برداشت شد). موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه‌برداری نیز بوسیله سیستم موقعیت‌یاب جهانی

نوآوری پژوهش حاضر در ترکیب تحلیل زمین‌آماري ویژگی‌های خاک، کنترل سوگیری مکانی داده‌ها و استفاده از مدل Maxent در مقیاس محلی جهت تبیین مطلوبیت رویشگاه گونه است. اهداف اصلی این پژوهش تهیه نقشه پیش‌بینی رویشگاه بالقوه گونه آویشن کوهی، با استفاده از مدل Maxent، یافتن عوامل مهم تأثیرگذار در استقرار و توزیع این گونه و گرایش ترجیحی گونه مورد نظر نسبت به عوامل محیطی است. گرایش ترجیحی به معنای تمایل گونه به شرایط محیطی خاص است که می‌تواند با مدل‌های توزیع گونه‌ها تعیین شود.

مواد و روش‌ها

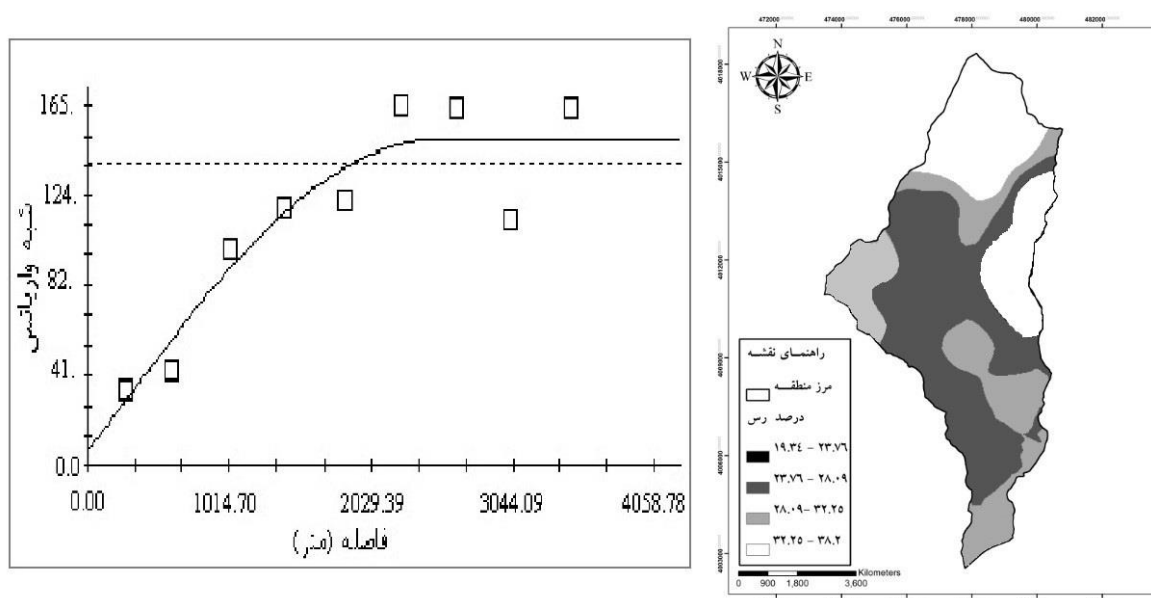
معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در حوزه آبخیز طالقان (شمال غربی استان البرز) در بخش میانی حوزه با وسعت ۵۴۶۰/۶۵ هکتار و با موقعیت جغرافیایی $50^{\circ} 45' 28''$ تا $50^{\circ} 48' 87''$ طول شرقی و $36^{\circ} 15' 17''$ تا $36^{\circ} 10' 7''$ عرض شمالی واقع شده است. شکل (۱) موقعیت منطقه را در ایران و استان البرز نشان می‌دهد. محدوده حوزه آبخیز طالقان به‌عنوان دامنه مطالعه و فضای قابل دسترس گونه تعریف شد و نقاط پس‌زمینه صرفاً از داخل این محدوده انتخاب گردیدند. حداکثر ارتفاع منطقه از

بالقوه گونه مورد بررسی از روش Maxent استفاده شد. کلیه لایه‌های محیطی به رزولوشن 30×30 متر هم‌مقیاس‌سازی شدند. برای داده‌های پیوسته از روش Bilinear (دوخطی) و برای داده‌های طبقه‌ای از Nearest Neighbor (نزدیکترین همسایه) استفاده شد. در این بخش داده‌های حضور گونه و همچنین لایه‌های محیطی به نرم‌افزار Maxent وارد شدند. دو گزینه ساخت منحنی‌های پاسخ گونه به ویژگی‌های محیطی و آزمون جک‌نایف جهت تعیین متغیرهای تأثیرگذار نیز انتخاب شدند. نقشه پیش‌بینی ساخته شده توسط Maxent نقشه احتمالی پیوسته است. بنابراین برای تعیین حضور یا عدم حضور گونه‌های مورد نظر، باید آستانه بهینه حضور مشخص شود (۲۰). بدین منظور آستانه بهینه به روش حساسیت و اختصاصیت برابر تعیین شده و نقشه‌های پیوسته مطلوبیت زیستگاه به نقشه‌های حضور و عدم حضور گونه‌ها تبدیل شدند (۱۹). پیش از مدل‌سازی، فرایند Spatial Thinning به منظور کاهش سوگیری مکانی اعمال شد. همچنین آزمون Moran's I نشان داد خودهمبستگی مکانی معناداری در داده‌ها وجود ندارد. برای ارزیابی میزان تطابق مدل‌های پیش‌بینی با واقعیت زمینی تیپ‌های گیاهی از شاخص کاپا در نرم‌افزار Idrisi Taiga نسخه ۱۷ استفاده شده است. از این شاخص در اغلب پژوهش‌های مدل‌سازی پیش‌بینی گونه‌های گیاهی از تیپ Miller و Franklin و برای ارزیابی اعتبار مدل استفاده شده است (۵). همچنین در خروجی نرم‌افزار Maxent مقدار AUC نیز که از روش‌های ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی است ارائه می‌شود. مدل با Feature classes شامل LQH، ضریب Regularization برابر ۱، تعداد ۱۰ تکرار و روش Cross-validation اجرا شد. در هر تکرار، ۷۵ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۵ درصد برای آزمون استفاده گردید. تعداد ۱۰,۰۰۰ نقطه پس‌زمینه در محدوده حوزه آبخیز تولید شد. واقعیت زمینی از داده‌های مستقل بازدید میدانی (۲۰ درصد داده‌های حضور برای اعتبارسنجی نگه‌داشته شد) استخراج گردید.

(GPS) ثبت شد و با رویهم‌گذاری نقشه نقطه‌ای این نقاط و نقشه‌های شیب و جهت و ارتفاع با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰، داده‌های فیزیوگرافی مربوط به نقاط نمونه‌برداری نیز به دست آمد. در آزمایشگاه نمونه‌های خاک از الک دو میلی‌متری عبور داده شد و بعد از آن بر روی ذرات کوچکتر از ۲ میلی‌متر آزمایش فیزیکی تعیین ذرات نسبی خاک شامل رس، سیلت و ماسه به روش هیدرومتری بایکاس برای تعیین بافت خاک انجام شد. در بررسی‌های تجزیه شیمیایی خاک، اسیدیته خاک در گل اشباع با pH متر، درصد کربن آلی به روش والک و بلک، آهک به روش کلسیمتری و هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع با هدایت‌سنج الکتریکی اندازه‌گیری شد.

نقشه‌های شیب، جهت و ارتفاع با استفاده از نقشه DEM منطقه (منبع SRTM: با رزولوشن ۳۰ متر؛ دقت ارتفاعی ± 16 متر؛ تاریخ برداشت ۲۰۱۴) تهیه شد. برای توصیف تغییرات مکانی هر ویژگی خاک و تهیه نقشه هر متغیر خاک از روش‌های زمین‌آمار استفاده شد. در این تحقیق برای بررسی و تشریح ارتباط و ساختار مکانی از تجزیه و تحلیل «تغییرنا یا واریوگرام» در نرم‌افزار GS+ نسخه ۹ استفاده شد. تغییرناها تغییرات فاصله‌ای یا تغییرپذیری ساختاری متغیرها را نشان می‌دهند (۶). بعد از تعیین اجزای تغییرنا برای هر یک از خصوصیات خاک با استفاده از نقشه نقاط در نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۹.۳ از طریق روش درون‌یابی کریجینگ معمولی (با $RMSE = 0.12$ ، $MAE = 0.08$ ، $MBE = 0.01$ برای رس) نقشه خصوصیات خاک مورد نظر تهیه شد. داده‌های حضور گونه از پلات‌هایی که گونه در آنها مشاهده شد (حضور بر اساس پوشش > 5 درصد، تعداد نقاط حضور: ۴۸ نقطه) استخراج گردید. لایه‌های اقلیمی (بارندگی سالانه و دما از ایستگاه‌های هواشناسی اطراف، درون‌یابی با روش IDW با قدرت ۲ و جستجوی ۱۲ نقطه) و زمین‌شناسی (از نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی ایران، مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰؛ تمرکز بر تشکیلات آهکی و رسوبی کرتاسه) نیز تهیه و استفاده شد. بعد از تکمیل اطلاعات با توجه به هدف تحقیق برای مدل‌سازی رویشگاه



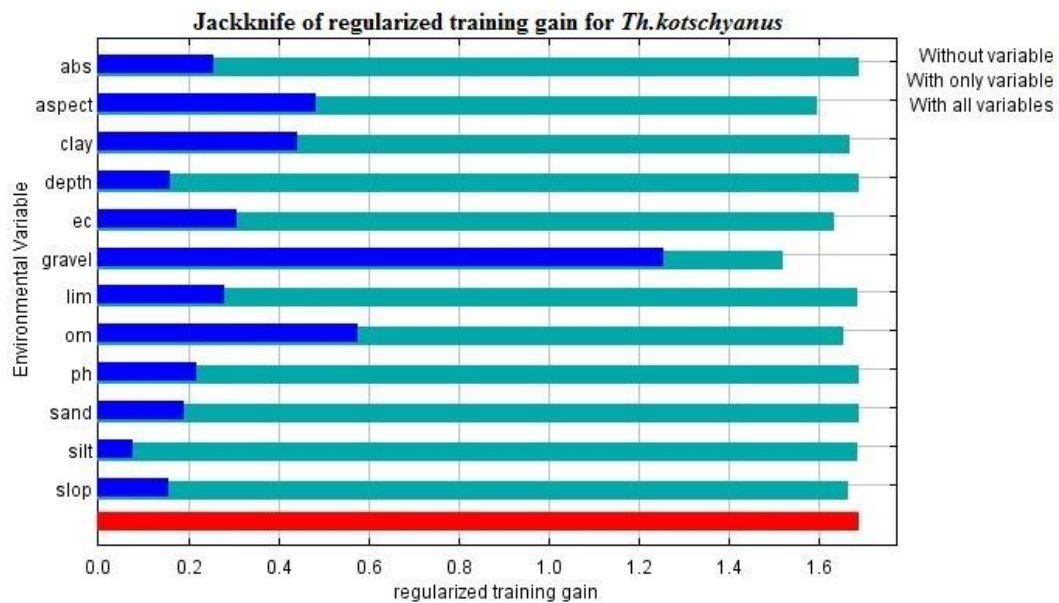
شکل ۲. مدل تغییرنمای خط برازش داده شده بر مدل تغییرنمای تجربی برای متغیر رس و نقشه رس خاک منطقه

نتایج

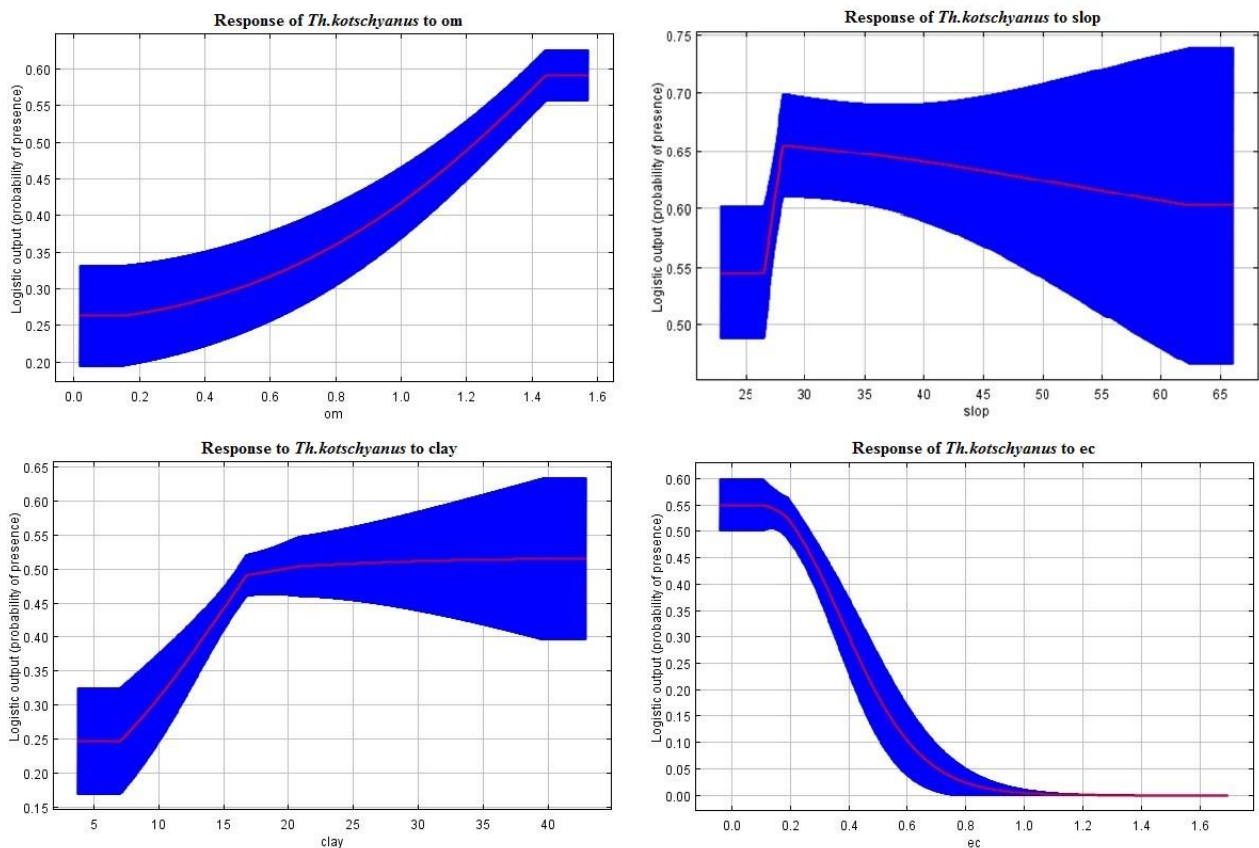
شکل (۲) مدل تغییرنمای خط برازش داده شده به مدل تغییرنمای تجربی متغیر رس (درصد) و نقشه درصد رس خاک را در منطقه نمونه‌برداری نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود درصد رس در قسمت بالادست منطقه و قسمتی که گونه آویشن کوهی در آن قرار دارد بیشتر از قسمت‌های پایین دست می‌باشد.

شکل (۳) اهمیت متغیرهای تأثیرگذار در حضور گونه آویشن کوهی توسط آزمون جک‌نایف را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج آزمون جک‌نایف، مهمترین متغیرهای تأثیرگذار در حضور این گونه در منطقه عوامل توپوگرافی، جهت و ارتفاع و از بین متغیرهای خاکی سنگریزه، ماده آلی و رس خاک هستند. این یافته نشان می‌دهد که خصوصیات توپوگرافی منطقه و بافت خاک تأثیر بسزایی در حضور و پراکنش آویشن کوهی دارند و متغیرهای محیطی دیگر هنگامی که به صورت جداگانه در عملیات جک‌نایف اجرا می‌شوند تأثیر کمتری دارند. محققان روش جک‌نایف را به عنوان یک روش ارزیابی با دقت عالی بیان کردند.

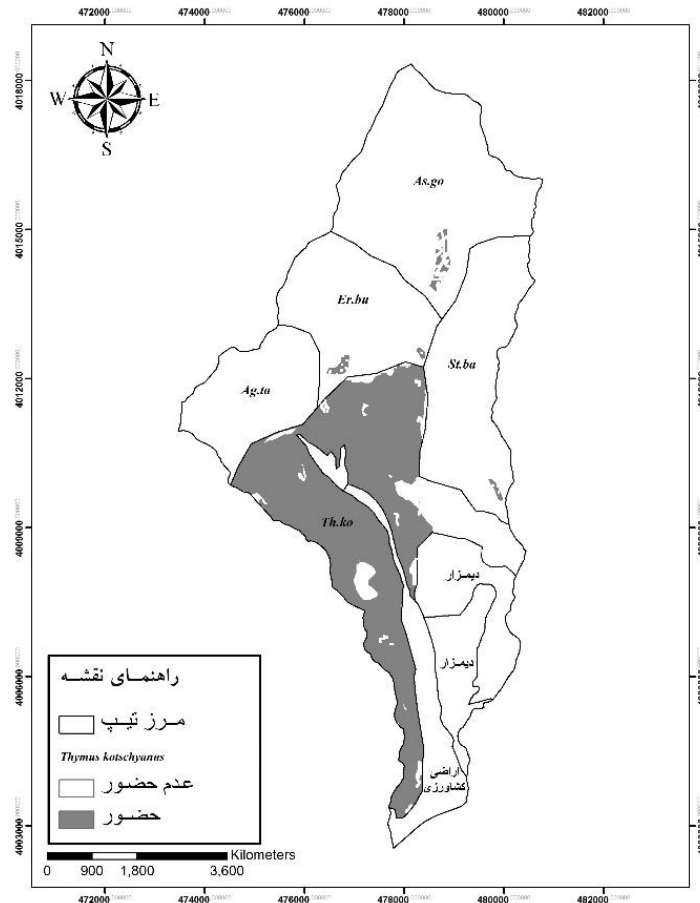
منحنی‌های پاسخ گونه‌ها به متغیرهای محیطی نشان می‌دهند که چگونه هر یک از متغیرهای محیطی پیش‌بینی‌های مدل Maxent را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به عنوان نمونه مهم‌ترین منحنی‌های پاسخ حضور آویشن کوهی نسبت به متغیرهای محیطی در شکل (۴) نشان داده شده است. سایه اطراف منحنی‌های پاسخ دامنه تغییرپذیری درصد احتمال حضور گونه‌ها را نشان می‌دهند. تحلیل منحنی‌های پاسخ مربوط به متغیرهای محیطی حاکی از آن است که احتمال حضور این گونه با افزایش ماده آلی افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش تدریجی رس خاک احتمال حضور گونه مذکور افزایش می‌یابد. در مورد متغیر شیب نیز با توجه به منحنی پاسخ گونه برای این متغیر، در شیب‌های ۲۵ تا ۳۰ درصد بیشترین تراکم و حضور را دارد. احتمال حضور گونه ۷۰ درصد است و با افزایش تدریجی شیب تا ۶۰ درصد احتمال حضور گونه کمتر شده و پراکنده‌تر نیز می‌شود. این در حالی است که افزایش هدایت الکتریکی خاک باعث کاهش احتمال حضور گونه مذکور می‌شود (حساسیت گونه به شوری پایین، که با اکولوژی گونه سازگار است و شاخص‌های کمی مدل بیانگر عملکرد مناسب



شکل ۳. اهمیت متغیرهای تأثیرگذار در حضور گونه *T. kotschyanus* توسط آزمون جک‌نایف



شکل ۴. مهمترین منحنی‌های پاسخ حضور گونه *T. kotschyanus* نسبت به متغیرهای محیطی (واحدها: درصد برای ماده آلی و رس، درجه برای شیب، dS/m برای EC)



شکل ۵. نقشه پیش‌بینی رویشگاه *T. kotschyanus*

جدول ۱. آستانه بهینه حضور و میزان تطابق نقشه پیش‌بینی گونه *T. kotschyanus* با واقعیت زمینی

گونه	آستانه بهینه حضور	ضریب کاپا	میزان توافق با واقعیت زمینی
<i>T. kotschyanus</i>	۰/۴۳	۰/۸۷	عالی

اساس نتایج به دست آمده از ارزیابی صحت با ضریب کاپا نقشه پیش‌بینی حاصل برای رویشگاه این گونه گیاهی، دارای توافق عالی با نقشه‌های واقعیت زمینی این گونه در منطقه مورد مطالعه است (۱۱). آستانه بهینه بر اساس بیشینه‌سازی Sensitivity+Specificity برابر ۰/۴۳ تعیین شد (حساسیت = ۰/۸۱، ویژگی = ۰/۷۸).

مدل‌سازی پراکنش گونه آویشن کوهی با استفاده از الگوریتم Maxent نشان داد که مقدار سطح زیر منحنی (AUC)

آن در تمایز زیستگاه‌های مطلوب و نامطلوب است؛ شوری کمتر از ۱ دسی‌زیمنس بر متر (1 ds/m) برای گونه‌های حساس مانند آویشن محدودکننده نیست، اما در این منطقه عامل تمایز است).

شکل ۵، نقشه پیش‌بینی رویشگاه گونه آویشن کوهی بدست آمده از مدل Maxent را نشان می‌دهد. جدول ۱، مقادیر آستانه بهینه حضور و میزان تطابق نقشه‌های پیش‌بینی به دست آمده از مدل Maxent را با واقعیت زمینی (نقشه تیپ‌های گیاهی از بازدید میدانی) در رویشگاه گونه مورد بررسی نشان می‌دهد. بر

برابر با ۰/۸۱۴ بوده است که بیانگر دقت خوب مدل در پیش‌بینی رویشگاه این گونه است. (۲۶).

بحث و نتیجه‌گیری

مدل‌های پیش‌بینی رویشگاه، مطلوبیت رویشگاه را در ارتباط با عوامل مهم تأثیرگذار بر ترجیح گونه‌ها مشخص می‌کنند (۵). بررسی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل Maxent رویشگاه آویشن کوهی را در سطح بسیار خوب پیش‌بینی کرده است. به‌طوریکه ضریب کاپا به‌دست آمده بر اساس مقایسه نقشه پیش‌بینی‌شده با واقعیت زمینی (نقشه تیپ-های گیاهی حاصل از بازدید میدانی مستقل)، برابر ۰/۸۷ بود. این یافته با مطالعات اخیر در زمینه مدل‌سازی توزیع گونه‌ها هم‌خوانی دارد (۲ و ۳۴). مقادیر کاپای بالاتر از ۰/۷۵ نشان دهنده یک مدل عالی است (۱۴). منحنی‌های پاسخ گونه‌ها به متغیرهای محیطی و جداول مربوط به درصد تأثیرگذاری متغیرهای محیطی در این پژوهش حاکی از آن است که این گونه در منطقه مورد مطالعه توزیع تصادفی ندارد و متغیرهای مربوط به توپوگرافی به خصوص جهت و ارتفاع در پیدایش رویشگاه گونه مورد بررسی نقش به‌سزایی دارند. آزمون جک-نایف مهمترین متغیرهای تأثیرگذار در پراکنش گونه آویشن کوهی در منطقه را عوامل توپوگرافی جهت و ارتفاع و از بین متغیرهای خاکی سنگریزه، ماده آلی و رس خاک نشان داد. (۷ و ۲۷). این نتایج با پژوهش‌های انجام‌شده در مراتع ایران، مانند مطالعه محمدی و همکاران (۲۰۲۳) درباره گونه‌های مرتعی و دارویی، سازگار است که نشان داد بافت خاک و عوامل توپوگرافی در پراکنش گونه‌های گیاهی نقش کلیدی دارند (۱۷). نتایج تحقیقی در منطقه اشتهاارد نشان داد در مناطق خشک پوشش گیاهی با آن دسته از عوامل محیطی، مانند بافت خاک، رابطه قوی‌تری دارد که به‌نحوی در کنترل آب قابل دسترس نقش دارند (۳۰)، در حالی که بر اساس نظر پژوهشگران در مناطق مرطوب، رطوبت محدودکننده نیست و عوامل اقلیمی و پستی و بلندی نقش بیشتری دارند (۳۲). ارتباط بین عوامل توپوگرافی و

اقلیمی با پوشش گیاهی توسط محققان دیگری نیز تأیید شده است (۶ و ۲۵). بالاترین احتمال حضور این گونه در مقدار آهک صفر تا ۲ درصد بوده است و افزایش آهک خاک احتمال حضور گونه در منطقه را کاهش می‌دهد. نتایج پژوهش‌های دیگری که در منطقه طالقان میانی انجام شده است نیز مؤید این مطلب است (۲۳ و ۳۱). آهک از نمک‌هایی است که حلالیت کمی در آب دارد و زمانی که به صورت محلول درآید تولید یک قلیای قوی نموده و رشد گیاهانی که به pH اسیدی نیاز دارند را با مشکل مواجه می‌کند. البته برخی از گیاهان با میزان زیاد این ماده در خاک سازگار شده و در خاک‌هایی با میزان آهک بالا نیز استقرار می‌یابند. با توجه به منحنی پاسخ گونه آویشن کوهی به میزان هدایت الکتریکی خاک منطقه، با افزایش هدایت الکتریکی تا مقدار ۰/۴۶۳ دسی‌زیمنس بر متر احتمال حضور گونه کاهش می‌یابد. این حساسیت به شوری پایین با اکولوژی گونه سازگار است، بنابراین، مدل در کشف روابط موفق بوده است. اگرچه شوری کمتر از ۱ دسی‌زیمنس بر متر برای گونه‌های حساس مانند آویشن محدودکننده نیست، اما در این منطقه می‌توان آن را عامل تمایز دانست (۱۹). همچنین افزایش سیلت خاک تأثیر مثبت بر حضور و پراکنش گونه مورد بررسی دارد. این گیاه خاک‌های نیمه‌عمیق، عمیق، بافت متوسط، بدون شوری و قلیایی را می‌پسندد و در خاک‌هایی که درصد رس بیشتری دارند، از فراوانی بیشتری برخوردار است (۴). پژوهشگران دیگری نیز در تحقیقات خود نقش بافت خاک را در پراکنش پوشش گیاهی مورد تأیید قرار داده‌اند (۳ و ۱۵). آزمون جک‌نایف مهمترین متغیرهای تأثیرگذار در پراکنش آویشن کوهی در منطقه را جهت، ارتفاع، رس و شن نشان داد. در پژوهشی در مراتع دنبیلد طالقان مشخص شد که رویشگاه گونه *Agropyron intermedium* با شیب همبستگی معنی‌دار دارد و در خاک‌هایی با شیب بالا و آهک و اسیدیته اندک احتمال حضور این گونه افزایش می‌یابد (۲۹). برای به‌کار بردن چنین پیش‌بینی‌های بوم‌شناختی در راستای اقدامات حفاظتی و مدیریتی، مدل مطلوبیت رویشگاه باید ساده و دارای توان پیش-

بینی بالا باشد. همچنین این مدل باید کاربرد گسترده‌ای داشته باشد و بر اساس پارامترهایی اجرا شود که به آسانی قابل اندازه‌گیری باشند. کاربرد مدل مکسنت در این مطالعه نشان‌دهنده قابلیت بالای این روش در مدیریت جوامع گیاهی و حفاظت از گونه‌های دارویی مانند آویشن کوهی است، به‌ویژه در مناطقی که تحت فشار تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی قرار دارند (۲۶ و ۳۳). با این حال، محدودیت‌هایی مانند عدم در نظر گرفتن اثرات تعاملات گونه‌ای و تغییرات فصلی در داده‌های حضور گونه ممکن است بر دقت پیش‌بینی‌ها تأثیر بگذارد (۲۴). مقایسه نتایج این مطالعه با مدل‌های دیگر، مانند رگرسیون لجستیک که در مراتع طالقان برای گونه‌های مشابه استفاده شده، نشان می‌دهد که مکسنت به دلیل انعطاف‌پذیری در استفاده از داده‌های فقط حضور، عملکرد بهتری دارد (۲۸). از منظر مدیریتی، نتایج این مطالعه می‌تواند به برنامه‌ریزی برای احیای جوامع گیاهی و حفاظت از گونه‌های دارویی در طالقان کمک کند. پیشنهاد می‌شود که در برنامه‌های مدیریت پوشش گیاهی، تمرکز بر کاهش عوامل محدودکننده مانند آهک خاک و بهبود شرایط توپوگرافی برای گونه‌های مرتعی باشد (۱۲). همچنین، تحقیقات آینده می‌تواند با ترکیب داده‌های سنجش از دور و مدل‌های پویا، اثرات تغییرات اقلیمی بر توزیع آویشن کوهی را بررسی کنند (۱). در نهایت، این مطالعه بر اهمیت

استفاده از مدل‌های پیشرفته مانند مکسنت برای حمایت از تصمیم‌گیری‌های زیست‌محیطی در اکوسیستم‌های شکننده مرتعی تأکید دارد (۲). نتایج این پژوهش نشان داد که پراکنش بالقوه گونه مذکور به‌طور مستقیم تحت تأثیر متغیرهای محیطی خاص و الگوی مکانی مشخصی قرار دارد و مدل Maxent با دقت قابل قبول توانست مناطق مستعد رویش این گونه را شناسایی کند. بر این اساس، نواحی با مطلوبیت زیستگاهی بالا که در نقشه پیش‌بینی‌شده مشخص شده‌اند، باید به‌عنوان اولویت‌های اصلی حفاظت در نظر گرفته شوند. همچنین، از آنجا که کاهش کیفیت زیستگاه می‌تواند منجر به محدود شدن رویش و بازایی این گونه شود، مدیریت چرای دام، جلوگیری از تخریب اراضی و کنترل بهره‌برداری بی‌رویه در این مناطق ضروری است. در مجموع، نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی حفاظتی و مدیریت پایدار رویشگاه‌های آویشن کوهی در منطقه مورد مطالعه قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از معاونت محترم پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران برای حمایت‌های مادی و معنوی در انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند.

منابع

1. Araújo, M.B., Anderson, R.P., Barbosa, A.M., Beale, C.M., Dormann, C.F., Early, R. and Rahbek, C., 2023. Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Science Advances*, 9(3): eabq1234.
2. Ashrafzadeh, M.R., and Danehkar, A., 2012. Habitat suitability assessment and modeling as a strategy for sustainable wildlife management. First National Conference on Strategies for Achieving Sustainable Development, Tehran. (In Persian)
3. Azarnivand, H., Jafari, M., Moghadam, M., and Zare Chahouki, M.A., 2011. Effect of soil properties and elevation changes in the distribution of two species of *Artemisia* (Case Study: Vardavrd, Semnan and Garmsar Rangeland). *Journal of Rangeland*, 56(1-2): 93-100. (In Persian)
4. Azarnivand, H., and Zare Chahouki, M.A., 2008. Range Improvement. Tehran University Press. 354 pp. (In Persian)
5. Behmanesh, B., Tabasi, E., Fakhireh, A., and Khalasi Ahvazi, L., 2019. Modeling the distribution of medicinal plant species of *Thymus kotschyianus* and *Achillea millefolium* using ENFA and logistic regression. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 6: 91-120. (In Persian)
6. Downie, A.L., Numers, M.v., and Boström, Ch., 2013. Influence of model selection on the predicted distribution of the seagrass *Zostera marina*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 121: 8-19.
7. Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., and Yates, C.J., 2021. A statistical explanation of Maxent for ecologists. *Diversity and Distributions*, 27(1): 45-57.

8. Gaston, A., Juan, I., and Garcia-Viñas., 2011. Modelling species distributions with penalised logistic regressions: A comparison with maximum entropy models. *Ecological Modelling*, 222: 2037-2041.
9. Graham, C.H., Ferrier, S., Huettman, F., Moritz, C., and Peterson, A.T., 2004. New developments in museum-based informatics and applications in biodiversity analysis. *Trends in Ecology and Evolution*, 19(9): 497-503.
10. Guisan, A., Thuiller, W., and Zimmermann, N.E., 2023. Habitat suitability and distribution models: Applications in ecology and conservation. Cambridge University Press.
11. Hosseini, N., Ghorbanpour, M. and Mostafavi, H., 2024. Habitat potential modelling and the effect of climate change on the current and future distribution of three *Thymus* species in Iran using Maxent. *Scientific Reports*, 14(1): 3641.
12. Hosseini, S.Z., Kappas, M., and Zare Chahouki, M.A., 2022. Modeling habitat suitability for rangeland species in central Iran using geospatial and machine learning approaches. *Rangeland Ecology and Management*, 80: 45-53. (In Persian)
13. Hosseini, S.Z., Kappas, M., Zare Chahouki, M.A., Gerold, G., Erasni, D., and Rafiei Emam, A., 2013. Modelling potential habitats for *Artemisia sieberi* and *Artemisia aucheri* in Poshtkouh area, central Iran using the maximum entropy model and geostatistics. *Ecological Informatics*, 18: 61-68. (In Persian)
14. Kia, F., Tavili, A., and Javadi, S.A., 2011. Relationship between some rangeland species distribution and environmental factors in Chahar-Bagh region of Golestan province. *Journal of Rangeland*, 5(3): 292-301. (In Persian)
15. Kumar, S., and Stohlgren, J.T., 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 1(4): 094-098.
16. Lemke, D., Hulme, P.E., Brown, J.A., and Tadesse, W., 2011. Distribution modelling of Japanese honeysuckle (*Lonicera japonica*) invasion in the Cumberland Plateau and Mountain Region, USA. *Forest Ecology and Management*, 262(2): 139-149.
17. Mohammadi, S., Ebrahimi, A., and Erfani, M., 2023. Predicting habitat suitability for rangeland species in Iran using Maxent: A case study of *Artemisia* spp. *Journal of Arid Environments*, 210: 104-112. (In Persian)
18. Nazari, S., Jafarian, Z., Alavi, J., and Naghi Poor, A.A., 2020. The impact of climate change on the geographic distribution of *Thymus Kotschyanus* (Boiss and Hohen) using ensemble modelling. *Ecology of Iranian Forests*, 9(3): 1-16. (In Persian)
19. Hosseini, N., Ghorbanpour, M. and Mostafavi, H., 2024. The influence of climate change on the future distribution of two *Thymus* species in Iran: Maxent model-based prediction. *BMC Plant Biology*, 24(1): 269.
20. Negga, H.E. 2007. Predictive Modelling of Amphibian Distribution Using Ecological Survey Data: a case study of Central Portugal. Master thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands.
21. Pearson, R.G. 2007. Species' Distribution Modeling for Conservation Educators and Practitioners. Synthesis. American Museum of Natural History. Available at <http://ncep.amnh.org>.
22. Peterson, A.T., Papes, M., and Eaton, M., 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography*, 30: 550-556.
23. Piry Sahragard, H., Azarnivand, H., Zare Chahouki, M.A., Arzani, H., and Qumi, S., 2011. Study of Effective Environmental Factors on Distribution of Plant Communities in Middle Taleghan Basin. *Journal of Range and Watershed Management, Iranian Journal of Natural Resources*, 64(1): 1-12. (In Persian)
24. Radosavljevic, A., and Anderson, R.P., 2024. Advances in ecological niche modeling: Addressing uncertainty and improving predictions. *Trends in Ecology and Evolution*, 39(2): 150-161.
25. Rota, T.Ch., Fletcher, J.R., Jason, M.E., and Hutto, L.R., 2011. Does accounting for imperfect detection improve species distribution models. *Ecography*, 34: 659-670.
26. Sofaer, H.R., Jarnevich, C.S., Pearse, I.S., Smyth, R.L., Auer, S., Cook, G.L., Edwards Jr, T.C., Guala, G.F., Howard, T.G., Morisette, J.T. and Hamilton, H., 2019. Development and delivery of species distribution models to inform decision-making. *BioScience*, 71(6): 651-669.
27. Valavi, R., Elith, J., Lahoz-Monfort, J.J., and Guillera-Aroita, G., 2022. Modelling species distributions with presence-only data: A case study using Maxent. *Ecological Modelling*, 465: 109857.
28. Zare Chahouki, M.A., Abbasi, M., and Azarnivand, H., 2015. Evaluation of the capability of the logistic regression model in preparing the spatial distribution map of plant species in the Taleghan rangelands. Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran. (In Persian)
29. Zare Chahouki, M.A., and Zare Chahouki, A., 2010. Predicting the distribution of plants species using logistic regression (Case study: Garizat rangelands of Yazd province). *Desert Journal*, 15: 151-158. (In Persian)
30. Zare, Chahouki, M., Nodehi, R., and Tavili, A., 2011a. Investigation on relationship between plant diversity and environmental factors in Eshtehard rangelands. *Journal of Arid Biom Scientific and Research*, 1(2): 41-49. (In Persian)

-
31. Zare, Chahouki, M.A., Zarei, A., and Jafari, M., 2011b. Effective environmental factors on distribution of plant species (Case study: Donbalid rangelands of Taleghan). *Journal of Watershed Management Research (Pajouhesh and Sazandegi)*, 94: 65-73. (In Persian)
 32. Zare, Chahouki, M.A., Ghomi, S., and Azarnivand, H., 2009. Relationship between vegetation diversity and environmental factors in Taleghan rangelands. *Journal of Rangeland*, 10(1): 171-180. (In Persian).
 33. Zhang, K., Yao, L., Meng, J., and Tao, J., 2022. Maxent modeling for predicting potential distribution of endangered species under climate change scenarios. *Ecological Informatics*, 68: 101547.
 34. Zurell, D., Franklin, J., König, C., Bouchet, P.J., Dormann, C.F., Elith, J., Fandos, G., Feng, X., Guillera-Arroita, G., Guisan, A. and Lahoz-Monfort, J.J., 2020. A standard protocol for reporting species distribution models. *Ecography*, 43(9): 1261-1277.

Ecological Analysis and Habitat Suitability Modeling of the Medicinal Plant *Thymus kotschyanus* in the Taleghan Watershed Using the Maximum Entropy (Maxent) Model

Mojtaba Akhavan Armaki^{1*} and Melika Hashemi¹

(Received: June 07-2025; Accepted: April 07-2026)

Abstract

The aim of this study was to conduct an ecological analysis and habitat suitability modeling of the medicinal plant *Thymus kotschyanus* in the Taleghan watershed using the Maxent model. A total of 48 occurrence points were spatially thinned to reduce sampling bias. Environmental variables, including topography (elevation, slope, aspect), soil properties, climate, and geology, were prepared and resampled to a common resolution of 30 × 30 m. Climatic data were based on 30-year averages, with interpolation accuracy evaluated using RMSE and R². The model was run using LQH feature classes, a regularization multiplier of 1, with 10 replicates and cross-validation. It performed well (AUC = 0.844, Kappa = 0.87). The optimal threshold was 0.43, with sensitivity of 0.81 and specificity of 0.78. Aspect, elevation, clay content, and soil organic matter were the most influential variables. Results highlight the significant roles of topographic and soil factors in shaping the habitat suitability for *T. kotschyanus*.

Keywords: Maxent, Species distribution modeling, *Thymus kotschyanus*, Maximum entropy, Habitat suitability

1- Ph.D. of Range Management, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Tehran, Iran.

* Corresponding Author, Email: mtakhavan@ut.ac.ir