Journal of Range & Watershed Management
https://jrwm.ut.ac.ir/

Volume 76 (3)
Online ISSN: 2423-7795

Ecological Habitat Modeling of *Ferula gummosa* in Ghorkhoud Protected Area Using Machine Learning Algorithms

Hamidreza Keshtkar*[1] | Hassan Yeganeh[2] | Omid Kavoosi[1]

1. Dept of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
E-mail: Hkeshtkar@ut.ac.ir
2. Dept. of Rangland Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 17 Feb. 2023
Revised: 07 May. 2023
Accepted: 19 May. 2023
Published online: 21 Nov. 2023

Keywords:
Ferula gummosa,
Habitat suitability,
Explanatory variable,
Evaluation metric,
North Khorasan.

Abstract

Ferula gummosa is one of the rare and valuable species in Iran's rangelands, which is exploited by local stakeholders due to its high economic value. Protecting this species can help maintain the biodiversity and stability of mountainous areas. Machine learning models are suitable techniques to determine the ecological niches of species in response to environmental variables. This study was conducted to compare the performance of six predictive models: Artificial Neural Networks, Random Forest, Classification Tree Analysis, Surface Range Envelope, Generalized Boosting Machines, and Generalized Linear Models. To evaluate the interactions between topographic factors and other variables, two environmental datasets were quantified and used for model calibration. The first dataset includes eleven factors covering topographic, climatic, edaphic, and remote sensing variables. Meanwhile, the second dataset contains six factors, focusing on climatic, edaphic, and remote-sensing variables. Model accuracy was evaluated using the True Skill Statistic (TSS), the area under the curve of the Receiver Operating Characteristics (ROC), and the Accuracy Index. The evaluation indices indicate that the Generalized Boosting Machine (GBM) model predicted the ecological niche of *F. gummosa* more accurately than the other methods. Additionally, the results showed that removing topographical variables reduced the model accuracy by 11 to 25%. The slope, NDVI, wetness, and soil groups were found to be the most important factors in mapping potentially suitable habitats for the target plant. According to the results obtained from the GBM model, approximately 45% of the Ghorkhoud area is in excellent condition. This knowledge can aid in the selection of predictors for practical Species Distribution Model (SDM) applications and provide information on which modeling techniques are most useful for a group of species.

Cite this article: Keshtkar, H.R., Yeganeh, H., Kavoosi, O. (2023). Ecological Habitat Modeling of Ferula gummosa in Ghorkhoud Protected Area Using Machine Learning Algorithms. *Journal of Range & Watershed Management*, 76 (3), 305-319. DOI: http//doi.org/10.22059/jrwm.2024.335991.1633

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

نشریه مرتع و آبخیزداری

دوره ۷۶ (۳)
شاپا الکترونیکی: ۲۴۲۳-۷۷۹۵

تعیین آشیان اکولوژیک گونه باریجه *(Ferula gummosa)* با استفاده از مدل‌های ماشین بردار در منطقه حفاظت شده قرخود

حمیدرضا کشتکار[1*] | حسن یگانه[2] | امید کاوسی[1]

۱. گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
رایانامه: Hkeshtkar@ut.ac.ir
۲. گروه مدیریت مرتع، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۲/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۹
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۸/۳۰

کلیدواژه‌ها:
باریجه،
مطلوبیت زیستگاه،
متغیر توصیفی،
متریک ارزیابی،
خراسان شمالی.

چکیده

تعیین آشیان اکولوژیک گونه‌ها یکی از رهیافت‌های محافظتی از گیاهان بشمار می‌رود. گیاه باریجه (*Ferula gummosa*)، از گونه‌های کمیاب و ارزشمند در مراتع ایران است که به دلیل ارزش بالای اقتصادی، مورد بهره‌برداری ذینفعان محلی قرار می‌گیرد. مدل‌های یادگیری ماشینی از تکنیک‌های مناسب برای تعیین آشیان اکولوژیک گونه‌ها با استفاده از متغیرهای محیطی بشمار می‌آیند. در این مطالعه به بررسی و مقایسه عملکرد شش مدل پیش‌بینی کننده (شبکه عصب مصنوعی، جنگل تصادفی، مدل خطی تعمیم یافته، مدل تقویت شده تعمیم یافته، مدل پاکت دامنه سطحی، و روش تجزیه و تحلیل درخت طبقه‌بندی) پرداخته شد. همچنین جهت ارزیابی تأثیر برهمکنش متغیرهای توپوگرافی با سایر متغیرها، دو مجموعه متغیر محیطی جهت واسنجی مدل‌ها کمی‌سازی شده و مورد استفاده قرار گرفت. مجموعه متغیر اول حاوی یازده عامل، مشتمل بر متغیرهای توپوگرافیک، اقلیمی، ادافیکی و سنجش از دوری است و مجموعه متغیر دوم حاوی شش عامل، مشتمل بر متغیرهای اقلیمی، ادافیکی و سنجش از دوری می‌باشد. عملکرد مدل با استفاده از شاخص مهارت واقعی (TSS)، منحنی مشخصه عملکرد سیستم (ROC) و شاخص صحت (Accuracy) ارزیابی شد. بر اساس شاخص‌های ارزیابی، مدل تقویت شده تعمیم یافته بهتر از سایر روش‌های یادگیری ماشینی توانست آشیان اکولوژیک گیاه باریجه را پیش‌بینی کند. همچنین نتایج نشان داد که حذف متغیرهای توپوگرافی، دقت مدل‌ها را بر اساس شاخص TSS، بین ۱۱ تا ۲۵ درصد کاهش می‌دهد که بیشترین کاهش مربوط به مدل خطی تعمیم یافته و کمترین کاهش مربوط به مدل شبکه عصب مصنوعی بوده است. ارزیابی اهمیت نسبی متغیرهای پیش‌بینی کننده در مدل برگزیده نشان داد که متغیر درجه شیب، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی، شاخص رطوبت سطحی، و گروه‌های خاک بیشترین تأثیر را در تعیین مطلوبیت زیستگاه گونهٔ باریجه دارند. بر اساس نتایج حاصل شده از مدل برگزیده، حدود ۴۵ درصد از سطح منطقه حفاظت شده قرخود از نظر مطلوبیت زیستگاه باریجه، در وضعیت عالی قرار دارد. لذا این منطقه پتانسیل بسیار زیادی برای کاشت و توسعه این گونه‌ی ارزشمند داشته و می‌تواند مدنظر مدیران بخش محیط زیست و منابع طبیعی جهت اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی و حفاظتی قرار گیرد.

استناد: حمیدرضا، کشتکار؛ یگانه، حسن؛ کاوسی، امید (۱۴۰۲). تعیین آشیان اکولوژیک گونه باریجه (*Ferula gummosa*) با استفاده از مدل‌های ماشین بردار در منطقه حفاظت شده قرخود. *نشریه مرتع و آبخیزداری*، ۷۶(۳)، ۳۱۹-۳۰۵.

DOI: http//doi.org/10.22059/jrwm.2024.335991.1633

ناشر : انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

مطالعه پراکنش گونه‌های گیاهی در مناطق حفاظت‌شده نقش حیاتی در تحقق اهداف محیط زیستی و حفاظتی دارد. گونه‌های گیاهی به عنوان یکی از ارکان اساسی در اکوسیستم‌ها، تاثیرات عمیقی بر تنوع زیستی و تعادلات اکولوژیک دارند (Ruheili et al., 2022). درک و شناسایی الگوهای پراکنش آن‌ها اطلاعات مهمی را برای مدیریت، حفاظت، استراتژی‌های اصلاحی و توان‌بخشی و مقابله با تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد. بوم‌شناسان اعتقاد دارند که محدوده جغرافیایی گونه‌ها نشان دهنده ویژگی‌های زیستگاه آنها است که حضور آنها را در یک مکان خاص پشتیبانی یا محدود می‌کند (Guisan, 2013).

بررسی ارتباط متغیرهای محیطی با آستانه تحمل گونه‌ها، امکان بررسی و مدل‌سازی پیامدهای تغییرات محیطی بر رفتار گونه‌ها و سیستم‌های اکولوژیکی را ممکن کرده است (Akhter et al., 2017). لذا درکی مناسب از رابطه بین گونه و محیط جهت مطالعه چگونگی تغییرات در آشیان اکولوژیک گیاهان مورد نیاز است. این درک معمولاً از طریق روش‌های نظری و آماری حاصل می‌شود که متغیرهای محیطی و پیدایش گونه‌ها را مرتبط می‌کند. پیش‌بینی توزیع جغرافیایی گونه‌ها از طریق مدل‌های پیش‌بینی کننده به ما کمک می‌کند تا درک عمیق‌تری از الگوهای توزیع زیستی و تعاملات محیطی گوناگون داشته باشیم (Ahmadi et al., 2023).

مدل‌های پیش‌بینی کننده، مانند مدل‌های توزیع مکانی گونه‌ها SDMs، بر این ایده استوار هستند که می‌توان توزیع گونه‌ها را با استفاده از رابطه‌های ریاضی و آماری بین داده‌های حضور گونه و متغیرهای محیطی پیش‌بینی کرد (پورمحمدی و همکاران، ۱۳۹۹). این مدل‌ها شرایط منحصر به فردی را برای هر گونه بر اساس شرایط زیستگاهی که در آنها یافت می‌شوند، شناسایی کرده و سپس احتمال حضور گونه در سایر نقاط را با استفاده از این اطلاعات پیش‌بینی می‌کنند (Zhu et al., 2018). این کار نه تنها به دانشمندان کمک می‌کند تا توزیع کنونی گونه‌های مورد مطالعه را درک کنند، بلکه امکان ارزیابی تاثیر تغییرات زیست محیطی، مانند تغییرات اقلیمی، روی توزیع‌های موجود و آتی گونه‌ها را نیز فراهم می‌آورد. این مدل‌ها در حفظ تنوع زیستی نیز نقش اساسی دارند. آن‌ها ابزار مهمی در اختیار مدیران مناطق محافظت‌شده و سایر متخصصان اکولوژی قرار می‌دهند تا با استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده، مناطق حساس اکولوژیکی را شناسایی کرده و اولویت‌های حفاظتی را مشخص نمایند (Slater & Michael, 2012). علاوه بر این، با استفاده از این مدل‌ها می‌توان پیش‌بینی کرد که گونه‌های مهاجم چگونه ممکن است در مناطق جدیدی گسترش یابند و چه تاثیری بر گونه‌های بومی خواهند داشت (Zhang et al., 2022).

در چند سال اخیر استفاده از روش‌های یادگیری ماشینی جهت بررسی آشیان اکولوژیک گیاهان و جانوران افزایش پیدا کرده است. پیش‌بینی آشیان اکولوژیک گونه‌ها از طریق یادگیری ماشینی یک رویکرد قوی و در حال توسعه در اکولوژی منظر و علم حفاظت است (Peng et al., 2017). این تکنیک‌ها امکان استخراج الگوها و روابط پیچیده بین داده‌های زیست‌محیطی و توزیع گونه‌ها را فراهم می‌آورد که با استفاده از روش‌های سنتی آماری بسیار دشوار یا غیرممکن است. به عنوان مثال، این روش‌ها می‌توانند روابط غیرخطی بین پیش‌بینی‌کننده‌ها را مدیریت کنند و همچنین قادر به مدیریت داده‌های پیچیده هستند (Thuiller et al., 2016). تعداد مدل‌های مورد استفاده برای تعیین مناطق مستعد رویش گونه‌ها در سال‌های اخیر به طور قابل‌توجهی افزایش یافته است (گوسن[1] و همکاران، ۲۰۱۳)، اما هنوز مشخص نیست کدام تکنیک‌ها مطمئن‌ترین پیش‌بینی‌ها را ارائه می‌دهند.

گونه باریجه (*Ferula gummosa*)، یکی از گونه‌های بومی و با ارزش ایران است که در مناطق کوهستانی زیست می‌کند. این گونه به دلیل ویژگی‌های دارویی که دارد بسیار مورد توجه قرار گرفته و در تهیه داروهای سنتی استفاده می‌شود. علاوه بر این، با تولید مواد ارگانیک و تأمین علوفه برای دام‌ها، در اقتصاد روستاییان نیز نقش دارد (Mahboubi, 2016). حفاظت از این گونه می‌تواند به حفظ تنوع زیستی و پایداری مناطق کوهستانی کمک شایانی کند. به دلیل اهمیت حفظ این گونه، نجم آبادی و همکاران (۱۳۹۶) مناطق مستعد رشد و توسعه گیاه باریجه را در شهرستان شیروان استان خراسان شمالی مورد بررسی قرار دادند. همچنین وردیان و همکاران (۱۴۰۱) مطلوبیت رویشی باریجه را در مراتع لار استان تهران مطالعه و عوامل محیطی موثر در آشیان اکولوژیک این گونه را معرفی نمودند. در مطالعه‌ای که توسط مرادی[2] و همکاران (۲۰۲۱) انجام گرفته، ویژگی‌های محیطی حضور گونه باریجه در استان زنجان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

انتخاب عوامل محیطی به عنوان متغیر پیش‌بینی کننده یک چالش برای اکولوژیست‌ها است (Araujo & Guisan, 2006). برخی متخصصین

[1] Guisan
[2] Moradi

گزارش داده‌اند که انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌هایی با تأثیر مستقیم بر توزیع گونه‌ها بهترین راه‌حل برای این چالش می‌باشد (Austin, 2007). استفاده از معیارهای متنوع محیطی مانند توپوگرافی، اقلیمی، ادافیکی و شاخص‌های سطحی بهترین ترکیب برای استفاده در مدل‌سازی و تعیین مناطق مستعد رویش گونه‌ها می‌باشند (Keshtkar & Poormohammad, 2022). برخی از محققین گزارش داده‌اند که انتخاب متغیرهای توپوگرافی از فاکتورهای بسیار مهم در پیش بینی آشیان اکولوژیک گونه‌های گیاهی می‌باشند (Balazi et al., 2019; Norberg, 2019)؛ به ویژه برای مطالعه گیاهانی که زیستگاه اصلی آنها عمدتا مناطق کوهستانی می‌باشد (Oppel et al., 2012; Rajpoot et al., 2020). در بسیاری از مطالعات مانند احمدی[1] و همکاران (۲۰۲۳) داده‌های توپوگرافی به عنوان عوامل اصلی مدل‌سازی درنظر گرفته شده‌اند و سایر متغیرها بر اساس اهداف تحقیق به این عوامل اضافه شده است. در این مطالعه جهت بررسی اهمیت حضور فاکتورهای توپوگرافی و تعامل آنها با رویکردهای مدل‌سازی، دو مجموعه از متغیرهای محیطی جهت واسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت که عبارتند از: ۱) تمام عوامل انتخابی در این مطالعه (یازده متغیر)، و ۲) متغیرهای انتخابی اول بدون عوامل توپوگرافی (شش متغیر). دیگر اهداف این مطالعه عبارت است از تعیین مناطق مستعد رویش گونه باریجه (*Ferula gommusa*)، ارزیابی عملکرد تعدادی از مدل‌های آماری و یادگیری ماشینی در تعیین پتانسیل رویشگاه، و تعیین عوامل محدودکننده و محرک‌های اکولوژیکی در رشد و پراکنش گونه‌ی مورد مطالعه. چنین دانشی می‌تواند به انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها برای کاربردهای عملی کمک کند و اطلاعاتی را در مورد اینکه کدام تکنیک‌های مدل‌سازی برای گروهی از گونه‌ها مفیدتر هستند، ارائه دهد.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه و گونه مورد مطالعه

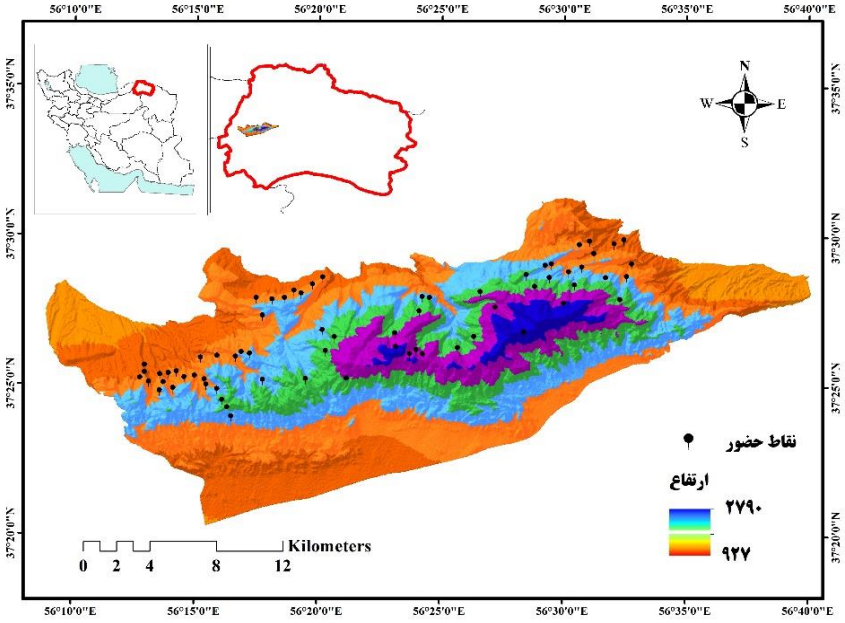
منطقه حفاظت شده قرخود در استان خراسان شمالی، شهرستان بانه و سملقان و در حاشیه رشته کوه تکلان معروف به قُرخود قرار گرفته است. این منطقه در بین طول‌های جغرافیایی "۵۴ '۰۸ °۵۶ تا "۵۹ '۳۹ °۵۶ شرقی و عرض‌های جغرافیایی "۲۳ '۲۰ °۳۷ تا "۰۳ '۳۱ °۳۷ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). منطقه حفاظت شده قرخود به علت واقع شدن در شرق پارک ملی گلستان از نظر بوم‌شناسی گیاهی دارای ارزش فراوانی است. در سال ۱۳۵۰، این منطقه تحت پوشش سازمان حفاظت محیط زیست ایران قرار گرفت و به عنوان یکی از مناطق چهارگانه محیط زیست کشور شناخته شد. این منطقه حدود ۴۳۷۰۰ هکتار مساحت دارد و کمترین و بیشترین ارتفاع آن به ترتیب ۹۴۰ و ۲۷۸۰ متر از سطح دریا می‌باشد. اقلیم منطقه بر پایه دوره زمانی ۳۰ ساله و براساس اقلیم نمای آمبرژه، نیمه‌خشک سرد می‌باشد (کشتکار و همکاران، ۱۳۹۰).

گیاه باریجه (*Ferula gummosa*) یکی از گونه‌های خانواده چتریان (Apiaceae) است. این گیاه چندساله می‌تواند به ارتفاع تقریبی یک تا دو متر رشد کند و معمولا در مناطق خشک و کوهستانی، بیشتر در کشورهای غرب و مرکزی آسیا از جمله ایران، افغانستان و ترکیه یافت می‌شود. باریجه به دلیل صمغ معطر و مرغوبی که تولید می‌کند شهرت دارد. این صمغ به صورت تاریخی برای مقاصد دارویی و عطرسازی ارزشمند بوده و به دلیل خواص دارویی قابل توجه‌ای مانند خاصیت ضدالتهابی، ضد میکروبی، و ضد سرطانی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Amiri et al., 2021; Keshtkar et al., 2008). با این حال، با توجه به اینکه بهره برداران صمغ این گیاه را برداشت می‌کنند، باعث بروز فشارهای بیش از حد و تخریب زیستگاه‌های طبیعی آن شده است که می‌تواند بر جمعیت‌های وحشی باریجه تاثیر منفی گذارد. مدیریت پایدار و حفاظت از زیستگاه‌های باریجه برای حفظ این گونه ارزشمند اهمیت بسزایی دارد. منطقه حفاظت شده قرخود یکی از زیستگاه‌های این گونه مهم مرتعی در ایران می‌باشد.

۲-۲. برداشت میدانی

جهت برداشت نقاط حضور و عدم حضور گونه باریجه، مطالعات میدانی در اردیبهشت و تیر ماه سال ۱۴۰۰ انجام گرفت و برای ثبت نقاط اطلاعاتی از GPS Garmin 64S استفاده شد. برای جلوگیری از خودهمبستگی مکانی و خطای نمونه‌برداری، حداقل فاصله بین نقاط ثبت شده ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه این گونه در معرض برداشت‌های غیرقانونی و خارج از توان گونه قرار گرفته و به گواهی اهالی محلی و محیط‌بانان پاسگاه محیط‌بانی، بسیاری از پایه‌های آن در سال‌های اخیر نابود شده است. لذا نقاطی با حداقل دو پایه باریجه، به عنوان منطقه مستعد حضور این گونه منظور گردید. در نهایت ۶۸ نقطه حضور و ۷۶ نقطه عدم حضور برای این گونه در منطقه ثبت شد.

[1] Amadi



شکل ۱. موقعیت منطقه حفاظت شده قرخود و طبقات ارتفاعی آن

۳-۲. متغیرهای محیطی

در این مطالعه، ۱۲ متغیر مستقل جهت پیش‌بینی زیستگاه‌های مناسب باریجه مورد استفاده قرار گرفت. این متغیرها داده‌های متنوع اکولوژیکی و محیطی هستند که از طریق تکنیک‌های سنجش از دوری، داده‌های هواشناسی، و پایگاه‌های داده‌های مکانی به دست می‌آیند. متغیرهای مورد استفاده عبارتند از لایه رقومی ارتفاع (DEM)، نقشه شیب (Slope)، نقشه جهت شیب (Aspect)، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، شاخص تابش خورشیدی (Solar radiation)، میانگین ۱۰ ساله شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی (NDVI) برای فصل رویش (فروردین تا شهریور)، میانگین شاخص گیاهی بهبود یافته (EVI)، میانگین شاخص رطوبت سطحی (Wetness)، میانگین دمای سالانه (Temperature)، میانگین بارش سالانه (Precipitation)، کربن آلی خاک (Organic Carbon)، و نقشه گروه‌های خاک (Soil groups).

لایه رقومی ارتفاع از سایت سازمان زمین شناسی آمریکا (www.earthengine.usgs.gov) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر دریافت شد. نقشه شیب، جهت شیب و شاخص تابش خورشیدی، در محیط GIS و با استفاده از لایه رقومی ارتفاع تولید گردید. شاخص‌های NDVI، EVI و Wetness، در محیط GEE و با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و لندست ۸ به صورت میانگین ۱۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۰) برای فصل رشد گیاهی (اول فروردین تا پایان شهریور) مورد محاسبه قرار گرفت. جهت تولید میانگین سالانه دما و بارندگی، از داده‌های ۱۰ ساله (۲۰۲۰-۲۰۱۰) ایستگاه‌های سینوپتیک و باران سنجی اطراف منطقه مطالعاتی استفاده گردید. داده‌های هواشناسی در محیط GIS با استفاده از روش میان‌یابی IDW تبدیل به نقشه یکپارچه برای کل منطقه شد. نقشه کربن آلی خاک و نقشه تیپ خاک از مرکز بین‌المللی مرجع و اطلاعات خاک (ISRIC) با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر دریافت گردید. در نهایت تمام لایه‌های اطلاعاتی با پیکسل سایز ۳۰ مترمربع تهیه و آماده ورود به نرم افزار شدند.

برای ارزیابی اهمیت پارامترهای توپوگرافی در تعیین آشیان اکولوژیک گونه باریجه، متغیرهای محیطی در دو مجموعه تهیه و برای پیش‌بینی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. مجموعه اول حاوی تمام متغیرهای محیطی در نظر گرفته شده در این مطالعه می‌باشد و مجموعه دوم، متغیرهای توپوگرافی (ارتفاع، درجه شیب، جهت شیب، رطوبت توپوگرافی، تابش خورشیدی) از مجموعه اول حذف شده و مابقی عوامل (شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی، شاخص رطوبت سطحی، میانگین دمای سالانه، میانگین بارش سالانه، کربن آلی خاک، و گروه‌های خاک) جهت واسنجی توسط مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

قبل از ورود متغیرهای محیطی به مدل‌ها، خود همبستگی چندگانه (Multicollinearity) بین متغیرها با استفاده از شاخص تورم واریانس (VIF) مورد ارزیابی قرار گرفت. این شاخص نحوه تغییر رفتار یک متغیر مستقل به دلیل همبستگی با سایر متغیرهای مستقل را آزمایش می‌کند و

درصـــورت وجود همبســـتگی بالا بین دو متغیر، یکی از متغیرها می‌بایســـت حذف شـــود (Shrestha, 2020). در این مطالعه VIF > 5 به عنوان خودهمبستگی چندگانه در نظر گرفته شد.

۴-۲. مدل‌سازی و اعتبارسنجی

به منظور تعیین آشیان اکولوژیک بالقوه گونه باریجه، شش الگـــوریتم شامل، مدل جنگل تصادفی (RF: Random Forest)، شبکه عصب مصنوعی (ANN: Artificial Neural Network)، مدل تقویت شـده تعمیم یافته (GBM: Generalized Boosting Method)، مدل خطی تعمیم یافته (GLMs: Generalized Linear Model)، مدل پاکت دامنه ســـطحی (SRE: Surface Range Envelope) و روش تجزیه و تحلیل درخت طبقه‌بندی (CTA: Classification Tree Analysis) انتخاب شـــدند. تمام مدل‌ها در نرم افزار R 4.3.2 اجرا و خروجی هر کدام به صـــورت نقشه‌های رستری در دامنه عددی ۱۰۰۰-۰ تهیه شد. عدد صفر نشان دهنده عدم وجود شرایط مناسب برای رشد گونه باریجه و عدد ۱۰۰۰ نشان دهنده وجود شرایط کاملا بهینه و مطلوب برای رشد و حضور این گونه می‌باشد. در نهایت، نقشه‌های نهایی مطلوبیت رویشگاه در چهار کلاس شامل رویشگاه با مطلوبیت حداقل (۲۵۰>)، مطلوبیت متوسط (۵۰۰-۲۵۰)، مطلوبیت خوب (۷۵۰-۵۰۰) و مطلوبیت عالی (۱۰۰۰-۷۵۰) طبقه‌بندی شدند.

جهت بهبود دقت و اثربخشی مدل‌های مورد استفاده، هر فرآیند مدل‌سازی ۱۰ بار تکرار شد. در هر یک از تکرارها داده‌ها به صورت تصادفی تقسیم‌بندی و در مدل قرار گرفتند. به عبارتی دیگر در هر بار تکرار، به طور تصادفی ۷۰ درصد از نقاط حضور گونه برای آموزش مدل استفاده شد و ۳۰ درصد باقی مانده در مرحله‌ی ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت عملکرد هر یک از مدل‌ها با استفاده از سه معیار ارزیابی شامل True Skill Statistics (TSS)، Receiver Operating Characteristic (ROC) و Accuracy مورد بررسی قرار گرفت. دامنه عددی TSS بین ۱- تا ۱+ می‌باشد، که ارزش عددی صفر و کمتر به این معناست که نتایج بهتر از حالت تصادفی نیست، ۰/۲-۰ نشان دهنده عملکرد بسیار ضعیف، ۰/۴-۰/۲ عملکرد ضعیف، ۰/۶-۰/۴ عملکرد متوسط، ۰/۸-۰/۶ عملکرد خوب و بالاتر از ۰/۸ عملکرد عالی می‌باشد (Ollouche et al., 2006). دامنه عددی ROC نیز بین صفر تا یک متغیر است. جایی که مقدار آن کمتر از ۰/۵ است نشان می‌دهد که نتایج بهتر از حالت تصادفی نیستند، مقادیر ۰/۷-۰/۵ نشان‌دهنده عملکرد متوسط، ۰/۹-۰/۷ نشان‌دهنده عملکرد خوب و بالاتر از ۰/۹ نشان‌دهنده عملکرد عالی مدل است (Franklin, 2009). شاخص صحت (Accuracy) دامنه‌ی عددی بین ۱-۰ دارد. صفر را می‌توان به عنوان پیش‌بینی‌های تصادفی و عملکرد ضعیف تفسیر کرد و عدد یک را توافق کامل و عملکرد عالی دانست. جهت محاسبه شاخص TSS و Accuracy از فرمول‌های ۴-۱ استفاده شد (Allouche et al., 2006).

$$\text{Sensitivity} = \frac{a}{a+c} \quad (۱)$$

$$\text{Specificity} = \frac{d}{b+d} \quad (۲)$$

$$\text{TSS} = \text{Sensitivity} + \text{Specificity} - 1 \quad (۳)$$

$$Accuracy = \frac{a+b}{a+b+c+d} \quad (۴)$$

متغیر a نشان دهنده مقادیر مثبت حقیقی، متغیر b نشان دهنده مقادیر مثبت کاذب، c نشان دهنده مقادیر منفی کاذب و d مقادیر منفی واقعی را نشان می‌دهند. هرچه مقدار b و c بیشتر باشد، نشان دهنده خطای بالاتر مدل است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. بررسی خودهمبستگی چندگانه

تمام متغیرهای مســتقلی که جهت تعیین مطلوبیت رویشـگاه گونه باریجه تهیه شـده بودند جهت بررسـی خودهمبسـتگی چندگانه مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که به غیر از میانگین شاخص گیاهی بهبود یافته (EVI)، سایر عوامل دارای مقادیر همبستگی ۰/۵> هستند. لذا تمام متغیرها غیر از EVI جهت واسنجی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۳. عملکرد مدل‌های مختلف

هر یک از معیارهای ارزیابی مدل که در این تحقیق استفاده شده است، از ابعاد تخصصی خود عملکرد مدل‌ها را مورد سنجش قرار می‌دهند. شاخص ROC به دلیل اینکه حداقل تاثیر را از اندازه نمونه می‌پذیرد، توسط محققین بسیاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مزایای شاخص TSS این است که تحت‌تأثیر نسبت‌های بروز طبقات مختلف در داده‌ها نیست و بنابراین حتی در شرایط نامتوازن داده‌ها (مانند رویدادهای نادر) نیز کاربردی است (Konowalik & Nosol, 2021). از دیگر مزایای این شاخص، در نظر گرفتن همزمان خطای کمیسیون و امیسیون است (امیری و همکاران، ۱۳۹۸). این معیار به‌طور ویژه در مقایسه با شاخص دقت (Accuracy) و منحنی ROC مزایای بیشتری ارائه می‌دهد، چرا که شاخص Accuracy فقط رویدادهایی که به‌درستی پیش‌بینی شده‌اند را نسبت به کل رویدادها در نظر می‌گیرد و ممکن است توسط کلاس‌های با تعداد زیاد به‌راحتی تحت تأثیر قرار بگیرد. از طرفی منحنی ROC نیز ممکن است توانایی مدل در کار با داده‌های نامتوازن را به‌درستی نشان ندهد (Ollouche et al., 2006). لذا عملکرد مدل‌ها در این مطالعه بر اساس نتایج شاخص TSS قضاوت شدند. در مواقعی که این شاخص تفاوت زیادی بین عملکرد دو مدل نشان نداده باشد، از منحنی ROC و شاخص Accuracy جهت تصمیم‌گیری نهایی استفاده شده است.

متریک‌های بدست آمده با استفاده از تمام متغیرهای مستقل، نشان داد که دامنه‌ی شاخص TSS بین ۰/۸۹-۰/۵۱، شاخص ROC بین ۰/۹۳-۰/۶۷ و شاخص Accuracy بین ۰/۹۲-۰/۶۶ می‌باشد. بر این اساس، مدل‌های GBM و GLM، بالاترین دقت و مدل‌های ANN و SRE، کمترین دقت را در تعیین رویشگاه‌های مطلوب برای گونه باریجه داشته‌اند (جدول ۱). مطابق با طبقه‌بندی شاخص TSS، مدل ANN و مدل SRE به ترتیب با TSS برابر با ۰/۵۳ و ۰/۵۱ از نظر عملکرد در طبقه متوسط قرار می‌گیرند. درحالیکه مدل‌های RF و CTA دارای عملکردی متوسط و مدل‌های GBM و GLM دارای عملکرد عالی هستند. شکل ۲، نتایج متریک‌های ارزیابی حاصل از ۱۰ بار تکرار توسط مدل‌ها را به صورت نمودار جعبه‌ای (Box-plot) نشان می‌دهد.

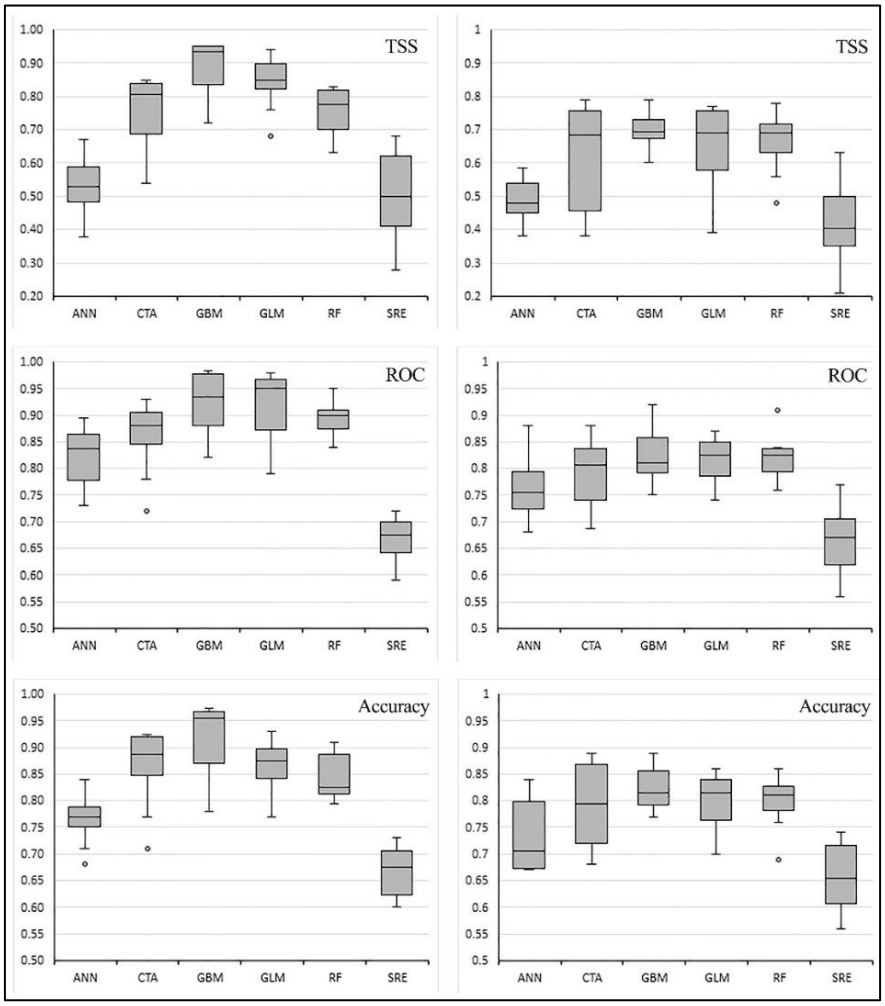
جدول ۱. نتایج عملکرد مدل‌ها بر اساس میانگین متریک‌های صحت بر اساس دو دسته متغیر

مدل‌ها	مجموعه متغیرهای اول			مجموعه متغیرهای دوم			تغییرات
	TSS1	ROC1	Accuracy1	TSS2	ROC2	Accuracy2	Δ% TSS1-TSS2
RF	۰/۷۶	۰/۹۰	۰/۸۵	۰/۶۷	۰/۸۲	۰/۷۹	-۱۱/۸
ANN	۰/۵۳	۰/۸۲	۰/۷۶	۰/۴۷	۰/۷۶	۰/۷۴	-۱۱/۳
CTA	۰/۷۶	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۶۱	۰/۷۹	۰/۷۹	-۱۹/۷
GLM	۰/۸۵	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۶۴	۰/۸۲	۰/۸۰	-۲۴/۷
GBM	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۹۲	۰/۶۹	۰/۸۲	۰/۸۱	-۲۲/۵
SRE	۰/۵۱	۰/۶۷	۰/۶۶	۰/۴۲	۰/۶۶	۰/۶۶	-۱۷/۹

همچنین متریک‌های بدست آمده با استفاده از مجموعه متغیرهای دوم (تمام عوامل به غیر از متغیرهای توپوگرافی) نشان می‌دهد که دامنه شاخص TSS بین ۰/۶۹-۰/۴۲، شاخص ROC بین ۰/۸۲-۰/۶۶ و شاخص Accuracy بین ۰/۸۱-۰/۶۶ می‌باشد. این نتایج نشان داد که حذف متغیرهای توپوگرافی باعث کاهش قابل توجه متریک‌های ارزیابی صحت در تمام مدل‌ها شده است و مدل GBM همچنان قوی‌ترین مدل بین تمام مدل‌های مورد استفاده در این تحقیق است. بر این اساس، نتایج مدل‌های GBM، RF، GLM و CTA به ترتیب با TSS برابر با ۰/۶۹، ۰/۶۷، ۰/۶۴ و ۰/۶۱ در طبقه‌ی خوب قرار گرفته است و مدل‌های ANN و SRE به ترتیب با TSS برابر با ۰/۴۹ و ۰/۴۲ به عنوان ضعیف‌ترین مدل‌ها، همچنان دارای عملکرد متوسط هستند. نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که مدل GLM و GBM به ترتیب با ۲۴/۷ و ۲۲/۵ درصد کاهش صحت، بیشترین کاهش را در نبود متغیرهای توپوگرافی داشته‌اند. براساس جدول ۱، مدل RF کاهش عملکرد کمتری نسبت به دو مدل GBM و GLM داشته است که نشان از آن دارد که این مدل نسبت به دو مدل دیگر حساسیت کمتری به تغییر در مجموعه متغیرهای مستقل دارد. زو[1] و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه خود نشان دادند که مدل RF یکی از مدل‌های مطمئن و دارای اعتبار است که می‌تواند نتایج خوبی در بحث مطلوبیت زیستگاه در اختیار محققین قرار دهد. زارع چاهوکی[2] و همکاران (۲۰۲۲) نیز در مطالعه بر روی پراکنش درمنه دشتی، مدل RF را به عنوان بهترین مدل از بین

[1] Zhu
[2] Zare Chahouki

مدل‌های مورد اسـتفاده معرفی کردند. در مجموع بهترین نتیجه در این مطالعه را مدل GBM با اسـتفاده از هر دو مجموعه متغیر، ارائه کرده اسـت. برخی دیگر از مطالعات که به ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف پرداخته‌اند، به عملکرد بهتر مدل GBM نسـبت به مدل های دیگر اشـاره کرده‌اند (Beauregard and Blois, 2014; Zhang and Wang, 2023). مدل RF و GBM به دلیل اسـتفاده از سـاختار درختی عمدتا نتایج قابل قبول و مشابهی را نشان می‌دهند و قابلیت به حداقل رساندن عدم قطعیت را دارند (Beauregard and Blois, 2014).



شکل ۲. مقایسه نتایج متریک‌های TSS، ROC و Accuracy. چپ: مجموعه متغیر اول، راست: مجموعه متغیر دوم

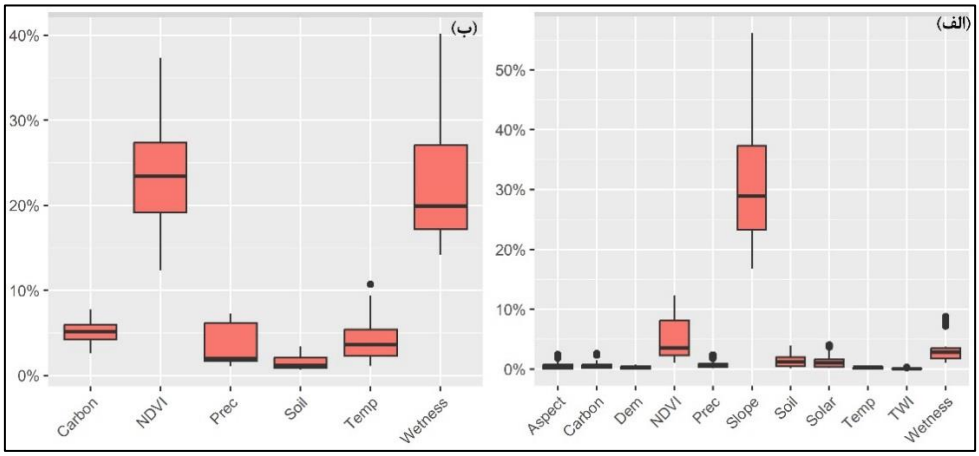
ارزیابی دقت مدل‌ها با توجه به مجموعه متغیرهای مورد استفاده نشان داد که حذف متغیرهای توپوگرافی، عملکرد مدل‌ها را به شدت کاهش می‌دهد (جدول ۱). عوامل توپوگرافی یکی از مهم‌ترین پارامترهای تعیین زیستگاه مناسب برای گونه‌های گیاهی به ویژه در مناطق حفاظت شده که عمدتا شامل اراضی کوهستانی هستند، بشمار می‌آیند (Neu et al., 2019). احمدی[1] و همکاران (۲۰۲۳) و یانگ[2] و همکاران (۲۰۲۰) نیز نتایج مشابهی گزارش دادند. مطالعات سایر محققین نیز نشان داده است که عوامل توپوگرافی، متغیرهای اکولولوژیکی مهم برای زیست گیاهان مانند، دما، شدت تابش خورشیدی، تبخیر و تعرق، رطوبت قابل استفاده گیاه، سرعت باد، عمق خاک، و همچنین شدت چرا و بهره‌برداری را تحت تاثیر قرار

[1] Ahmadi
[2] Yang

می‌دهند (Dashti et al., 2021؛ Yang et al., 2020؛ Zhou et al., 2023؛ Keshtkar and Pourmohammad, 2022؛ Ghorbani et al., 2022).

۲-۳. مهم‌ترین عوامل موثر در پراکنش گونه

به دلیل تفاوت در ماهیت مدل‌های استفاده شده در این مطالعه، نمی‌توان انتظار داشت تاثیرگذاری هر یک از متغیرها در این مدل‌ها یکسان باشد. بر این اساس، سهم نسبی هر یک از متغیرها برای دو مدل GBM و GLM که بهترین عملکرد در سناریو اول را دارند، رسم و مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). در مجموع، چهار متغیر درجه شیب، شاخص NDVI، رطوبت سطحی، و گروه‌های خاک بیشترین سهم را در مطلوبیت رویشگاه داشته‌اند و میانگین دما کم اهمیت‌ترین عامل در هر دو مدل بوده است.



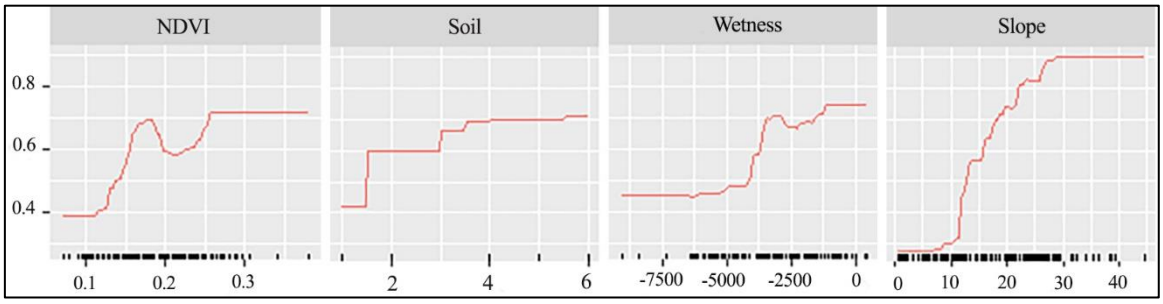
شکل ۳. اهمیت نسبی متغیرهای محیطی بر اساس مدل GBM

عکس‌العمل گونه باریجه نسبت به متغیرهای مهم محیطی با استفاده از منحنی عکس‌العمل گونه به متغیر قابل دریافت و تفسیر است. این منحنی می‌تواند نشان دهنده قدرت تحمل گونه نسبت به عوامل محیطی یا به عبارتی مشخص کننده آشیان اکولوژیک آن باشد (Kosanic et al., 2018). منحنی رفتار باریجه نشان می‌دهد که این گونه شیب‌های بالای ۱۰ درجه را ترجیح می‌دهد و هرچه به مناطق پست و دشتی نزدیک می‌شویم، از حضور آن به شدت کاسته می‌شود. در بسیاری از مطالعات گذشته نیز به اهمیت درجه شیب در تعیین زیستگاه مناسب گونه های گیاهی اشاره شده است (Kosanic et al., 2018; Yang et al., 2020). نجم آبادی و همکاران (۱۳۹۶) گزارش دادند که درصد شیب تاثیر قابل توجهی در تعیین آشیان اکولوژیک گیاه باریجه در شهرستان شیروان دارد. در مطالعه‌ای که توسط مرادی[1] و همکاران (۲۰۲۱) در استان زنجان صورت گرفته، حضور گونه باریجه در شیب‌های زیاد گزارش شده است. همچنین مناطقی که ارزش میانگین NDVI در آنها بالاتر از ۰/۱ بوده و از رطوبت سطحی بالاتری برخوردار هستند، به عنوان مناطق مطلوب رویشی باریجه بشمار می‌آیند. اگرچه این گونه گیاهی در تمام گروه‌های خاکی حضور دارد، اما پذیرش آن در گروه‌های کاستانوزم (Kastanozem)، لپتوسول (Leptosol) و رگوسول (Regosol) به طور قابل توجهی بیشتر است (شکل ۴). در مقابل کمترین مطلوبیت مربوط است به گروه‌های خاکی کامبیسول (Cambisol) و کلسیسول (Calcisol). این نتایج نشان می‌دهد که گونه باریجه تمایل بسیار کمتری برای حضور در خاک‌های تکامل نیافته و فقیر (کامبیسول) و خاک‌های آهکی (کلسیسول) دارد.

سهم نسبی هر یک از عوامل با استفاده از سری متغیرهای دوم برای مدل GBM در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در عدم حضور متغیرهای توپوگرافی، از بین شش عامل باقی مانده، به ترتیب چهار متغیر میانگین شاخص NDVI، شاخص رطوبت سطحی، کربن آلی خاک و میانگین دما از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین عوامل بوده‌اند. ازآنجاکه دو شاخص NDVI و رطوبت سطحی (Wetness)، در هر دو سناریو جزو متغیرهای مهم و تاثیرگذار بوده اند، می‌توان به اهمیت این دو شاخص که مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای هستند، اشاره کرد. وردیان و همکاران

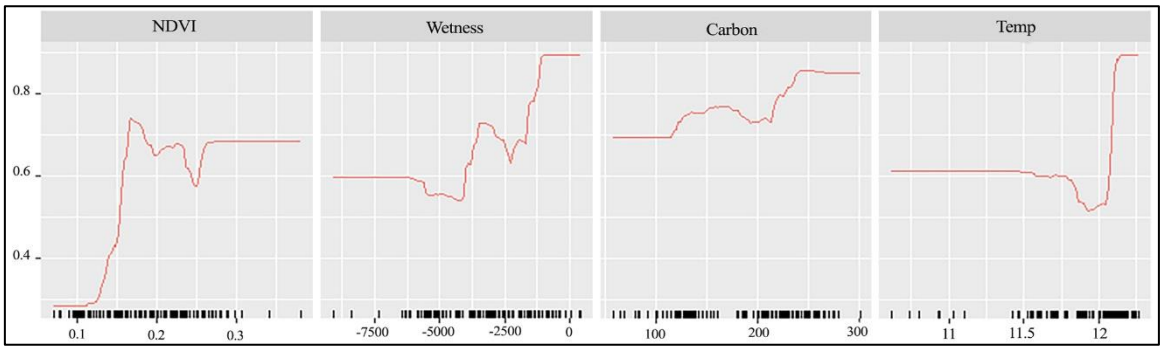
[1] Moradi

(۱۴۰۱) نیز در مطالعه خود گزارش دادند که یکی از مهمترین پارامترها در تعیین رویشگاه گیاه باریجه در منطقه لار استان تهران، رطوبت می‌باشد.



شکل ۴. منحنی‌های رفتار گونه نسبت به مهم‌ترین عوامل محیطی در GBM مدل بر اساس مجموعه متغیرهای اول

شاخص NDVI به عنوان یک شاخص کلیدی در هر منطقه‌ای می‌تواند مورد توجه بوم شناسان قرار گیرد. زیرا این شاخص تابعی است از سه متغیر اصلی در محیط که عبارتند از وضعیت رطوبت، مواد غذایی و انرژی در منطقه (Parviainen et al., 2008). برخی از مطالعات گذشته نیز به اهمیت شاخص NDVI در تعیین زیستگاه‌های مناسب موجودات زنده اشاره کرده‌اند (Guiquan et al., 2023; Leveau & Isla, 2021; Schwager & Berg, 2021; Konatowska et al., 2023). شکل ۵ نشان می‌دهد که عکس العمل گونه به سبزینگی و رطوبت سطحی، به صورت سیگموئید افزایشی بوده و مطلوبیت زیستگاه گونه باریجه نیز افزایش می‌یابد. مطابق با نتایج این تحقیق، برخی از محققین نیز به اهمیت و جایگاه فاکتورهای خاک از جمله کربن آلی در حضور و یا عدم حضور گونه‌های گیاهی اشاره کرده‌اند (Maharjan et al., 2022; Buri et al., 2017). همچنین مرادی و همکاران (۲۰۲۳) گزارش داند که گونه باریجه عمدتا در اراضی با درصد کربن آلی بالا استقرار پیدا می‌کند. بررسی منحنی رفتار گونه نشان داد که اراضی دارای میانگین دمای بالاتر، مطلوبیت بیشتری برای حضور گونه باریجه دارند.



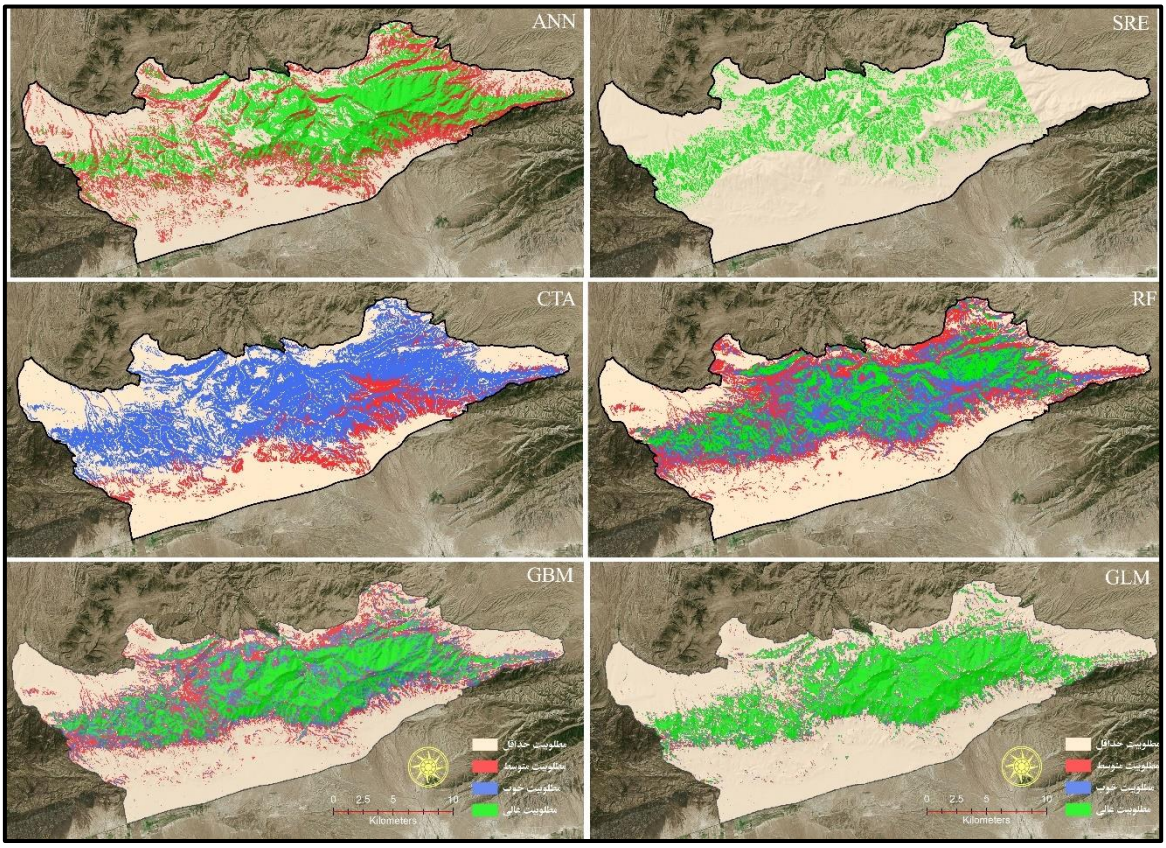
شکل ۵. منحنی‌های رفتار گونه نسبت به مهم‌ترین عوامل محیطی در GBM مدل بر اساس مجموعه متغیرهای دوم

نقشه‌های مطلوبیت تولید شده توسط مدل‌ها نشان می‌دهد که به طور کلی، یک نوار نسبتا وسیع در مرکز منطقه حفاظت شده قرخود، که از مناطق غربی تا نزدیکی مناطق شرقی کشیده شده است، بیشترین مطلوبیت برای حضور گونه باریجه را دارا می‌باشد. درمقابل، مناطق شرقی، جنوبی، جنوب غربی و شمال غربی، از مطلوبیت کمیتری برای رشد و حضور این گونه برخوردار هستند (شکل ۶ و ۷).

بررسی وضعیت تناسب زیستگاه گونه باریجه در نقشه‌های خروجی حاصل از مدل GBM نشان می‌دهد که با استفاده از مجموعه متغیرهای اول که شامل تمام متغیرهای پیش‌بینی کننده می‌باشد، حدود ۴۶ درصد، معادل ۲۱۲/۴ کیلومتر مربع از منطقه مورد مطالعه از مطلوبیت عالی برای استقرار این گونه گیاهی برخوردار است. به این ترتیب ۱۶/۶ درصد، معادل ۷۷ کیلومتر مربع از منطقه دارای مطلوبیت خوب، ۱۵ درصد معادل ۶۹/۹ کیلومتر مربع دارای مطلوبیت متوسط و تقریبا ۲۲ درصد معادل ۱۰۱/۶ کیلومتر مربع از اراضی نیز دارای حداقل مطلوبیت برای رشد و حضور گونه باریجه

می‌باشند (جدول ۲).

حذف متغیرهای توپوگرافی از مجموعه متغیرهای پیش‌بینی کننده، باعث شده که مدل GBM مناطق کمتری را به عنوان اراضی مستعد رشد و استقرار گونه باریجه شناسایی نماید. بر این اساس در مجموع ۱۰/۵ درصد (۴۸/۸ کیلومتر مربع) از مساحت مناطق دارای مطلوبیت‌های عالی و زیاد، کم شده و به مناطق دارای مطلوبیت‌های متوسط و حداقل افزوده شده است (جدول ۲).



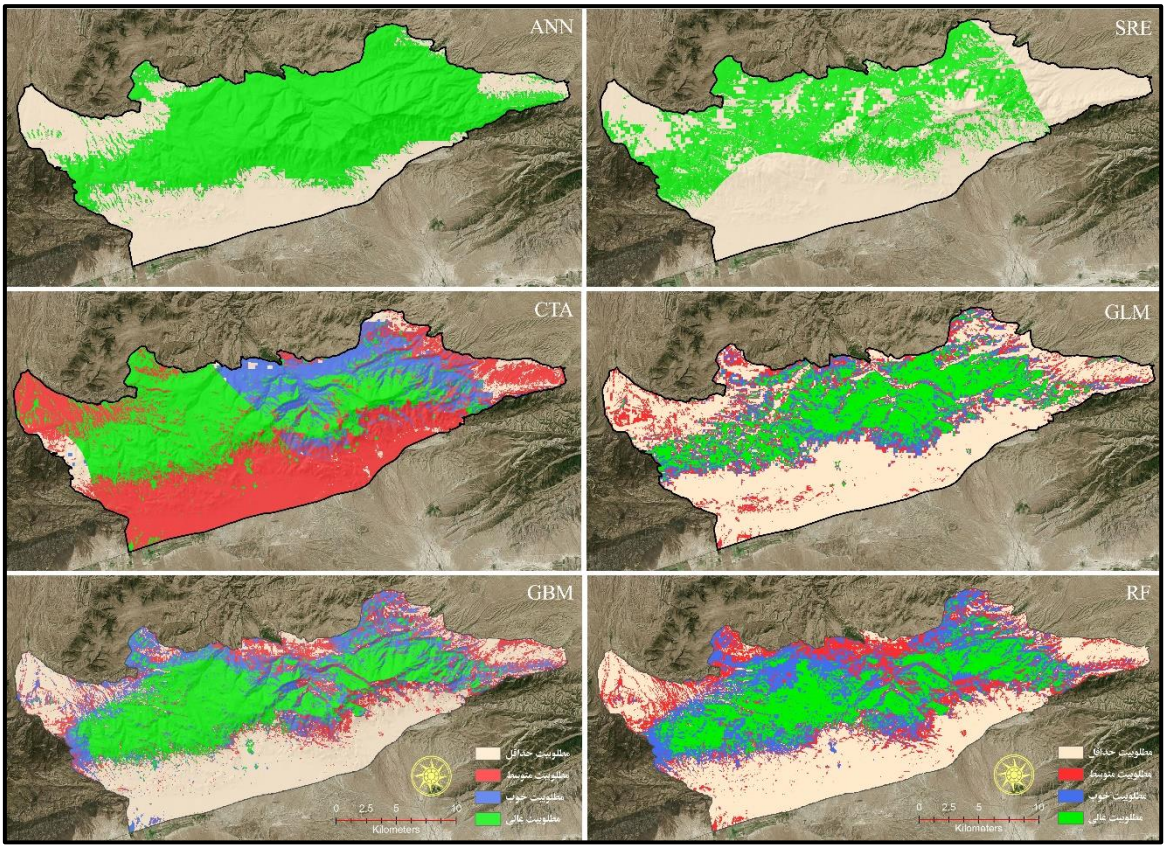
شکل ۶. نقشه مطلوبیت زیستگاه گونه باریجه با استفاده از مجموعه متغیرهای اول

جدول ۲. مساحت و درصد مناطق مستعد استقرار گونه باریجه

رویشگاه	GBM مدل برگزیده					
	مساحت مناطق مستعد (کیلومترمربع)			مساحت مناطق مستعد (درصد)		
	متغیرهای اول	متغیرهای دوم	تغییرات	متغیرهای اول	متغیرهای دوم	تغییرات
مطلوبیت حداقل	۱۰۱/۶	۱۳۴/۸	۳۳/۲	۲۲/۱	۲۹/۳	۷/۲
مطلوبیت متوسط	۶۹/۹	۸۵/۴	۱۵/۵	۱۵/۲	۱۸/۵	۳/۳
مطلوبیت زیاد	۷۷	۶۷	-۱۰	۱۶/۶	۱۴/۵	-۲/۱
مطلوبیت عالی	۲۱۲/۴	۱۷۳/۶	-۳۸/۸	۴۶/۱	۳۷/۷	-۸/۴

در مجموع نقشه‌های تناسب زیستگاه گونه باریجه و همچنین بررسی متغیرهای محیطی مهم و موثر در تعیین زیستگاه‌ها نشان می‌دهد که گیاه باریجه تمایل به حضور در مناطق کوهستانی و نیمه کوهستانی دارد و این مناطق شرایط زیست بهتری برای آن مهیا می‌کند. تمایل به حضور در

شیب‌های زیاد و استقرار در اراضی دارای گروه‌های خاکی مختص به اراضی کوهستانی (لپتوسول و رگوسول) را می توان از جمله این دلایل برشمرد (Deckers et al., 2001). از سویی دیگر با افزایش رطوبت سطحی و میزان سبزینگی نیز مطلوبیت زیستگاه را برای اینگونه افزایش می‌یابد که این موضوع نیز ارتباط مشخصی با افزایش ارتفاع و کوهستانی بودن منطقه دارد. نتایج محققین نشان داده است که در مناطق نیمه خشک (مانند منطقه مورد مطالعه در این تحقیق)، با افزایش ارتفاع در یک منطقه، میزان رطوبت سطحی و همچنین میزان پوشش گیاهی (NDVI) بیشتر می‌شود (Andaryani et al., 2021; Xiong & Wang, 2022).



شکل ۷. نقشه مطلوبیت زیستگاه گونه باریجه با استفاده از مجموعه متغیرهای دوم

۴. نتیجه‌گیری

بهره‌برداری‌های بی رویه و غیراصولی از گونهٔ باریجه جهت دستیابی به منافع اقتصادی بالاتر، باعث شده تا زیستگاه‌های کنونی این گونه در منطقه حفاظت شده قرخود با کاهش روبرو شود. استفاده‌های خارج از توان اکولوژیک گونه‌های گیاهی یکی از مشکلات اساسی در حفاظت از گیاهان دارویی و صنعتی در کشور ما می‌باشد. در این مطالعه سعی شد تا موقعیت مکانی آشیان اکولوژیک گونه باریجه جهت احیاء مناطق آسیب‌دیده و حفظ مناطق در معرض خطر در منطقه حفاظت شده قرخود مورد ارزیابی قرار گیرد. از طرفی به‌منظور درک عمیق‌تر و شناخت بهتر توانایی مدل‌های بوم‌شناختی در پیش‌بینی رویشگاه‌های بالقوهٔ گونه‌های گیاهی از شش مدل مختلف استفاده و کارایی آنها با استفاده از دو گروه متغیر مستقل، مقایسه شد و مدل GBM به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. باوجود تفاوت در عملکرد و شیوهٔ کار، از روش‌های ماشین‌بردار به‌عنوان روش‌هایی کارآمد در پیش‌بینی‌ها یاد می‌شود (Xu et al., 2021). در واقع این مدل‌ها قادر هستند روابط بین حضور یک گونه با مجموعه‌ای از شرایط فیزیکی و زیستی که برای آن گونه مناسب هستند را تعیین کنند. با استفاده از نتایج این تحقیق می‌توان محدودیت‌های مرتبط با گسترش و استقرار این گونه را مشخص نمود.

یکی از چالش‌های موجود برای اکولوژیست‌ها، انتخاب متغیرهای مناسب پیش‌بینی کننده رویشگاه‌های گیاهی می‌باشد. نتایج این تحقیق تایید

کرد که متغیرهای وابسته به شکل زمین و توپوگرافی، نقش بسیار مهمی در بالا بردن عملکرد مدل‌های پیش‌بینی‌کننده دارند. همچنین متغیرهای تصویری مانند شاخص‌های سبزینگی، با توجه به ارائه اطلاعات مکانی دقیق و بهنگام، از پارامترهای بسیار مهم در تعیین الگوهای پراکنش زیستگاه بشمار می‌آیند.

یکی از راهکارهای تعدیل دام و تقویت مراتع افزایش کشت گیاهان دارویی است. با توجه به درآمدزایی گیاه باریجه، بخشی از عرصه‌های مرتعی می‌تواند زیرکشت این گیاه قرار گرفته و با اتخاذ تصمیمات مدیریتی و حمایتی بتوان روند توسعه و کشت این گیاهان دارویی را ادامه داد. نتایج این تحقیق نشان داد که بخش قابل توجهی از منطقه حفاظت شده قرخود (۴۶ درصد)، شرایط اکولوژیک مناسب برای حضور و رشد گونه باریجه را دارا می‌باشند. نقشه‌های پراکنش تولید شده الگو و راهنمای مناسبی برای تعیین مناطق اجرای عملیات اصلاحی و حفاظتی می‌باشند و کاربرد گسترده‌ای در اولویت‌بندی مناطق حفاظت شده خواهند داشت.

References

Ahmadi, k., Mahmoodi, S., Chandra Pal, S., Saha, A., Chowdhuri, I., Trong Nguyen, T., Jarvie, S., Szostak, M., Socha, J., & Thai, V. (2023). Improving species distribution models for dominant trees in climate data-poor forests using high-resolution remote sensing. *Ecological Modelling*, 475, 110190. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110190.

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, 1223-1232.

Akhter, S., Mcdonald, MA., van Breugel, P., Sohel, S., Kjær, ED., & Mariott, R. (2017). Habitat distribution modelling to identify areas of high conservation value under climate change for Mangifera sylvatica Roxb. of Bangladesh. *Land Use policy*, 60, 223–232. doi: 10.1016/j.landusepol.2016.10.027

Amiri, M.S., Yazdi, M.E.T., & Rahnama, M. (2021). Medicinal plants and phytotherapy in Iran: Glorious history, current status and future prospects. *Plant Sci. Today*, 8, 95–111.

Amiri, M., Tarkesh, M., & Jafari, R. (2019). Predicting the climatic Ecological Niche of Artemisia aucheri Boiss in Central Iran using species distribution modeling. *Iranian Journal of Applied Ecology*, *8*(2), 61-79. (In Persian)

Andaryani, S., Sloan, S., Nourani, V., & Keshtkar, H. (2021). The utility of a hybrid GEOMOD-Markov Chain model of land-use change in the context of highly water-demanding agriculture in a semi-arid region. *Ecological Informatics*, 64, 101332. doi: 10.1016/j.ecoinf.2021.101332.

Araujo, MB., & Guisan, A. (2006). Five (or so) challenges for species distribution modelling. *Journal of Biogeography*, 33, 1677-1688. doi:10.1111/j.1365-2699.2006. 01584.x

Austin, MP. (2007). Species distribution models and ecological theory: a critical assessment and some possible new approaches, *Ecological Modelling*, 200, 1–19.

Buri, A., Cianfrani, C., Pinto-Figueroa, E., Yashiro, E., Spangenberg, J. E., Adatte, T., Verrecchia, E., Guisan, A., & Pradervand, J.N. (2017). Soil factors improve predictions of plant species distribution in a mountain environment. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 41(6), 703-722. https://doi.org/10.1177/0309133317738162

Balazy, R., Kamińska, A., Ciesielski, M., Socha, J., & Pierzchalski, M. (2019). Modeling the Effect of Environmental and Topographic Variables Affecting the Height Increment of Norway Spruce Stands in Mountainous Conditions with the Use of LiDAR Data. *Remote Sensing*, 11 (20), 2407.

Beauregard, F., & de Blois, S. (2014). Beyond a Climate-Centric View of Plant Distribution: Edaphic Variables Add Value to Distribution Models. *PLoS ONE*, 9(3), e92642. doi: 10.1371/journal.pone.0092642

Dashti, M., Mirdavoudi, H., Ghasemi Arian, A. & Azizi, N. (2021). Effects of Topography and Soil Variables on Abundance of *Onobrychis chorassanica* Bunge. in Kardeh and Kurtian Rangelands, Mashhad, Iran. *Journal of Rangeland Science*, 11(3), 283-300.

Deckers, J., Driessen, P., Nachtergaele, F., Spaargaren, O. (2001). World reference base for soil resourcesein a nutshell. *Eur. Soil Bur. Rep*. 7, 173e181.

Franklin, J. (2009). Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction. Cambridge: Cambridge University Press.

Ghorbani, A., Porghorban, N., Moamerin, M., Ghafarin, S., Bidarlordn, M., Taheri Niarin, MM. (2022). Effects of topographic variables on plant species diversity in rangelands of Hir County, Ardabil Province, Iran. *ECOPERSIA*, 10(4), 285-295. doi:20.1001.1.23222700.2022.10.4.3.2

Guiquan, S., Jiali, F., Shuai, G. (2023). Geographic distribution and impacts of climate change on the suitable habitats of Rhamnus utilis Decne in China. *BMC Plant Biol,* 23, 592. Doi:10.1186/s12870-023-04574-4

Guisan, A. (2013). Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecol. Lett*, 16, 1424–1435. doi: 10.1111/ele.12189.

Keshtkar, H., Azarnivand, H., Etemad, V., & Mosavi, S. (2008). Seed dormancy-breaking and germination requirements of *Ferula ovina* and *Ferula gummosa*. *Desert*, 13, 45-51.

Keshtkar, H. R., Yeganeh, B. H., & Jabarzare, A. (2011). Floristic studies and life forms of GhorKhood protected area. Iranian Journal of Biology. 24(3) 421-431. (In Persian)

Keshtkar, H., & Poormohammad, P. (2022). Mapping spatial patterns of plant species based on machine-learning and regression models. *Desert*, 27(1), 167-181. doi:10.22059/JDESERT.2022.88514.

Kosanic, A., Anderson, K., Harrison, S., Turkington, T., & Bennie, J. (2018). Changes in the geographical distribution of plant species and climatic variables on the West Cornwall peninsula (South West UK). *PloS One*, 13(2), e0191021.

Konowalik, K., Nosol, A. (2021). Evaluation metrics and validation of presence-only species distribution models based on distributional maps with varying coverage. *Sci Rep,* 11, 1482. Doi:10.1038/s41598-020-80062-1

Kontsiotis, V.J., Chatzigiovanakis, S., Valsamidis, E., Xofis, P., & Liordos, V. (2023). Normalized Difference Vegetation Index as a Proxy of Urban Bird Species Presence and Distribution at Different Spatial Scales. *Diversity*, 15, 1139. Doi:10.3390/d15111139

Leveau, L.M. & Isla, F.I. (2021). Predicting bird species presence in urban areas with NDVI: An assessment within and between cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 63, 127199. Doi: 10.1016/j.ufug.2021.127199.

Maharjan, SK., Sterck, FJ., Raes, N. & Poorter, L. (2022). Temperature and soils predict the distribution of plant species along the Himalayan elevational gradient. *Journal of Tropical Ecology* 38, 58–70. Doi:10.1017/S026646742100050X

Mahboubi, M. (2016). *Ferula gummosa*, a traditional medicine with novel applications. *J. Diet. Suppl*., 13, 700–718.

Moradi, P., Aghajanloo, F., Moosavi, A., Monfared, H.H., Khalafi, J., Taghiloo, M., Khoshzaman, T., Shojaee, M., & Mastinu, A. (2021). Anthropic Effects on the Biodiversity of the Habitats of *Ferula gummosa*. *Sustainability*, 13, 7874. Doi:10.3390/su13147874

Najmabadi, A., Fakhira, A., Fathabadi, A., and Qolipour, M. (2016). Modeling the habitat desirability of Ferula gummosa species based on methods based on the presence of maximum entropy and factor analysis of the ecological niche of a case study (Buanlu watershed, Shirvan city). National Conference of New Researches in Agricultural Engineering, Environment and Natural Resources, Karaj, 1-11. (In Persian)

Niu, Y., Zhou, J., Yang, S., Chu, B., Ma, S., Zhu, H. & Hua, L. (2019). The effects of topographical factors on the distribution of plant communities in a mountain meadow on the Tibetan Plateau as a foundation for target-oriented management. *Ecological Indicators*, 106, 105532. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105532.

Norberg, A. (2019). A comprehensive evaluation of predictive performance of 33 species distribution models at species and community levels. *Ecological Monographs*, 89, 1–24. Doi:10.1002/ecm.1370

Oppel, S., Meirinho, A., Ramírez, I., Gardner, B., O'Connell, AF., Miller, PI., & Louzao, M. (2012). Comparison of five modelling techniques to predict the spatial distribution and abundance of seabirds. *Biological Conservation*, 156, 94-104.

Parviainen, M., Luoto, M., Ryttäri, T. & Heikkinen, RK. (2008). Modelling the occurrence of threatened plant species in taiga landscapes: methodological and ecological perspectives. *Journal of Biogeography*, 35, 1888-1905.

Peng, LP., Cheng, FY., Hu, XG. (2019). Modelling environmentally suitable areas for the potential introduction and cultivation of the emerging oil crop Paeonia ostii in China. *Sci Rep*, 9, 3213. doi:10.1038/s41598-019-39449-y.

Poormohammadi, S., Malekinezhad, H., & Rahimian, M. (2010). Investigating the role of physiographical factors on temperature-related parameters affecting evapotranspiration (Case study: Yazd province). *Journal of Arid Biome*, *1*(2), 9-19. (In Persian)

Rajpoot, R., Adhikari, D., Verma, S., Saikia, P., Kumar, A, & Grant, KR. (2020). Climate models predict a divergent future for the medicinal tree Boswellia serrata Roxb. In India. *Global Ecology and Conservation*, 23, e01040.

Ruheili, A.M., Al Sariri, T., & Al Subhi, A.M. (2022). Predicting the potential habitat distribution of parthenium weed (Parthenium hysterophorus) globally and in Oman under projected climate change. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21(7), 469-478. doi: 10.1016/j.jssas.2021.12.004

Schwager, P., & Berg, C. (2021). Remote sensing variables improve species distribution models for alpine plant species. *Basic and Applied Ecology*, 54,1-13. https://doi.org/10.1016/j.baae.2021.04.002.

Shrestha, N. (2020). Detecting Multicollinearity in Regression Analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, 8, 39-42. DOI: 10.12691/ajams-8-2-1

Slater, H., & Michael, E. (2012). Predicting the Current and Future Potential Distributions of Lymphatic Filariasis in Africa Using Maximum Entropy Ecological Niche Modelling. *PLoS ONE*, 7(2), e32202. doi: 10.1371/journal.pone.0032202

Thuiller, W., Georges, D., Engler, R., Breiner, F., Georges, MD., & Thuiller, CW. (2016). Package 'biomod2'. https://cran.r-project.org/package= biomod2.

Verdian, S., Jafarian, Z., rastgar, S., & kargar, M. (2022). Habitat Determination of Ferula gummosa Boiss. Using Generalized Additive Model in Lar Rangeland, Tehran Province. *Journal of Environmental Science Studies*, *7*(1), 4512-4520. doi: 10.22034/jess.2022.142079 (In Persian)

Xu, Y., Huang, Y., Zhao, H., Yang, M., Zhuang, Y., & Ye, X. (2021). Modelling the Effects of Climate Change on the Distribution of Endangered Cypripedium japonicum in China. *Forests*, 12(4), 429. 429. DOI:10.3390/f12040429

Yang, J., El-Kassaby, Y.A. & Guan, W. (2020). The effect of slope aspect on vegetation attributes in a mountainous dry valley, Southwest China. *Sci Rep* 10, 16465. doi:10.1038/s41598-020-73496-0

Zare Chahouki, M.A., Karami, P., & Piri Sahragard, H. (2022). Ensemble Modeling Approach to Predict the Potential Distribution of Artemisia sieberi in Desert Rangelands of Yazd Province, Central Iran. *Journal of Rangeland Science*, 12(4), 326-340. doi: 10.30495/RS.2022.685569

Zhang, Q., Fang, R., Deng, C., Zhao, H., Shen, M., & Wang, Q. (2022). Slope aspect effects on plant community characteristics and soil properties of alpine meadows on Eastern Qinghai-Tibetan plateau. *Ecological Indicators*, 143, 109400. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109400.

Zhang, H.T., & Wang, W.T. (2023). Prediction of the Potential Distribution of the Endangered Species Meconopsis punicea Maxim under Future Climate Change Based on Four Species Distribution Models. *Plants*, 12, 1376. https://doi.org/10.3390/plants12061376

Zhou, H., Feng, L., & Fu, L. (2023). Modelling the effects of topographic heterogeneity on distribution of Nitraria tangutorum Bobr. species in deserts using LiDAR-data. *Sci Rep*, 13, 13673. doi:10.1038/s41598-023-40678-5

Zhu, Y., Wei, W., Li, H., Wang, B.,Yang, X., & Liu, Y. (2018). Modelling the potential distribution and shifts of three v0arieties of Stipa tianschanica in the eastern Eurasian Steppe under multiple climate change scenarios. *Global Ecology and Conservation*, 16, e00501. doi: 10.1016/j.gecco. 2018.e00501