



University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies

Vol. 49, No. 1, Spring 2023

Journal Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Print ISSN: 1025-8620 Online ISSN 2345-6922

Comparison of Regression and Machine Learning Techniques in Determination of Geographical Range of *Onobrychis cornuta* L. Under Environmental Characteristics and Climate Change Using the IPSL-CM6A-LR Model

Zeinab Jafarian¹✉, Mohadeseh Amiri^{2,3}

1. Corresponding Author, Department of Rangeland Science, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural and Natural Resources University, E-mail: z.jafarian@sanru.ac.ir
2. Department of Rangeland Science, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural and Natural Resources University, E-mail: mohaddesehamiri@yahoo.com
3. Department of Agricultural Science, Technical and Vocational University, Tehran, Iran, Email: mohaddesehamiri@yahoo.com

Article Info

Research Article:
Research Paper

Article history:

Received 21 January 2023
Received in revised form
25 February 2023
Accepted 27 February 2023
Publish online 11 April 2023

Keywords:

Climate change
CMIP6 models
Ecological niche
Habitat suitability
SSP scenarios

ABSTRACT

Predicting the effect of climate change on native ecosystems is one of the longstanding goals of ecologists and is essential for their conservation and management. Species distribution models (SDMs) are the most widely used tools to predict the effects of climate change on the geographical range of plants. In this study, two regression techniques (GLM and MARS) and two machine learning techniques (ANN and RF), along with environmental factors were used to predict the distribution of *Onobrychis cornuta* L. The species response to future climate (2050-2070) was investigated under optimistic (SSP1-2.6), pessimistic (SSP3-7.0) and very pessimistic (SSP5-8.5) emission scenarios of the IPSL-CM6A-LR climatic model from CMIP6 models. Based on results, the ensemble model and then MARS presented the most accurate prediction. ANN had the lowest prediction accuracy with a significant difference from other models ($p < 0.05$). The sensitivity analysis revealed altitude (24.64%), maximum temperature of the warmest month (20.31%), temperature seasonality (16.57%) and diurnal range of mean temperature (16%) as the most effective variables on the distribution. According to the ensemble model, the suitable habitat occupies about 27% of the area, but its distribution will be decrease under the future climate. The SSP5-8.5 scenario will have the greatest impact on the displacement of the species distribution range. The resulting prediction maps provide valuable information for conservation strategies, including identifying suitable places for its reintroduction and cultivation in the framework of rangeland management plans.

Cite this article: Jafarian, Z., Amiri, M. (2023). Comparison of Regression and Machine Learning Techniques in Determination of Geographical Range of *Onobrychis cornuta* L. Under Environmental Characteristics and Climate Change Using the IPSL-CM6A-LR Model. *Journal of Environmental Studies*, 49 (1), 107- 120. DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.354111.1008382>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.354111.1008382>

Extended Summary

Introduction

Climate is one of the most important factors in plant species diversity and distribution, which also affects their functional and phenological characteristics. In this study, the geographical range of *Onobrychis cornuta* L. in the base period (present) and future (2040-2070) under the influence of climate change using two regression models including Generalized Linear Model (GLM) and Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) and two machine learning models including Artificial Neural Network (ANN) and Random Forest (RF) were investigated in the Hyrcanian rangelands of Mazandaran province. Since methods integrating multiple single model have the potential to provide more robust estimations of suitable habitat for a species at a given time, an ensemble approach was used.

Materials and Methods

The study was conducted in rangelands of the Hyrcanian vegetation zone in Mazandaran province. The number of 284 species occurrence points at a distance of at least one kilometer from each other was recorded in a stratified-random sampling method in different altitude classes. Digital elevation model (DEM) was used to generate the altitude, slope and aspect layers. Nineteen bioclimatic variables (1979-2013) were downloaded from the CHELSA database, available at 1-km spatial resolution. The bioclimatic variables related to the period 2014–2019 were derived using mean monthly precipitation, the maximum and minimum monthly temperature extracted from this database in IDRISI TerrSet software. Then, the weighted average of these bioclimatic variables was considered for modeling process. The biological data, together with environmental data selected by Pearson's correlation test ($-0.8 < r < 0.8$), including one physiographic variable and seven bioclimatic variables, were used in the modeling process. Based on ensemble model, the amount and direction of the species' habitat range was determined between two time periods. The relative influence of environmental variables in modeling was determined using sensitivity analysis and modeling evaluation was done with independent strategy. The performance of the models was evaluated using the Area under the ROC Curve (AUC), sensitivity, specificity, and True Skill Statistic (TSS). Using future environmental variables, the output of the IPSL-CM6A-LR climatic model from CMIP6 models was investigated under optimistic (SSP1-2.6), pessimistic (SSP3-7.0) and very pessimistic (SSP5-8.5) emission scenarios in the future period.

Discussion of Results

Regression models showed more accuracy than machine learning models. Also, ANN had the lowest prediction accuracy with a significant difference from other models ($p < 0.05$). Furthermore, MARS outperformed the other SDMs to determine climatic habitats for the species. The results of the sensitivity analysis based on the ensemble model revealed that among the physiographic and bioclimatic variables affecting the distribution and habitat suitability of the species, altitude, and then the temperature-based indicators including the maximum temperature of the warmest month (Bio5), temperature seasonality (Bio4) and diurnal range of mean temperature (Bio2) have been the most effective variables on the species distribution, and precipitation-based had negligible effects. The species is homogeneously distributed across the western and southern parts of the province, while it also has small and patchy distribution in the eastern part. According to the ensemble model, the area of suitable habitat for the species is currently 6428.5 km², which is about 27% of the entire area. According to the response curves drawn based on the best performing model, the maximum presence of this species is observed in the altitude range of 1700-3600 m above sea level. If the maximum temperature of the warmest month exceeds 22 °C and the temperature seasonality exceeds 65, a dramatic decrease will be observed in species presence.

According to the predictions, under all three scenarios, the probability of the species presence will decrease in the future. The SSP5-8.5 scenario will have the greatest impact on the displacement of the species distribution range. Due to climate change, the extent of the species suitable habitat will decrease by 1.41% under the optimistic scenario, 2.46% under the pessimistic scenario, and 3.01% under the very pessimistic scenario. The low displacement values can be due to the low sensitivity of this species to climate change.

Conclusions:

The range of species tolerance and effective environmental factors have undergone changes due to climate change, and as a result, it causes changes in the species distribution range. The studied species will have a reduced response to future climate changes and will lose areas of its distribution range. It is likely that the habitat of the species will shift to higher altitudes with lower temperatures in the future. These findings can support the conservation planning and management efforts in ecological engineering and be used in formulating preventive measures for the species as well as its proposal in areas with similar ecological conditions.



مقایسه تکنیک‌های رگرسیونی و یادگیری ماشینی در تعیین گستره جغرافیایی اسپرس کوهی (*Onobrychis cornuta* L.) تحت تأثیر ویژگی‌های محیطی و تغییر اقلیم با استفاده از مدل IPSL-CM6A-LR

زینب جعفریان^۱، محدثه امیری^{۲،۳}

۱. نویسنده مسئول، گروه مترداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، رایانامه: z.jafarian@sanru.ac.ir

۲. گروه مترداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، رایانامه: mohaddesehamiri@yahoo.com

۳. گروه علوم کشاورزی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران، رایانامه: mohaddesehamiri@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌های بومی یکی از اهداف دیرینه اکولوژیست‌هاست و امری ضروری جهت حفاظت و مدیریت آنهاست. مدل‌های پراکنش گونه‌ای (SDM) پرکاربردترین ابزار برای پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر محدوده جغرافیایی گیاهان هستند. در این مطالعه، تکنیک‌های رگرسیونی (GLM و MARS) و یادگیری ماشینی (ANN و RF) همراه با متغیرهای محیطی برای پیش‌بینی پراکنش *Onobrychis cornuta* L. به کار رفتند. پاسخ گونه به اقلیم آینده (۲۰۷۰-۲۰۵۰) تحت سناریوهای خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، بدبینانه (SSP3-7.0) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) مدل اقلیمی IPSL-CM6A-LR از مدل‌های CMIP6 بررسی شد. طبق نتایج، مدل اجماعی و سپس MARS دقیق‌ترین پیش‌بینی را داشتند. مدل ANN با اختلاف معنی‌دار با سایر مدل‌ها ($p < 0.05$) کمترین صحت پیش‌بینی را داشت. آنالیز حساسیت، ارتفاع (۲۴/۶۴ درصد)، حداکثر دمای گرم‌ترین ماه (۲۰/۳۱ درصد)، تغییرات فصلی دما (۱۶/۵۷ درصد) و میانگین دامنه دمای روزانه (۱۶ درصد) را مؤثرترین متغیرها بر پراکنش گونه معرفی کرد. طبق مدل اجماعی، رویشگاه مناسب گونه، ۲۷ درصد از منطقه را به خود اختصاص داده است، اما تحت اقلیم آینده، پراکنش آن کاهش خواهد یافت. سناریوی SSP5-8.5 بیشترین تأثیر را بر جابجایی محدوده پراکنش گونه خواهد داشت. نقشه‌های پیش‌بینی حاصل اطلاعات ارزشمندی را برای راهکارهای حفاظتی شامل شناسایی مکان‌های مناسب جهت معرفی مجدد و کشت آن در چارچوب طرح‌های مدیریت مراتع فراهم می‌سازند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱/۲۲

کلیدواژه‌ها:

آشپان اکولوژیک، مطلوبیت رویشگاه، تغییر اقلیم، سناریوهای SSP، مدل‌های CMIP6

استناد: جعفریان، زینب؛ امیری، محدثه. (۱۴۰۲). مقایسه تکنیک‌های رگرسیونی و یادگیری ماشینی در تعیین گستره جغرافیایی اسپرس کوهی (*Onobrychis cornuta* L.) تحت تأثیر ویژگی‌های محیطی و تغییر اقلیم با استفاده از مدل IPSL-CM6A-LR. نشریه محیط‌شناسی، ۴۹(۱)، ۱۰۷-۱۲۰.

DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.354111.1008382>

DOR: 20.1001.1.10258620.1402.49.1.6.6

© نویسندگان.

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران



DOI: <http://doi.org/10.22059/JES.2023.354111.1008382>

۱. مقدمه

از دهه ۱۹۰۰ میلادی، میانگین جهانی غلظت گازهای گلخانه‌ای به سرعت افزایش یافته است. این افزایش با تغییر در ویژگی‌های متغیرهای اقلیمی، اثرات شدیدی بر جامعه و اکوسیستم‌ها بر جای می‌گذارد (Fallah Kalaki et al., 2021). تغییر اقلیم به تغییر طولانی مدت در توزیع آماری الگوهای اقلیمی و از بین رفتن تعادل روند متغیرهای اقلیمی گفته می‌شود. با شروع انقلاب صنعتی (۱۹۰۰-۱۸۵۰) و به دنبال آن مصرف سوخت‌های فسیلی، انتشار جهانی دی‌اکسیدکربن و سایر گازهای گلخانه‌ای منجر به بروز پدیده‌ای به نام گرمایش جهانی شده است (Ghashangzadeh and Fotouhi, 2021). بسیاری از دانشمندان، گرمایش جهانی را منتج از فعالیت‌های بشری می‌دانند و معتقدند که این پدیده می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی آب و هوای زمین و نیز بر زندگی بسیاری از موجودات زنده اثرات شگرفی داشته باشد (Farzadmehr and Sangoony, 2020). در واقع، تغییر اقلیم از طریق تغییر فصل رشد یا تغییر الگوهای دمایی که محرک تغییر چرخه حیات موجودات زنده می‌باشد، بر بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری مؤثر است (Hosseini et al., 2022). اکوسیستم‌های مرتعی به دلیل داشتن توانایی جذب و ذخیره کربن در زیتوده چوبی، یکی از عوامل مهم جبران انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شوند (Falkowski et al., 2000).

مؤسسه بین‌دولتی تغییر اقلیم^۱ (IPCC) در ششمین گزارش ارزیابی خود^۲ (AR6) افزایش میانگین دمای جهانی مشاهده شده را ۱/۰۹ درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۲۰-۲۰۱۱ نسبت به شروع انقلاب صنعتی برآورد کرده است (IPCC, 2021). دما یکی از عناصر شکل‌گیری آب و هواست که تغییر آن می‌تواند ساختار آب و هوای هر منطقه را تغییر دهد (Zarrin et al., 2021). لذا، گرمایش جهانی، عواقب بلند مدتی بر اجزای سامانه اقلیمی، از جمله تغییراتی در توزیع بارش روزانه و رطوبت جوی خواهد داشت (Zarrin and Dadashi-Roudbari, 2022). در نتیجه ادامه وضعیت موجود، در آینده اکوسیستم‌های طبیعی و پوشش گیاهی به شدت تحت تأثیر گرمایش جهانی قرار خواهند گرفت. فیزیولوژی، فنولوژی، دامنه پراکنش گونه‌ها و پایداری بوم‌شناختی آنها در اثر تغییر اقلیم دگرگون خواهد شد و چه بسا در اثر گسترش و پراکنش گونه‌های دیگر از طریق جابجایی به مناطقی دارای شرایط محیطی مناسب‌تر و تناسب بیشتر برای حیات، برخی گونه‌های دیگر منقرض شوند (Nazari et al., 2022). تغییرات دامنه اکولوژیک گونه‌ها و جوامع گیاهی به این صورت است که تحت تأثیر اقلیم در سال‌های آتی، در مناطق مرتفع‌تر شاهد استقرار گونه‌های گیاهی خواهیم بود و احتمال حضور گونه‌ها در مناطق با ارتفاعات کمتر، کاهش خواهد یافت (Taylor et al., 2012). البته گونه‌های گیاهی به دلیل اینکه توانایی جابجایی سریعی ندارند، با تأخیر زمانی نسبتاً زیادی به تغییرات محیطی عکس‌العمل نشان می‌دهند (Iverson and McKenzie, 2013). در واقع، پیچیدگی چند بُعدی اکوسیستم و تعامل همگن آن با آب و هوای محلی موجب تعامل پیچیده گونه‌ها و محیط می‌شود، در نتیجه تغییر رژیم آب و هوایی به انقراض و کاهش تنوع زیستی منجر خواهد شد (Zarrin et al., 2021). مدلسازی اکولوژیکی گونه‌ها، کاربرد وسیعی در شناسایی عوامل مؤثر بر پراکنش گونه‌ها و پایش و پیش‌بینی تغییرات پراکنش آنها تحت سناریوهای تغییر اقلیم دارند. نتایج حاصل از این مدلسازی‌ها می‌توانند در تصمیم‌گیری‌های مختلف مدیریتی و حفاظت از تنوع زیستی بسیار راهگشا باشند (Farzadmehr and Sangoony, 2020). مطالعات بسیاری نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی، الگوی پراکنش بسیاری از گونه‌های گیاهی را تغییر می‌دهند. از جمله مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۱۵) جهت پیش‌بینی رویشگاه مناسب ۱۵۴۱ گونه گیاهی دانه‌دار در حال حاضر و آینده در آلبرتای کانادا، مدلسازی ۲۵ گونه درختی در بریتانیا با استفاده از مدل اجماعی توسط Hill و همکاران (۲۰۱۷)، مطالعه Amirی و همکاران (۲۰۱۹) در پیش‌بینی پراکنش گونه *Artemisia sieberi* Besser در مراتع استپی و نیمه استپی استان اصفهان با مدل‌های اقلیمی CCSM4 و NorESM1-ME، مطالعه Farzadmehr و Sangoony (۲۰۲۰) در تعیین رویشگاه بالقوه گونه گاوزبان وحشی در استان خراسان رضوی تحت مدل اقلیمی HadGEM2، مطالعه Nazari و همکاران (۲۰۲۲) در خصوص پیش‌بینی پراکنش جغرافیایی گونه مرتعی *Alopecurus textilis* Boiss تحت تغییر اقلیم در استان مازندران، مطالعه Motamedi و همکاران (۲۰۲۲) جهت پیش‌بینی پراکنش گونه *Artemisia aucheri* در مراتع البرز جنوبی و مطالعه Gebrewahid و همکاران (۲۰۲۰) در مورد گونه *Oxytenanthera abyssinica* در جنگل‌های اتیوپی شمالی برای سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۷۰.

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. IPCC Sixth Assessment Report

از آنجایی که گیاهان به صورت اجتماعی زندگی می‌کنند و در اکوسیستم‌ها، بین گیاهان و سایر اجزای آن ارتباط تنگاتنگی وجود دارد، شناسایی روابط موجود بین پوشش گیاهی و عوامل محیطی به دلیل نقش مهم گیاهان در تعادل اکوسیستم ناگزیر است (Jafarian et al., 2011). بر اساس چارچوب مفهومی Dawson و Pearson (۲۰۰۳) در خصوص کاربرد عوامل محیطی در مدلسازی پراکنش گونه‌ها در مقیاس‌های مختلف مکانی، استفاده از متغیرهای اقلیمی و فیزیوگرافی برای مدلسازی در سطح منطقه‌ای کفایت می‌کنند. همچنین به دلیل وجود اختلافاتی بین مدل‌های مختلف و مشکل بودن انتخاب مدل، به ویژه زمانی که مدل‌ها به منظور پیش‌بینی پراکنش گونه‌ها تحت سناریوهای تغییر اقلیم به کار می‌روند، مدلسازی اجماعی می‌تواند پیش‌بینی‌های قابل قبولی ارائه دهد و سبب کاهش عدم قطعیت گردد (Stohlgren et al., 2010). در مطالعه حاضر نیز این سوالات مطرح می‌باشند که آیا تغییر اقلیم سبب تغییر در محدوده پراکنش جغرافیایی گونه‌ها می‌شود و آیا مدل اجماعی در این بررسی کارایی بیشتری نسبت به مدل‌های مجزا خواهد داشت؟ بنابراین، با فرض اینکه تغییرات اقلیمی سبب کاهش دامنه پراکنش جغرافیایی گونه می‌شوند و مدل‌های متمایز کننده گروهی کارایی بالایی در تهیه نقشه پراکنش گونه دارند، دو مدل رگرسیونی (مدل خطی تعمیم یافته^۳ (GLM) و رگرسیون تطبیقی چندمتغیره^۴ (MARS)) و دو مدل یادگیری ماشینی (شبکه عصبی مصنوعی^۵ (ANN) و جنگل تصادفی: RF) با استفاده از متغیرهای اقلیمی و فیزیوگرافی در چارچوب روش اجماعی جهت ترسیم گستره جغرافیایی حال حاضر و آینده گونه اسپرس کوهی (*Onobrychis cornuta* L.) به کار می‌روند.

۲. روش شناسی پژوهش

۲-۱. محدوده منطقه مورد مطالعه

استان مازندران با مختصات جغرافیایی ۳۵° ۳۶' تا ۳۵° ۴۷' عرض شمالی و ۱۰° ۵۴' تا ۳۴° ۵۰' طول شرقی و مساحتی حدود ۲۳۷۵۶/۴ کیلومترمربع، ارتفاعی از ۲۶- متر تا ۵۶۷۱ متر از سطح دریا را تحت پوشش خود دارد. اشکال ناهمواری در منطقه از تنوع زیادی برخوردار است و با توجه به نقشه‌های توپوگرافی از نظر ناهمواری و شیب به نواحی جلگه‌ای، پایکوهی و کوهستانی تقسیم می‌شود. اقلیم استان با میانگین دمای سالانه ۱۷/۲۵-۳/۵۶ درجه سانتی‌گراد و بارندگی سالانه ۱۵۰۳-۲۰۶ میلی‌متر، بر اساس طبقه‌بندی دومارتن در نواحی غربی بسیار مرطوب، نواحی مرکزی مرطوب، نواحی شرقی مدیترانه‌ای و نواحی کوهستانی نیمه‌مرطوب می‌باشد. پوشش گیاهی طبیعی منطقه را می‌توان به جنگل و مرتع تقسیم کرد. در ارتفاعات مختلف مراتع، تیپ‌های گیاهی متنوعی شکل گرفته‌اند و در این بین گیاهان بالشتکی به همراه گندمیان پایا از عناصر اصلی گیاهی مراتع به شمار می‌روند. مراتع کوهستانی زیر حوزه هیرکانی عمدتاً در ارتفاعات بیش از ۲۰۰۰ متری از سطح دریا واقع شده‌اند. البته شرایط فیزیوتوپوگرافیک در برخی مناطق سبب شده که مراتع حتی در دامنه‌های ارتفاعی ۱۰۰۰-۵۰۰ متری نیز شکل گیرند. مساحت مراتع استان مازندران ۶۵۲۱۹۹ هکتار شامل ۱۳ گروه گیاهی و ۱۵۳ تیپ گیاهی می‌باشد.

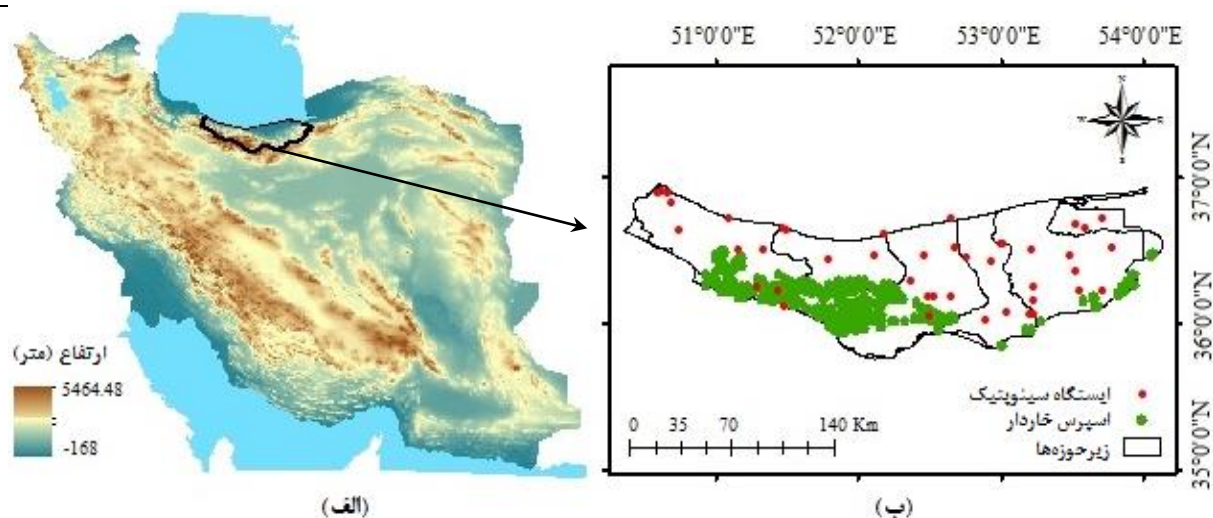
۲-۲. گونه مورد مطالعه

گونه مورد مطالعه در این پژوهش، یک گیاه مرتعی از خانواده Fabaceae است که با نام فارسی اسپرس کوهی، پشته‌ای یا خاردار و نام علمی *Onobrychis cornuta* L. شناخته می‌شود. این گیاه بوته‌ای بالشتکی، مقاوم به خشکی و خوشخوار، مصرف علوفه‌ای برای گوسفند و گاو دارد. ساقه‌های آن متعدد، کوتاه و بسیار خاردار، برگ‌ها دارای ۵-۲ عدد زوج برگچه با اشکال متفاوت، پهن دراز- بیضی، یا خطی، نوک تیز در انتها مدور، یا نوکدار، کرکدار، گوشوارک‌ها چسبیده به هم و فلسی می‌باشند. گل‌ها ارغوانی یا صورتی- بنفش، به ندرت سفید، گل‌آذین تنک و خاردار، میوه یا نیام غالباً نیمه مدور، نوک تیز، بدون خار و موسم گل تیر- مرداد می‌باشد (Qahraman, 1988).

3. Generalized Linear Model

4. Multivariate Adaptive Regression Splines

5. Artificial Neural Network



شکل ۱. (الف) موقعیت منطقه مطالعاتی در کشور؛ و (ب) نقاط ثبت شده حضور گونه هدف و ایستگاه‌های سینوتیک استان

۲-۳. جمع‌آوری داده‌های زیستی

داده‌های زیستی شامل نقاط ثبت شده‌ای هستند که طی بازدید صحرایی با مختصات طول و عرض جغرافیایی مشخص می‌شوند و بیانگر رخداد یا حضور گونه مدنظر می‌باشند. جهت انتخاب مکان‌های حضور گونه به صورت تصادفی، مکان‌هایی که گونه مورد مطالعه در آنها غالب بود و تمامی کلاس‌های سنی گیاه در آنها وجود داشت، بر اساس طبقات ارتفاعی، طبقه‌بندی شدند. به منظور مطابقت با قدرت تفکیک مکانی لایه‌های محیطی، در ثبت سایت‌های حضور گونه، تلاش بر این بود تا مناطقی به عنوان محل حضور در نظر گرفته شوند که حداقل لکه‌ای به سطح یک کیلومترمربع را در برگیرند. همچنین نقاط نمونه‌برداری شده حداقل یک کیلومتر از هم فاصله داشتند. بدین ترتیب، تعداد ۲۸۴ نقطه رخداد به روش نمونه‌برداری تصادفی-طبقه‌بندی شده در طبقات مختلف ارتفاعی ثبت گردیدند که با توجه به شکل ۱-ب، ارزش‌های ارتفاعی پراکنش گونه مورد مطالعه به سمت مناطق مرتفع‌تر پیش رفته است. به جای برداشت نقاط غیاب در سطح منطقه، به تعداد نقاط حضور، نقاط شبه غیاب فرضی به صورت تصادفی در سطح منطقه ایجاد شد. علت انتخاب نقطه شبه غیاب به جای نقاط غیاب واقعی این است که با عدم مشاهده گونه در منطقه نمی‌توان از عدم حضور آن اطمینان حاصل نمود (Merow et al., 2013).

۲-۴. استخراج و آماده‌سازی متغیرهای محیطی

نقشه‌های درصد شیب، جهت شیب و ارتفاع از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.3 تولید شدند و به عنوان متغیرهای فیزیوگرافی مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از یک تبدیل کسینوسی، متغیر جهت به یک متغیر کمی پیوسته تبدیل شد. داده‌های ۱۹ متغیر اقلیمی (سال‌های ۲۰۱۳-۱۹۷۹) به صورت ریزمقیاس شده با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ ثانیه از پایگاه داده‌های اقلیمی چلسا به نشانی <https://chelsa-climate.org> استخراج شدند. متغیرهای زیست اقلیمی مربوط به سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۱۴، با استفاده از داده‌های بارش، حداکثر دما و حداقل دمای ماهانه مستخرج از همین پایگاه داده در محیط نرم‌افزار IDRISI TerrSet تولید شدند. سپس میانگین وزنی این متغیرهای زیست اقلیمی جهت فرآیند مدل‌سازی در نظر گرفته شد. این متغیرها عمدتاً تحت تأثیر فصل، بارندگی و دما قرار دارند و بنابراین علاوه بر اینکه ماهیت اقلیمی دارند، به لحاظ اکولوژیکی نیز معنی‌دار هستند. تمامی لایه‌های محیطی به لحاظ ابعاد (تعداد پیکسل‌های سطر و ستون)، دقت مکانی و سیستم مختصات یکسان‌سازی شدند. با توجه به اینکه همبستگی بین متغیرهای ورودی به مدل‌ها می‌تواند خطای قابل توجهی در خروجی آنها ایجاد کند (Braunisch et al., 2013)، همبستگی بین متغیرهای محیطی با ضریب همبستگی متداول پیرسون و برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار R v4.0.3 بررسی گردید. سپس از هر جفت متغیر دارای همبستگی بالاتر از

۸۰ درصد، یکی از متغیرها بر اساس دانش بوم‌شناختی حذف شدند و در نهایت تعداد هشت متغیر با حداقل همبستگی به عنوان ورودی مدل‌ها انتخاب گردیدند (جدول ۲).

۲-۵. مدل‌سازی

در مطالعه حاضر از دو مدل رگرسیونی شامل مدل خطی تعمیم یافته (GLM) و رگرسیون تطبیقی چند متغیره (MARS) و دو مدل یادگیری ماشینی شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و جنگل تصادفی^۶ (RF) در چارچوب روش اجماعی استفاده شد. در این مدل‌ها، داده‌های حضور و غیاب گونه به عنوان متغیر وابسته یا پاسخ و متغیرهای محیطی به عنوان متغیر مستقل یا پیشگو می‌باشند و ارتباط بین متغیرها به صورت توابع ریاضی (آماری) با استفاده از بسته کامپیوتری Biomod2 در نرم‌افزار R v4.0.3 ارائه گردید. این بسته کامپیوتری مانند کتابخانه‌ای در نرم‌افزار R است که توانایی اجماع و مقایسه مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها را دارد (Thuiller et al., 2016). نقشه‌های پیوسته خروجی با احتمال رخداد بین صفر (پایین‌ترین تناسب) تا یک (بالا‌ترین تناسب) در چهار طبقه شامل رویشگاه نامناسب (۰-۰/۲۵)، رویشگاه با تناسب کم (۰/۲۵-۰/۵)، رویشگاه با تناسب متوسط (۰/۵-۰/۷۵) و رویشگاه با تناسب زیاد (۰/۷۵-۱) گروه‌بندی شدند. در این مطالعه گستره جغرافیایی گونه در دوره پیش‌بینی نیز شامل دوره ۳۰ ساله آینده (۲۰۴۰-۲۰۷۰) تحت سناریوهای خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، بدبینانه (SSP3-7.0) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) مدل اقلیمی مؤسسه پیر سیمون لاپلاس فرانسه^۷ (IPSL-CM6A-LR) از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6)، مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌های موجود در پروژه CMIP6 به طور کلی وضوح بیشتری همراه با بهبود فرآیندهای پویا دارند و در آنها سناریوهای انتشار مشترک اجتماعی و اقتصادی برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی آینده اعمال شده است (ÓNeill et al., 2016). سناریوی SSP1-2.6، نشان‌دهنده پایین‌ترین میزان واداشت تابشی و پایداری کاربری اراضی در آینده است. سناریوی SSP5-8.5 نیز حد بالای واداشت تابشی را در نظر می‌گیرد که در آن پیشرفت با استفاده از سوخت فسیلی و الگوی مصرف بالای انرژی همراه است. انتشار بالای ذرات معلق و تغییر کاربری اراضی نیز از خصوصیات اصلی سناریوی SSP3-7.0 (واداشت غیر کاهشی) می‌باشد (Ansari et al., 2022). با استفاده از این سناریوها، امکان بررسی تغییر شایستگی رویشگاه گونه حاصل از تغییرات اقلیمی در خوش‌بینانه تا بدبینانه‌ترین حالت فراهم می‌شود. جهت برآورد اثر تغییر اقلیم، از یک سطح بحرانی (بر اساس ROC) برای طبقه‌بندی نقشه مطلوبیت رویشگاه به دو طبقه مطلوب و نامطلوب بر مبنای آستانه ۱۰ درصدی نقاط حضور استفاده شد و با نقشه‌های حال حاضر مقایسه شد.

۲-۶. ارزیابی مدل‌سازی

به منظور افزایش دقت و کارایی مدل‌ها، ۱۰ تکرار دسته‌بندی تصادفی برای هر یک از چهار مدل پراکنش گونه‌ای به کار رفت. جهت ارزیابی صحیح، در هر تقسیم تصادفی با استفاده از راهبرد مستقل بودن، از ۷۰ درصد داده‌های حضور جهت واسنجی مدل‌ها (داده‌های آموزشی) و از ۳۰ درصد باقیمانده آن جهت ارزیابی استفاده شد (داده‌های آزمایشی). با تشکیل ماتریس خطا، عملکرد مدل‌ها با استفاده از مؤلفه‌ها و روابط خاصی شامل سطح زیر منحنی^۸ ROC (AUC)، حساسیت^۹، اختصاصی بودن^{۱۰} و TSS^{۱۱} (جدول ۱) ارزیابی شد. نمودار ROC از طریق رسم حساسیت در برابر نرخ قبول اشتباه بدست می‌آید و به عنوان ارتباط میان نسبتی از حضورهایی که به طور صحیح پیش‌بینی شده‌اند (حساسیت) و نسبتی از غیاب‌هایی که به درستی پیش‌بینی نشده‌اند (اختصاصی بودن) تعریف می‌شود. حساسیت، نسبتی از حضورهای مشاهده شده است که به صورت صحیح پیش‌بینی شده‌اند. اختصاصی بودن نیز به معنی نسبتی از عدم حضورهایی است که صحیح پیش‌بینی نشده‌اند (Allouche et al., 2006). مقادیر AUC معمولاً بین ۰/۵ تا یک می‌باشد. مقادیر نزدیک به یک بیانگر مدلی

6. Random Forest

7. Institute Pierre-Simon Laplace

8. Area under Curve

9. Sensitivity

10. Specificity

11. True Skill Statistic

است که پیش‌بینی بی‌نقصی دارد. مقادیر ۰/۹-۱/۰ حاکی از پیش‌بینی عالی مدل، ۰/۷-۰/۹ پیش‌بینی قابل قبول و ۰/۵-۰/۷ پیش‌بینی ضعیف مدل می‌باشند. مقادیر کمتر از ۰/۵، عملکرد پیش‌بینی مدل را بدتر از حالت تصادفی نشان می‌دهند (Franklin, 2010). آماره TSS نیز دامنه‌ای از +۱ تا -۱ دارد که هر چه به +۱ نزدیک‌تر باشد، توانایی مدل بیشتر و هر چه به سمت صفر یا کمتر از آن میل پیدا کند، دقت مدل کاهش می‌یابد (Allouche et al., 2006).

$$TSS = (\text{sensitivity} + \text{specificity}) - 1 = \left(\frac{a}{a+b} + \frac{d}{d+c} \right) - 1 \quad (1)$$

که در آن، a نشان‌دهنده مقادیری است که هم در واقعیت و هم در مدل وجود دارند، اما مدل آن را به عنوان حضور ثبت می‌کند؛ b مقادیری است که فقط در مدل دیده می‌شود، اما عملاً در دنیای واقعی دیده نمی‌شود؛ c مقادیری را نشان می‌دهد که در واقعیت وجود دارند اما در مدل دیده نمی‌شوند؛ d نیز مقادیری است که نه در مدل وجود دارند و نه در واقعیت، و مدل آن را به عنوان غیاب ثبت می‌کند. به مقادیر b و c خطای مدل گفته می‌شود (Tsoar et al., 2007).

به منظور بررسی اختلاف معنی‌دار بین کارایی مدل‌های مجزا و مدل اجماعی با آزمون مقایسه میانگین توکی، مقادیر AUC حاصل از هر تکرار به عنوان متغیر وابسته و مدل‌ها به عنوان تیمار در نظر گرفته شدند.

۲-۷. ارزیابی اهمیت متغیرها و رسم منحنی عکس‌العمل گونه

اهمیت نسبی متغیرهای محیطی مورد استفاده با آنالیز حساسیت مدل‌ها به متغیرها تعیین شدند. پس از ایجاد مدل نهایی در هر روش مدل‌سازی، یکی از متغیرها از مدل خارج شد و فرآیند مدل‌سازی با متغیرهای باقیمانده تکرار شد. میزان همبستگی دو نقشه خروجی، درصد اهمیت نسبی متغیر مورد نظر در مدل را تعیین می‌کند (Elith et al., 2010). پس از تعیین مدل با بهترین کارایی بر اساس معیارهای ارزیابی، برای نشان دادن ترجیحات رویشگاهی و تحمل زیستی گونه، منحنی‌های عکس‌العمل گونه نسبت به تأثیرگذارترین متغیرهای محیطی ورودی به مدل در نرم‌افزار R رسم شدند. به دلیل اینکه احتمال وقوع در داخل محدوده ۰-۱ قرار دارد، احتمال حضور گونه در این منحنی‌ها در دامنه تغییرات ۰ تا ۱ نمایش داده می‌شود.

۳. یافته‌های پژوهش

۳-۱. ارزیابی مدل‌ها

مطلوبیت رویشگاه اسپرس کوهی بر اساس متغیرهای محیطی توسط مدل‌هایی که قبلاً به آنها اشاره شد، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج ارزیابی در جدول ۱ نشان داده شد. رگرسیون تطبیقی چند متغیره بیشترین صحت و شبکه عصبی مصنوعی با دارا بودن اختلاف معنی‌دار با سایر مدل‌ها ($p < 0.05$) کمترین صحت پیش‌بینی را به منظور تعیین رویشگاه اقلیمی گونه در منطقه دارا بود. در مجموع، مقادیر معیارهای صحت‌سنجی برای داده‌های تست بیانگر عملکرد عالی مدل‌های مجزا و نیز مدل اجماعی در پیش‌بینی پراکنش گونه می‌باشند.

جدول ۱. نتایج صحت‌سنجی مدل‌های مجزا و اجماعی

مدل اجماعی	RF	MARS	GLM	ANN	
۰/۹۵۴	۰/۹۳۳ ^b	۰/۹۳۳ ^b	۰/۹۳۱ ^b	۰/۸۶۴ ^a	TSS
۰/۹۹۶	۰/۹۸۶ ^b	۰/۹۸۷ ^b	۰/۹۸۶ ^b	۰/۹۷۳ ^a	AUC
۹۹/۲۹	۹۸/۰۳ ^a	۹۸/۱۷ ^a	۹۸/۰۳ ^a	۹۶/۰۶ ^a	حساسیت
۹۶/۱۷	۹۴/۴۳ ^b	۹۵/۱۴ ^b	۹۵/۰۸ ^b	۹۰/۳۳ ^a	ویژه‌انگاری

* حروف مشابه نشان‌دهنده عدم وجود اختلاف معنی‌دار می‌باشند.

۳-۲. تأثیرگذاری نسبی متغیرهای محیطی در پیش‌بینی مناطق مناسب برای حضور گونه

طبق نتایج آنالیز حساسیت، ترتیب اهمیت متغیرها در تمام مدل‌ها یکسان نبود. این موضوع به این دلیل است که مدل‌های مورد بررسی،

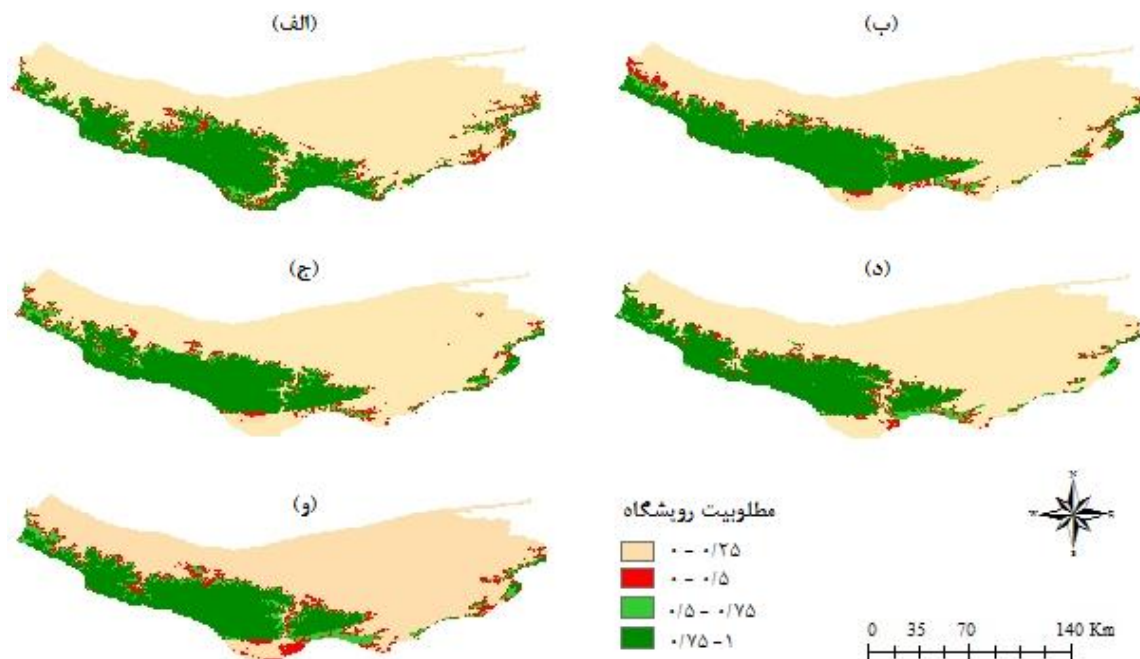
مدل‌های همبسته‌ای هستند که به واسطه نوع الگوریتم، درجه اهمیت متغیرها در آنها متفاوت می‌باشد (جدول ۲). به منظور دستیابی به یک نتیجه‌گیری از عوامل محیطی مهم و مؤثر، میانگین حاصل از نتایج آنالیز حساسیت برای تعیین اهمیت نسبی متغیرها به کار رفت. در مجموع، پارامتر ارتفاع و متغیرهای دمایی شامل حداکثر دمای گرم‌ترین ماه (Bio5)، تغییرات فصلی دما (Bio4) و میانگین دامنه دمای روزانه (Bio2) به ترتیب بیشترین کارایی را در تعیین مکان‌های مناسب اقلیمی گونه داشتند و در مجموع حدود ۸۰ درصد از تغییرات را توجیه نمودند.

جدول ۲. توصیف متغیرهای مورد استفاده در مدلسازی پراکنش مکانی گونه و تأثیرگذاری نسبی آنها در مدل‌های مختلف

نمایه متغیر	توصیف متغیر	ANN	GLM	MARS	RF	متوسط سهم نسبی در مدل‌ها
Alt.	ارتفاع (متر)	۲۶/۰۶	۱۷/۴۵	۳۵/۵۶	۱۹/۴۸	۲۴/۶۴
Bio2	میانگین دامنه دمای روزانه	۰	۱۶/۸۰	۱۵/۱۱	۳۲/۰۸	۱۶
Bio4	تغییرات فصلی دما	۰	۱۵	۲۶/۳۷	۲۴/۹۰	۱۶/۵۷
Bio5	حداکثر دمای گرم‌ترین ماه	۳۱/۸	۱۷/۹	۱۸/۰۴	۱۳/۴۸	۲۰/۳۱
Bio8	میانگین دمای مرطوب‌ترین فصل	۱۰/۲۳	۷/۹۸	۱/۷۶	۱/۹	۵/۴۷
Bio11	میانگین دمای سردترین فصل	۲۸/۶	۲۰/۲۸	۰	۲/۴۸	۱۲/۸۴
Bio13	بارندگی پربارش‌ترین ماه	۲/۸۱	۳/۵۸	۳/۱۶	۲/۸۸	۳/۱۱
Bio19	بارندگی سردترین فصل	۰/۵۰	۱/۰۱	۰	۲/۸۰	۱/۰۸

۳-۳. شایستگی نسبی رویشگاه گونه در حال حاضر

نقشه‌های تناسب اقلیمی رویشگاه گونه بر اساس داده‌های رخداد در شرایط اقلیمی حال حاضر در شکل ۲ آمده‌اند. با توجه به شکل، اسپرس کوهی در بخش‌های غربی و جنوبی استان پراکنده شده است، ضمن اینکه پراکنش ناچیزی به صورت لکه در بخش شرقی نیز دارد. طبق مدل اجماعی، حدود ۲۷ درصد از منطقه در حال حاضر به عنوان رویشگاه مطلوب گونه شناسایی شد که حدود ۶۴۲۸/۵ کیلومترمربع از سطح منطقه را می‌پوشاند.

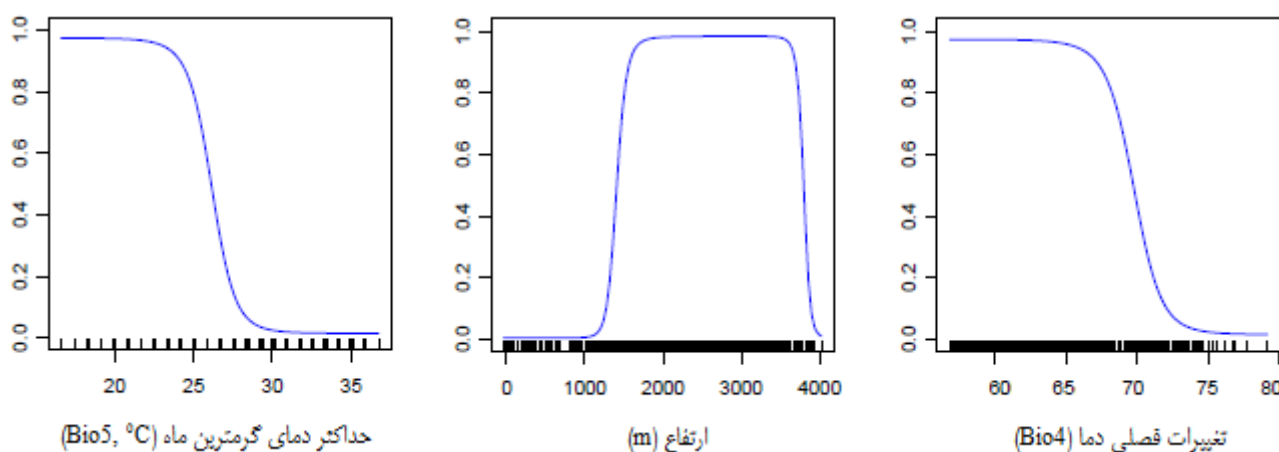


شکل ۲. نقشه شایستگی رویشگاه فعلی اسپرس کوهی بر اساس داده‌های رخداد تحت مدل‌های پراکنش گونه‌ای

(الف) GLM؛ (ب) MARS؛ (ج) ANN؛ (د) RF؛ و (و) مدل اجماعی

۳-۴. عکس‌العمل گونه به مهم‌ترین متغیرهای محیطی

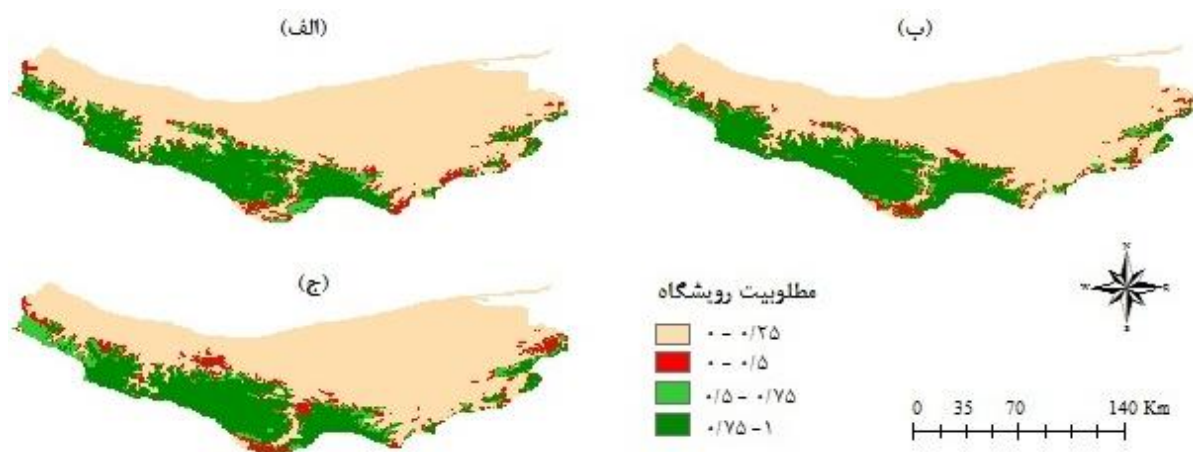
منحنی‌های عکس‌العمل اسپرس کوهی نسبت به مهم‌ترین متغیرهای محیطی بر اساس مدل با بیشترین کارایی یعنی رگرسیون تطبیقی چند متغیره مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). عکس‌العمل گونه اسپرس کوهی به حداکثر دمای گرم‌ترین ماه (Bio5) به صورت هم‌نوا کاهش می‌باشد. زمانی که اوج درجه حرارت هوا در گرم‌ترین ماه سال از ۲۲ درجه سانتی‌گراد فراتر می‌رود، حضور گونه کاهش چشمگیری پیدا کرده و در بیش از ۲۸ درجه سانتی‌گراد شاهد حضور گونه نخواهیم بود. منحنی پاسخ این گونه به ارتفاع به صورت چوله‌دار و دارای چولگی به چپ یا چولگی مثبت می‌باشد. حداقل ارتفاع رویشگاه گونه ۱۷۰۰ متر و حداکثر ارتفاع آن حدود ۳۶۰۰ متر از سطح دریا مشاهده شد. خارج از این محدوده یعنی در ارتفاعات کمتر از ۱۷۰۰ و بیش از ۳۶۰۰ متری گونه عملاً حضور ندارد. بطوریکه هنگام بازدید صحرایی نیز اثر ارتفاع قابل رؤیت بود. شایستگی رویشگاه اسپرس کوهی با افزایش تغییرات فصلی دما (Bio4) بیش از ۶۵ کاهش می‌یابد. این گونه به این متغیر نیز رفتار هم‌نوا کاهش می‌دهد.



شکل ۳. منحنی‌های عکس‌العمل گونه اسپرس کوهی نسبت به تأثیرگذارترین متغیرها بر پراکنش

۳-۵. شایستگی نسبی رویشگاه گونه در آینده و جابجایی آن

با مطالعه تغییر اقلیم و استفاده از معادلاتی که برای هر یک از مدل‌ها برآزش داده شد، نقشه اجماعی پراکنش گونه اسپرس کوهی بر مبنای نیازهای محیطی آن، تحت سناریوهای اقلیمی مورد مطالعه تولید شد (شکل ۴). با افزایش دما و کاهش بارندگی به واسطه تغییر اقلیم، وسعت رویشگاه گونه در بخش‌هایی از رویشگاه فعلی کاهش خواهد یافت.



شکل ۴. نقشه شایستگی رویشگاه آبی اسپرس کوهی تحت سناریوهای (الف) SSP1-2.6؛ (ب) SSP3-7.0 و (ج) SSP5-8.5 مدل اقلیمی IPSL-CM6A-LR

به منظور تعیین میزان و جهت جابجایی محدوده پراکنش مکانی گونه در منطقه، از نقشه‌های اجماعی بدست آمده در پایه‌های زمانی حال حاضر و آینده استفاده شد. جدول ۳، نشان‌دهنده مقادیر تغییر در محدوده پراکنش مکانی گونه بر حسب کیلومتر مربع است. تناسب پایدار، مقداری از مساحت تناسب فعلی است که در آینده هم برای گونه تناسب دارد. عدم تناسب پایدار، مقداری از مساحت عدم تناسب فعلی است که در آینده هم برای گونه نامناسب است. عدم تناسب آینده نیز مجموع عدم تناسب پایدار و تناسب از بین رفته را نشان می‌دهد. با محاسبه اختلاف مساحت رویشگاه مناسب اقلیمی جهت حضور گونه و مساحت رویشگاه نامناسب شده به این نتیجه دست یافتیم که طبق پیش‌بینی‌ها تحت هر سه سناریو، احتمال حضور گونه در آینده کاهش خواهد یافت. بیشترین کاهش در رویشگاه‌های مناسب گونه مربوط به سناریوی SSP5-8.5 بوده است که این موضوع با توجه به شدت تغییرات اقلیمی در این سناریو قابل پیش‌بینی بود. در برخی مناطق شاهد بروز رویشگاه مناسب جهت رخداد گونه هستیم و در مناطقی هم که گونه حضور داشته است، شاهد از بین رفتن شرایط مناسب رویش و در نتیجه کاهش سطح رویشگاه خواهیم بود. مقایسه مساحت این دو منطقه گویای این مطلب است که مساحت رویشگاه نامناسب شده اقلیمی طی سال‌های آتی و تحت هر سه سناریو بیشتر از مساحت رویشگاه مناسب خواهد بود. بنابراین، بخش‌هایی از میدان اکولوژیک واقعی گونه در آینده تحت پوشش قرار نخواهد گرفت و از شرایط مطلوب برای گونه دور خواهد شد. به واسطه تغییر اقلیم، وسعت رویشگاه مطلوب گونه حدود ۱/۴۱ درصد تحت سناریوی خوش‌بینانه، ۲/۴۶ درصد تحت سناریوی بدبینانه و ۳/۰۱ درصد تحت سناریوی خیلی بدبینانه کاهش خواهد یافت که این مقادیر کم جابه‌جایی می‌تواند به دلیل حساسیت کم این گونه به تغییرات اقلیمی باشد.

جدول ۳. تغییرات ایجاد شده در گستره جغرافیایی گونه تحت سناریوهای مختلف اقلیمی

SSP5-8.5	SSP3-7.0	SSP1-2.6	
۵۷۹۸/۹۴	۵۸۸۴/۴۶	۵۸۶۷/۸۳	تناسب پایدار
۱۶۴۹۸/۸۲	۱۶۴۳۴/۶۸	۱۶۳۳۰/۱۵	عدم تناسب پایدار
۳۷۱/۸۶	۴۲۶/۵	۶۱۲/۰۲	تناسب بدست آمده
۱۰۸۶/۷۸	۱۰۱۰/۷۶	۹۴۶/۴	تناسب از بین رفته
۶۱۷۰/۸	۶۳۱۰/۹۶	۶۴۷۹/۸۵	تناسب آینده
۱۷۵۸۵/۶	۱۷۴۴۵/۴۴	۱۷۲۷۶/۵۵	عدم تناسب آینده
۱/۵۶	۱/۷۹	۲/۵۷	تناسب به دست آمده (%)
۴/۵۷	۴/۲۵	۳/۹۸	تناسب از بین رفته (%)
-۳/۰۱	-۲/۴۶	-۱/۴۱	تغییرات خالص در رویشگاه (%)

۴. بحث و نتیجه‌گیری

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌تواند سبب گرمایش جهانی و بروز پدیده تغییر اقلیم و در نتیجه انقراض گیاهان به عنوان اصلی‌ترین جزء اکوسیستم‌ها شود. دامنه بردباری گونه‌ها و عوامل محیطی که بر پراکنش گونه‌ها و گسترش جغرافیایی آنها مؤثرند، در اثر تغییر اقلیم دستخوش تغییر شده و در نتیجه سبب تغییراتی در دامنه پراکنش و انتشار گونه‌ها می‌شود. لذا مطالعه حاضر نیز با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم بر گستره جغرافیایی اسپرس کوهی انجام شد. به منظور بررسی این هدف، در کنار نقاط حضور و شبه غیاب از یک متغیر فیزیوگرافی و هفت متغیر اقلیمی به عنوان ورودی فرآیند مدلسازی استفاده شد. دلیل استفاده از نقاط شبه غیاب این بود که غیبت یک گونه می‌تواند به دلیل نرسیدن بذرها، نامناسب بودن شرایط محیطی و اقلیمی، تغییرات کاربری اراضی و نیز عدم موفقیت محقق در مشاهده گونه مورد مطالعه باشد.

میزان تغییرات رویشگاه گونه با استفاده از دو مدل رگرسیونی و دو تکنیک یادگیری ماشینی، در دو مقطع زمانی حال حاضر و ۲۰۷۰-۲۰۵۰ تعیین شد. طبق مقادیر معیارهای صحت‌سنجی، مدل‌های رگرسیونی دقت بیشتری را نسبت به مدل‌های یادگیری ماشینی نشان دادند. همچنین، پس از مدل اجماعی، مدل MARS از قابلیت پیش‌بینی بیشتری برخوردار بود. مدل اجماعی به دلیل اینکه مزایای هر مدل مجزا را دارا می‌باشد، عدم قطعیت نتایج نهایی را کاهش می‌دهد (Amiri et al., 2019). در مطالعه Araújo و New (۲۰۰۷) نیز مشخص

شد که مدل اجماعی زمانی بیشترین عملکرد را دارد که همه مدل‌های مورد استفاده در آن از صحت و دقت قابل قبولی برخوردار باشند تا دقت پایین یک مدل سبب پایین آمدن دقت و عملکرد سایر مدل‌ها نشود.

از میان متغیرهای تأثیرگذار بر مطلوبیت رویشگاه گونه، ارتفاع با اختصاص سهم ۲۵ درصدی از تأثیرات، و سپس متغیرهای مربوط به درجه حرارت شامل حداکثر دمای گرم‌ترین ماه (Bio5) با ۲۰/۳۱ درصد، تغییرات فصلی دما (Bio4) با ۱۶/۵ درصد و میانگین دامنه دمای روزانه (Bio2) با ۱۶ درصد به ترتیب مؤثرترین متغیرها بوده‌اند. در مطالعه Santos و همکاران (۲۰۰۷) نیز مشخص شد که پارامترهای مربوط به فرم زمین به خصوص ارتفاع با تأثیر بر بسیاری از عوامل محیطی، در ایجاد رویشگاه‌ها و همچنین پراکنش گونه‌های گیاهی در چشم‌اندازهای کوهستانی نقش مهمی ایفا می‌کنند. تغییرات ارتفاعی می‌تواند به طور مستقیم روی سه پارامتر درجه حرارت، بارش و رطوبت و به طور غیرمستقیم بر تشکیل خاک در جوامع گیاهی تأثیر بگذارد. تغییر ارتفاع در شیب‌های مختلف از نظر زاویه و جهت عواملی هستند که جوامع گیاهی را در اکوسیستم‌ها ایجاد می‌کنند (Ardakani, 2014). با توجه به پاسخ گونه به ارتفاع و درجه حرارت گرم‌ترین ماه، می‌توان گفت که طبق رابطه ارتفاع با دما، مناطق مرتفع که دمای کمتری دارند برای اسپرس کوهی دارای تناسب هستند. دلیل غلبه این گیاه در مراتع کوهستانی و مرتفع را می‌توان داشتن ریشه‌های قوی، مقاومت آن نسبت به سرما، خشکی و نیز چرای دام نسبت داد. در واقع در محدوده ارتفاعی مذکور، محدودیت قابل ملاحظه‌ای از لحاظ رطوبت و درجه حرارت برای استقرار و رشد این گونه مشاهده نمی‌شود. در ارتفاعات، به دلیل این که گونه‌های دیگر تحمل شرایط محیطی را ندارند، حضورشان کاهش یافته و رقابت برای اسپرس کوهی کاهش می‌یابد. Abd El-Ghani و همکاران (۲۰۱۴) نیز از بین عوامل توپوگرافی، عامل ارتفاع از سطح دریا را به دلیل تأثیر بر اقلیم منطقه از مهمترین عوامل مؤثر بر پراکنش گونه‌های گیاهی معرفی نمودند. اهمیت تغییرات فصلی دما را می‌توان به توپوگرافی پیچیده استان نسبت داد، بطوریکه غرب استان نسبت به شرق آن کوهستانی‌تر می‌باشد (شکل ۱-الف). Ugurlu و Oldeland (۲۰۱۲) در کشور ترکیه نیز به چنین نتیجه‌ای دست یافتند. Rana و همکاران (۲۰۱۷) نیز در خصوص گونه *Fritillaria cirrhosa*، از میان متغیرهای مورد بررسی، متغیرهای مرتبط با درجه حرارت را به عنوان مهمترین عامل مؤثر معرفی نمودند. نقشه‌های شایستگی رویشگاه یا الگوهای مکانی در احتمال وقوع پیش‌بینی شده بین الگوریتم‌های مدل متفاوت می‌باشد اما همپوشانی بسیاری با هم دارند که دلیل آن را می‌توان در ماهیت و الگوریتم‌های مدل جستجو کرد.

گونه اسپرس کوهی بنا بر تغییرات اقلیمی سال‌های آتی و طبق پیش‌بینی انجام شده، بخش‌هایی از رویشگاه خود را از دست خواهد داد. این نتایج با یافته‌های Fatemi Azarkhavarani و همکاران (۲۰۱۷)، Amiri و همکاران (۲۰۱۹) و Sheikhzadeh Ghahnaviyeh و همکاران (۲۰۲۱) که روند کاهشی را برای گونه مورد مطالعه خود پیش‌بینی نمودند، همخوانی دارد. البته، آنچه مسلم است این است که به لحاظ پیچیدگی و تنوع خصوصیات اکولوژیک در هر منطقه، نمی‌توان نتایج بدست آمده در هر مطالعه را با تمامی مطالعات دیگر کاملاً مرتبط دانست. این پژوهش، نخستین تلاش برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر گستره جغرافیایی یک گونه مرتعی در مراتع هیرکانی با استفاده از یک مدل CMIP6 است. نظر به این که مدل مورد استفاده، امکان تحلیل بازخورد تغییرات اقلیمی و عوامل اقتصادی-اجتماعی را فراهم می‌آورد، نتایج حاصل از این مطالعه، می‌تواند در مدیریت مراتع و نیز اتخاذ راهبردهای سازگار در راستای فعالیت‌های اقتصادی-اجتماعی همچون استفاده پایدار و بهره‌برداری چند منظوره از مراتع راهگشا باشد. از میان برداشتن عوامل محیطی حساس نظیر بوته‌کنی، چرای مفراط دام، استفاده بی‌رویه از مراتع و تخریب رویشگاه‌ها در اثر عوامل انسانی از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند اکوسیستم‌های مرتعی را در برابر تغییر متغیرهای اقلیمی مقاوم‌تر سازند.

۵. منابع

- Abd El-Ghani, M., Soliman, A., & Abd El-Fattahr, A. (2014). Spatial distribution and soil characteristics of the vegetation associated with common succulent plants in Egypt. *Turkish Journal of Botany*, 38, 550-565. doi: 10.3906/bot-1309-49.
- Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. doi: 10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x.

- Amiri, M., Tarkesh, M., & Jafari, R. (2019). Predicting the distribution of *Artemisia sieberi* Besser under climate change in steppe and semi-steppe of Iran-Touranian region. *Desert Management*, 13, 29-48. doi: 10.22034/JDMAL.2019.36534. (In Persian)
- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M. J., & Farokhnia, A. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Research Journal*, 16(1), 11-24. doi: 10.22034/IWRJ.2022.11204. (In Persian)
- Araújo, M. B., & New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution*, 22, 42-47. doi: 10.1016/j.tree.2006.09.010.
- Ardakani, M. R. (2014). *Ecology*. University of Tehran Press. (In Persian)
- Braunisch, V., Coppes, J., Arlettaz, R., Suchant, R., Schmid, H., & Bollmann, K. (2013). Selecting from correlated climate variables: A major source of uncertainty for predicting species distributions under climate change. *Ecography*, 36(9): 971-983. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.00138.x.
- Elith, J., Kearney, M., & Phillips, S. (2010). The art of modelling range-shifting species. *Methods in ecology and evolution*, 1, 330-342. doi: 10.1111/j.2041-210X.2010.00036.x.
- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Hogberg, P., Linder, S., Mackenzie, F. T., Moore, B., Pedersen, T., Rosenthal, Y., Smetacek, V., & Stefen, W. (2000). The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system. *Science*, 290(5490), 291-296. doi: 10.1126/science.290.5490.291.
- Fallah Kalaki, M., Shokri Kuchak, V., & Ramezani Etedali, H. (2021). Simulating the effects of climate change on runoff using the CMIP5 and CMIP6 climate models by SWAT hydrological model (case study: Tashk-Bakhtegan basin). *Iran-water Resource Research*, 17(3), 345-359. (In Persian)
- Farzadmehr, J., & Sangoony, H. (2020). The effect of climate change on the geographical distribution of wild borage in Khorasan Razavi. *Water and Soil Conservation*, 27(3), 145-162. doi: 10.22069/JWSC.2020.16868.3221. (In Persian)
- Fatemi Azarkhavarani, S. S., Rahimi, M., Tarkesh, M., & Ravanbakhsh, H. (2017). Prediction of *Juniperus excelsa* M. Bieb. geographical distribution using by climate data under the conditions of current and future in Semnan Province. *Iranian Journal of Forest*, 9(2), 233-248. (In Persian)
- Franklin, J. (2010). *Mapping species distributions: spatial inference and prediction*. Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511810602.
- Gebrewahid, Y., Abrehe, S., Meresa, E., Eyasu, G., Abay, K., Gebreab, G., Kidanemariam, K., Adissu, G., Abreha, G. & Darcha, G. (2020). Current and future predicting potential areas of *Oxytenanthera abyssinica* (A. Richard) using MaxEnt model under climate change in Northern Ethiopia. *Ecological Processes*, 9, 1-15. doi: 10.1186/s13717-019-0210-8.
- Ghashangzadeh, A., & Fotouhi, F. (2021, November 24-25). *Effect of precipitation fluctuations to climate change on crop production and water constraint management in Iran*. 10th international conference on rainwater catchment systems. University of Kurdistan. <https://civilica.com/doc/1411106> (In Persian)
- Hill, L., Hector, A., Hemery, G., Smart, S., Tanadini, M., & Brown, N. (2017). Abundance distributions for tree species in Great Britain: A two-stage approach to modeling abundance using species distribution modeling and random forest. *Ecology and Evolution*, 7, 1043-1056. doi: 10.1002/ece3.2661.
- Hosseini, S. S., Tavili, A., Naghipoor Borj, A. A., & Khalighi Sigaroodi, S. (2022). Potential effects of climate change on the geographic distribution of the *Hordeum bulbosum* L. in the central Zagros region. *Natural Environment*, 74(4), 747-758. (In Persian)
- IPCC. (2021). *Summary for policymakers Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Iverson, L. R., & McKenzie, D. (2013). Tree-species range shifts in a changing climate: detecting, modeling and assisting. *Landscape Ecology*, 28, 879-889. doi: 10.1007/s10980-013-9885-x.
- Jafarian, Z., Karimzadeh, A., Ghorbani, J., & Akbarzadeh, A. (2011). Determination of ecological species groups and effective environmental factors on them. *Environmental Studies*, 59, 77-88. (In Persian)
- Merow, C., Smith, M. J., & Silander, S. J. (2013). A practical guide to Maxent for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography*, 36(10), 1058-1069. doi: 10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x.
- Motamedi, J., Khodaghohi, M., & Khalifezadeh, R. (2022). Prediction of current and future potential range of *Artemisia aucheri* under two climate warning models (Rcp4.5 and Rcp8.5) in southern Alborz rangeland habitats, Qazvin province. *Environmental Sciences Studies*, 7(2), 5015-5023. doi: 10.22034/JESS.2022.331331.1732. (In Persian)

- Nazari, S., Jafarian, Z., Alavi, S. J., & Naghipoor Borj, A. A. (2022). Predicting the geographical distribution of *Alopecurus textile* Boiss rangeland species on basis consensus approach of climate change in Mazandaran province. *Plant Ecosystem Conservation*, 9(19), 137-155. (In Persian)
- ÓNeill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J. F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (Scenario MIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. doi: 10.5194/gmd-9-3461-2016.
- Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12, 361-371. doi: 10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x.
- Qahraman, A. (1988). *Flora of Iran*. Volume 11. Research Institute of Forests and Rangelands. (In Persian)
- Rana, S. K., Rana, H. K., Ghimire, S. K., Shrestha, K. K., & Ranjitkar, S. (2017). Predicting the impact of climate change on the distribution of two threatened Himalayan medicinal plants of Liliaceae in Nepal. *Mountain Science*, 14(3), 558-570. doi: 10.1007/s11629-015-3822-1.
- Santos, B. A., Barbosa, D. C. A., & Tabarelli, M. (2007). Directional changes in plant assemblages along an altitudinal gradient in northeast Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 67(4), 777-779. doi: 10.1590/S1519-69842007000400028.
- Sheikhzadeh Ghahnaviyeh, A., Tarkesh Esfahani, M., Bashari, H., & Soltani Koupaie, S. (2021). Investigating geographical shifts of *Astragalus* verus under climate change scenarios using random-forest modeling (Case study: Isfahan and Chaharmahal va Bakhtiari provinces). *Journal of Rangeland*, 15(4), 589-602. (In Persian)
- Stohlgren, T. J., Ma, P., Kumar, S., Rocca, M., Morissette, J. T., Jarnevich, C., & Benson, N. (2010). Ensemble habitat mapping of invasive plant species. *Risk Analysis*, 30(2), 224-235. doi: 10.1111/j.1539-6924.2009.01343.x.
- Taylor, M. A., Stephenson, T. S., Anthony Chen, A., & Stephenson, K. A. (2012). Climate change and the caribbean: Review and response. *Caribbean Studies*, 40(2), 169-200.
- Thuiller, W., Georges, D., Engler, R., Breiner, F., Georges, M. D., & Thuiller, C. W. (2016). Package 'biomod2'. 114 p.
- Tsoar, A., Ahhouche, O., Steinitz, O., Rotem, D., & Kadmon, R. (2007). A comparative evaluation of presence-only methods for modeling species distribution. *Diversity and Distributions*, 13(4), 397-405. doi: 10.1111/j.1472-4642.2007.00346.x.
- Uğurlu, E., & Oldeland, J. (2012). Species response curves of oak species along climatic gradients in Turkey. *International Journal of Biometeorology*, 56(1), 85-93. doi: 10.1007/s00484-010-0399-9.
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2022). Assessing the Effect of Climate Change on Heavy Precipitation in Iran Based on a CMIP6 Ensemble Model. *Water and Sustainable Development*, 8(4), 119-124. (In Persian)
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A. A., & Salehabadi, N. (2021). Projected temperature anomalies and trends in different climate zones in Iran based on CMIP6. *Journal of Geophysics*, 15(1), 35-54. doi: 10.22059/JPHGR.2021.308361.1007551. (In Persian)
- Zhang, J., Huang, S., & He, F. (2015). Half-century evidence from western Canada shows forest dynamics are primarily driven by competition followed by climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(13), 4009-4014. doi: 10.1073/pnas.1420844112.