



Modeling the Distribution of Juniper Species (*Juniperus excelsa* M.Bieb.) Using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) and Generalized Linear Model (GLM) in Southern Ardabil and Northern Zanjan Provinces

Azad Kakehmami¹, Ardavan Ghorbani^{2*}, Mehdi Moameri³, Abazar Esmali Ouri⁴, Zeinab Hazbavi⁵, Sahar Ghafari⁶

1. PhD. of Rangeland Science and Engineering, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
2. Corresponding author; Prof., Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: a_ghorbani@uma.ac.ir
3. Associate Prof., Department of Plant Sciences and Medicinal Plants, Meshgin Shahr Faculty of Agriculture, Water Management Research Center, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
4. Prof., Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
5. Associate Prof., Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
6. Ph.D. of Rangeland Science, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Article Info

Article type:
Research Full Paper

2024; Vol 18, Issue 2

Article history:

Received: 22.05.2023
Revised: 20.07.2023
Accepted: 26.07.2023

Keywords:

Habitat suitability,
Remote sensing
indices,
Software for Assisted
Habitat Modeling
(SAHM).

Abstract

Background and objectives: Remote sensing data, with its comprehensive and accessible nature, facilitates the understanding of plant-environment interactions. Integrating such information into species distribution models can create global maps of species distributions and aid in their conservation and restoration. This research aims to determine the remote sensing predictors—including climatic, topographic, and remote sensing indices—to predict the distribution of *J. excelsa* in Khalkhal County, Ardabil Province, and Northern Zanjan Province.

Methodology: The study area includes Khalkhal County in Southern Ardabil Province and the northern parts of Zanjan Province (Zanjan, Tarem, and the northeastern part of Mahenshan), covering approximately 1,036,742 hectares. Suitable locations were selected for sampling based on a land use map and preliminary field surveys. Coordinates of *J. excelsa* presence and absence were recorded using GPS, resulting in 1,577 recorded points. Areas with at least one square kilometer of dominance and sampling sites at least one kilometer apart were considered. To reduce sampling bias and autocorrelation, SDM toolbox and multi-distance methods in ArcGIS software were used. Pseudo-absence points were created randomly using the Random Selection tool in ArcGIS, with approximately 1 km intervals, and verified through field visits. Digital elevation model, slope, and aspect maps were prepared using topographic maps at a 1:25000 scale and the Spatial Analyst tool in ArcGIS. Precipitation and temperature layers were prepared using satellite images with high temporal resolution. Remote sensing indices

(GEMI, LAI, MNDWI, and VARI) were calculated and rasterized using ENVI software. MARS and GLM models were performed in SAHM software.

Results: The area under the curve (AUC) was 0.967 for GLM and 0.984 for MARS, indicating excellent model performance. Key variables for GLM included VARI, slope, temperature, digital elevation model, LAI, MNDWI, annual precipitation, and GEMI indices. For MARS, important variables were VARI, annual precipitation, digital elevation model, slope, MNDWI, temperature, LAI, GEMI, and aspect. Suitable habitats for *J. excelsa* were estimated to be 349,569 hectares (33.7% of the area) by GLM and 340,610 hectares (32.8% of the area) by MARS. Habitat elevation ranged from 450 to 2800 meters, with species presence increasing with slope percentage. Species presence was observed within precipitation ranges of 300 to 800 mm and temperatures between 6 to 18°C. GEMI index showed highest presence at 0.18 and lowest at 0.24. LAI index indicated highest presence at 0 and lowest between 0.05 to 0.15. MNDWI index remained constant from -0.5 to -0.1, then decreased. VARI index showed increasing presence from -0.18 and remained constant from -0.18 to 0.3.

Conclusion: Due to the different algorithms used, it is more reliable to employ multiple prediction methods rather than a single one. The models presented are valid within the study area's habitat conditions and should be tested in other similar regions for validation.

Cite this article: Kakehmami, A., A. Ghorbani, M. Moameri, A. Esmali Ouri, Z. Hazbavi, S. Ghafari, 2024. Modeling the Distribution of Juniper Species (*Juniperus excelsa* M.Bieb.) Using Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) and Generalized Linear Model (GLM) in Southern Ardabil and Northern Zanzan Provinces. Journal of Rangeland, 18(2): 241-264.



© The Author(s).

DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.2.4.2

Publisher: Iranian Society for Range Management

مدلسازی پراکنش گونه ارس (*Juniperus excelsa* M.Bieb.) با استفاده از مدل‌های رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین و مدل خطی تعمیم‌یافته در جنوب استان اردبیل و بخش شمالی استان زنجان

آزاد کاکه ممی^۱، اردوان قربانی^{۲*}، مهدی معمری^۳، ابادر اسمعلی^۴، زینب حزباوی^۵، سحر غفاری^۶

۱. دکتری علوم و مهندسی مرتع، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایان‌نامه: a_ghorbani@uma.ac.ir
۳. دانشیار گروه علوم گیاهی و گیاهان دارویی، دانشکده کشاورزی مشکین شهر، پژوهشکده مدیریت آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۴. استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۵. دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۶. دکتری علوم مرتع، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

| اطلاعات مقاله | چکیده |
|--|--|
| نوع مقاله: مقاله کامل - پژوهشی | سابقه و هدف: داده‌های سنجش از دوری با ماهیت فراگیر و قابل دسترس داده‌های بزرگ و بروز بودن داده‌های مکانی، شناخت تعاملات گیاه و محیط را تسهیل می‌کند. ادغام چنین اطلاعاتی در مدل‌های پراکنش گونه‌ها می‌تواند منجر به تولید نقشه جهانی از پراکنش گونه شده و در حفظ و احیا گونه مؤثر باشد. هدف از این پژوهش تعیین پیش‌بینی کننده‌های سنجش از دور شامل شاخص‌های اقلیمی، شاخص‌های اولیه و ثانویه توپوگرافی و شاخص‌های سنجش از دوری برای پیش‌بینی پراکنش گونه ارس (<i>J. excelsa</i>) در سطح شهرستان‌های خلخال اردبیل و بخش شمالی استان زنجان است. |
| ۱۴۰۳، جلد ۱۸، شماره ۲ | مواد و روش: منطقه مورد مطالعه شامل شهرستان خلخال در جنوب استان اردبیل و بخش شمالی استان زنجان (شامل سه شهرستان زنجان، طارم و بخش شمال شرقی شهرستان ماهنشان) با مساحت حدود ۱۰۳۶۷۴۲ هکتار است. در ابتدا با استفاده از نقشه کاربری اراضی و طی چندین مرحله بازدیدهای میدانی اولیه از منطقه مورد مطالعه محل‌های دارای راه دسترسی مناسب برای ثبت نمونه انتخاب شد سپس با پیمایش عرصه‌ای مختصات طول و عرض جغرافیایی نقاط حضور و عدم حضور گونه ارس (<i>J. excelsa</i>) با استفاده از (GPS) ثبت شد. جمعاً تعداد ۱۵۷۷ (نقطه حضور و نقطه غیاب) برای گونه به ثبت رسید. در هنگام ثبت نقاط حضور برای اجتناب از اریب ناشی از نمونه‌برداری سعی شد مناطقی به‌عنوان محل حضور در نظر گرفته شوند که علاوه بر غالبیت گونه حداقل یک لکه به مساحت یک کیلومتر مربع را تحت پوشش قرار داده باشد، همچنین نمونه‌برداری از یکدیگر حداقل یک کیلومتر فاصله داشتند. به‌منظور کاهش خودهمبستگی و اریب داده‌های حضور از جعبه ابزار SDM و روش چند فاصله در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. ایجاد نقاط شبه غیاب نیز به‌صورت تصادفی با استفاده از ابزار Random Selection در نرم‌افزار ArcGIS با فواصل تقریبی ۱ کیلومتری انجام شد. بازبینی موقعیت نقاط غیاب ثبت شده به جهت حصول اطمینان از غیاب گونه، با بازدید میدانی انجام شد. با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ نقشه مدل نقشه رقمی ارتفاع با استفاده از ابزار Spatial Analyst در نرم‌افزار ArcGIS و سپس نقشه شیب و جهت جغرافیایی تهیه شد. جهت تهیه لایه بارش و دما از اطلاعات برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی بالا (فواصل تصویربرداری کوتاه) استفاده شد. با |
| تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱ | |
| تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۹ | |
| تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴ | |
| واژه‌های کلیدی: مطلوبیت رویشگاه، شاخص‌های سنجش از دوری، نرم‌افزار مدل‌سازی زیستگاه مساعدت شده. | |

استفاده از نرم‌افزار ENVI، چهار شاخص سنجش از دوری (شاخص جهانی پایش محیطی (GEMI)، شاخص سطح برگی (LAI)، شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی (MNDWI) و شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده (VARI)) محاسبه و لایه رستری آن تهیه شد. پس از تهیه لایه‌های متغیرهای مورد بررسی مدل‌سازی رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین و مدل خطی تعمیم‌یافته در نرم‌افزار (SAHM) انجام شد.

نتایج: سطح زیر منحنی در مدل خطی تعمیم یافته (۰/۹۶۷) و در رگرسیون تطبیقی چندمتغیره اسپیلاین (۰/۹۸۴) بود که برای هر دو مدل در سطح عالی طبقه‌بندی می‌شود. مهمترین متغیرهای مؤثر در روش مدل خطی تعمیم یافته به ترتیب شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده، شیب، دما، مدل رقومی ارتفاع، شاخص سطح برگی، شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی، بارندگی سالانه و شاخص پایش جهانی محیط‌زیست است. مهمترین متغیرهای مؤثر در روش رگرسیون تطبیقی به ترتیب شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده، بارندگی سالانه، مدل رقومی ارتفاع، شیب، شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی، دما، شاخص سطح برگی، شاخص پایش جهانی محیط‌زیست و جهت است. زیستگاه مطلوب برای حضور گونه در روش خطی تعمیم یافته ۳۴۹۵۶۹ هکتار (۳۳/۷ درصد از کل منطقه) و در روش رگرسیون تطبیقی چندمتغیره اسپیلاین ۳۴۰۶۱۰ هکتار (۳۲/۸ درصد از کل منطقه) برآورد گردید. حداقل ارتفاع زیستگاه گونه ۴۵۰ متر و حداکثر ارتفاع آن ۲۸۰۰ متر است. با افزایش درصد شیب احتمال حضور گونه افزایش و سپس روند ثابتی دارد. احتمال حضور گونه در بازه بارندگی ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر و در بازه دمایی ۶ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد وجود دارد. براساس شاخص جهانی پایش محیط‌زیست بیشترین حضور گونه در مقدار ۰/۱۸ و کمترین در ۰/۲۴ است. بیشترین احتمال حضور در شاخص سطح برگی صفر و کمترین در ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ مشاهده شد. شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی از ۰/۵- تا ۰/۱- روند ثابت و پس از آن احتمال حضور کاهش می‌یابد. احتمال پراکنش گونه با افزایش شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده از ۰/۱۸- افزایش و در بازه ۰/۱۸- تا ۰/۳- روند تقریباً ثابتی دارد.

نتیجه‌گیری: مدل‌های مختلف به دلیل برخورداری از الگوریتم‌های متفاوت نتایج متفاوتی به دست می‌دهند. بنابراین استفاده از چند روش پیش‌بینی به جای استفاده از یک روش قابل اعتمادتر است. مدل‌های ارائه شده در این مطالعه فقط در محدوده شرایط رویشگاهی منطقه مورد مطالعه صادق است و برای مناطق دیگر باید آنها را در چند منطقه با گونه گیاهی مشابه آزمون کرد تا میزان تبعیت مدل را سنجید.

استناد: کاکه ممی، آ.، ا. قربانی، م. معمری، ا. اسمعیلی، ز. حزباوی، س. غفاری، ۱۴۰۳. مدل‌سازی پراکنش گونه ارس (*Juniperus excelsa* M.Bieb.) با استفاده از مدل‌های رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین و مدل خطی تعمیم‌یافته در جنوب استان اردبیل و بخش شمالی استان زنجان. مرتع، ۱۸(۲): ۲۶۴-۲۴۱.



DOR: 20.1001.1.20080891.1403.18.2.5.3

© نویسندگان

ناشر: انجمن علمی مرتعداری ایران

مقدمه

مدیریت جوامع گیاهی ارس (*J. excelsa* M.Bieb) به‌عنوان اکوسیستم‌های حساس و شکننده مطالعه همه جانبه و فراگیر در راستای اهداف حفظ، احیاء و توسعه این نوع جوامع را می‌طلبد. اولین قدم مؤثر برای رسیدن به این اهداف شناخت از وضعیت موجود جوامع گیاهی ارس و کسب اطلاعات دقیق برای برنامه‌ریزی برای آینده است. مطالعه گونه ارس به‌عنوان یکی از معدود سوزنی‌برگان بومی کشور، به علت دارا بودن ویژگی‌هایی از جمله دامنه پراکنش گسترده در مناطق رویشی مختلف بالاخص مراتع مشجر حائز اهمیت فراوان است. گونه ارس در برابر شرایط نامساعد محیطی بسیار مقاوم است و نقش قابل توجهی در تثبیت خاک و کاهش فرسایش‌های آبی دارد. در حال حاضر در نتیجه عدم شناخت دقیق رویشگاه‌های ارس، بهره‌برداری غیراصولی و شدید، حفاظت نادرست، تغییر اقلیم و غیره جوامع گیاهی ارس دچار تخریب شده‌اند که این‌رود بر شدت پدیده‌های نظیر فرسایش خاک افزوده است. به‌رغم اینکه ارس از معدود سوزنی‌برگان باارزش است که مناطق وسیعی از کشور را به خود اختصاص داده است مطالعات انجام شده در رابطه با جوامع گیاهی ارس در مقایسه با سایر کشورهای حوزه پراکنش آن بسیار ناچیز است. این موضوع، ضرورت توجه مدیران و کارشناسان منابع طبیعی به گونه ارس که ضمن توانایی حفاظت خاک، از نظر تولیدات اقتصادی نیز حائز اهمیت است را دو چندان می‌کند (۱).

مدل‌های پیش‌بینی کننده رویشگاه، تناسب رویشگاه را برای استقرار گونه‌های گیاهی مشخص و کمک می‌کند تا با اختصاص زمان و هزینه‌ی کمتر، به شناسایی عوامل تهدیدکننده جمعیت، عوامل مهم در برنامه‌ریزی‌های حفاظتی، بررسی سناریوهای تغییر اقلیم بر پراکنش جغرافیایی گونه‌ها، رویشگاه مطلوب گونه‌های گیاهی، پیش‌بینی تغییرات سناریوهای آینده (اعم از تغییر کاربری، مدیریت و ...) و طرح‌های مبارزه بیولوژیک با فرسایش و مناطق بااهمیت حفاظتی بپردازند (۸). استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور از روش‌هایی است که مطالعه پایش پراکنش گونه را به دلیل ماهیت فراگیر، قابل دسترسی داده‌های بزرگ (جغرافیایی)، بروز بودن داده‌های مکانی، هزینه کمتر و روش‌های نوآورانه جمع‌آوری داده‌ها

در شناخت تعاملات گیاه و محیط را تسهیل می‌کند (۱۸). تلفیق مدل‌های پراکنش گونه با سامانه اطلاعات جغرافیایی، مناطق دارای شرایط محیطی مناسب برای گونه‌ها را تعیین خواهد نمود (۳۹). تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه مدلسازی پراکنش گونه ارس با متغیرهای مختلف محیطی در مناطق مختلف انجام شده است. استفان و همکاران (۲۰۲۰)، در بررسی آشیان اکولوژیکی مناسب برای ۲۷ گونه درخت جنگلی در لبنان با استفاده از روش حداکثر آنتروپی بیان کردند که ارتفاع عامل اصلی تأثیرگذار بر پراکنش گونه ارس (*J. excelsa*) است و این گونه در ارتفاعات بالا (عمدتاً بالای ۱۵۰۰ متر از سطح زمین) گسترش دارد. نقی‌پور و همکاران (۲۰۲۱)، در ارزیابی پراکنش گونه ارس (*J. excelsa*) تحت سناریوهای اقلیمی فعلی و آینده در استان چهارمحال و بختیاری از شش الگوریتم مدلسازی پراکنش گونه (مدل خطی تعمیم یافته، تحلیل تفکیک‌پذیر انعطاف‌پذیر، شبکه عصبی مصنوعی، روش تقویت تعمیم یافته، رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین و جنگل تصادفی) استفاده کردند. یافته این پژوهش نشان داد که بارش سالانه، شیب و دما بالاترین سهم کلی را در عملکرد مدل داشتند. صدیقی و همکاران (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ای تحت عنوان تأثیر عوامل فیزیوگرافی بر ویژگی‌های کمی گونه ارس (*J. excelsa*) با استفاده از مدل رگرسیونی چندگانه در رویشگاه ارس اسپپرو - دامغان بیان کردند که شاخص‌های جهت و رطوبت توپوگرافی همبستگی معنی‌داری با تعداد در هکتار درختان در منطقه مورد بررسی داشتند. شاخص‌های ارتفاع از سطح دریا و ناهمواری نیز همبستگی معنی‌داری با متغیر سطح مقطع در هکتار درختان داشتند. فاطمی آذرخوارانی و همکاران (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ای تحت عنوان مدلسازی پراکنش بالقوه گونه ارس (*J. excelsa*) با استفاده از عوامل محیطی در رشته‌کوه‌های البرز، ۳۸ پارامتر محیطی را با استفاده از مدل‌های دامنه و رگرسیون لجستیک مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج به دست آمده شرایط مطلوب رویشگاهی گونه ارس (*J. excelsa*) در منطقه‌هایی است که اختلاف حداکثر و حداقل درجه حرارت سالانه بین ۱۳ تا ۱۵/۵ درجه سانتی‌گراد، بارش فصلی ۹۰-۶۴ میلی‌متر، بارش سردترین فصل سال ۳۵-۶۰ میلی‌متر، ارتفاع از سطح دریا، ۳۱۰۰-۱۸۰۰ متر،

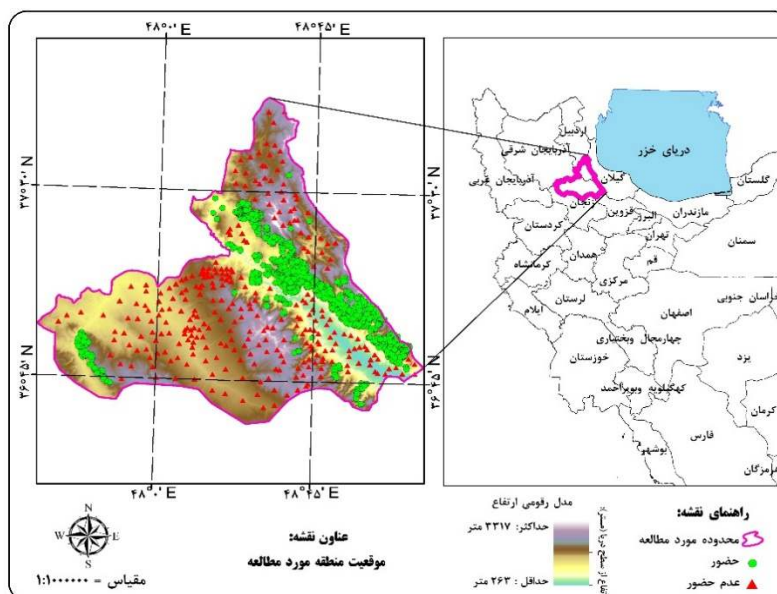
در جهات جغرافیایی جنوب، جنوب شرق و شرق، شیب ۳۰- ۱۰ درصد است، همچنین احتمال حضور گونه در نزدیک آبراهه‌ها و خط برف بیشتر است.

از نظر تاکسونومی گونه ارس (*J. excelsa*) مقاوم‌ترین و رایج‌ترین گونه ارس موجود در ایران است که می‌تواند خود را با رژیم‌های مختلف آب و هوایی و خاکی سازگار کند. ارس گونه‌ای کم‌توقع است که حتی توان استقرار در خاک‌های بسیار سطحی و واریزه‌ای که از نظر مواد آلی فقیر هستند را داراست و به‌عنوان یک گونه مهم تثبیت‌کننده خاک و کاهش‌دهنده فرسایش‌های آبی مطرح است. گونه ارس، دارای چوب خوش کار محکم و با دوام است که برگ‌ها و دانه‌های آن برای تهیه مواد دارویی و صنعتی کاربرد دارد. از سوی دیگر رشد آهسته، کند بودن روند تجدیدنسل و نیز بهره‌برداری بی‌رویه از چوب ارس این درختان را به‌شدت در معرض انهدام و انقراض قرار داده است. ارزش حفاظتی آنها بیش از هر استفاده دیگر اهمیت دارد و به‌عنوان عناصر گیاهی اصلی اکوسیستم‌های مناطق کوهستانی نقش بسیار ارزنده و حیاتی دارند و زندگی بسیاری از جانوران به آنها وابسته است. متأسفانه جنگل‌های ارس به‌علت استفاده‌های نامعقول با سرعت زیاد رو به نابودی قرار گرفته و در مراحل قهقرای توالی خود به سر می‌برند (۳). گونه غالب مراتع مشجر در شهرستان خلخال را گونه ارس (*J. excelsa*) تشکیل می‌دهد (۳۰ و ۳۴). استان زنجان دارای ۱/۱۵ میلیون هکتار رویشگاه طبیعی ارس است که از این مقدار ۱۳۰ هزار هکتار دارای تراکم مناسب و بالا هستند. ۲۷ درصد از کل این رویشگاه‌ها در شهرستان طارم زنجان قرار دارد (۳). با وجود گستردگی چشمگیر گونه ارس در این دو استان و دیگر مناطق رویشی در ایران، پژوهش‌های انجام شده در رابطه با جوامع گیاهی ارس در مقایسه با سایر کشورهای حوزه پراکنش آن بسیار ناچیز است. همچنین تاکنون مدل‌سازی پراکنش گونه ارس (*J. excelsa*) با استفاده از داده‌های سنجش از دوری و روش‌های مختلف مدل‌سازی مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به وسعت منطقه، عدم وجود اطلاعات مدون و شناخت عوامل مؤثر بر

پراکنش به منظور حفاظت گونه ارس پژوهش حاضر با هدف تعیین مهم‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌های سنجش از دور شامل شاخص‌های اقلیمی، توپوگرافی و سنجش از دوری با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) و رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین (MARS) برای پیش‌بینی حضور گونه ارس (*J. excelsa*) در شهرستان خلخال استان اردبیل و بخش شمالی استان زنجان (شامل سه شهرستان زنجان، طارم و بخش شمال شرقی شهرستان ماهنشان) با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی زیستگاه مساعدت شده (SAHM) صورت گرفته است. نتایج این مطالعه می‌تواند در اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی با رویکرد احیا یا ورود گونه به مناطقی با شرایط اکولوژیکی مشابه به کار رود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شامل بخش شمالی استان زنجان (شامل سه شهرستان زنجان، طارم و بخش شمال شرقی شهرستان ماهنشان) و شهرستان خلخال در جنوب استان اردبیل با مساحت ۱۰۳۶۷۴۲ هکتار در حدود جغرافیایی ۳۴° ۳۶' تا ۵۲° ۳۷' عرض شمالی و ۲۵' ۴۷' تا ۱۶' ۴۹° طول شرقی واقع گرفته است. منطقه مورد مطالعه در محدوده ارتفاعی ۲۶۳ تا ۳۳۱۷ متر از سطح دریا قرار گرفته است. بارندگی سالانه کل منطقه مورد مطالعه حدوداً ۴۵۰ میلی‌متر (حداقل ۳۴۲ و حداکثر ۸۱۲ میلی‌متر) و متوسط دما سالانه در محدوده ۵ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد (حداقل ۵ و حداکثر ۱۸ میلی‌متر) است. به‌طور کلی ارتفاعات منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوای سرد کوهستانی، زمستان‌های پربرف و سرد و در تابستان معتدل و خشک است. اقلیم منطقه براساس روش دومارتن نیمه‌خشک فراسرد است. جنگل‌های منطقه مورد مطالعه که به‌صورت انبوه، نیمه‌انبوه و تنک می‌باشند، جزو جنگل‌های خشک ناحیه ایران - تورانی هستند (۳ و ۲۴).



شکل ۱: موقعیت و تقسیمات سیاسی منطقه مورد مطالعه در ایران

روش پژوهش

نمونه‌برداری از پوشش گیاهی

برای جمع‌آوری اطلاعات از مناطق پراکنش گونه ارس (*J. excelsa*) از نقشه تیپ‌های گیاهی تهیه شده در اداره منابع طبیعی استان زنجان و اردبیل، مطالعات پیشین در قالب پایان‌نامه‌های دانشجویی و مطالعات میدانی استفاده شد. در ابتدا با استفاده از نقشه کاربری اراضی، بازدید میدانی اولیه از منطقه مورد مطالعه مناطق دارای راه دسترسی برای ثبت نمونه انتخاب و سپس با پیمایش عرصه‌ای مختصات طول و عرض جغرافیایی نقاط حضور و عدم حضور گونه با استفاده از (GPS) ثبت شد. نقاط حضور گونه بدین مفهوم است که میزان تراکم و نمود ظاهری این گونه در منطقه قابل ملاحظه بوده است و این گونه جزو گونه‌های غالب تیپ گیاهی است. مناطقی که این گونه به‌عنوان گونه همراه بوده و تراکم و نمود ظاهری کمی داشت به‌عنوان سایت غیاب لحاظ شد. در هنگام ثبت نقاط حضور برای اجتناب از اریب ناشی از نمونه‌برداری سعی شد مناطقی به‌عنوان محل حضور در نظر گرفته شوند که علاوه بر غالبیت گونه حداقل یک لکه به مساحت یک کیلومترمربع را تحت پوشش قرار داده باشد، همچنین نمونه‌برداری از یکدیگر حداقل یک کیلومتر فاصله داشتند (۳۸). به‌منظور کاهش خودهمبستگی و اریب داده‌های حضور از جعبه ابزار SDM

و روش چند فاصله (Multiple rarefying distances) در نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. سپس به‌منظور بررسی الگوی پراکنش نقاطی که اریب آنها کاهش یافته است از ابزار میانگین نزدیکترین فاصله همسایگی (Average Nearest Neighbor) استفاده شد. این روش ابتدا فاصله بین نقطه مرکزی هر عارضه را با نقطه مرکزی نزدیکترین همسایه‌اش اندازه‌گیری کرده، سپس میانگین تمامی این نزدیکترین همسایگی‌ها را محاسبه می‌کند. اگر میانگین فاصله محاسبه شده از میانگین توزیع تصادفی فرضی کمتر باشد آنگاه می‌توان نتیجه گرفت که توزیع پدیده مورد بررسی خوشه‌ای است. اگر میانگین فاصله محاسبه شده بزرگتر از میانگین توزیع تصادفی باشد آنگاه می‌توان نتیجه گرفت که عوارض به‌صورت پراکنده در فضا توزیع شده‌اند (۱۲). نتایج این تحلیل نشان داد که داده‌های حضور در منطقه از الگوی خوشه‌ای پیروی نمی‌کنند و نقاط حضور به‌صورت تصادفی در تمام محدوده مطالعه تهیه ثبت شده‌اند. از آنجا که مدل‌های مورد استفاده از گروه روش‌های طبقه‌بندی کننده هستند پس به دو نوع داده (حضور و غیاب) نیاز است. از این‌رو، علاوه بر ثبت نقاط حضور برای گونه، به دلیل لزوم دسترسی به نقاط غیاب جهت مدلسازی، از نقاط شبه غیاب به‌صورت تصادفی استفاده شد. به‌منظور دستیابی به نقاط

آماده‌سازی لایه‌های داده‌های مورد استفاده در مدل انتخاب، تهیه و آماده‌سازی لایه‌های وابسته به اقلیمی دما و بارش به‌عنوان اصلی‌ترین متغیرهای اقلیمی مؤثر در شکل‌گیری انواع پوشش‌های گیاهی در مدل استفاده شد. با توجه به اینکه تعداد و پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک در استان اردبیل و زنجان نامطلوب است و امکان نقشه‌سازی متغیرهای وابسته به درجه حرارت با صحت مناسب وجود ندارد، با توجه به هدف مطالعه که استفاده از اطلاعات برگرفته از سنجش از دور است بدین‌منظور جهت تهیه لایه بارش و دما از اطلاعات برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی بالا (فواصل تصویربرداری کوتاه) استفاده شد. بدین منظور بازه زمانی ۳۰ ساله انتخاب و با توجه به تعداد و حجم بالای اطلاعات در این بازه زمانی از موتور پردازشگر قدرتمند Google earth engine و کدنویسی استفاده شد که کدهای مورد استفاده برای هدف این مطالعه در جدول (**Error! Reference source not found.** ۱) ارائه شده است. همچنین تولیدات ماهواره‌ای مورد استفاده در جدول (**Error! Reference source not found.** ۲) ارائه شده است.

شبه‌غیاب ابتدا مدلسازی رویشگاه با استفاده از مدل دامنه اجرا و از نقشه پیش‌بینی حاصل از این روش برای تهیه نقاط شبه‌غیاب استفاده شد. در این راستا متغیرهای رویشگاه وارد نرم‌افزار ArcGIS شدند و مدلسازی نقاط غیاب با استفاده از این نرم‌افزار انجام شد. خروجی نرم‌افزار نقشه صفر و یک است که در آن پهنه‌های نامطلوب ارزش صفر و پهنه‌های مطلوب برای پراکنش گونه ارزش عددی یک را به خود اختصاص می‌دهد. بدین ترتیب نقطه غیاب به شکل تصادفی در بخش‌هایی که به‌عنوان رویشگاه نامطلوب شناسایی شده بود، ایجاد شد. ایجاد نقاط شبه‌غیاب نیز به‌صورت تصادفی با استفاده از ابزار Random Selection در نرم‌افزار ArcGIS با فواصل تقریبی ۱ کیلومتری انجام شد. بازبینی موقعیت نقاط غیاب ثبت شده به جهت حصول اطمینان از غیاب گونه، با بازدید میدانی انجام شد. دستیابی به یک مدل مطلوبیت قابل‌استناد نیازمند دستیابی به تعداد کافی از نقاط حضور گونه موردنظر است بنابراین جمعاً تعداد ۱۵۷۷ (نقطه حضور و غیاب) برای گونه به ثبت رسید. پیمایش صحرایی در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ انجام گرفت.

جدول ۱: کدهای مورد استفاده داده‌های بارش و دما

| دما | بارش |
|---|---|
| <pre> var geometry = /* color: #d63000 */ /* displayProperties: [{ "type": "rectangle" }] */ ee.Geometry.Polygon([[[47.31064567849103, 38.45520839285983], [47.31064567849103, 36.34334403266938], [50.50766716286603, 36.34334403266938], [50.50766716286603, 38.45520839285983]]], null, false); /**** End of imports. If edited, may not auto-convert in the playground. *****/ Map.centerObject(geometry); Map.addLayer(geometry); var tem = ee.ImageCollection("NASA/FLDAS/NOAH01/C/GL/M/V001") .filterBounds(geometry) .filterDate('1990-01-01', '2021-12-30') .select('Tair_f_tavg') .toBands() .clip(geometry); print(tem); Map.addLayer(tem, {}, 'tem'); Export.image.toDrive({ image: tem, description: 'tem', scale: 10000, region: geometry, maxPixels: 1e9, }); </pre> | <pre> var geometry = /* color: #d63000 */ /* displayProperties: [{ "type": "rectangle" }] */ ee.Geometry.Polygon([[[47.31064567849103, 38.45520839285983], [47.31064567849103, 36.34334403266938], [50.50766716286603, 36.34334403266938], [50.50766716286603, 38.45520839285983]]], null, false); /**** End of imports. If edited, may not auto-convert in the playground. *****/ Map.centerObject(geometry); Map.addLayer(geometry); var trmm = ee.ImageCollection("TRMM/3B43V7") .filterBounds(table) .filterDate('1990-01-01', '2021-02-30') .select('precipitation'); .toBands() .clip(geometry); print(Per); Map.addLayer(tem, {}, 'tPer'); Export.image.toDrive({ image: Per, description: 'Per', scale: 10000, region: geometry, maxPixels: 1e9, }); </pre> |

جدول ۲: تولیدات ماهواره‌ای مورد استفاده

| نام | شرح | بازه زمانی مورد استفاده (در دسترس) | اندازه پیکسل (درجه جغرافیایی) |
|--|---|------------------------------------|-------------------------------|
| TRMM 3B43: Monthly Precipitation Estimates | پروژه مأموریت اندازه‌گیری بارندگی استوایی (تخمین ماهانه بارش و بر اساس آن تهیه لایه بارش سالانه) | ۲۰۲۱/۱۲/۳۰ الی ۱۹۹۰/۰۱/۰۱ | ۰/۲۵*۰/۲۵ |
| FLDAS: Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System | FLDAS: شبکه سیستم‌های هشدار زودهنگام قحطی (FEWS NET) سیستم همسان‌سازی داده‌های زمین (Restored original (Edited) جهت محاسبه دمای هوای سالانه | ۲۰۱۹/۱۲/۰۱ الی ۱۹۹۸/۰۱/۰۱ | ۰/۲۵*۰/۲۵ |

آماده‌سازی لایه‌های توپوگرافی اولیه و ثانویه

با توجه به بررسی اولیه، نقشه‌های پستی و بلندی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور برای منطقه انتخاب و با استفاده از ابزار Spatial Analyst در نرم‌افزار ArcGIS (نسخه ۱۰.۵) نقشه مدل نقشه رقومی ارتفاع، شیب و جهات جغرافیایی تهیه شد.

آماده‌سازی لایه‌های وابسته به شاخص‌های سنجش از دور به منظور استخراج شاخص‌های سنجش از دور ابتدا بایستی نوع ماهواره، سنسور و زمان تصویربرداری با توجه به هدف مطالعه انتخاب گردد. با توجه به اینکه محدوده مورد مطالعه وسعت بالایی داشته و همچنین به جهت هزینه بالای تصاویر با قدرت تفکیک مکانی مناسب از تصاویر سری ۸ ماهواره لندست و سنسور OLI آن استفاده شد. با توجه به مراحل فنولوژی و درجه سبزی‌نگی درخت ارس در منطقه مورد مطالعه با سایر گونه‌های پوشش گیاهی قابل تمایز

است تصویر خردادماه سال ۱۴۰۰ با پوشش ابر حداقلی انتخاب گردید که ویژگی‌های تصویر انتخابی در جدول (۳) ارائه شده است. عملیات پیش‌پردازش در واقع اعمال کلیه اقداماتی است که ضمن تصحیح کلیه اعوجاج‌ها و خطاهای احتمالی، با استخراج اطلاعات اولیه، آن‌ها را برای مرحله‌ی پردازش آماده می‌کند (۱۰). به منظور کنترل کیفیت داده‌ها و آگاهی از وجود خطاهای توپوگرافی، رادیومتریکی - اتمسفری و هندسی تصاویر مورد بررسی اولیه قرار گرفتند. سپس به منظور استخراج شاخص‌های سنجش از دور با استفاده از نرم‌افزار ENVI، شاخص‌های سنجش از دوری شامل شاخص جهانی پایش محیطی (GEMI)، شاخص سطح برگ (LAI)، شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی (MNDWI) و شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده (VARI) محاسبه و لایه رستری آن تهیه شد.

جدول ۳: اطلاعات باندهای ماهواره لندست (منبع: سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا)

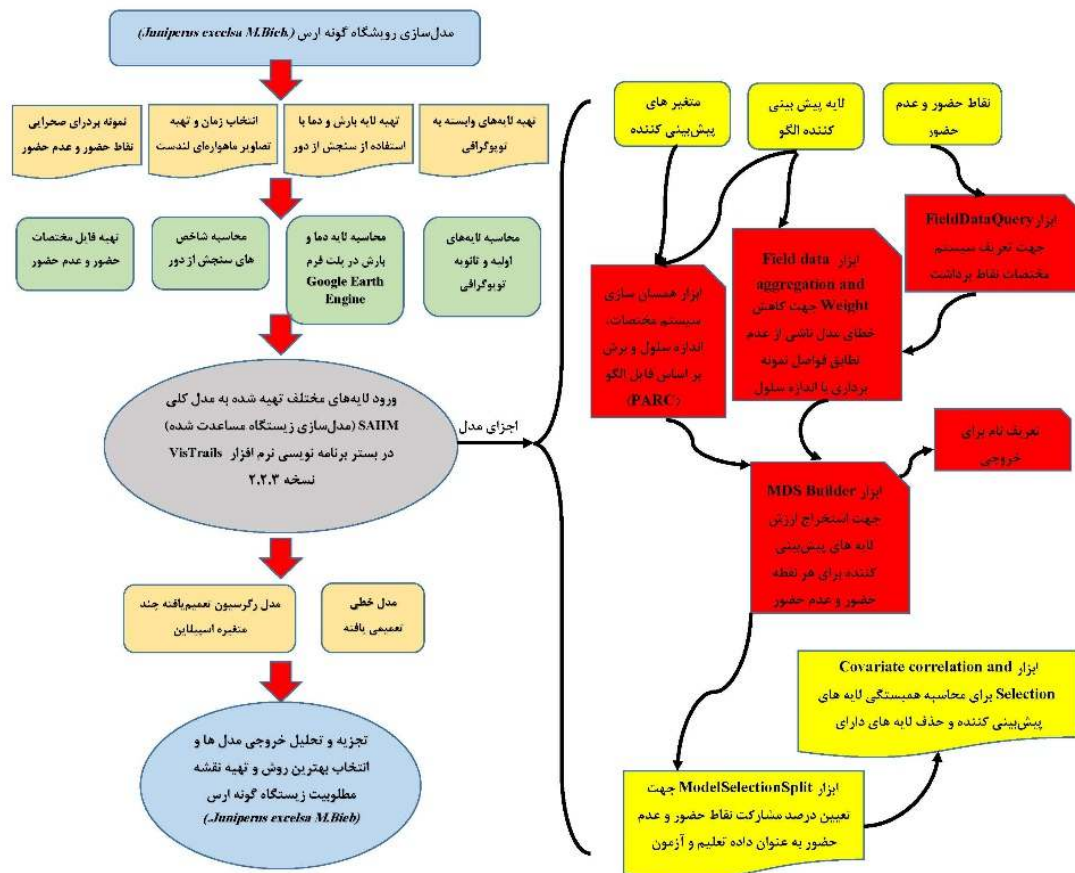
| نوع ماهواره و سنجنده | باند | طول موج (میکرومتر) | قدرت تفکیک مکانی (متر) |
|----------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------|
| سنجنده OLI لندست ۸ | باند ۱ - ماورای آبی | ۰/۰-۴۳۵/۴۵۱ | ۳۰ |
| | باند ۲ - آبی | ۰/۰-۴۵۲/۵۱۲ | ۳۰ |
| | باند ۳ - سبز | ۰/۰-۵۳۳/۵۹۰ | ۳۰ |
| | باند ۴ - قرمز | ۰/۰-۶۳۶/۶۷۳ | ۳۰ |
| | باند ۵ - مادون قرمز نزدیک | ۰/۰-۸۵۱/۸۷۹ | ۳۰ |
| | باند ۶ - مادون قرمز موج کوتاه ۱ | ۱/۱-۵۶۶/۶۵۱ | ۳۰ |
| | باند ۷ - مادون قرمز موج کوتاه ۲ | ۲/۲-۱۰۷/۲۹۴ | ۳۰ |
| سنجنده TIRS لندست ۸ | باند ۱۰ - مادون قرمز حرارتی ۱ | ۱۰/۱۱-۶۰/۱۹ | ۱۰۰*۳۰ |
| | باند ۱۱ - مادون قرمز حرارتی ۲ | ۱۱/۱۲-۵۰/۵۱ | ۱۰۰*۳۰ |

به منظور افزایش صحت تجزیه و تحلیل برای کمی کردن ارتباط بین متغیرها و گونه، اقدام به محدود کردن متغیرهای مورد بررسی شده است. بدین منظور ابتدا برای جلوگیری از همخطی و انتخاب مهم‌ترین متغیرهای مورد بررسی با

کمترین همبستگی و همخطی، همبستگی بین متغیرها مورد بررسی قرار گرفت. به منظور کاهش اثرهای نامطلوب ناشی از همبستگی میان متغیرها از بین جفت متغیرهایی که دارای همبستگی بالاتر از ۰/۸ بودند با انجام آزمون

از حضورهایی که به‌درستی پیش‌بینی شده است)، اختصاصیت (کسری از عدم حضورها که به‌درستی پیش‌بینی شده است)، آمار مهارت واقعی (تطابق و عدم تطابق بین مشاهدات و پیش‌بینی‌ها) و مقدار کاپا (به روش کوهن) مورد بررسی قرار گرفته است. قابل ذکر است که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل پیش‌بینی و ۳۰ درصد آن برای ارزیابی مدل به کار برده شدند و هر دو دسته از داده‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب شدند. در شکل (۲) نمودار مراحل اجرایی تحقیق و فرآیند مدلسازی رویشگاه گونه در نرم‌افزار SAHM ارائه شده است.

تجزیه به مؤلفه‌های اصلی یکی از آنها حذف شد. پس از تهیه لایه‌های متغیرهای مورد بررسی از نرم‌افزار مدل‌سازی زیستگاه مساعدت شده (SAHM) به‌عنوان ابزار مدل‌سازی درخت رگرسیون تقویت شده و جنگل تصادفی استفاده شد. اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی کننده پراکنش گونه، گامی اساسی در توسعه و تعیین مناطق مناسب پراکنش گونه و تعیین کیفیت آنها است. به‌منظور اعتبارسنجی مدل‌های مورد استفاده از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC)، مساحت زیر منحنی (AUC) و ماتریس خطا استفاده شده است. در ماتریس خطا معیارهایی شامل درصدی که به درستی طبقه‌بندی شده، حساسیت (کسری

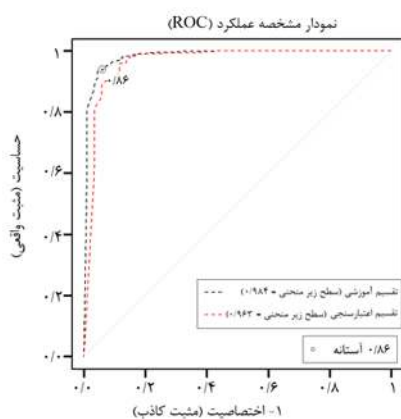


شکل ۲: نمودار مراحل اجرایی تحقیق

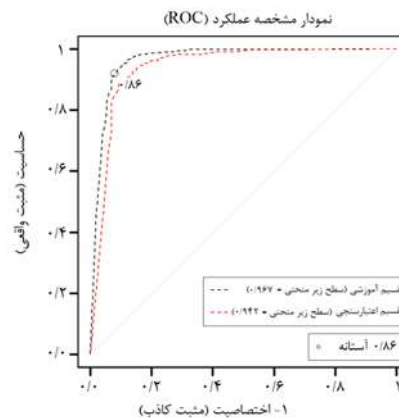
نتایج

اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی کننده پراکنش گونه هر چه سطح زیر منحنی (AUC) بیشتر باشد اعتبار تمایز بین زیستگاه‌های مناسب و نامناسب مورد تحقیق بالاتر خواهد بود و به همان نسبت نیز دقت مدل بیشتر می‌شود که میزان آن از ۰ تا ۱ متغیر است که به‌طور کلی تقسیم‌بندی ۰/۹ تا ۱ عالی، ۰/۹ تا ۰/۸ تا ۰/۸ تا ۰/۷ خوب، ۰/۷ تا ۰/۶ متوسط و ۰/۶ تا ۰/۵ ضعیف را برای

آن ارائه داده‌اند. براساس نتایج اعتبارسنجی مدل‌های استفاده شده با استفاده از داده‌های آزمون نشان داد مقدار مدل خطی تعمیم یافته (۰/۹۶۷) و رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین (۰/۹۸۴) و برای هر دو مدل در سطح عالی قرار می‌گیرند. نتایج مربوط به اعتبارسنجی مدل‌های مورد استفاده در این پژوهش در اشکال (۲) و (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳: نمودار اعتبارسنجی نقشه پراکنش زیستگاه گونه *J. excelsa* در روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



شکل ۲: نمودار اعتبارسنجی نقشه پراکنش زیستگاه گونه *J. excelsa* در روش مدل خطی تعمیم یافته

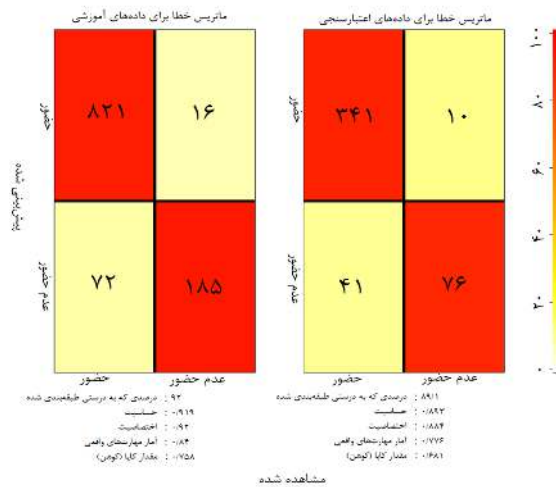
تحلیل ماتریس خطا

در مدل خطی تعمیم یافته در ماتریس خطا برای داده‌های آموزشی از مجموع ۱۰۹۴ داده حضور و عدم حضور وارد شده به مدل، ۸۲۱ داده حضور و ۱۸۵ داده عدم حضور به درستی پیش‌بینی شده است (مجموعاً ۱۰۰۶)؛ در حالیکه ۱۶ داده حضور و ۷۲ داده عدم حضور به ترتیب عدم حضور و حضور پیش‌بینی شده است (مجموعاً ۸۸) (شکل ۴). در مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین در ماتریس خطا برای داده‌های آموزشی از مجموع ۱۰۹۴ داده حضور و عدم حضور وارد شده به مدل، ۸۳۳ داده حضور و ۱۸۹ داده عدم حضور به درستی پیش‌بینی شده است (مجموعاً ۱۰۲۷)؛ در حالیکه ۱۲ داده حضور و ۵۵ داده عدم حضور به ترتیب عدم حضور و حضور پیش‌بینی شده است (مجموعاً

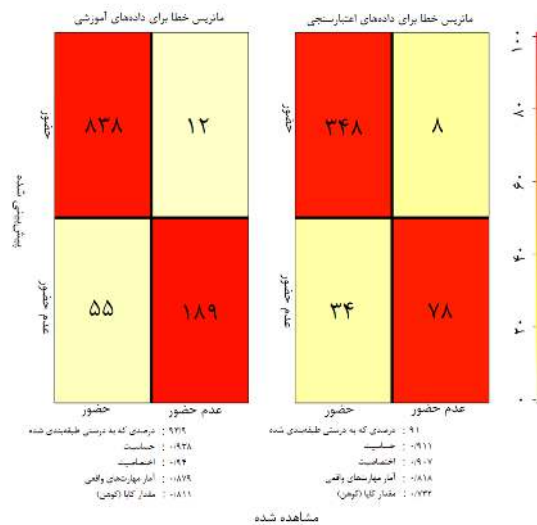
۶۷) (شکل ۵). ماتریس خطا برای داده‌های اعتبارسنجی نیز در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. درصدی که به درستی طبقه‌بندی شده در ماتریس خطا برای داده‌های آموزشی و داده‌های اعتباری در مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین به ترتیب ۹۳/۹ و ۹۱ درصد و در مدل خطی تعمیم یافته به ترتیب ۹۲ و ۸۹/۱ درصد است. کسری از حضورهایی که به درستی پیش‌بینی شده براساس داده حساسیت در ماتریس خطا برای داده‌های آموزشی و داده‌های اعتباری در مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین به ترتیب ۰/۹۳۸ و ۰/۹۱۱ و در مدل خطی تعمیم یافته به ترتیب ۰/۹۱۹ و ۰/۸۹۳ است. کسری از عدم حضورها که به درستی پیش‌بینی شده براساس داده اختصاصیت در ماتریس خطا برای داده‌های آموزشی و داده‌های اعتباری در مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره

به ترتیب ۰/۸۴۰ و ۰/۷۷۶ است. تطابق و عدم تطابق بین مشاهدات و پیش‌بینی‌ها براساس مقدار کاپا در ماتریس خطا برای داده‌های آموزشی و داده‌های اعتباری در مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین به ترتیب ۰/۸۱۱ و ۰/۷۳۲ و در مدل خطی تعمیم یافته به ترتیب ۰/۷۵۸ و ۰/۶۸۱ است (شکل‌های ۴ و ۵).

اسپیلاین به ترتیب ۰/۹۴۰ و ۰/۹۰۷ و در مدل خطی تعمیم یافته به ترتیب ۰/۹۲۰ و ۰/۸۸۴ است. تطابق و عدم تطابق بین مشاهدات و پیش‌بینی‌ها براساس داده آمار مهارت‌های واقعی در ماتریس خطا برای داده‌های آموزشی و داده‌های اعتباری در مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین به ترتیب ۰/۸۷۹ و ۰/۸۱۸ و در مدل خطی تعمیم یافته



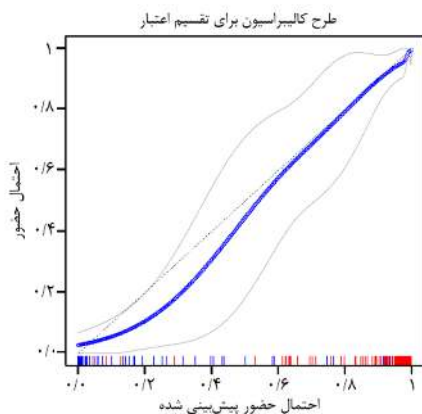
شکل ۴: ماتریس خطا برای داده‌های آموزشی و داده‌های اعتبارسنجی متقابل مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* در روش خطی تعمیم یافته



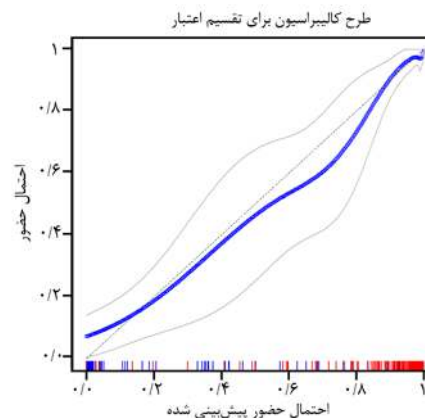
شکل ۵: ماتریس خطا برای داده‌های آموزشی و داده‌های اعتبارسنجی متقابل مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین

دنبال می‌کند که نشان‌دهنده کالیبراسیون خوب مدل است (شکل‌های ۶ و ۷).

تحلیل طرح کالیبراسیون برای تقسیم اعتبار مدل نمودار کالیبراسیون در روش مدل خطی تعمیم‌یافته و رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین مورب را به خوبی



شکل ۷: طرح کالیبراسیون برای تقسیم اعتبار مدل مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* در روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین

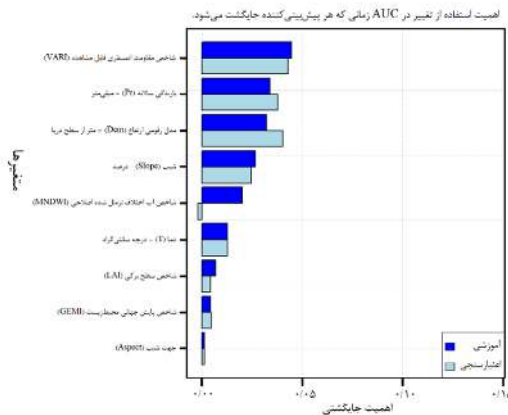


شکل ۶: طرح کالیبراسیون برای تقسیم اعتبار مدل مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* در روش خطی تعمیم‌یافته

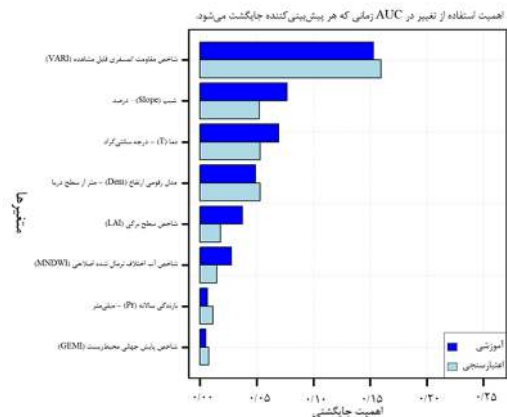
مطلوبیت زیستگاه براساس روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین برای داده‌های آموزشی به‌ترتیب شامل شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده، بارندگی سالانه، مدل رقومی ارتفاع، شیب، شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی، دما، شاخص سطح برگی، شاخص پایش جهانی محیط‌زیست و جهت است. مهمترین متغیرها براساس روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین برای داده‌های اعتبارسنجی به‌ترتیب شامل شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده، مدل رقومی ارتفاع، بارندگی سالانه، شیب، دما، شاخص پایش جهانی محیط‌زیست، شاخص سطح برگی، شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی و جهت شیب است (شکل ۹).

نمودار اهمیت هر یک از متغیرها

مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر مطلوبیت زیستگاه براساس روش مدل خطی تعمیم‌یافته برای داده‌های آموزشی به‌ترتیب شامل شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده، شیب، دما، مدل رقومی ارتفاع، شاخص سطح برگی، شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی، بارندگی سالانه و شاخص پایش جهانی محیط‌زیست است. مهمترین متغیرها براساس روش مدل خطی تعمیم‌یافته برای داده‌های اعتبارسنجی به‌ترتیب شامل شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده، مدل رقومی ارتفاع، دما، شیب، شاخص سطح برگی، شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی، بارندگی سالانه و شاخص پایش جهانی محیط‌زیست است (شکل ۸). مهمترین متغیرهای مؤثر بر



شکل ۹: نمودار اهمیت هر یک از متغیرها بر مدل مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* در روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



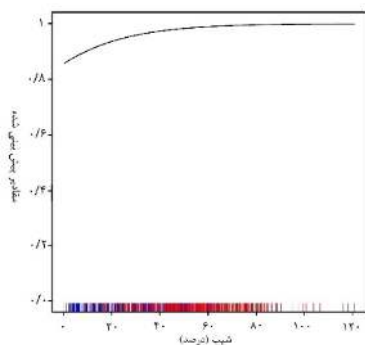
شکل ۸: نمودار اهمیت هر یک از متغیرها بر مدل مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* در روش خطی تعمیم‌یافته

نمودار منحنی پاسخ

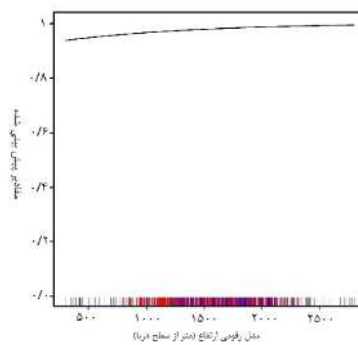
روش خطی تعمیم‌یافته

در مدل خطی تعمیم یافته منحنی پاسخ گونه به متغیر ارتفاع به صورت افزایشی بوده، حداقل ارتفاع زیستگاه این گونه ۴۵۰ متر و حداکثر ارتفاع آن حدود ۲۸۰۰ متر است. نتایج نشان داد که با افزایش درصد شیب (بالتر از ۳۰ درصد) احتمال حضور گونه به سرعت افزایش و در شیب بالاتر از ۴۰ درصد تقریباً ثابت می‌ماند. نتایج نشان داد احتمال حضور گونه در بازه بارندگی ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر وجود دارد. با افزایش میزان بارندگی احتمال حضور گونه افزایش و پس از آن روند تقریباً ثابتی دارد. احتمال حضور گونه در بازه دمایی ۶ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد وجود دارد. با افزایش دما احتمال حضور گونه به سرعت افزایش و سپس روند ثابتی مشاهده شد. بیشترین احتمال حضور برای این گونه برای مناطقی با دمای ۱۲ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد است.

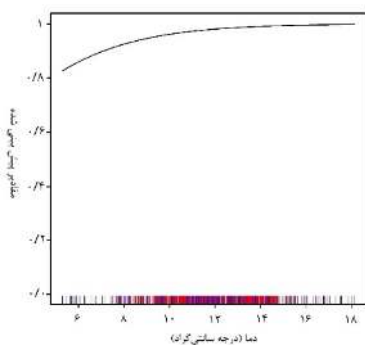
با افزایش متغیر شاخص جهانی پایش محیط‌زیست احتمال حضور این گونه به سرعت کاهش پیدا می‌کند. بیشترین حضور گونه در مقدار ۰/۱۸ و کمترین احتمال حضور در ۰/۲۴ است. با افزایش شاخص سطح برگی احتمال حضور گونه به شدت کاهش می‌یابد به طوری که بیشترین احتمال حضور گونه در شاخص سطح برگی صفر و کمترین مقدار پیش‌بینی شده در سطح پیش‌بینی ۰/۰۵ تا ۰/۱۵ مشاهده شد. با افزایش شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی (بیشتر از ۰/۲-) احتمال حضور گونه به سرعت کاهش می‌یابد احتمال حضور گونه در بازه ۰/۵- تا حدود صفر مشاهده شد. منحنی پاسخ شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده نشان می‌دهد احتمال پراکنش گونه با افزایش این شاخص از ۰/۱۸- به سرعت افزایش و در بازه ۰/۱۸- تا ۰/۳ روند تقریباً ثابتی دارد (شکل‌های ۱۰ تا ۱۷).



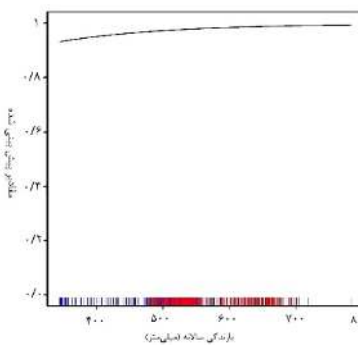
شکل ۱۰: منحنی پاسخ مدل رقومی ارتفاع - روش خطی تعمیم یافته



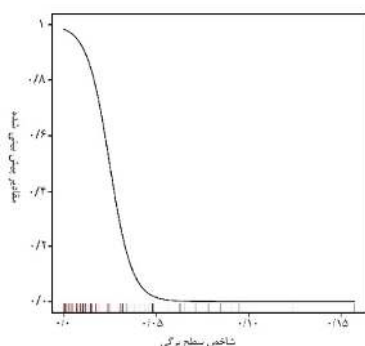
شکل ۱۱: منحنی پاسخ مدل رقومی ارتفاع - روش خطی تعمیم یافته



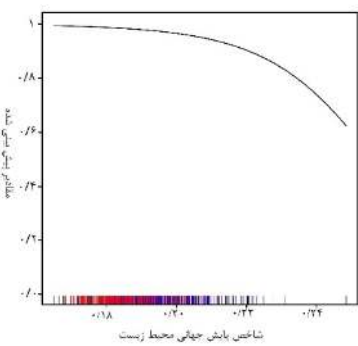
شکل ۱۲: منحنی پاسخ مقدار بارندگی سالانه - روش خطی تعمیم یافته



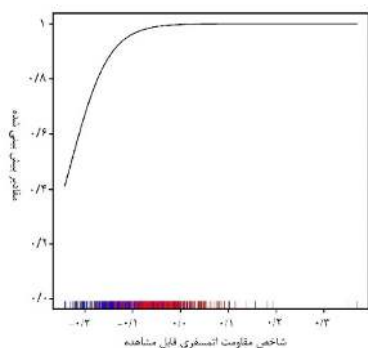
شکل ۱۳: منحنی پاسخ دما - روش خطی تعمیم یافته



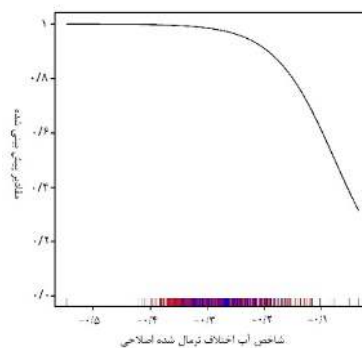
شکل ۱۴: منحنی پاسخ شاخص پایش جهانی محیط زیست - روش خطی تعمیم یافته



شکل ۱۵: منحنی پاسخ شاخص سطح برگی - روش خطی تعمیم یافته



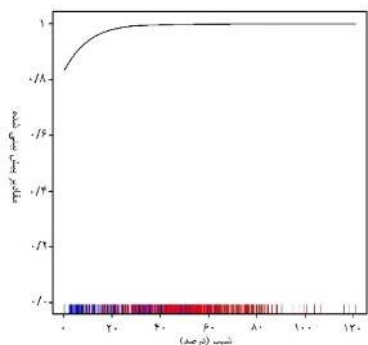
شکل ۱۷: منحنی پاسخ شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده
- مدل خطی تعمیم یافته



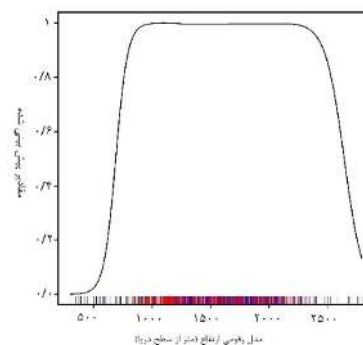
شکل ۱۶: منحنی پاسخ شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی
- مدل خطی تعمیم یافته

بارندگی ۷۳۰ میلی‌متر و بیش از این مقدار مشاهده شده است. با افزایش دما تا ۸ درجه سانتی‌گراد حضور گونه افزایش و پس از آن تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد روند تقریباً ثابتی دارد. با افزایش متغیر شاخص جهانی پایش محیط‌زیست از ۰/۱۸ تا ۰/۲۲ احتمال حضور این گونه ابتدا ثابت و در بیش از این مقدار به سرعت کاهش پیدا می‌کند. بیشترین حضور گونه در مقدار ۰/۱۸ و کمترین احتمال حضور در ۰/۲۴ است. منحنی پاسخ گونه به شاخص سطح برگری روند سیگموئیدی معکوس دارد به طوری که در ابتدا روند حضور گونه ثابت (۰ تا ۰/۷) و سپس با افزایش این شاخص (بیش از ۰/۸) حضور گونه به سرعت کاهش و در بیشتر از ۰/۱۵ روند ثابتی دارد. شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی از ۰/۵- تا ۰/۱- روند ثابت و پس از آن احتمال حضور گونه کاهش می‌یابد. منحنی پاسخ شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده نشان می‌دهد احتمال پراکنش گونه با افزایش این شاخص از ۰/۱۸- به سرعت افزایش و در بازه ۰/۱۸- تا ۰/۳- روند تقریباً ثابتی دارد (اشکال ۱۸ تا ۲۶).

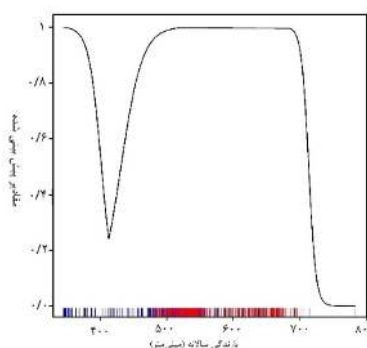
روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین در مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین منحنی پاسخ گونه به متغیر ارتفاع به صورت زنگوله‌ای بوده، حداقل ارتفاع زیستگاه این گونه ۴۵۰ متر و حداکثر ارتفاع آن حدود ۲۸۰۰ متر است و با افزایش ارتفاع احتمال حضور گونه کم می‌شود. بیشترین تراکم ۸۰۰ تا ۲۳۰۰ متری با حضور ثابت است و سپس در ارتفاع بیش از ۲۵۰۰ متری حضور گونه به سرعت کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد شیب (بالتر از ۲۰ درصد) احتمال حضور گونه به سرعت افزایش و در شیب بالاتر از ۲۰ درصد تقریباً روند ثابتی دارد. جهت شیب روند ثابتی در پراکنش گونه ارس دارد. مقدار بارندگی اثر متفاوتی در روند پراکنش گونه داشته است به طوری که با افزایش بارندگی تا ۴۰۰ میلی‌متر روند گونه ابتدا کاهش و کمترین حضور گونه در مقدار بارندگی ۴۰۰ میلی‌متر و در بیشتر از این مقدار مجدداً حضور گونه افزایش یافته است (۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر) و در بارندگی بیش از ۷۰۰ میلی‌متر مجدداً پراکنش گونه به شدت کاهش یافته است و کمترین حضور گونه در



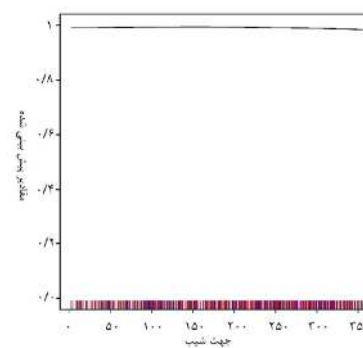
شکل ۱۹: منحنی پاسخ شیب - روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



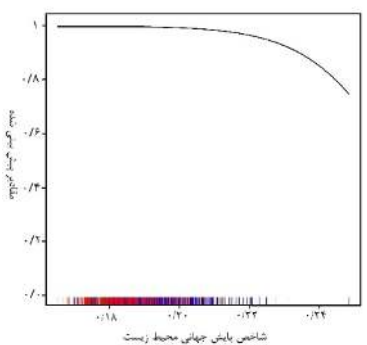
شکل ۱۸: منحنی پاسخ مدل رگومی ارتفاع - روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



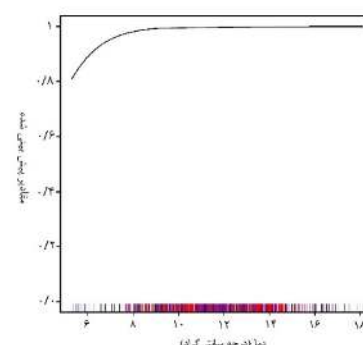
شکل ۲۱: منحنی پاسخ بارندگی سالانه - روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



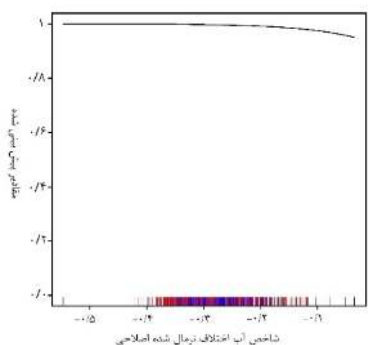
شکل ۲۰: منحنی پاسخ جهت شیب - روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



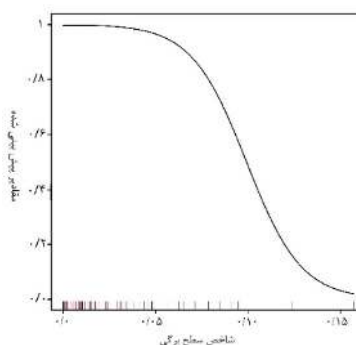
شکل ۲۳: منحنی پاسخ شاخص پایش جهانی محیط زیست - روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



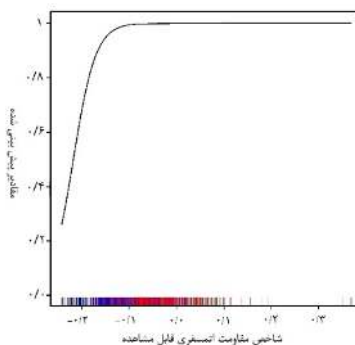
شکل ۲۲: منحنی پاسخ دما - روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



شکل ۲۵: منحنی پاسخ شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی - روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



شکل ۲۴: منحنی پاسخ شاخص سطح برگ - روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین

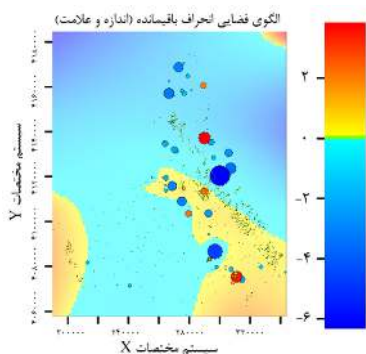


شکل ۲۶: منحنی پاسخ شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده - روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین

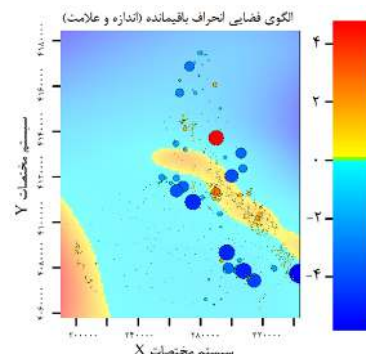
از ۲ می‌تواند نشان‌دهنده یک مشکل باشد بر این اساس مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین با بازه کمتر برازش مناسب‌تری از پراکنش گونه ارائه می‌دهد (اشکال ۲۷ و ۲۸).

نمودارهای باقیمانده مدل رابطه فضایی

در نمودار الگوی فضایی مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* در مدل خطی تعمیم‌یافته در بازه ۴- تا ۴+ و در رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین در بازه ۶- تا ۲+ است. با توجه به اینکه باقیمانده‌های انحراف با مقادیر مطلق بزرگتر



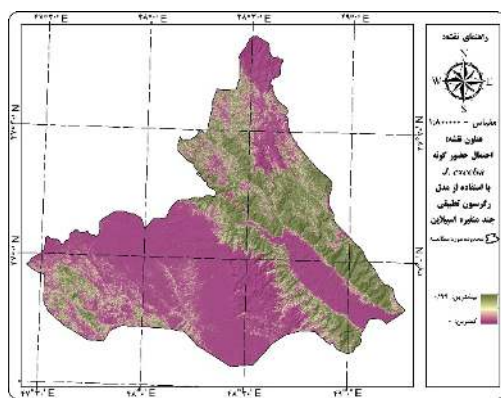
شکل ۲۸: الگوی فضایی مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* در روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



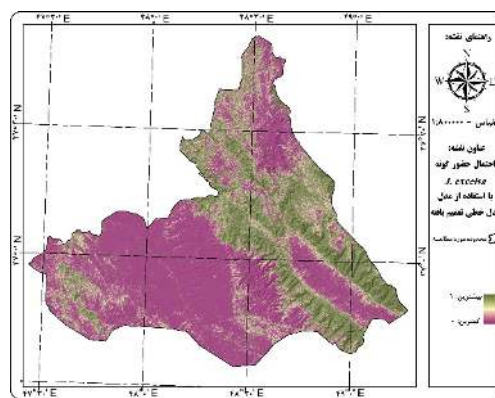
شکل ۲۷: الگوی فضایی مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* در روش خطی تعمیم‌یافته

زیستگاه‌های مطلوب و نامطلوب و درصد هر یک براساس دو مدل در جدول (۴) ارائه شده است.

در نهایت نقشه طبقه‌بندی شده حضور و عدم حضور هر مدل ترسیم شد (اشکال ۳۰ و ۳۱). مساحت



شکل ۳۰: نقشه نهایی مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* براساس روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین



شکل ۳۱: نقشه نهایی مدل‌سازی مطلوبیت زیستگاه *J. excelsa* براساس روش خطی تعمیم‌یافته

جدول ۴: مساحت و درصد مطلوبیت زیستگاه در محدوده مورد مطالعه

| مدل | زیستگاه مطلوب برای حضور گونه | | زیستگاه نامطلوب برای حضور گونه | | سطح کل منطقه | |
|--|------------------------------|------------|--------------------------------|------------|--------------|------------|
| | هکتار | درصد از کل | هکتار | درصد از کل | هکتار | درصد از کل |
| روش خطی تعمیم‌یافته | ۳۴۹۵۶۹ | ۳۳/۷ | ۶۸۷۱۷۳ | ۶۶/۳ | ۱۰۳۶۷۲۲ | ۱۰۰ |
| روش رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین | ۳۴۰۶۱۰ | ۳۲/۸ | ۶۹۶۱۳۲ | ۶۷/۲ | | |

کردند برای جلوگیری از این مشکل احتمالی، هر مدلی باید قبل از استفاده از نظر دقت در میدان آزمایش شود (۱۰). همان‌طور که در بخش نتایج مشاهده شد با وجود شباهت به نسبت زیاد بین نتایج حاصل از دو مدل، متغیرهای اثرگذار و نقشه‌های شایستگی زیستگاه یا الگوهای مکانی در احتمال وقوع پیش‌بینی شده گونه ارس بین الگوریتم‌های مدل متفاوت است اما همپوشانی بسیاری با هم دارند که این مرتبط با بهره‌مندی مدل‌های از منطبق‌های متفاوت در امر مدلسازی است. به دلیل تفاوت در ماهیت مدل‌های استفاده شده در این مطالعه نمی‌توان انتظار داشت نتایج حاصل از مدل‌ها یکسان باشد (۷).

متغیرهای پیش‌بینی کننده گونه ارس

شاخص‌های توپوگرافی پیش‌بینی کننده گونه ارس نتایج نشان داد که حداقل ارتفاع زیستگاه گونه ارس ۴۵۰ متر و حداکثر ۲۸۰۰ متر از سطح دریا است و با افزایش ارتفاع احتمال حضور گونه کم می‌شود. بیشترین احتمال حضور گونه در ارتفاع ۸۰۰ تا ۲۳۰۰ مشاهده شد و سپس

بحث و نتیجه گیری

کارایی مدل در پراکنش گونه ارس

نتایج نشان داد براساس سطح زیر منحنی و ضریب کاپا در مدل رگرسیون تعمیم‌یافته چندمتغیره اسپیلاین (سطح زیر منحنی = $0/984$ ، ضریب کاپا = $0/811$) و مدل خطی تعمیمی یافته (سطح زیر منحنی = $0/967$ ، ضریب کاپا = $0/758$) است. مقدار سطح زیر منحنی بالای $0/9$ نشان می‌دهد که این مدل‌ها دارای قابلیت عالی برای پیش‌بینی پراکنش گونه ارس در منطقه مورد مطالعه هستند. محمدی و همکاران (۲۰۲۲) و گاشپاروویچووا و همکاران (۲۰۲۲)، در مطالعات خود که با هدف پیش‌بینی پراکنش گونه با استفاده از مدل‌های رگرسیون تطبیقی چند متغیره اسپیلاین و مدل خطی تعمیم یافته بود بیان کردند که هر دو مدل دقت بالایی داشتند. در حالی که برخی از مدل‌ها در معیارهای ارزیابی عملکرد خوبی دارند، اتکا به این معیارها به تنهایی کافی نیست و می‌تواند منجر به خطا در هنگام استفاده برای بررسی شود؛ بنابراین محققان توصیه

در ارتفاع بیش از ۲۵۰۰ متری حضور گونه به سرعت کاهش می‌یابد. داغستانی و همکاران (۲۰۱۷) حضور گونه ارس را در طارم زنگان در حدود ارتفاعی ۱۱۰۰ تا ۱۷۰۰ متر و بیشترین تراکم گونه ارس را در ارتفاع ۱۴۰۰ تا ۱۵۰۰ متر از سطح دریا گزارش کردند. عدم مطابقت پژوهش داغستانی و همکاران با پژوهش حاضر را می‌توان به بررسی توده‌های ارس در بازه ارتفاعی ۱۱۰۰ تا ۱۷۰۰ متری که محدوده پراکنش مطلوب این گونه در رویشگاه‌های کشور است، مربوط دانست در حالیکه در پژوهش حاضر بررسی پراکنش گونه ارس در بازه وسیع‌تری (۲۶۳ تا ۳۳۱۷ متری از سطح دریا) مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش حاضر با افزایش ارتفاع، احتمال حضور گونه ارس کاهش می‌یابد.

تغییرات ارتفاع از این جهت که می‌توانند بر درجه حرارت و بارندگی (مقدار رطوبت) تأثیر مستقیم داشته باشند دارای اهمیت فراوان است. افزایش ارتفاع با کاهش دما، افزایش شدت نور و افزایش شدت وزش باد همراه است. این تغییرات همراه با کاهش درجه حرارت بر مقدار رطوبت تأثیر که می‌تواند بر کاهش حضور گونه ارس در ارتفاعات بالا اثرگذار باشد (۱۵ و ۳۳). پژوهش کنونی از این نظر با نتیجه تحقیق اوزکان و همکاران (۲۰۱۰)، پورمجیدیان و مرادی (۲۰۰۹)، مؤمنی مقدم (۲۰۱۲) و صدیقی و همکاران (۲۰۲۰) سازگاری دارد. ارس در ارتفاعات میانبند دارای بیشترین حضور است که نشان‌دهنده شرایط بهینه در این ارتفاعات است؛ بنابراین با افزایش ارتفاع در میانبند، ضمن کاهش دما مقداری بر میزان بارش افزوده می‌گردد. افزایش بارش به همراه کاهش نیاز آبی ناشی از دمای پایین‌تر در درختان واقع در ارتفاعات بالاتر خصوصاً در دوره گرم تابستان شرایط بهتری را برای رشد گونه‌های گیاهی نسبت به گونه‌های واقع در ارتفاع پایین‌تر که دمای بالاتر و نیاز آبی بیشتری دارند فراهم می‌کند (۲ و ۲۸). ارس گونه‌ای است که به رطوبت زیاد هوا و محیط خنک نیازمند است که در ارتفاعات پایین به دلیل گرم‌تر بودن و رطوبت کمتر، شرایط مناسب برای حضور گونه ارس وجود ندارد. این نتایج تأیید کننده مطالعات پایه انجام شده در جنگل‌های ارس آیلان در استان قزوین است که بیشترین تعداد درختان ارس و زادآوری گونه ارس را در ارتفاعات میانی (۲۳۰۰ تا ۲۴۰۰ متر از سطح دریا و در مناطق تپه‌ماهوری) ذکر کردند (۲۸).

گونه ارس در ارتفاعات پایین به علت دخالت‌های بشر از قبیل قطع غیرمجاز و چرای دام احتمال حضور کمتری دارند (۳ و ۳۴). با افزایش درصد شیب (بالاتر از ۳۰ درصد) احتمال حضور گونه ارس به سرعت افزایش و در شیب بالاتر از ۴۰ درصد (تا ۱۲۰ درصد) تقریباً ثابت می‌ماند. در مناطق پایین دست که شیب کمتری دارند به دلیل عبور و مرور، استفاده از مناطق به‌عنوان مرتع و فشار دام، فشار زیادی از زمان گذشته تاکنون به این مناطق وارد شده است و تعداد زیادی از درختان ارس در منطقه مورد بررسی قطع شده بودند. از سوی دیگر در ارتفاعات و شیب‌های تند، به‌رغم حضور کمتر گونه ارس که ناشی از شرایط نامساعد رویشگاهی و سنگلاخی بودن بستر و کم‌عمق بودن خاک است، اما به دلیل دشواری دسترسی، این مناطق کمتر مورد تعرض و قطع قرار می‌گیرند و در نتیجه گونه ارس فرصت رویش بیشتر را به دست آورده‌اند. از طرف دیگر، قدرت سازش و سازگاری در محیط‌های سنگی و صخره‌ای یکی دیگر از توانمندی‌های گونه ارس است که موجب استقرار در این مناطق شده است (۲۸). علی‌جانی و همکاران (۲۰۲۰) و لیوینگستون (۱۹۷۲) حضور گونه ارس را در شیب‌های تند و پرتگاه‌ها گزارش کردند که با پژوهش حاضر همخوانی دارد.

بیشترین احتمال حضور گونه ارس در جهات جغرافیایی شمال و غرب و کمترین در جهات جغرافیایی شمال شرقی، جنوب شرقی و شرق مشاهده شد. در جهت شمالی به دلیل تابش کمتر آفتاب، تبخیر کمتری صورت می‌گیرد و در نتیجه ماندگاری رطوبت در محیط‌های خاکی بیشتر است (۴، ۸، ۳۳ و ۳۶). پژوهش‌های اتو و همکاران (۲۰۱۰) و خوشنویس و همکاران (۲۰۱۹) بیشترین تراکم گونه ارس در هکتار را برای جهت دامنه شمالی معرفی کردند. ایشان علت افزایش تراکم گونه ارس در جهت شمالی را تأثیر جهت دامنه بر توزیع اقلیم خرد در زمین‌نما دانستند که منجر به تغییر در ویژگی خاک می‌شود که شرایط را برای حضور گونه میسر می‌سازد. مقصودلونژاد و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی رویشگاه‌های ارس عنوان کردند که اینگونه به شکل فراوانی تحت تأثیر جهت جغرافیایی قرار دارد؛ به‌طوری‌که ارس بیشتر در دامنه‌های شرقی، شمال و غربی ظاهر می‌شود و در دامنه‌های جنوبی حضور آن متداول

نیست؛ ایشان دلیل آن را فراتر از عوامل بوم‌شناختی، بیشتر به عوامل انسانی مربوط دانستن و بیان داشتند که دامنه‌های شمالی، شرقی و غربی در رویشگاه‌های مرتفع ارس معمولاً دارای دمای پایین بوده و استقرار جوامع انسانی در این جهات کمتر معمول است و به دلیل سردتر بودن به نسبت شیب جنوبی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است؛ در حالیکه در جهت جنوبی با درجه حرارت بالاتر؛ تردد انسان و دام سبب تخریب و از بین رفتن توده‌های ارس شده است. از عوامل دیگر نیز سرماپسند بودن ارس و تمایل این گونه به جبهه‌های سردتر است. از سوی دیگر پورمجیدیان و همکاران (۲۰۰۹) بیشترین تعداد در هکتار گونه ارس را در جهت غربی اندازه‌گیری کردند. نامبردگان دلیل اصلی فراوانی ارس در جهت غربی را وفور مقدار نور دریافتی بیان کردند. به نظر می‌رسد که سرشت اکولوژیکی و نورپسند بودن درختان ارس، دلیل اصلی فراوانی آنها در جهت غربی دامنه باشد، زیرا مقدار نور دریافتی رویشگاه در جهت‌های جنوبی و غربی بیشتر از سایر جهات جغرافیایی است. این اثر به‌ویژه در ارتفاعات متوسط و زیاد که زاویه تابش نور خورشید در زمستان کاهش می‌یابد، بسیار مشهود است (۲۸). در حالیکه مؤمنی مقدم (۲۰۱۲)، بیان کردند که دامنه‌های غربی به دلیل واقع شدن در مناطق سنگلاخی و صخره‌ای و نیز بیشتر بودن مدت تابش خورشید و گرم بودن و در نتیجه تبخیر و تعرق بیشتر، دارای شرایط سخت رویشی است بنابراین درختان ارس با تراکم و شادابی کمتر در آنجا حضور می‌یابند که با نتایج پژوهش حاضر در تضاد است. بر پایه نتایج پژوهش حاضر با وجود حضور بیشتر در دامنه‌های شمال و غرب، حضور گونه ارس در تمام جهات جغرافیایی مشاهده نشد. میلیوس و همکاران (۲۰۹۹)، داغستانی و همکاران (۲۰۱۷) و فاطمی آذرخورانی و همکاران (۲۰۲۰) نیز در تحقیقات خود حضور گونه ارس را در تمامی جهات گزارش کردند که با پژوهش حاضر همخوانی دارد. مقصودلونداد و همکاران (۲۰۱۳) بیان داشتند که در جهت جنوبی هیچ پایه ارسی مشاهده نشد که با پژوهش حاضر مغایرت دارد.

شاخص‌های اقلیمی پیش‌بینی کننده گونه ارس

احتمال حضور گونه در بازه بارندگی ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر وجود دارد. با افزایش میزان بارندگی احتمال

حضور گونه افزایش و پس از آن روند تقریباً ثابتی دارد. سرنگری و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی بوم‌شناسی گونه ارس (*J. excelsa*) در بلوچستان پاکستان بیان کردند که در بارش سالانه ۲۲۰ - ۱۲۰ میلی‌متر احتمال حضور گونه افزایش می‌یابد که با پژوهش حاضر همخوانی دارد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین احتمال حضور گونه ارس برای مناطقی با دمای ۹ تا ۱۶ درجه سانتی‌گراد است. با افزایش دمای بیش از ۱۶ درجه سانتی‌گراد احتمال حضور گونه کاهش یافته است. سرنگری و همکاران (۲۰۱۳) حداکثر پراکنش گونه ارس را در مناطقی با درجه حرارت صفر تا ۱۳ درجه سانتی‌گراد در مرطوب‌ترین فصل سال گزارش کردند و بیان داشتند با افزایش درجه حرارت حضور گونه ارس محدود می‌گردد. احتمال حضور گونه ارس در منطقه مطالعاتی با افزایش ارتفاع تا ۲۳۰۰ متر از سطح دریا افزایش می‌یابد اما بعد از آن به ازای افزایش ارتفاع احتمال حضور آن کاهش داشته زیرا در ارتفاعات بالاتر از ۲۳۰۰ متر از سطح دریا شرایط دمایی که با ارتفاع همبستگی منفی دارد نیز باعث محدودیت تکمیل چرخه زندگی گیاه می‌شود. با توجه به اینکه گونه ارس در مناطق مرتفع و کوهستانی رویش دارد به دلیل کاهش درجه حرارت در ارتفاعات، درجه حرارت تأثیر بسزایی روی پراکنش گونه دارد. مؤمنی مقدم و همکاران (۲۰۱۲) در آرسزارهای استان خراسان درجه حرارت متوسط سالانه ۸ درجه سانتی‌گراد و هال (۸) در آفریقا مناطقی با درجه حرارت متوسط سالیانه کمتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد را مناسب حضور گونه ارس دانستند.

شاخص‌های سنجش از دوری پیش‌بینی کننده گونه ارس

منحنی پاسخ گونه به شاخص سطح برگ در ابتدا روند حضور گونه ثابت (۰ تا ۰/۰۷) و سپس با افزایش این شاخص (بیش از ۰/۰۸) حضور گونه به سرعت کاهش و در بیشتر از ۰/۱۵ روند ثابتی دارد. با توجه به سوزنی برگ بودن گونه ارس و همچنین وفور تیره گندمیان در سطح منطقه مورد مطالعه با افزایش مقدار شاخص سطح برگی حضور گونه کاهش می‌یابد. با افزایش متغیر شاخص جهانی پیش محیط‌زیست از ۰/۱۸ تا ۰/۲۰ احتمال حضور این گونه ابتدا ثابت و در بیش از این مقدار تا ۰/۲۲ کاهش و در بیش از این مقدار کاهش پیدا می‌کند. شاخص جهانی پیش محیطی (GEMI) شبیه به NDVI بوده، اما در مقایسه با آن

از حساسیت کمتری به اثرات جوی برخوردار است و در مقایسه با سایر عوامل محیطی بیشتر تحت تأثیر خاک لخت قرار می‌گیرد (پینتی و ورستریت، ۱۹۹۲). مقادیر بالای شاخص NDVI (اعداد نزدیک به +۱) نشان‌دهنده جنگل‌های بارانی مناطق گرم و استوایی، مقادیر پایین و مثبت شاخص (حدود $+0.2$ تا $+0.4$) نشان‌دهنده پوشش درختچه‌ای و علفزار و مقادیر نزدیک به صفر (بین -0.1 تا $+0.1$) معمولاً نشان‌دهنده سطوح برهنه سنگی، ماسه‌ای یا برفی است (۲۰). صابر فر و همکاران (۳۰) نیز در مطالعه خود حضور گونه ارس را با استفاده از شاخص NDVI در مقادیر 0.16 تا 0.26 گزارش کردند که با پژوهش حاضر همخوانی دارد. براساس نتایج حاصل از شاخص پایش جهانی محیط‌زیست (GEMI) استنباط می‌شود که گونه ارس در مناطقی با فضای باز حضور بیشتری داشته و با افزایش تراکم و پوشش گیاهی از حضور گونه ارس کاسته می‌شود. روانبخش و همکاران (۲۰۱۰) نیز بیان کردند که نهال‌های ارس برای ادامه بقا به آفتاب مستقیم علاقه‌مندند و وابسته به سایه درختان مادری یا دیگر درختچه‌ها نیستند که با نتیجه پژوهش حاضر همخوانی دارد. با افزایش مقادیر شاخص‌های شاخص نسبت ساده اصلاح شده (MSR) و مقاومت اتمسفری قابل مشاهده (VARI) احتمال حضور گونه افزایش و سپس کاهش و در ادامه با روند ثابتی مشاهده شد. شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده (VARI) برای تصاویر RGB یا رنگی مناسب است زیرا با کل بخش قابل مشاهده طیف الکترومغناطیسی (شامل نوارهای رنگی آبی، سبز و قرمز) کار می‌کند. وظیفه خاص آن افزایش پوشش گیاهی تحت تأثیر شدید جوی است و در عین حال تغییرات نور را صاف می‌کند. به دلیل حساسیت کم به ضربه جوی، خطای شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده (VARI) برای پایش پوشش گیاهی در شرایط ضخامت‌های مختلف جوی کمتر از ۱۰٪ است. زمانی که ارزیابی با حداقل

حساسیت به اثرات جوی مورد نیاز است این شاخص مناسب است (۱۳). با توجه به اینکه شهرستان خلخال و بخش شمالی استان زنجان محتوای آئروسول اتمسفر (هواپخش) بالا مانند باران، مه، گرد و غبار دارند شاخص مقاومت اتمسفری قابل مشاهده (VARI) می‌تواند جایگزین سایر شاخص‌های سنجش از دوری قرار گیرد. شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی (MNDWI) از 0.5 تا -0.1 روند ثابت و پس از آن احتمال حضور گونه کاهش می‌یابد. مقادیر منفی شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی (MNDWI) نشان‌دهنده پدیده‌های غیرآبی همچون خاک و پوشش گیاهی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده آب است (۱۸ و ۳۶). به دلیل کوهستانی بودن منطقه و سرشت اکولوژیکی گونه ارس که نورپسند و مقاوم به خشکی است حضور این گونه در مقادیر منفی شاخص آب اختلاف نرمال شده اصلاحی قابل توجیه است. نتایج این پژوهش با نتایج رستمی‌کیا و زبیری (۲۰۱۲) و خوشنویس و همکاران (۲۰۱۹) که گونه ارس را خشکی‌پسند معرفی کرده‌اند مطابقت دارد.

References

1. Alijani, V., S.M. Moein Sadeghi, M. Namiranian & R. Akhavan, 2020. Determination of the Optimum Plot Size to Study the Spatial Patterns of *Juniperus excelsa* Trees (Case study: Atashgah, Karaj). Journal of Environmental Science and Technology, 22(7): 113-123. (In Persian)
2. Azizi, G., I. Robertson, M. Karimi & M.M. Abadijoui Ravari, 2020. Relationship between Altitude and Juniper Genus Tree-Rings Width Case Study: Juniperus Habitats in North of Kerman Province. Ecology of Iranian Forest, 8(15): 115-127. (In Persian)

3. Daghestani, M., M. Zanganeh & M. Taheri, 2017. Investigation on quantitative characteristic and soil properties of *Juniperus excelsa* M. Bieb stands in Tarom Zanjan. Forest Research and Development, 3(2): 175-190. (In Persian)
4. Esfanjani, J., A. Ghorbani, M. Moameri, MA. Zarechahouki, A. Esmali Ouri, A. Mirzaei Mossivand, 2020. Prediction of distribution of *Prangos uloptera* DC. using two modeling techniques in the southern rangelands of Ardabil Province, Iran. Journal of Rangeland Science 10(2):137-148.
5. Fatemi Azarkhavarani, S.S., M. Rahimi, M. Tarkesh & H. Ravanbakhsh, 2020. Modeling the potential distribution of *Juniperus excelsa* using environmental factors in Alborz Mountains. Environmental Sciences, 18(2): 237-254. (In Persian)
6. Gašparovičová, P., M. Ševčík & S. David, 2022. The Prediction of Distribution of the Invasive Fallopia Taxa in Slovakia. Plants, 11(11): 1484 .<https://doi.org/10.3390/plants11111484>.
7. Ghadirian, O., M.R. Hemami, A. Soffianian, M. Malekian, S. Pourmanafi & M. Amiri, 2019. The prediction of Persian Squirrel Distribution Using a Combined Modeling Approach in the Forest Landscapes of Luristan Province. Iranian Journal of Applied Ecology, 8(1): 47-58. (In Persian)
8. Ghafari, S., A. Ghorbani, M. Moameri, R. Mostafazadeh, M. Bidar Lord & A. Kakehmami, 2021. Habitat potential modeling of *Thymus kotschyanus* Boiss. & Hohen. in the northern of Ardabil Province rangelands. Journal of Rangeland, 15(2): 195-213. (In Persian)
9. Hall, J.B. 1984. *Juniperus excelsa* in Africa: a biogeographical study of an Afromontane tree. Journal of Biogeography, 11(1): 47-61.
10. Jorgensen, N. & M. Renz, 2021. Assessing the performance and accuracy of invasive plant habitat suitability models in detecting new observations in Wisconsin. Invasive Plant Science and Management, 14(4): 214-222 .<https://doi.org/10.1017/inp.2021.27>.
11. Kakehmami, A., A. Ghorbani, M. Moameri & S. Ghafari, 2021. Evaluation of land use changes in Ardabil province using satellite image processing. Iranian Journal of Range and Desert Research, 28(3): 537-550. (In Persian)
12. Karami, P., Shayesteh, K., & Hosseini, S.M. (2018). Identify the habitat corridors of wild sheep (*Ovis Orientalis*) in the context of the landscape based on the theory of electrical circuits (Case Study: Lashgardar and Golparabad protected areas). Journal of Animal Research (Iranian Journal of Biology), 31(3), 316-330.
13. Kaufman, Y.J. & D. Tanre, 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOSMODIS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30: 261-270. <https://doi.org/10.1109/36.134076>.
14. Khoshnevis, M., M. Teimouri, M.H.S. Hallaj, M. Matinizadeh & A. Shirvany, 2019. The effect of canopy and its geographic orientation on seeds germination and survival of *Juniperus excelsa* seedlings. Iranian Journal of Forest, 11(3): 363-371. (In Persian)
15. Klippel, L., P.J. Krusic, R. Brandes, C. Hartl-Meier, V. Trouet, M. Meko & J. Esper, 2017. High-elevation inter-site differences in Mount Smolikas tree-ring width data. Dendrochronologia, 44: 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.05.006>.
16. Livingston, R.B. 1972. Influence of birds, stone and soil on the establishment of pasture juniper, *Juniper communis* and Red cedar and *J. virginiana* in New England pastures, Ecology, 53(6): 1141-1147. <https://doi.org/10.2307/1935427>.
17. Maghsodlonejad, M., S.H. Shataee, H. Habashi & M. Babanezhad, 2013. Spatial and statistical analysis of quantitative characteristics of Juniperus stands in Chahar-bagh of Gorgan regarding to topographic and soil features. Iranian Journal of Forest, 5(2): 195-206. (In Persian)
18. Mahzooni-Kachapi, S.S., P. Tahmasebi, A. Ebrahimi & M.H. Jouri, 2023. Evaluation of the ability of different algorithms and visual interpretation of Google Earth images in the separation and classification of plant ecological units. Journal of Rangeland, 16(4): 745-764. (In Persian)
19. McFeeters, S.K. 1996. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features. International Journal of Remote Sensing, 17: 1425-1432. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>.
20. Milios, E., P. Smiris, E. Pipinis & P. Petrou, 2009. The growth ecology of *Juniperus excelsa* Bieb. Trees in the central part of the Nestos valley (NE Greece) in the context of anthropogenic disturbances. Journal of Biological Research-Thessaloniki, 11: 83-94.
21. Mohammadi Moghaddam S., A. Ghorbani, H. Arzani, J. Azizi Mobser & R. Mostafazadeh, 2022. Modelling Above ground net primary production of Sabalan rangelands using vegetation index and non-linear regression. Journal of Rangeland, 16(1), 33-51. (In Persian)
22. Mohammadi, M., Z. Jafarian, R. Tamartash & M. Kargar, 2022. Prediction of Plant Species Biodiversity using Generalized Linear Model (GLM) and Boosted Regression Tree (BRT) in Eastern Rangelands of Mazandaran, Journal of Rangeland, 16(3): 468-480. (In Persian)

23. Momeni Moghaddam, T.M., K. Sagheb Talebi, M. Akbarinia, R. Akhavan & S.M. Hosseini, 2012. Impact of some physiographic and edaphic factors on quantitative and qualitative characteristics of Juniper forest (case study: Layen region-Khorasan). *Iranian Journal of Forest*, 4(2): 143-156. (In Persian)
24. Naghibi, S.A. & M. M. Dashtpajardi, 2017. Evaluation of four supervised learning methods for groundwater spring potential mapping in Khalkhal region (Iran) using GIS-based features. *Hydrogeology journal*, 25(1): 169. (In Persian)
25. Naghipour, A.A., M.R. Ashrafzadeh & M. Haidarian, 2021. Assessing the potential distribution of *Juniperus excelsa* M. Bieb. under current and future climate scenarios in the Chaharmahal va Bakhtiari province, Iran. *Scientific Reports in Life Sciences*, 2(3): 8-17. <https://doi.org/10.22034/srls.2021.537634.1020>.
26. Otto, R., B.O. Krusi, J.D. Delgado, J.M.F. Andez- Palacios, E.G. Del-Rey & J.R. Arevalo, 2010. Regeneration niche of the Canarian juniper: the role of adults, shrubs and environmental conditions. *Annals Forest Science*, 67: 709-719.
27. Özkan, K., S. Gulsoy, R. Aerts & B. Muys, 2010. Site properties Crimean Juniper (*Juniperus excelsa*) in semiarid forests of south western Anatolia Turkey. *Journal of Environmental Biology*, 31: 97-100.
28. Pourmajidian, M. R. & M. Moradi, 2009. Investigation on the site and silvicultural properties of *Juniperus excelsa* in natural forests of Ilan in Qazvin province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 17(3): 475-487. (In Persian)
29. Ravanbakhsh, H., M.M Mohajer & V. Etemad, 2010. Natural regeneration of woody species in woodlands of southern slopes of Elborz mountains (case study: Latian watershed). *Iranian Journal of Forest*, 2(2): 113-125. (In Persian)
30. Rostamikia, Y., 2012. Study on The Structure of *Juniperus excelsa* Beib. Stand in Khakhal Protected Forests. *Journal of Wood and Forest Science and Technology* 19(4): 151-162. (In Persian)
31. Saberfar, R., S. Falahatkar, S.H. HosseinKia, 2018. Analysis of Vegetation Indices Change in Sensors of Landsat Satellite (Case Study: Persian juniper fields of East Golestan National Park and Ghorkhod Protected Area). *Natural Ecosystems of Iran*, 9(1): 71-90. (In Persian)
32. Sarangzai, A.M., A. Ahmed, M.F. Sidiq, S.K. Lochari, M. Akbar & A. Hussain, 2013. Ecological status and regeneration patterns of *Juniperus excelsa* foresta in north-eastern Balochestan. *Fuuast journal biology*, 3(2): 53-61.
33. Sedighi, F., K. Taheri Abkenar & A. Heidari Safari Kouchi, 2020. Effect of physiographic factors on quantitative characteristics of cypress (*Juniperus excelsa* M. Bieb) trees (case study: Spiro cypress habitat-Damghan). *Forest Research and Development*, 6(1): 29-42. (In Persian)
34. Sefidi, K., Y. Firouzi, F. Keivan Behju, M. Sharari & Y. Rostamikia, 2018. Quantification of spatial structure of juniper stands in Kandaragh region. *Iranian Journal of Forest*, 10(2): 207-220. (In Persian)
35. Stephan, J., C. Bercachy, J. Bechara, E. Charbel & J. López-Tirado, 2020. Local ecological niche modelling to provide suitability maps for 27 forest tree species in edge conditions. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 13(3): 230. <https://doi.org/10.3832/ifer3331-013>.
36. Wu, H., S.B. Franklin, J. Liu & Z. Lu, 2019. Relative importance of density dependence and topography on tree mortality in a subtropical mountain forest. *Forest Ecology and Management*, 384: 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.049>.
37. Xu, H. 2006. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14): 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.
38. Zhang, M. G., Z. K. Zhou, W. Y. Chen, J. F. Slik, C.H. Cannon & N. Raes. 2012. Using species distribution modeling to improve conservation and land use planning of Yunnan, China. *Biological Conservation*, 153, 257-264.
39. Zhou, Y., P. Peng & G. Wang, 2022. A multimodal species distribution model incorporating remote sensing images and environmental features, 1-20