



دانشگاه گند کاووس

نشریه "حافظت زیست بوم گیاهان"
دوره ششم، شماره سیزدهم
<http://pec.gonbad.ac.ir>

پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر توزیع جفرافیایی گونه (*Pistacia atlantica*) در منطقه زاگرس

مرکزی

علی اصغر نقی‌بور برج^۱، مریم حیدریان آفاخانی^۲، حامد سنگونی^۳

استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

آشناس آموخته دکتری علوم مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری

دکتری علوم مرتع، استاد مدعو گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تربت‌حیدریه، تربت
حیدریه

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۵

چکیده

پیش‌بینی توزیع بالقوه گونه‌های گیاهی بالارزش و در معرض خطر در پاسخ به تغییر اقلیم، امری ضروری در جهت حفاظت و مدیریت آن‌ها محسوب می‌شود. این مطالعه باهدف پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر توزیع جفرافیایی گونه پسته وحشی یا بهنه (Pistacia atlantica) در استان چهارمحال و بختیاری واقع در منطقه زاگرس مرکزی انجام شد. در این مطالعه از ۱۹ متغیر زیست‌اقلیمی حاصل از دما و بارش و سه متغیر فیزیوگرافی، به عنوان ورودی مدل حداکثر آنتروپی (MaxEnt) استفاده شد. نتایج نشان داد که به ترتیب میزان بارش سالیانه، دامنه تغییرات سالیانه دما و تغییرات فصلی دما بیشترین سهم را در تعیین مطلوبیت رویشگاه گونه بهنه داشتند. براساس نتایج حاصل از مدل سازی حداکثر آنتروپی، سطح رویشگاه مناسب برای گونه بهنه در استان چهارمحال و بختیاری حدود ۱۴/۷ درصد (۲۴۱۳/۷ کیلومترمربع) می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که وسعت رویشگاه گونه بهنه در سال ۲۰۵۰ در مقایسه با حال حاضر تحت سناریو RCP۴/۵ حدود ۸/۱۱ درصد و تحت سناریو RCP۸/۵، حدود ۱۱ درصد کاهش خواهد یافت. با توجه به دقت بالای مدل حداکثر آنتروپی در پیش‌بینی پراکنش گونه موردمطالعه (AUC=۰/۹۲)، از نتایج این مطالعه می‌توان در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی و اصلاحی گونه بهنه استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: استان چهارمحال و بختیاری، تناسب رویشگاه، مدل گردش عمومی، مدل سازی پراکنش گونه‌ای

نویسنده مسئول: aa_naghipour@yahoo.com*

مقدمه

رون داده‌های آبوهوازی در چند دهه اخیر و همچنین نتایج حاصل از خروجی مدل‌های پیش‌بینی تغییر اقلیم، حکایت از افزایش میانگین درجه حرارت کره زمین به عنوان عامل اصلی زنجیره تغییرات اقلیمی و همچنین تغییر در الگوهای بارش می‌باشد (Linstädter and Zielhofer, ۲۰۱۰). میانگین درجه حرارت سالانه در طی قرن حاضر بین $1/1$ تا $6/4$ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت (IPCC, ۲۰۱۴). یکی از اثرات مهم تغییر اقلیم بر گیاهان، تغییر در گستره جغرافیایی آن‌هاست (Lawler et al., ۲۰۰۶).

پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌های گیاهی بالرزش و مهم، امری ضروری در جهت حفاظت، ارزیابی سطح تهدیدات و مدیریت آن‌ها محسوب می‌شود (Rana et al., ۲۰۱۷); بنابراین لازم است که تصمیمات مدیریتی با درک اثرات بالقوه تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌ها و کاهش اثرات مخرب تغییر اقلیم بر تنوع زیستی اتخاذ شوند (Pressey et al., ۲۰۰۷). مدل‌های پراکنش گونه‌ای (Species Distribution Models) پرکاربردترین روش‌ها به منظور پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر تغییرات پراکنش گونه‌های گیاهی محسوب می‌شوند (Sinclair et al., ۲۰۱۰). این مدل‌ها به عنوان یک ابزار دقیق، سریع و کم هزینه به منظور یافتن رویشگاه‌های مطلوب و همچنین مدل‌سازی پراکنش گونه‌ها تحت ستاریوهای تغییر اقلیم به کاربرده می‌شوند (Franklin, ۲۰۱۰). در سال‌های اخیر، علاقه‌مندی به مدل‌های پراکنش گونه‌ای و مطالعات مرتبط با آن به طور چشمگیری افزایش یافته است. به طوری که از سال ۲۰۰۰ میلادی چندین جلد کتاب و مقاله مروری در این رابطه منتشر شده است (Booth et al., ۲۰۱۴). از جمله کتاب‌های مطرح می‌توان به فرانکلین (Franklin, ۲۰۱۰) و پترسون و همکاران (Peterson et al., ۲۰۱۱) اشاره نمود. همچنین از جمله مقالات مروری که به این موضوع پرداخته‌اند، می‌توان، گویسان و زیمرمن (Guisan and Zimmermann, ۲۰۰۰)، گویسان و تایلر (Guisan and Zimmermann, ۲۰۰۰) و الیت و لیدویک (Thuiller, ۲۰۰۵) و الیت و لیدویک (Elith and Leathwick, ۲۰۰۹) را نام برد.

مدل‌های پراکنش گونه‌ای ارتباط موجود بین نقاط حضور گونه و متغیرهای زیست‌محیطی را محاسبه می‌نمایند (Franklin, ۲۰۱۰). یکی از روش‌های پرکاربرد به منظور مطالعات ارزیابی پراکنش جغرافیایی گونه‌ها، مدل حداقل آنتروپی (MaxEnt) است. مدل حداقل آنتروپی روشی است که احتمال حضور گونه را در یک فضا بر اساس متغیرهای محیطی امکان‌پذیر نموده و به عنوان کارآمدترین رویکرد مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای محسوب می‌شود که نیازی به دانستن نقاط عدم حضور گونه ندارد و تنها بر اساس نقاط حضور گونه، مدل را پیش‌بینی می‌نماید (Elith et al., ۲۰۰۶). در سال‌های اخیر مطالعات متعددی در زمینه بررسی اثرات تغییر اقلیم بر پراکنش گونه‌های گیاهی توسط روش حداقل

آنتروپی انجام شده است (خوشبخت، ۱۳۹۵؛ شعبانی، ۱۳۹۵؛ فاطمی آذرخوارانی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Rana et al., ۲۰۱۷؛ Abolmaali et al., ۲۰۱۷).

جنگل‌های موجود در ناحیه رویشی زاگرس یکی از نواحی رویشی پنجم‌گانه ایران است که با دارا بودن سطحی معادل ۵ میلیون هکتار و همچنین سایر جنبه‌های خاص خود، منحصر به فرد می‌باشد (مروی‌مهراجر، ۱۳۸۴). در دهه‌های اخیر، بیشتر جنگل‌های زاگرس به دلیل عوامل مختلفی همچون تغییر کاربری اراضی، چرای بیش از حد دام، بهره‌برداری شدید، آتش‌سوزی و عوامل محیطی بهشت تخریب شده‌اند (نقی‌پور و فرخنیا، ۱۳۹۶؛ Naghipour et al., ۲۰۱۶). یکی از گونه‌های درختی مهم ناحیه رویشی زاگرس، پسته وحشی یا بنه (*Pistacia atlantica*) می‌باشد که علاوه بر خصوصیات اکولوژیکی منحصر به فرد، تأثیر زیادی بر زندگی مردم منطقه نیز دارد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۵). در سال‌های اخیر به علت برداشت مستمر از چوب، میوه، محصولات فرعی و بهره‌برداری‌های غیرمستقیم از عرصه‌های رویشگاهی گونه بنه همچون چرای مفترط، به فرسایش رویشگاه و عدم تجدید حیات آن منجر شده است (Pourreza et al., ۲۰۰۸). بنه از جمله گونه‌های بالارزشی است که سطح قابل توجهی از مناطق مختلف ایران را به خود اختصاص داده و از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی جایگاه ویژه‌ای دارد. متأسفانه رویشگاه‌های این گونه تخریب شده و آینده آن را با چالش جدی روپرتو نموده است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۵). از جمله مطالعات صورت گرفته در رابطه با مدل سازی پراکنش گونه بنه در زمان حال حاضر و آینده، می‌توان به کوژورایدزه و همکاران (Kozhoridze et al., ۲۰۱۵) اشاره نمود؛ که در تحقیق آن‌ها پراکنش گونه‌های جنس پسته در جهان مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج پیش‌بینی آن‌ها در رابطه با گونه بنه نشان داد که سطح رویشگاه مناسب برای این گونه در سال ۲۰۵۰ در مقایسه با زمان حال حاضر، حدود ۱۶ درصد و در سال ۲۱۰۰، ۴۰ درصد کاهش خواهد یافت.

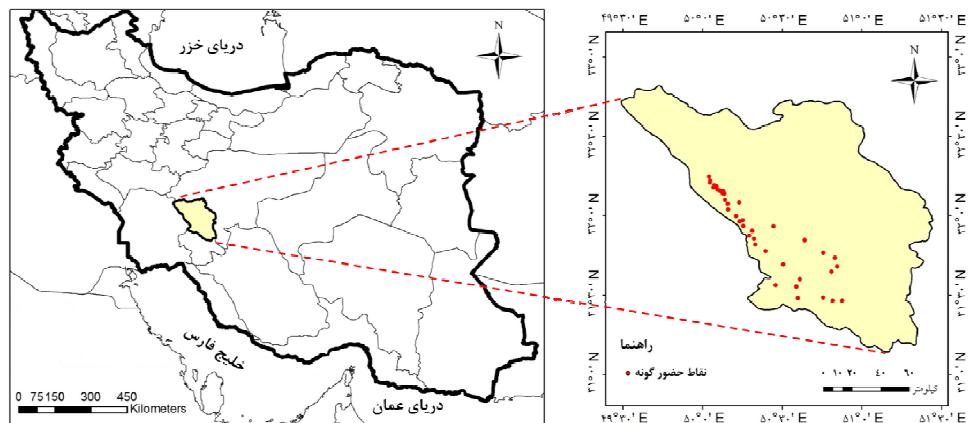
مطالعه حاضر در استان چهارمحال و بختیاری که بخش بزرگی از منطقه زاگرس مرکزی را به خود اختصاص داده است، انجام می‌شود. این منطقه دارای آب‌وهوا و خصوصیات طبیعی ویژه‌ای است که باعث شده است تا با داشتن فون و فلور منحصر به فرد از لحاظ تنوع زیستی از اهمیت بالایی برخوردار باشد (Hunnam, ۲۰۱۱). با توجه به تنوع بالای فیزیوگرافی، امکان بررسی عکس‌العمل گونه موردمطالعه به تغییرات اقلیمی در این منطقه از نظر تئوری وجود دارد و همین موضوع، این منطقه را به عنوان منطقه‌ای مناسب برای مطالعه اثرات تغییرات اقلیم بر پراکنش مکانی گونه‌های مختلف گیاهی مطرح می‌نماید. با توجه به اهمیت موضوع، مطالعه حاضر با هدف بررسی پراکنش گونه گیاهی بنه به عنوان یک گونه مهم و اقتصادی در جنگل‌های زاگرس و شناسایی مهم‌ترین عوامل زیست‌اقلیمی تأثیرگذار بر پراکنش این گونه با استفاده از روش حداکثر آنتروپی انجام پذیرفت. همچنین پیش‌بینی

الگوی پراکنش این گونه در سال ۲۰۵۰ تحت سناریوهای اقلیمی RCP۴/۵ و RCP۸/۵ و مدل گردش عمومی HadGEM2-CC جهت اتخاذ راهکارهای حفاظتی مناسب از اهداف دیگر این تحقیق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

یکی از مهم‌ترین جنس‌های اقتصادی تیره *Anacardiaceae* بوده و شامل حداقل ۱۱ گونه با فرم رویشی درختچه یا درختی می‌باشد (Farhoosh and Tavakoli, ۲۰۰۸; Fayyaz et al., ۲۰۱۳). گونه‌های گیاهی موجود در این جنس، خزان‌کننده و یا همیشه‌سبز و دوپایه می‌باشند که با سه گونه بومی *P. atlantica* و *P. khinjuk*, *P. vera* در بیشتر مناطق کوهستانی ایران توزیع شده‌اند (خراسانی و همکاران، ۱۳۹۳). پسته وحشی یا بنه (*Pistacia atlantica* Desf.) یکی از گونه‌های بومی محسوب شده که دارای گستره پراکنش قابل توجهی بوده و به عنوان گونه‌ای ایران-تورانی شناخته می‌شود (Farhoosh and Tavakoli, ۲۰۰۸). گونه بنه درخت یا درختچه‌ای دوپایه، برگ‌ریز به ارتفاع ۲ تا ۷ متر با تاج پوشش گسترده بوده که دارای برگ‌های مرکب شانه‌ای و میوه‌ای شفت با مصرف خوراکی می‌باشد (AL-Saghir, ۲۰۱۰). این گونه $\frac{2}{4}$ میلیون هکتار از جنگل‌های نیمه‌خشک غرب و شمال غرب ایران را به خود اختصاص داده است. به دلیل تولید سفر در اندام‌های هوایی و میوه، این گیاه به عنوان سرمایه ملی کشور محسوب می‌شود (خراسانی و همکاران، ۱۳۹۳؛ حیدری و همکاران، ۱۳۹۵). این گونه درختی سازگار با آبوهواهی خشک، مناسب زمین‌های سبک و سنگلاخی و کاملاً نورپسند است که باعث شده بیشتر در شیب‌های جنوبی دیده شود (جهانبازی گوجانی و همکاران، ۱۳۸۵؛ حیدری و همکاران، ۱۳۹۵). خاک رویشگاه‌های این گونه از نوع لیتوسول با بافت متوسط تا سنگین که بیشتر در اراضی کوهستانی می‌باشد و بیشترین گسترش این گونه در اقلیم‌های نیمه‌خشک سرد و مدیترانه‌ای است (طهماسبی و فتاحی، ۱۳۸۰). همچنین ارتفاع رویش این گونه در سطح جنگل‌های زاگرس از ارتفاع ۹۰۰ تا ۲۸۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد (Fayyaz et al., ۲۰۱۳).

مطالعه حاضر در استان چهارمحال و بختیاری واقع در منطقه زاگرس مرکزی و با مساحتی حدود ۱/۶۵ میلیون هکتار (حدود ۱ درصد از مساحت کشور) انجام شد. این استان بین ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و نیز ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی قرار دارد. بارش متوسط سالانه استان حدود ۵۶۰ میلی‌متر است که در مناطق مرتفع عمدها به صورت برف می‌باشد (سلطانی و همکاران، ۱۳۸۹). این تحقیق در مناطق عمده رویش گونه گیاهی پسته وحشی یا بنه در استان چهارمحال و بختیاری انجام شد (شکل ۱).

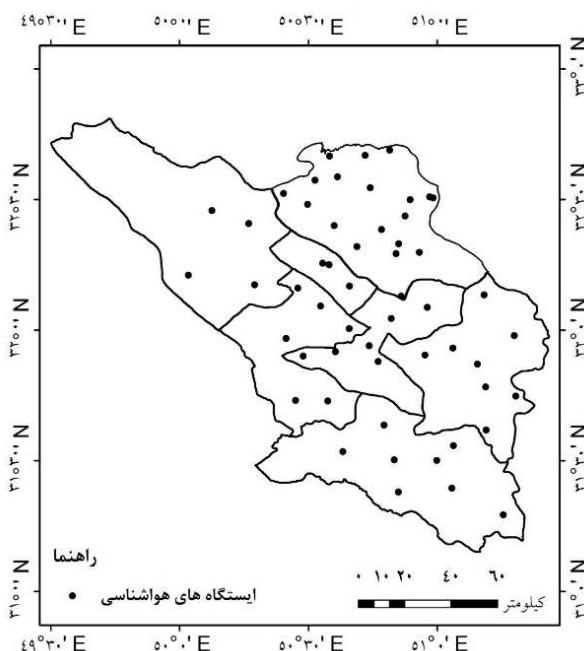


شکل ۱- موقعیت استان چهارمحال و بختیاری در ایران به همراه نقاط ثبت شده حضور گونه

نقاط حضور گونه بر اساس بررسی‌های مستقیم میدانی در مناطق پراکنش گونه بنه در کل استان چهارمحال و بختیاری جمع‌آوری گردید. بازدید از مناطق حضور گونه در سطح استان انجام شده و با استفاده سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) نقاط مدنظر ثبت گردید. در ثبت نقاط وقوع گونه، سعی شد، مناطقی به عنوان وقوع گونه در نظر گرفته شوند که گونه موردنظر حداقل یک لکه به مساحت یک کیلومترمربع را تحت پوشش قرار دهد. همچنین نقاط نمونه‌برداری شده از یکدیگر حداقل یک کیلومتر فاصله داشته باشند. با توجه به شرایط ذکر شده، درنهایت ۴۰ نقطه حضور گونه انتخاب شد (شکل ۱).

مطالعه حاضر برای دو دوره زمانی حال حاضر و یک دوره زمانی ۲۰۵۰ برای آینده انجام شد. ابتدا متغیرهای دما و بارش ماهیانه و لایه مدل رقومی ارتفاع (DEM) منطقه مورد مطالعه به صورت رستری و ریزمقیاس شده و با دقت ۳۰ ثانیه از پایگاه اطلاعاتی Worldclim (Hijmans et al., ۲۰۰۵) دریافت شد. سپس از داده‌های بارش ماهانه و دمای میانگین ماهانه ایستگاه‌های کلیماتولوژی و سینوپتیک (۵۰ ایستگاه) که در استان وجود داشتند به منظور اصلاح پیکسل‌های ارزش پیکسلی مکان ایستگاهها از ۲۴ لایه موردنظر (۱۲ لایه میانگین طولانی‌مدت بارندگی به صورت ماهانه و ۱۲ لایه میانگین طولانی‌مدت دما به صورت ماهانه) در آن‌ها استخراج شد. مقادیر ایستگاه‌ها به عنوان X و Y به منظور اصلاح موجود در پیکسل به عنوان X در نظر گرفته شدند. رابطه موجود بین مقادیر X و Y به منظور اصلاح پیکسل‌های دانلود شده مورد استفاده قرار گرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار Curve expert، بهترین معادله‌ای که رابطه بین مقدار موجود در پیکسل و مقدار ثبت شده در مقطع زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ در هر ایستگاه را نشان می‌داد تعیین شد. در مرحله بعدی رابطه حاصله برای هر لایه در محیط سامانه

اطلاعات جغرافیایی ۱۰.۳ و با استفاده از ابزار Raster calculator اعمال شد. سپس توسط لایه‌های دما و بارندگی اصلاح شده، لایه‌های ۱۹ متغیر زیست-اقلیمی (Bioclimatic variables) در نرم‌افزار DIVA-GIS تولید شدند. توضیحات مربوط به ۱۹ متغیر زیست-اقلیمی مربوطه در جدول ۱ آورده شده است. این متغیرهای زیست-اقلیمی برای رشد و توسعه گونه‌ها مهم بوده و به طور گسترده‌ای برای بررسی پراکنش گونه‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرند (Warren et al., ۲۰۱۳).



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی به کارفته برای اصلاح لایه‌های اقلیمی در منطقه مورد مطالعه

از نقشه مدل رقومی ارتفاع در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه‌های درصد شیب و جهت شیب تولید شد و به عنوان متغیرهای فیزیوگرافی مورد استفاده قرار گرفت. کل لایه‌های محیطی از نظر محدوده، تعداد پیکسل و سیستم تصویر در نرم‌افزار ArcGIS یکسان‌سازی گردیدند. با توجه به این موضوع که همبستگی بین متغیرهای ورودی به مدل می‌تواند باعث ایجاد خطای قابل توجهی در خروجی مدل شود، ابتدا وجود همبستگی بین متغیرهای زیست‌اقلیمی اصلاح شده و متغیرهای فیزیوگرافی توسط آزمون آماری پیرسون (Pearson) بررسی شد. سپس لایه‌هایی با بیش از ۰/۸ (همبستگی بالا)، تعیین شده و لایه‌هایی با درجه اهمیت کمتر برای گونه مورد مطالعه حذف گردیدند (Rana et al., ۲۰۱۷). درنهایت و پس از حذف لایه‌های دارای همبستگی بالا و غیر ضروری، ۸ متغیر

شامل درصد شیب، جهت شیب، شاخص همدمایی، تغییرات فصلی دما، دامنه سالانه دما، میانگین دمای خشکترین فصل سال، مجموع بارندگی سالانه و مجموع بارندگی کمبارش ترین فصل سال به عنوان ورودی مدل‌ها انتخاب گردیدند.

جدول ۱- توصیف اقلیمی متغیرهای زیست‌اقلیمی

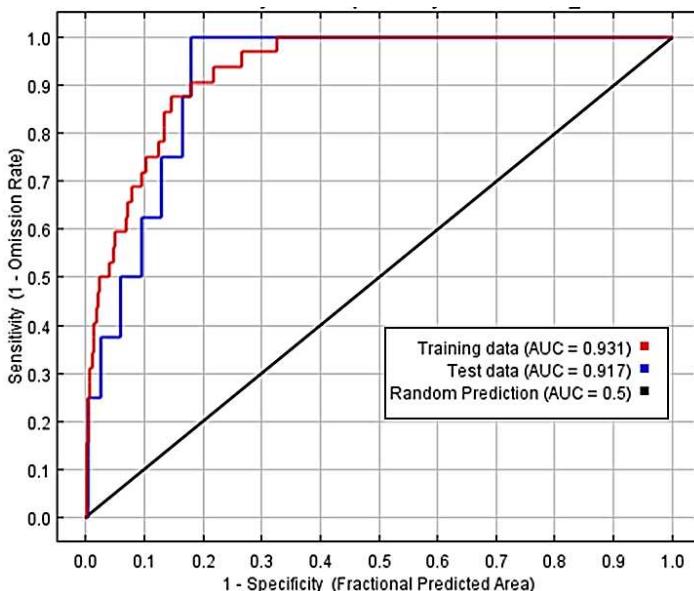
نامه متغیر	توصیف اقلیمی	نامه متغیر
BIO _{۱۱}	میانگین دمای سرددترین فصل سال	BIO _۱
BIO _{۱۲}	مجموع بارندگی سالانه	BIO _۲
BIO _{۱۳}	مجموع بارندگی پربارش ترین ماه	BIO _۳
BIO _{۱۴}	مجموع بارندگی کمبارش ترین ماه	BIO _۴
BIO _{۱۵}	تغییرات فصلی بارندگی (ضریب تغییرات)	BIO _۵
BIO _{۱۶}	حداقل دمای سرددترین ماه سال	BIO _۶
BIO _{۱۷}	مجموع بارندگی پربارش ترین فصل سال	BIO _۷
BIO _{۱۸}	مجموع بارندگی گرم‌ترین فصل سال	BIO _۸
BIO _{۱۹}	مجموع بارندگی سرددترین فصل سال	BIO _۹
	میانگین دمای گرم‌ترین فصل سال	BIO _{۱۰}

مدلهای گردش عمومی ابزارهای قابل اعتماد و قدرتمندی برای افزایش درک عوامل مؤثر بر اقلیم و بهبود توانایی پیش‌بینی الگوهای اقلیمی آینده هستند. در این مطالعه از مدل گردش عمومی HadGEM2-CC استفاده شد که صحت پیش‌بینی آن در نیمکره شمالی تأیید شده است (Sutton et al., ۲۰۱۴). در این مطالعه از دو سناریو اقلیمی RCP4/5 و RCP8/5 استفاده شد که به ترتیب سناریوهای متعادل و بدینانه هستند. مدل‌سازی پراکنش گونه‌ای حال حاضر و آینده گونه موردمطالعه با استفاده از مدل حداقل آنتروپی و با استفاده از نرم‌افزار MaxEnt (Phillips et al., ۲۰۰۶) انجام شد. داده‌های حضور گونه بهنجه با ۸ متغیر اقلیمی و با تکرار ۱۰ بار با استفاده از نرم‌افزار MaxEnt مورد تحلیل قرار گرفت. برای حساسیت‌سنجی مدل و مشخص کردن متغیرهای مهم در پراکنش، از تحلیل جکنایف استفاده شد. برای ارزیابی نتایج مدل‌سازی از سطح زیر منحنی ROC یا شاخص AUC استفاده شد. در صورتی که مقادیر سطح زیر منحنی (AUC) کمتر از ۰/۷ باشد نشان‌دهنده توانایی

ضعیف مدل در پیش‌بینی، مقادیر 0.90% - 0.70% نشان‌دهنده یک پیش‌بینی قابل قبول و مقادیر بالای 0.90% نشان‌دهنده توانایی پیش‌بینی عالی مدل است (Rana et al., ۲۰۱۷).

نتایج

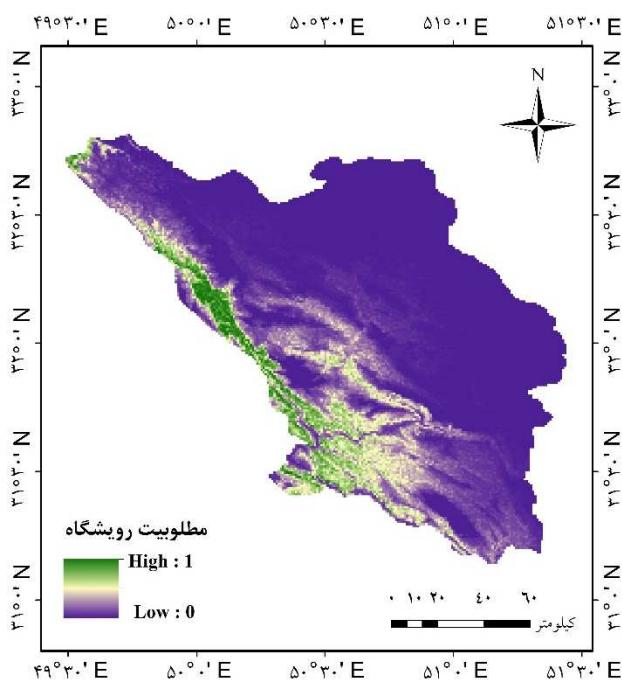
به منظور ارزیابی مدل پیش‌بینی حاصل، از روش تحلیل سطح زیر منحنی (AUC) استفاده گردید (شکل ۳). نتایج ارزیابی نشان داد که مدل سازی حداکثر آنتروپی، توانایی بالای جهت پیش‌بینی توزیع جغرافیایی بالقوه گونه بنه در استان چهارمحال و بختیاری دارا می‌باشد. با توجه به مقادیر سطح زیر منحنی برای داده‌های آموزشی ($AUC=0.931$) و داده‌های آزمون ($AUC=0.917$) و بر اساس طبقه‌بندی آن (Rana et al., ۲۰۱۷)، دقت مدل در طبقه خوب قرار می‌گیرد.



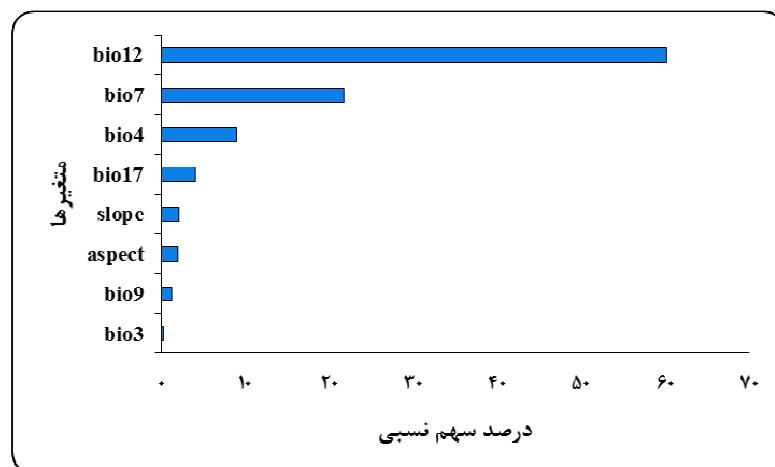
شکل ۳- سطح زیر منحنی (AUC) داده‌های آموزش و داده‌های آزمون بر اساس مدل حداکثر آنتروپی

نقشه مطلوبیت زیستگاه یا احتمال پراکنش گونه بنه در زمان حال حاضر در شکل ۴ آورده شده است. با توجه به نقشه پیش‌بینی، سطح رویشگاه مناسب این گونه ۲۴۱۳۷۱ هکتار می‌باشد که حدود 14.7% درصد از کل منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است. همچنین، درصد سهم نسبی (اهمیت) هر یک از متغیرهای وارد شده به مدل در پیش‌بینی مناطق مناسب برای حضور گونه بنه در شکل ۵ آمده است. بر اساس پیش‌بینی مدل، میزان بارش سالیانه (Bio12)، دامنه تغییرات سالیانه دما

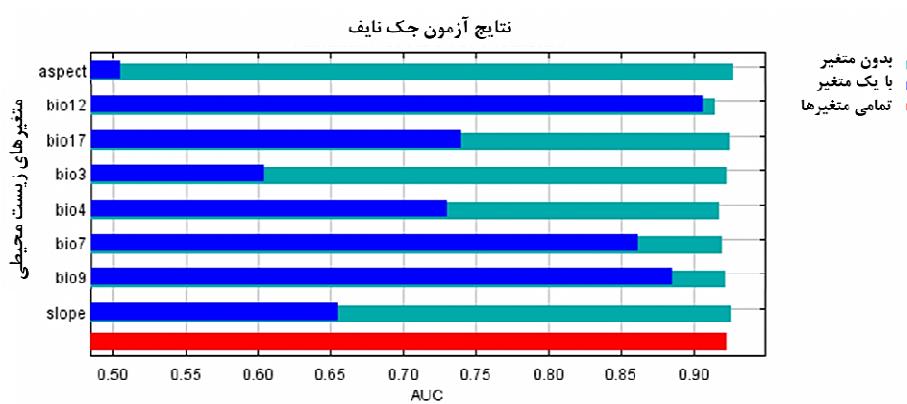
(Bio₄)، تغییرات فصلی دما (Bio₇) و مجموع بارندگی کم بازترین فصل سال (Bio₁₇) مهم‌ترین متغیرهایی بودند که بیشترین سهم را در تعیین مطلوبیت رویشگاه گونه به داشتند. دو متغیر میزان بارش سالیانه و دامنه تغییرات سالیانه دما با همدیگر در حدود ۸۱/۸ درصد تغییرات پراکنش گونه را توجیه نمودند و بیشترین سهم را در تعیین مطلوبیت رویشگاه داشتند. ترتیب اهمیت متغیرها بر اساس آزمون جکنایف نیز در شکل ۶ آمده است. نتایج آزمون جکنایف نیز حاکی از اهمیت بالای متغیر میزان بارش سالیانه می‌باشد.



شکل ۴- نقشه مطلوبیت نسبی شرایط محیطی گونه به در شرایط حال حاضر

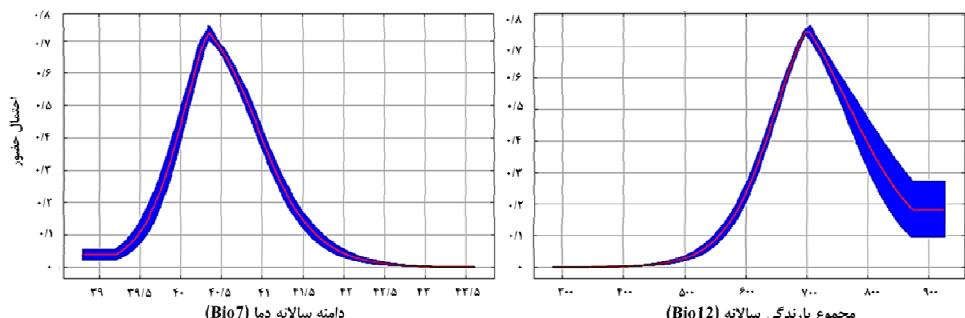


شکل ۵- درصد سهم نسبی متغیرها در مدل‌سازی پراکنش گونه بنه



شکل ۶- اهمیت متغیرهای تأثیرگذار در حضور گونه بنه بر اساس آزمون جک نایف

منحنی‌های پاسخ مربوط به مهمترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر مطلوبیت رویشگاه گونه بنه در شکل ۷ آورده شده است. با توجه به شکل ۶، بیشترین مطلوبیت رویشگاه برای گونه بنه در میانگین بارندگی سالانه (Bio12) ۷۰۰ میلی‌متر بوده و با کاهش بارش، مطلوبیت برای گونه کاهش می‌یابد. همچنین از نظر دامنه تغییرات سالانه دما (Bio7)، بالاترین مطلوبیت در حدود $40/3$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و بعد از آن مطلوبیت برای گونه کاهش می‌یابد.



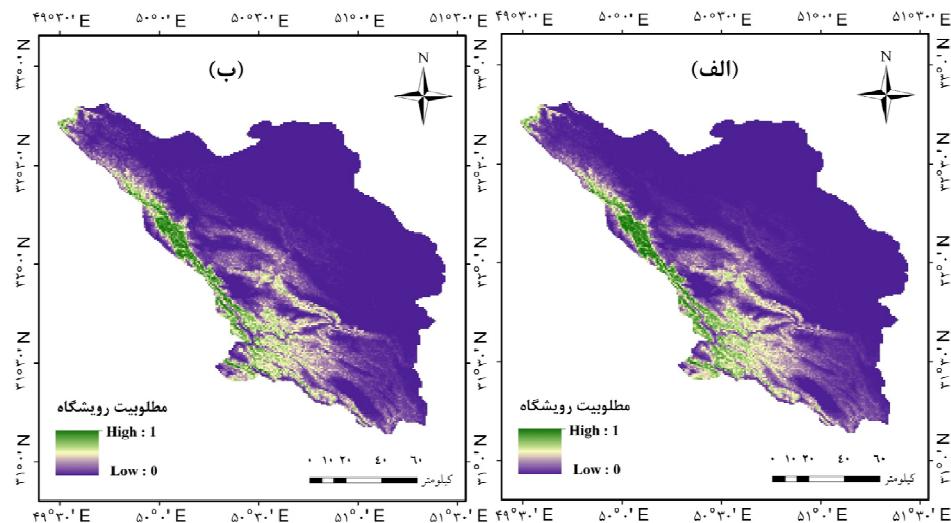
شکل ۷- منحنی های پاسخ مهم ترین متغیرها برای گونه بنه

همچنین با مطالعه تغییر اقلیم، نقشه پراکنش بنه بر مبنای نیازهای محیطی آن، تحت سناریوی اقلیمی RCP ۴/۵ (شکل ۸، الف)، سناریو اقلیمی RCP8/5 (شکل ۸، ب) و مدل گردش عمومی HadGEM2-CC برای سال ۲۰۵۰ تولید شد. جهت پیش‌بینی جابجایی دامنه گونه در سال ۲۰۵۰، ابتدا یک سطح بحرانی (در این مطالعه، احتمال حضور بیشتر از ۲۴٪) مورد استفاده قرار گرفت. این سطح، صحت مدل را بواسطه AUC حداً کثر می‌نمود. بر اساس آن، نقشه‌ها به دو طبقه مناسب و نامناسب طبقه‌بندی شدند. سپس نقشه‌های حال حاضر و آینده دوبه‌دو مقایسه شدند (جدول ۲). نتایج مطالعه نشان داد که تحت سناریو اقلیمی RCP ۴/۵، ۲۰۲۱۳ هکتار (۸/۳٪ درصد) از سطح رویشگاه مناسب گونه در سال ۲۰۵۰ ازدست‌رفته و در مقابل، ۶۲۷ هکتار (۰/۲۶ درصد) به سطح رویشگاه مناسب جهت وقوع گونه افزوده شده است. همچنین تحت سناریوی RCP ۸/۵، ۳۰۲۵۰ هکتار (۱۲/۵٪ درصد) از سطح رویشگاه مناسب گونه کاوش یافته و ۳۶۹۴ هکتار (۱/۵ درصد) به سطح رویشگاه مناسب گونه افزوده شده است (جدول ۲؛ بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که تحت هر دو سناریوی اقلیمی، سطح رویشگاه مناسب برای گونه در سال ۲۰۵۰ کاوش خواهد یافت.

جدول ۲- تغییرات مساحت رویشگاه گونه بنه در سال ۲۰۵۰ و سناریوهای اقلیمی ۴/۵ RCP و ۸/۵ RCP در

مقایسه با شرایط محیطی حال حاضر

تغییرات در رویشگاه	رویشگاه	رویشگاه	رویشگاه	رویشگاه	غیاب	حضور	سناریو
رویشگاه گونه (درصد)	نامناسب شده	مناسب شده	مناسب شده	نامناسب شده	پایدار	پایدار	
-۸/۱۱	۸/۳۷	۰/۲۶	۶۲۷	۲۰۲۱۳	۱۳۹۱۷۰۰	۲۲۱۱۵۸	RCP ۴/۵
-۱۱	۱۲/۵	۱/۵	۳۶۹۴	۳۰۲۵۰	۱۳۸۸۶۴۳	۲۱۱۱۲۱	RCP ۸/۵



شکل ۸- نقشه پیش‌بینی مطابقیت نسبی شرایط محیطی گونه بنه برای سال ۲۰۵۰ و بر اساس سناریوهای اقلیمی (الف) RCP8/5 (ب) RCP4/5

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی اثر سناریوهای تغییر اقلیم جهانی بر توزیع جغرافیایی گونه‌ها، نقش مهمی در درک عوامل تعیین‌کننده وسعت محدوده جغرافیایی آن‌ها دارد (Davies et al., ۲۰۰۹). به دلیل ارتباطی که بین وسعت محدوده جغرافیایی گونه و خطر انقراض گونه‌ای وجود دارد، این نوع ارزیابی می‌تواند نقش مهمی در مدیریت حفاظت ایفا نماید (Cardillo et al., ۲۰۰۸). به همین دلیل، مدل‌های پراکنش گونه‌ای یکی از ابزارهای مهم و مقرن به صرفه برای تعیین آشیان اکولوژیک گونه‌ها محسوب می‌شوند (Rana et al., ۲۰۱۷). نتایج اجرای مدل، میزان AUC زیاد را نشان داد که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل حداکثر آنتروپی در پیش‌بینی پراکنش گونه در منطقه مورد مطالعه است. فاطمی آذرخوارانی و همکاران (۱۳۹۶) جهت پیش‌بینی پراکنش حال حاضر و آینده گونه *Juniperus excelsa* در استان سمنان، ضربی و همکاران (۱۳۹۶) به منظور تحقیق در مورد وضعیت حفاظت گونه *Pistacia vera* در استان خراسان رضوی، چوده‌هاری و همکاران (Choudhury et al., ۲۰۱۶) بررسی پراکنش احتمالی دو گونه مهاجم در هند و رانا و همکاران (Rana et al., ۲۰۱۷) جهت بررسی پراکنش دو گونه گیاهی دارویی از تیره لاله در نیال، از مدل پراکنش گونه‌ای حداکثر آنتروپی استفاده کردند. نتایج این محققان همچون مطالعه حاضر، نشان‌دهنده عملکرد بالای مدل حداکثر آنتروپی در پیش‌بینی پراکنش گونه‌ای می‌باشد.

براساس نتایج حاصل از مدل‌سازی حداقل آنتروپی، سطح رویشگاه مناسب برای گونه بنه در استان چهارمحال و بختیاری حدود ۱۴/۷ درصد (۲۴۱۳/۷ کیلومترمربع) می‌باشد. همچنین میزان بارش سالیانه، دامنه تغییرات سالیانه دما و تغییرات فصلی دما در حدود ۹۱ درصد تغییرات پراکنش گونه را توجیه نمودند و بیشترین سهم را در تعیین مطلوبیت رویشگاه گونه داشتند. وانگ و همکاران (Wang et al., ۲۰۱۴) با بررسی اثر تغییر اقلیم بر پراکنش گونه *Pistacia chinensis* در کشور چین، بارندگی را به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر در پراکنش این گونه ذکر نمودند. کوزوریدزه و همکاران (Kozhoridze et al., ۲۰۱۵) نیز تغییرات فصلی دما را یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در پراکنش گونه بنه معرفی نمودند.

بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی، میانگین ارتفاع مناطقی که در حال حاضر، گونه در آن‌ها حضور دارد ۱۷۵۰ متر است. نتایج مدل‌سازی در سال ۲۰۵۰ بر اساس سناریو RCP۸/۵ در مناطق مستعد حضور گونه، این میانگین ارتفاع را ۱۹۳۳ متر نشان می‌دهد؛ بنابراین، به طور میانگین حدود ۱۸۳ متر جابجایی در ارتفاع گونه بنه برای سال ۲۰۵۰ اتفاق خواهد افتاد. طی سال‌های اخیر، محققان بسیاری گسترش گیاهان به سمت ارتفاعات را نمونه‌ای از جابجایی گونه‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم ذکر نموده‌اند (Thuiller et al., ۲۰۰۷). Walther et al., (۲۰۰۲) نیز یکی از مهم‌ترین اثرات تغییر اقلیم را جابجایی محدوده جغرافیایی گونه‌های گیاهی دانست. وی بیان نمود که افزایش دما باعث حرکت گونه‌های نیمکره شمالی به سمت ارتفاعات خواهد شد. البته این تغییرات در اکوسیستم‌های مختلف یکسان نیست و هر اکوسیستم باید با روش‌های مناسب بررسی شود. همان‌طور که گونه‌ها به سمت قطب یا ارتفاعات می‌روند ممکن است ناپدید شوند و یا به پناهگاهی دور از بقیه محدود شوند، درحالی که گونه‌های دیگر ممکن است دامنه پراکنش خود را گسترش دهند. زیست‌شناسان در مورد Nابودی گونه‌هایی که دسترسی آن‌ها به رویشگاه مناسب محدود شود، اظهار نگرانی نموده‌اند (Potter & Hargrove, ۲۰۱۳). با توجه به نتایج مدل‌سازی به نظر می‌رسد که در مورد گونه بنه، جابجایی به سمت ارتفاعات نسبت به انراض گونه با سرعت کمتری رخ خواهد داد.

نتایج نشان داد که در مجموع، وسعت رویشگاه گونه بنه در آینده (سال ۲۰۵۰) در مقایسه با حال حاضر تحت سناریو RCP۴/۵، حدود ۸/۱۱ درصد و تحت سناریو RCP۸/۵، حدود ۱۱ درصد کاهش خواهد یافت. کوزوریدزه و همکاران (Kozhoridze et al., ۲۰۱۵) نیز در مطالعه خود بر روی این گونه که برای کل جهان انجام شد؛ پیش‌بینی نمودند که در سال ۲۰۵۰ رویشگاه این گونه حدود ۱۶ درصد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، بخشی از میدان اکولوژیک واقعی گونه بنه در سال ۲۰۵۰ تحت پوشش قرار نخواهد گرفت و از شرایط بهینه گونه دور خواهد شد. این تغییرات پیش‌بینی شده در پراکنش بنه در پاسخ به تغییر اقلیم، مدیران را وادار می‌نماید تا استراتژی‌های منطبق با حفاظت این مناطق را اجرا

نمایند. رویشگاههایی که پیش‌بینی شده دارای گونه ارزشمند بنه هستند باید از تغییر کاربری، دست‌اندازی، کف بر نمودن و تخریب بیشتر حفظ شوند. اثرات منفی تغییر اقلیم بر جنگل‌های زاگرس تنها شامل جنگل‌ها نیست؛ بلکه در پی کاهش خدمات اکوسيستم جنگل بهویژه چرخه آب، تولید خاک و محافظت از تنوع زیستی، زندگی ۹/۸ میلیون نفر ساکن در منطقه زاگرس و ۱/۵ میلیون نفر در مناطق جنگلی که از جنگل برای غذا، سوخت و درآمد استفاده می‌کنند نیز تحت تأثیر قرار خواهد گرفت. به علت پیوستگی ذاتی بین اکوسيستم‌های مختلف یک چشم‌انداز ضروری است که تنوع گونه‌ای حفاظت شود تا خدمات بشری به صورت پایداری حفظ شوند. پیشرفت در درک مدل‌های پراکنش گونه‌ای در مقابله با تغییر اقلیم و اصلاح پایگاه مکانی داده‌ها می‌تواند منجر به توسعه استراتژی‌های حفاظتی شود که برای اکوسيستم و هم گونه مفید است. علاوه بر آن در سطح محلی و جهانی خواهان حفظ تنوع زیستی زاگرس مرکزی هستند و این منطقه از نظر اکولوژیکی و تنوع زیستی مهم است (Hunnam, ۲۰۱۱)؛ بنابراین نیازمند تلاش مضاعفی برای حفاظت از گونه‌های مختلف از جمله گونه بنه در برابر تغییر اقلیم هستیم.

نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند به عنوان ابزاری مفید و مقرر به صرفه به منظور استفاده مدیران منابع طبیعی محسوب شده و آگاهی آن‌ها را نسبت به اثرات تغییر اقلیم بر گونه‌ها افزایش می‌دهد. نقشه‌های حاصل از مدل‌ها، مناطق حساس به تغییر اقلیم و پناهگاه‌های ممکن در آینده گونه بنه را به منظور استفاده در طرح‌های حفاظتی و مدیریت جنگل‌های این مناطق مشخص می‌نماید. این استراتژی‌ها باید به منظور حفاظت این مناطق در برابر تهدیدها و به منظور بهبود مقاومت گونه بنه به تغییر اقلیم به کار روند تا حضور گونه بنه در آینده را تضمین کنند.

منابع

جهانبازی گوجانی، ح، ایران‌منش، ی، طالبی، م. ۱۳۸۵. توان جنگل‌های استان چهارمحال و بختیاری در زمینه تولید بذر بنه و اثر اقتصادی آن بر زندگی جنگل‌نشینان. *تحقیقات جنگل و صنوبر ایران*، ۱۴(۲): ۱۵۹-۱۶۷.

حیدری، م، نادری، س، کرمشاهی، ع، مزبانی، آ. ۱۳۹۵. آت اکولوژی و فنولوژی گونه بنه (*Pistacia atlantica*) در رابطه با عوامل ادافیکی و فیزیوگرافی در جنگل‌های کبیرکوه شهرستان دره‌شهر، استان ایلام. *مجله پژوهش‌های گیاهی (زیست‌شناسی ایران)*، ۲۹(۱): ۸۰-۹۵.

خراسانی، م، نصرتی، م، رزبان حقیقی، ا، کلیج، ص. ۱۳۹۳. بررسی ریخت‌شناسی برگ در پایه‌های نر و ماده گونه بنه (*Pistacia atlantica Desf*) در جنگل‌های ارسباران. *مجله پژوهش‌های گیاهی (زیست‌شناسی ایران)*، ۲۷(۴): ۶۰۵-۶۱۲.

خوشبخت، م. ۱۳۹۵. پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر رویشگاه بالقوه گونه گیاهی سنبل‌الطیب (*Valeriana sisymbriifolia*) در استان اصفهان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

فاطمی آذرخوارانی، س.س، رحیمی، م، ترکش، م، روان‌بخش، م. ۱۳۹۶. پیش‌بینی پراکنش جغرافیایی گونه *Juniperus excelsa* M.Bieb. با استفاده از داده‌های اقلیمی در شرایط حاضر و آینده در استان سمنان.

مجله جنگل ایران، ۹(۲): ۲۴۸-۲۳۳.

سلطانی، س، یغمایی، ل، خداقلی، م، صبوحی، ر. ۱۳۸۹. پنهان‌بندی زیست‌اقلیمی استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آبخواک، ۱۴(۵۴): ۵۳-۶۸.

شعبانی، ن. ۱۳۹۵. اثر تغییر اقلیم بر رویشگاه بالقوه گون گزی در غرب استان اصفهان با استفاده از مدل‌های پراکنش گونه‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۰۱ صفحه.

ضرابی، م، حقدادی، ر، یوسفی، ح. ۱۳۹۶. مدل‌سازی مطلوبیت رویشگاه پسته ارگانیک (وحشی) با استفاده از روش آنتروپوپی حداکثر در منطقه جنگلی سرخس خراسان رضوی. اکوهیدرولوژی، ۴(۳): ۸۲۴-۸۱۷.

مرموی مهاجر، م.ر. ۱۳۸۴. جنگل‌شناسی و پژوهش جنگل، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۸۷ صفحه.

نقی‌پور برج، ع.ا، فرخنیا، س. ۱۳۹۶. اثر آتش‌سوزی بر ترسیب کردن خاک و زیست‌دهنگاهی در مرتع نیمه‌استپی زاگرس مرکزی. حفاظت زیست‌بوم گیاهان، ۱۰(۵): ۳۹-۵۱.

Abolmaali, M.R., Tarkesh, M., Bashari, H. ۲۰۱۷. Maxent modeling for predicting suitable habitats and identifying the effects of climate change on a threatened species, *Daphne mucronata*, in central Iran. Ecological Informatics, 43: ۱۱۶-۱۲۳.

AL-Saghir, M.G. ۲۰۱۰. Phylogenetic analysis of the genus *Pistacia* L. (Anacardiaceae) based on morphological data. Asian Journal of Plant Sciences, 9(1): ۲۸.

Booth, T.H., Nix, H.A., Busby, J.R., Hutchinson, M.F. ۲۰۱۴. BIOCLIM: the first species distribution modelling package, its early applications and relevance to most current MAXENT studies. Diversity and Distributions, 20(1): 1-9.

Cardillo, M., Mace, G.M., Gittleman, J.L., Jones K.E., Bielby, J., Purvis A. ۲۰۰۸. The predictability of extinction: biological and external correlates of decline in mammals. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 275(1641): 1441-8.

Choudhury, M.R., Deb, P., Singha, H., Chakdar, B., Medhi, M. ۲۰۱۶. Predicting the probable distribution and threat of invasive *Mimosa diplotricha* Suavalle and *Mikania micrantha* Kunth in a protected tropical grassland. Ecological Engineering, 97: ۲۳-۳۱.

Davies, T.J., Purvis, A., Gittleman, J.L. ۲۰۰۹. Quaternary climate change and the geographic ranges of mammals. The American Naturalist, 174 (3): 297-307.

- Elith, J., Leathwick, J.R. ۲۰۰۹. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, ۴۰: ۶۷۷-۶۹۷.
- Elith, J., Graham, C.H., Anderson, R.P., Dudík, M., Ferrier S., Guisan, A., Hijmans, R.J., et al. ۲۰۰۶. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*, ۲۹(۲): ۱۲۹-۱۵۱.
- Farhoosh, R., Tavakoli, J., Khodaparast, M.H.H. ۲۰۰۸. Chemical composition and oxidative stability of kernel oils from two current subspecies of *Pistacia atlantica* in Iran. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, ۸۵(۸): ۷۲۳.
- Fayyaz, P., Etemadi, E., Julaiee-Manesh, N., Zolfaghari, R. ۲۰۱۳. Sodium and potassium allocation under drought stress in Atlas mastic tree (*Pistacia atlantica* subsp. *mutica*). *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 6(4): 90.
- Franklin, J. ۲۰۱۰. *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Guisan, A., Thuiller, W. ۲۰۰۵. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology letters*, 8(9): 993-1009.
- Guisan, A., Zimmermann, N.E. ۲۰۰۰. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 130(2): 147-186.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A. ۲۰۰۵. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25: 1960-1978.
- Hunnam, P. ۲۰۱۱. Conservation of biodiversity in the Central Zagros Landscape conservation zone: Mid-Term evaluation report. Government of the Islamic Republic of Iran, United Nations Development Programme, Global Environment Facility, Project No. PIMS ۲۲۷۸.
- IPCC, ۲۰۱۴. Summary for Policymakers, In: Field CB et al. (eds.), *Climate Change: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kozhoridze, G., Orlovsky, N., Orlovsky, L., Blumberg, D.G., Golan-Goldhirsh, A. ۲۰۱۰. Geographic distribution and migration pathways of *Pistacia*—present, past and future. *Ecography*, 33(11): 1141-1154.
- Lawler, J.J., White, D., Neilson, R.P., Blaustein, A.R. ۲۰۰۷. Predicting climate-induced range shifts: model differences and model reliability. *Global Change Biology*, 13 (8): 1068-1084.
- Linstädter, A., Zielhofer, C. ۲۰۱۰. Regional fire history shows abrupt responses of Mediterranean ecosystems to centennial-scale climate change (Olea–Pistacia woodlands, NE Morocco). *Journal of Arid Environments*, 74(1): 101-110.
- Naghipour, A.A., Bashari, H., Khajeddin, S.J., Tahmasebi, P., Iravani, M. ۲۰۱۶. Effects of smoke, ash and heat shock on seed germination of seven species from Central Zagros rangelands in the semi-arid region of Iran. *African Journal of Range & Forage Science*, 33(1): 67-71.

- Peterson, A.T. ۲۰۱۱. Ecological niches and geographic distributions (MPB-۴۹) (No. ۴۹). Princeton University Press.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. ۲۰۰۶. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, ۱۹(۳): ۲۳۱-۲۵۹.
- Potter, K.M., Hargrove, W.W. ۲۰۱۳. Quantitative assessment of predicted climate change pressure on North American tree species. *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences (MCFNS)*, ۵(۲): ۱۵۱-۱۷۹.
- Pourreza, M., Shaw, J.D., Zangeneh, H. ۲۰۰۸. Sustainability of wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) in Zagros forests, Iran. *Forest Ecology and Management*, ۲۵۵(۱۱): ۳۶۶۷-۳۶۷۱.
- Pressey, R.L., Cabeza, M., Watts, M.E., Cowling, R.M., Wilson, K.A. ۲۰۰۷. Conservation planning in a changing world. *Trends in ecology & evolution*, ۲۲(۱۱): ۵۸۳-۵۹۲.
- Rana, S.K., Rana, H.K., Ghimire, S.K., Shrestha, K.K., Ranjitkar, S. ۲۰۱۷. Predicting the impact of climate change on the distribution of two threatened Himalayan medicinal plants of Liliaceae in Nepal. *Journal of Mountain Science*, ۱۴ (۳): ۸۵۸-۸۷۰.
- Sinclair, S., White, M., Newell, G. ۲۰۱۰. How useful are species distribution models for managing biodiversity under future climates? *Ecology and Society*, ۱۵ (۱): ۸.
- Sutton, W.B., Barrett, K., Moody, A.T., Loftin, C.S., deMaynadier, P.G., Nanjappa, P. ۲۰۱۴. Predicted changes in climatic niche and climate refugia of conservation priority salamander species in the northeastern United States. *Forests*, ۷ (۱): ۱-۲۶.
- Thuiller, W. ۲۰۰۷. Biodiversity: climate change and the ecologist. *Nature*, ۴۴۸(۷۱۰۳): ۵۰۰-۵۰۲.
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T.J., Fromentin, J-M., Hoegh-Guldberg, O., Bairlein, F. ۲۰۰۷. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879): 389-390.
- Wang, W., Tang, X., Zhu, Q., Pan, K., Hu, Q., He, M., Li, J. ۲۰۱۴. Predicting the impacts of climate change on the potential distribution of major native non-food bioenergy plants in China. *PLoS one*, 9(11): 1-11.
- Warren, R., VanDerWal, J., Price, J., Welbergen, J.A., Atkinson, I., Ramirez-Villegas, J., Osborn, T.J., Jarvis, A., Shoo, L.P., Williams, S.E., Lowe, J., ۲۰۱۳. Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Climate Change*, 3: 678-682.

