

Research Paper

Spatial Modeling of Deforestation Probability Using Generalized Linear and Additive Models

Saeid Shabani ¹, Ali Asghar Vahedi² and Behrooz Mohseni³

- 1- Assistant Professor, Research Department of Natural Resources, Golestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran, (Corresponding Author: s.shabani@areeo.ac.ir).
2- Assistant Professor, Research Department of Natural Resources, Mazandaran Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran
3- Assistant Professor, Research Department of Natural Resources, Golestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

Received: 08 February, 2025

Revised: 29 April, 2025

Accepted: 03 June, 2025

Extended Abstract

Background: Deforestation poses a serious threat to ecosystems by reducing biodiversity, disrupting hydrological cycles, and exacerbating climate change. In addition to undermining natural resources, it adversely impacts local economies and ecotourism. The Hyrcanian forests, among the most valuable temperate biomes, harbor numerous endemic species. However, anthropogenic pressures, such as urban expansion, unsustainable agriculture, and unregulated exploitation, have led to severe degradation of these forests. The Peymot Forest region in Noor County, Mazandaran Province, is no exception and is currently facing a significant decline in forest cover.

Methods: In total, 107 deforested plots were recorded to identify key drivers and spatial patterns of deforestation in the study area. Deforested sites were coded as “1” and non-deforested sites as “0.” In this research, deforestation is defined as the permanent or long-term conversion of forested areas into non-forested land due to anthropogenic activities or natural disturbances, where forest recovery within a reasonable timeframe is improbable. Fourteen environmental and anthropogenic predictor variables—including slope aspect, slope gradient, elevation, landform shape, profile curvature, slope length, wind exposure, minimum temperature, mean temperature, maximum temperature, precipitation, distance to roads, distance to settlements, and proximity to agricultural land—were extracted from multiple sources and integrated into two statistical modeling frameworks: Generalized Linear Model (GLM) and Generalized Additive Model (GAM). GLM, an extension of classical linear regression adapted for binary outcomes, and GAM, an advanced nonparametric extension of GLM that effectively captures nonlinear relationships, were employed for spatial modeling. The GLM framework began with variable selection based on ecological knowledge and multicollinearity analysis, followed by stepwise model refinement using likelihood ratio tests to eliminate non-significant predictors. Appropriate smoothing functions were selected in the GAM approach, and optimal degrees of freedom were determined for each smoother. Model performance was enhanced through the estimation of smoothing parameters and significance testing for each smooth term. Model validation was conducted using the Akaike Information Criterion (AIC) and the Area Under the Curve (AUC) of the Receiver Operating Characteristic. Deforestation risk maps were generated for both models independently, and final susceptibility maps were classified into four risk categories (low, moderate, high, and very high) using natural breaks.

Results: Results from the GLM indicated that elevation, wind exposure, distance to roads, distance to settlements, and mean temperature were statistically significant predictors of deforestation. The final model achieved a notable reduction in deviance (from 207.94 to 81.68) and an AIC value of 93.68, reflecting strong model fit and predictive capacity. According to the GAM results, the most influential factors included elevation, wind exposure, distance to roads, distance to settlements, and proximity to agricultural land, with human-related variables showing the highest contribution to deforestation probability. Specifically, increased distances from settlements (25.6%), agricultural land (22.1%), and roads (18.3%) were associated with decreased deforestation likelihood. The GAM outperformed the GLM, achieving an AIC of 21.07 and an AUC of 0.947. Final susceptibility maps from both models revealed that a substantial portion of



the study area would fall within the "very high" risk category, indicating critical vulnerability in the near future.

Conclusion: The findings underscore the applicability of deforestation risk modeling using GLM and GAM in supporting sustainable forest management. The outputs can serve as a decision-support tool for regional planning and targeted resource allocation. Moreover, advanced modeling frameworks, such as GAM, allow for more accurate estimation of nonlinear and complex interactions among predictors. The resulting deforestation zoning maps offer a scientific foundation for implementing proactive strategies, including legal restrictions in high-risk areas, community-based awareness programs, and the promotion of sustainable land-use practices. Integration of local data with robust global models enhances predictive performance and improves the effectiveness of policy interventions. Ultimately, this study not only contributes practical and theoretical insights into deforestation dynamics but also provides a transferable methodology for application in other ecologically sensitive regions.

Keywords: Akaike Information Criterion, Deforestation Zoning, Logistic Model, Model Fitting, Response Variable

How to Cite This Article: Shabani, S., Vahedi, A. A., & Mohseni, B. (2025). Spatial Modeling of Deforestation Probability Using Generalized Linear and Additive Models. *Ecol Iran For*, 13(2), 74-90. DOI: 10.61882/ifej.2025.584



مقاله پژوهشی

مدل‌سازی مکانی احتمال جنگل‌زدایی با استفاده از مدل‌های خطی و جمعی تعمیم‌یافته

سعید شعبانی^۱، علی اصغر واحدی^۲ و بهروز محسنی^۳^۱ - استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران، (نویسنده مسوول: s.shabani@areeo.ac.ir)^۲ - استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران^۳ - استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹
صفحه ۷۴ تا ۹۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: جنگل‌زدایی تهدیدی جدی برای محیط‌زیست است که تنوع زیستی را کاهش داده، چرخه آب را مختل کرده، و تغییرات اقلیمی را تشدید می‌کند. این پدیده نه تنها منابع طبیعی را از بین می‌برد، بلکه اقتصاد جوامع محلی و گردشگری را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. جنگل‌های هیرکانی یکی از ارزشمندترین زیست‌بوم‌های معتدله محسوب می‌شوند که گونه‌های گیاهی و جانوری منحصر به فردی را در خود جای داده‌اند. با این حال، تغییرات انسانی از جمله توسعه شهری، کشاورزی بی‌رویه و بهره‌برداری غیرمسئولانه، موجب تخریب شدید این جنگل‌ها شده‌اند. این مطالعه با هدف شناسایی عوامل اصلی مؤثر بر جنگل‌زدایی و تولید نقشه‌های پهنه‌بندی خطر به منظور پشتیبانی از برنامه‌ریزی‌های حفاظتی انجام شده است.

مواد و روش‌ها: در همین راستا، این مطالعه در جنگل‌های منطقه پیمت شهرستان نور در استان مازندران، به عنوان یکی از عرصه‌های متاثر از روند فزاینده جنگل‌زدایی، انجام شده است. به منظور شناسایی عوامل مؤثر و پهنه‌بندی جنگل‌زدایی در این منطقه، ۱۰۷ عرصه که با جنگل‌زدایی مواجه بود شناسایی و ثبت شد. بر این اساس، مناطق دارای جنگل‌زدایی با مقدار "یک" و مناطق فاقد جنگل‌زدایی با مقدار "صفر" مشخص شدند. در این پژوهش، جنگل‌زدایی به عنوان تبدیل دائمی یا بلندمدت مناطق جنگلی به زمین‌های غیرجنگلی بر اثر فعالیت‌های انسانی یا اختلالات طبیعی تعریف شده است، به طوری که پوشش جنگلی در بازه زمانی معقولی قادر به بازگشت به حالت اولیه خود نیست. همچنین، ۱۴ متغیر پیشگوی مؤثر بر این پدیده شامل جهت شیب، شیب، ارتفاع از سطح دریا، شکل زمین، انحنای دامنه، طول شیب، اثر باد، کمینه دما، میانگین دما، بیشینه دما، بارش، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی و نزدیکی به اراضی کشاورزی از منابع مختلف استخراج و در قالب دو روش مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) و مدل جمعی تعمیم‌یافته (GAM) جهت مدل‌سازی استفاده شدند. مدل لجستیک و مدل GAM به ترتیب به عنوان نسخه‌های پیشرفته‌تر رگرسیون کلاسیک و GLM، به دلیل توانایی در تحلیل روابط غیرخطی، در مطالعات زیست‌محیطی کاربرد گسترده‌ای دارند. در این پژوهش، مدل‌سازی با انتخاب متغیرها بر اساس دانش اکولوژیکی آغاز شد و با حذف عوامل غیرمعنی‌دار و تنظیم مناسب توابع هموارساز، مدلی دقیق و کم‌خطا به دست آمد. محاسبه ضرایب هموارسازی و ارزیابی معناداری هر تابع هموار از مراحل بعدی کار بود که در نهایت منجر به ایجاد مدلی با قدرت پیش‌بینی بالا شد. اعتبارسنجی دو مدل نیز با دو شاخص آکائیک و سطح زیر منحنی عملکرد انجام و نقشه‌های پهنه‌بندی جنگل‌زدایی برای هر مدل به صورت جداگانه انجام و نقشه‌های نهایی با رویکرد شکستگی‌های طبیعی در چهار طبقه احتمال پایین، متوسط، زیاد و خیلی زیاد تهیه شدند. قابل ذکر است که مدل‌سازی داده‌ها در محیط نرم‌افزار R نسخه ۴/۳/۱ و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی در نرم‌افزار ArcGIS نسخه ۱۰/۸ انجام شد.

یافته‌ها: یافته‌های مدل خطی حاکی از آن بود که در مدل نهایی متغیرهای ارتفاع از سطح دریا، اثر باد، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی و میانگین دما تأثیرات معناداری بر احتمال وقوع جنگل‌زدایی داشتند. شاخص‌های برازش مدل شامل کاهش قابل توجه انحراف از مقدار اولیه ۲۰۷/۹۴ به ۸۱/۶۸ و مقدار آکائیک برابر با ۹۳/۶۸ نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل و توانایی بالای آن در پیش‌بینی الگوهای جنگل‌زدایی در مدل خطی بودند. براساس نتایج مدل جمعی، متغیرهای ارتفاع از سطح دریا، اثر باد، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی و نزدیکی به اراضی کشاورزی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر الگوی جنگل‌زدایی در منطقه مورد مطالعه بودند که در این میان سه متغیر مرتبط با عوامل انسانی از درصد تأثیرگذاری بالاتری برخوردار بودند. بر این اساس، با افزایش فاصله نسبت به سکونتگاه‌های انسانی (۲۵/۶ درصد)، اراضی کشاورزی (۲۲/۱ درصد) و جاده‌ها (۱۸/۳ درصد)، احتمال جنگل‌زدایی کاهش یافته است. ارزیابی مدل‌ها حاکی از دقت بالاتر مدل GAM با معیار آکائیک برابر ۲۱/۰۷ و سطح زیر منحنی عملکرد برابر ۰/۹۴۷ نسبت به مدل GLM بود. خروجی نقشه‌های نهایی در هر دو مدل نیز نشان داد که بیشتر سطح منطقه در طبقه با احتمال جنگل‌زدایی خیلی بالا قرار گرفته است که شرایط بحرانی این منطقه را در سال‌های پیش رو نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه که براساس مدل‌سازی پهنه‌بندی جنگل‌زدایی با استفاده از مدل‌های خطی و جمعی تعمیم‌یافته به دست آمده‌اند، تأثیرات چشم‌گیری بر کاهش جنگل‌زدایی و مدیریت پایدار منابع جنگلی دارند. این یافته‌ها را می‌توان به عنوان ابزاری کاربردی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی منطقه‌ای به کار برد. با شناسایی مناطق حساس و مستعد جنگل‌زدایی، امکان اختصاص منابع و اتخاذ سیاست‌های حفاظتی به صورت هدفمند فراهم می‌شود. همچنین، استفاده از مدل‌های پیشرفته، مانند GAM، به دلیل توانایی آن‌ها در نمایش روابط غیرخطی و پیچیده، امکان ارائه تخمین‌های دقیق‌تر از عوامل مؤثر بر جنگل‌زدایی را فراهم می‌کند. نقشه‌های حاصل از ارزیابی خطر جنگل‌زدایی می‌توانند در تدوین راهبردهای پیشگیرانه مدیریت جنگل‌ها، از جمله وضع مقررات حفاظتی در مناطق بحرانی، آموزش و مشارکت جوامع محلی، و ترویج بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی نقش مؤثری ایفا کنند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که ترکیب داده‌های محلی با مدل‌های پیشرفته جهانی می‌تواند به بهبود پیش‌بینی‌ها و افزایش اثربخشی اقدامات مدیریتی منجر شود. در نهایت، این تحقیق با ارائه بینش‌های کاربردی و علمی، نه تنها مدیریت جنگل‌زدایی را تقویت می‌کند، بلکه می‌تواند به عنوان الگویی برای سایر مناطق مشابه مورد استفاده قرار گیرد. برای کاهش مؤثر جنگل‌زدایی، توصیه می‌شود که استقرار سیاست‌های حفاظتی مبتنی بر اولویت‌بندی مناطق پرخطر، تقویت مشارکت فعال جوامع محلی در مدیریت منابع طبیعی، و بهره‌گیری از سامانه‌های پایش و ارزیابی مستمر مبتنی بر فناوری‌های نوین سنجش از دور و مدل‌سازی پیشرفته، به عنوان راهبردهای کلیدی پیشگیرانه و احیایی به طور هم‌افزا به کار گرفته شوند.

واژه‌های کلیدی: برازش مدل، پهنه‌بندی، متغیر پاسخ، مدل لجستیک، معیار آکائیک

مقدمه

در چند دهه اخیر، نرخ جنگل زدایی (Deforestation) در بسیاری از مناطق جهان به طور نگران کننده ای افزایش یافته است، به طوری که سالانه میلیون ها هکتار از جنگل های طبیعی از بین می روند که تأثیرات عمیقی بر پایداری بوم سازگان ها دارد (FAO, 2021). جنگل زدایی به عنوان یکی از جدی ترین چالش های محیط زیستی عصر حاضر، پیامدهای گسترده ای در سطوح محلی، منطقه ای و جهانی به همراه دارد (Ogundele & Adebisi, 2016; Kayet et al., 2021). این پدیده نه تنها موجب کاهش تنوع زیستی و تخریب زیستگاه های طبیعی می شود، بلکه نقش مهمی در تشدید تغییرات آب و هوایی از طریق انتشار کربن ذخیره شده در زیست توده جنگلی ایفا می کند (Chavan et al., 2018; Budniak & Zieba, 2022). از دیدگاه هیدرولوژیکی، جنگل زدایی منجر به اختلال در چرخه آب، افزایش رواناب سطحی و کاهش نفوذپذیری خاک می گردد که در نهایت به فرسایش شدید خاک و کاهش کیفیت منابع آب منجر می شود (Mazgajski et al., 2010; Fynn & Campbell, 2019). از منظر اقتصادی-اجتماعی نیز تخریب جنگل ها معیشت جوامع محلی وابسته به منابع جنگلی را متاثر می سازد و پتانسیل گردشگری طبیعی را کاهش می دهد (Dimobe et al., 2015; Austi et al., 2019).

در ایران نیز جنگل زدایی نه تنها در نواحی زاگرس و ارسباران بلکه به ویژه در جنگل های شمال کشور به یک نگرانی ملی تبدیل شده است (Bazgir et al., 2020). تخریب پوشش جنگلی در این مناطق به دلیل شیب های تند، خاک های ناپایدار و فشار فزاینده انسانی، منجر به تشدید فرسایش خاک، رانش زمین و از دست رفتن خدمات بوم سازگانی حیاتی شده است (Hajjarian et al., 2016). جنگل های هیرکانی به عنوان بازمانده ای از دوران سوم زمین شناسی، نمونه ای منحصر به فرد از بوم سازگان جنگلی معتدله را تشکیل می دهند. این جنگل ها که در نوار شمالی ایران واقع شده اند، به دلیل تنوع زیستی بالا از اهمیت حفاظتی ویژه ای برخوردارند. این جنگل ها نه تنها منبع غنی تنوع زیستی هستند، بلکه به عنوان ذخیره گاه ژنتیکی گونه های چوبی و علفی، نقش کلیدی در حفظ پویایی اکولوژیکی منطقه ایفا می کنند (Akbari & Kalbi, 2019; Bijani-Nejad et al., 2024). ویژگی هایی مانند ساختار عمودی پیچیده، حضور میکروکلیمای متنوع، و ترکیب گونه ای خاص، موجب شده اند که جنگل های هیرکانی از منظر علمی و حفاظتی مورد توجه مجامع بین المللی مانند یونسکو نیز قرار گیرند (Sadeghi, 2019; Javanmiri Pour, 2024). متأسفانه در دهه های اخیر، این بوم سازگان ارزشمند تحت تأثیر ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی با نرخ نگران کننده ای در حال تخریب هستند. توسعه شهری و روستایی، گسترش زمین های کشاورزی، بهره برداری غیراصولی از منابع چوبی و افزایش فشار گردشگری از جمله مهم ترین عوامل انسانی مؤثر بر این روند تخریب محسوب می شوند (Firouzabadi & Azimzadeh, 2012). افزون بر عوامل انسانی، نبود نظام مالکیت و کاربری زمین شفاف، ضعف در اجرای قوانین حفاظتی، و ناکارآمدی برخی از برنامه های مدیریت منابع طبیعی، روند تخریب را در

برخی نواحی تسریع کرده است (Avatefi Hemmat et al., 2013). همچنین، اجرای طرح های توسعه ای بدون ارزیابی زیست محیطی دقیق، مانند ساخت و ساز در حریم جنگل یا تعریض جاده های جنگلی، تأثیرات منفی مضاعفی بر پایداری این بوم سازگان داشته است (Avatefi Hemmat et al., 2013). از سوی دیگر، تغییرات الگوهای بارشی و افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم نیز به عنوان عوامل تشدیدکننده این فرآیند عمل می کنند (Abdul-Nabi et al., 2025).

در تحلیل عوامل مؤثر بر جنگل زدایی، شناسایی روابط پیچیده بین متغیرهای محیطی و انسانی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در این زمینه، مدل های آماری پیشرفته ابزارهای ارزشمندی برای درک این روابط و پیش بینی الگوهای فضایی تخریب جنگل محسوب می شوند. افزایش دسترسی به داده های محیطی با دقت مکانی بالا، به ویژه از طریق فناوری GIS، زمینه را برای استفاده از این مدل ها در تحلیل های اکولوژیکی فراهم ساخته است. همچنین، رشد توان محاسباتی در نرم افزارهای آماری، امکان اجرای مدل های پیچیده با حجم داده های زیاد را فراهم کرده است و موجب ارتقای دقت پیش بینی ها شده است (Ferrari et al., 2025). در میان این مدل ها، مدل های خطی تعمیم یافته (Generalized Linear Model: GLM) و مدل های جمعی تعمیم یافته (Generalized Additive Model: GAM) به دلیل انعطاف پذیری در مدل سازی روابط، کاربرد گسترده ای در مطالعات تغییرات پوشش زمین یافته اند (Kayet et al., 2021). GLM با امکان استفاده از توزیع های مختلف برای متغیر پاسخ و قابلیت تلفیق اثرات متقابل بین متغیرها، ابزار قدرتمندی برای تحلیل داده های اکولوژیکی محسوب می شود. از سوی دیگر، GAM با بهره گیری از توابع هموارساز، امکان مدل سازی روابط پیچیده غیرخطی را بدون نیاز به پیش فرض های سختگیرانه در مورد شکل رابطه فراهم می آورد (Sasikumar and Indira, 2019).

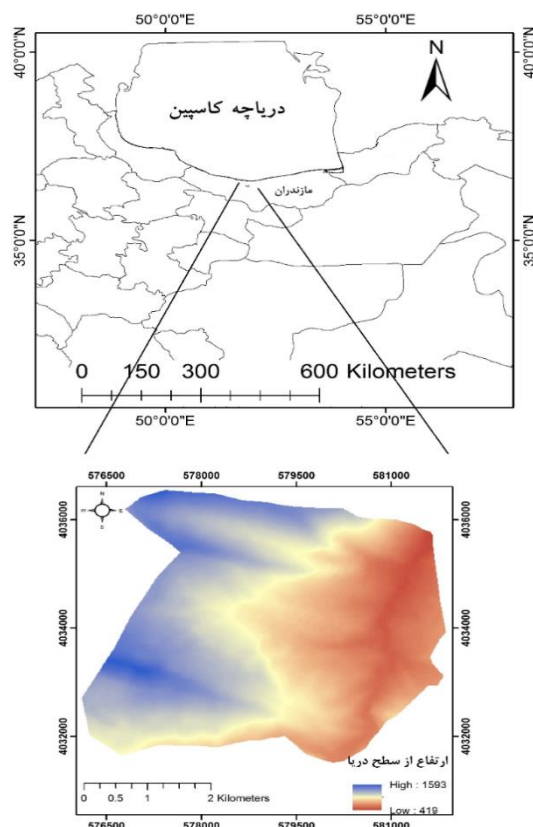
انتخاب این دو مدل در مطالعه حاضر بر اساس چندین مزیت کلیدی صورت گرفته است. نخست آن که این مدل ها قابلیت بالایی در پردازش داده های با ساختار پیچیده دارند (Bonsoms & Ninyerola, 2024). دوم آن که امکان ترکیب انواع مختلف متغیرهای پیش بین (کمی و کیفی) در آن ها وجود دارد (Lemus-Canovas et al., 2019). سوم آن که خروجی های این مدل ها از قابلیت تفسیرپذیری بالایی برخوردار هستند که برای تصمیم گیری های مدیریتی حائز اهمیت است (Bonsoms & Ninyerola, 2024). با این حال، هر یک از این روش ها محدودیت های خاص خود را نیز دارا هستند. به عنوان مثال، GLM در مدل سازی روابط بسیار پیچیده غیرخطی ممکن است با چالش مواجه شود، در حالی که GAM به داده های بیشتری برای آموزش مدل نیاز دارد و خطر بیش برآزش در آن بالاتر است (Sasikumar & Indira, 2019).

در مطالعات اخیر، ترکیب رویکردهای مدل سازی آماری با داده های مکانی نقش مهمی در شناسایی مناطق پرخطر از نظر جنگل زدایی ایفا کرده است (Smith et al., 2023). این ترکیب، به ویژه در برنامه ریزی برای حفاظت هدفمند،

مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

جهت مطالعه جنگل‌زدایی در استان مازندران، جنگل‌های شهرستان نور از سری ۱۱ با نام پیمت در نظر گرفته شدند که در حوزه آبخیز ۴۸ اداره کل منابع طبیعی استان مازندران، نوشهر و در ۳۰ کیلومتری شرق شهرستان نوشهر واقع گردیده‌اند (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه جزء جنگل‌های هیرکانی با اقلیم معتدله است که زمستانی معتدل و تابستانی گرم و خشک دارد. مساحت منطقه تحت بررسی حدود ۲۰۰۰ هکتار و محدوده ارتفاعی آن حداقل ۵۰۰ متر و حداکثر ۱۷۰۰ متر از سطح دریا است.

اولویت‌بندی مناطق بحرانی و تخصیص بهینه منابع حفاظتی بسیار مؤثر بوده است. در این مطالعه، منطقه مورد بررسی جنگل‌های حوزه پیمت در شهرستان نور استان مازندران است که به دلیل حساسیت اکولوژیکی بالا و تنوع عوامل تهدیدکننده، نیازمند توجه ویژه در مدیریت منابع جنگلی است. مطالعه حاضر با در نظر گرفتن این ملاحظات روش‌شناختی، سه هدف اصلی را دنبال می‌کند: (۱) شناسایی و ارزیابی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر روند جنگل‌زدایی در منطقه مورد مطالعه، (۲) مقایسه عملکرد مدل‌های GLM و GAM در پیش‌بینی الگوهای فضایی جنگل‌زدایی، و (۳) ارائه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر جنگل‌زدایی به‌عنوان ابزاری برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی.

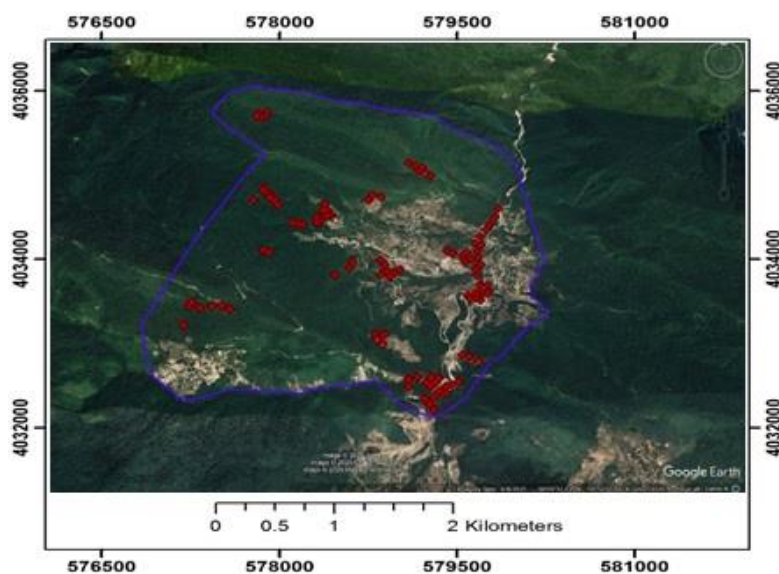


شکل ۱- منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، نور، پیمت
Figure 1. Case study location in Mazandaran Province, Noor, Peymot

بازگشت به حالت اولیه خود نیست (Worku, 2023; Vázquez-Grandón *et al.*, 2018). بر این اساس، با پیمایش میدانی در سری جنگل‌داری پیمت، ۱۰۷ منطقه که متأثر از جنگل‌زدایی بودند شناسایی شدند و موقعیت جغرافیایی آن‌ها ثبت شد (شکل ۲).

روش پژوهش

در تحقیق حاضر، جنگل‌زدایی به‌عنوان تبدیل دائمی یا بلندمدت مناطق جنگلی به زمین‌های غیر جنگلی بر اثر فعالیت‌های انسانی یا اختلالات طبیعی تعریف شده است، به‌طوری که پوشش جنگلی در بازه زمانی معقولی قادر به



شکل ۲- موقعیت مناطق واجد جنگل زدایی در منطقه مورد مطالعه
Figure 2. Location of the deforestation area

پیش بینی شده دارند. استفاده از این روش باعث کاهش اثر نویز داده ها و افزایش دقت لایه های تولیدی می شود. نقشه های مربوط به مراکز جمعیتی با استفاده از لایه های نقطه ای و خطی متغیرهای تبیینی، که از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری و اداره کل جهاد کشاورزی استان مازندران به دست آمدند، تهیه شدند و در نهایت تمامی لایه ها با اندازه سلول $12/5 \times 12/5$ متر یکسان سازی شدند. برای مدل سازی احتمال جنگل زدایی از تکنیک های داده کاوی استفاده شد. در این مطالعه، از مدل هایی با تحلیل دودویی داده ها بهره گرفته شد که در آن مناطق دارای جنگل زدایی با مقدار "یک" و مناطق فاقد جنگل زدایی با مقدار "صفر" تعریف می شوند (Sahana et al., 2018). این نوع تحلیل، رابطه بین یک یا چند متغیر مستقل و وابسته را به صورت دودویی توصیف می کند. در این تحقیق، از دو مدل GLM و GAM برای بررسی احتمال جنگل زدایی استفاده شد.

با توجه به ماهیت باینری متغیر پاسخ در این مطالعه، از تابع پیوند لجوجیت استفاده شد که امکان مدل سازی احتمال وقوع پدیده جنگل زدایی را به خوبی فراهم می آورد. فرآیند مدل سازی با انتخاب اولیه متغیرها براساس دانش اکولوژیکی و تحلیل همبستگی بین متغیرها آغاز شد و پس از برآزش مدل اولیه، متغیرهای غیرمعنی دار از طریق آزمون نسبت درست نمایی حذف شدند تا در نهایت مدلی با بیشترین توان پیش بینی و کمترین خطا به دست آید. معادله کلی مدل در دو رابطه ۱ و ۲ بیان شده است:

$$p = \frac{e^z}{1 + e^z} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Z = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این روابط p احتمال وقوع جنگل زدایی، Z معادله خطی چندگانه حاصل شده از تابع لجوجیت که همان متغیر وابسته یا

در پژوهش های مربوط به پهنه بندی، روش های دقیق علمی برای جمع آوری، پردازش و تحلیل داده ها از اهمیت بالایی برخوردار هستند. روش شناسی مورد استفاده باید بتواند داده های پراکنده و متنوع محیطی را به اطلاعات مکانی قابل استفاده تبدیل کند. در این راستا، فناوری های سامانه اطلاعات جغرافیایی در ترکیب با روش های آماری، ابزارهای مؤثری برای تحلیل و تولید نقشه های پهنه بندی محسوب می شوند. در این مطالعه، مجموعه ای از روش ها شامل پیش پردازش داده ها، میان یابی مکانی و تحلیل مکانی به کار گرفته شد. ۱۴ متغیر تبیینی شامل جهت شیب، شیب، ارتفاع از سطح دریا، شکل زمین، انحنای دامنه، طول شیب، اثر باد، کمینه دما، میانگین دما، بیشینه دما، بارش، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی و نزدیکی به اراضی کشاورزی از منابع مختلف استخراج و برای شناسایی احتمال جنگل زدایی در منطقه مورد مطالعه استفاده شدند (جدول ۱). نقشه های مربوط به متغیرهای توپوگرافیک از مدل رقومی ارتفاعی با دقت $12/5 \times 12/5$ متر تهیه شدند. داده های اقلیمی از نه ایستگاه سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران سنجی جمع آوری شدند که دورترین آن ها در فاصله ای کمتر از ۱۰ کیلومتر از منطقه مورد مطالعه قرار داشت. این داده ها ابتدا از نظر همخوانی زمانی و مکانی بررسی شدند تا اطمینان حاصل شود که همه آن ها مربوط به یک دوره زمانی واحد و محدوده مکانی مشخص هستند. سپس داده های دارای خطا یا مقادیر مفقود شناسایی و تصحیح شدند و داده های غیرقابل اعتماد حذف گردیدند. برای آماده سازی متغیرهای اقلیمی، از روش میان یابی معکوس فاصله روی داده های ایستگاه های سینوپتیک، کلیماتولوژی و باران سنجی اطراف منطقه مورد مطالعه استفاده شد. این روش به دلیل سادگی، کارایی و دقت بالا در توزیع داده های اقلیمی در مناطق با تراکم متوسط ایستگاه ها انتخاب مناسبی محسوب می شود (Karami & Sarvestan, 2022). در این روش، فرض بر این است که نقاط نزدیک تر به نقطه مورد نظر تأثیر بیشتری بر مقدار

Team, 2024). همچنین، مدل جمعی تعمیم‌یافته با استفاده از بسته mgcv پیاده‌سازی شد (Wood, 2017). مقایسات شامل بررسی دقت پیش‌بینی مدل‌ها، قدرت تفسیرپذیری نتایج و توانایی هر مدل در شناسایی روابط بین متغیرها بودند که در نهایت منجر به انتخاب مدل مناسب‌تر برای پیش‌بینی پدیده جنگل‌زدایی در منطقه مورد مطالعه شد. دقت پیش‌بینی هر دو مدل با استفاده از دو معیار آکائیک و سطح زیر منحنی ارزیابی شد. به این منظور، داده‌ها به‌صورت تصادفی به دو بخش آموزش (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شدند. قابل ذکر است که مقادیر سطح زیر منحنی بین ۰/۵ (تصادفی) تا ۱ (کامل) تفسیر شدند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از مدل خطی تعمیم‌یافته با تابع پیوند لجیت برای پیش‌بینی جنگل‌زدایی نشان‌دهنده روابط آماری معنی‌دار و قوی بین متغیرهای مستقل و وقوع جنگل‌زدایی هستند. در فرآیند مدل‌سازی، سه متغیر جهت شیب، شکل زمین و انحنای دامنه به‌دلیل بالا بودن میزان همبستگی با سایر متغیرهای پیشگو از مدل حذف شدند (جدول ۲). تحلیل خروجی مدل حاکی از آن است که پس از حذف متغیرهای کم‌تأثیر، متغیرهای واردشده در مدل نهایی شامل ارتفاع از سطح دریا، اثر باد، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی و میانگین دما تأثیرات معناداری بر احتمال وقوع جنگل‌زدایی داشته‌اند (جدول ۳).

پاسخ است، β_0 عرض از مبدأ، β_1 تا β_n ضرایب مدل و X_1 تا X_n متغیرهای پیش‌بین هستند.

برای انتخاب بهترین ترکیب متغیرها از روش گام به گام مبتنی بر معیار اطلاعات آکائیک (AIC) استفاده شد. پس از برآورد پارامترهای مدل، احتمال وقوع جنگل‌زدایی برای هر سلول، محاسبه و نقشه پهنه‌بندی خطر در نرم‌افزار R تولید گردید.

دومین مدل مورد استفاده در تحقیق، GAM است که به‌عنوان تکنیک توسعه‌یافته از مدل GLM شناخته می‌شود. مدل مذکور این قابلیت را فراهم می‌آورد که روابط غیرخطی بین متغیرهای پیش‌بین و متغیر پاسخ را با دقت بالایی مدل‌سازی کند (Sasikumar & Indira, 2019).

بعد از اجرای هر دو مدل، ارزش عددی احتمال جنگل‌زدایی برای کل منطقه در سلول‌های با ابعاد $12/5 \times 12/5$ ایجاد و جهت ترسیم نقشه به نرم‌افزار Arc GIS نسخه ۱۰/۸ منتقل شد. جهت تفسیر راحت‌تر نقشه‌های نهایی حاصل از دو مدل، نقشه‌های احتمال جنگل‌زدایی در محیط این نرم‌افزار با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی در چهار طبقه شامل پایین، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند و درصد سطح هر طبقه محاسبه شد.

اجرای هر دو مدل در محیط نرم‌افزار R نسخه ۴/۳/۱ با استفاده از بسته‌های تخصصی انجام پذیرفت و نتایج حاصل از آن‌ها از جنبه‌های مختلف مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفتند. بر این اساس، مدل خطی تعمیم‌یافته با استفاده از تابع (glm) در بسته پایه stats و با تابع پیوند لجیت اجرا شد (R Core

Table 1. Characteristics of predictive variables

متغیرها Variables	کمینه Minimum	میانگین Average	بیشینه Maximum
شیب Slope	4.12	21.50	51.37
ارتفاع از سطح دریا Altitude	472	1046	1568
طول شیب Slope-length	0.00	25.10	93.85
اثر باد Wind effect	0.74	0.81	1.31
کمینه دما Minimum temperature	-11.4	-10.22	-9.12
میانگین دما Mean temperature	12.66	13.01	13.44
بیشینه دما Maximum temperature	35.04	35.18	35.29
بارش Precipitation	614.73	622.29	631.41
فاصله از جاده Distance from roads	12.50	409.84	1518.63
فاصله از مناطق مسکونی Distance from residential areas	0.00	1103.62	2493.24
نزدیکی به اراضی کشاورزی Distance from agricultural land	12.50	598.66	2134.28

جدول ۲- ماتریس همبستگی بین متغیرهای تبیینی مورد استفاده در مدل سازی احتمال جنگل زدایی

Table 2. The correlation matrix among explanatory variables used in modeling deforestation probability

متغیرها Variables	جهت شیب Slope aspect	شیب Slope	ارتفاع از سطح دریا Altitude	شکل زمین Landform	انحنای دامنه Plan curvature	طول شیب Slope-length	اثر باد Wind effect	کمینه دما Minimum temperature	میانگین دما Mean temperature	بیشینه دما Maximum temperature	بارش Precipitation	فاصله از جاده Distance from roads	فاصله از مناطق مسکونی Distance from Residential areas	نزدیکی به اراضی کشاورزی Distance from agricultural land
جهت شیب Slope aspect	1													
شیب Slope	0.54 η^2	1												
ارتفاع از سطح دریا Altitude	0.54 η^2	0.42	1											
شکل زمین Landform	0.72 (C)	0.54 η^2	0.54 η^2	1										
انحنای دامنه Plan curvature	0.72 (C)	0.54 η^2	0.54 η^2	0.72 (C)	1									
طول شیب Slope-length	0.54 η^2	0.42	0.42	0.54 η^2	0.54 η^2	1								
اثر باد Wind effect	0.54 η^2	0.42	0.42	0.54 η^2	0.54 η^2	0.42	1							
کمینه دما Minimum temperature	0.54 η^2	0.42	0.42	0.54 η^2	0.54 η^2	0.42	0.42	1						
میانگین دما Mean temperature	0.54 η^2	0.42	0.42	0.54 η^2	0.54 η^2	0.42	0.42	0.42	1					
بیشینه دما Maximum temperature	0.54 η^2	0.42	0.42	0.54 η^2	0.54 η^2	0.42	0.42	0.42	0.42	1				
بارش Precipitation	0.54 η^2	0.42	0.42	0.54 η^2	0.54 η^2	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	1			
فاصله از جاده Distance from roads	0.54 η^2	0.42	0.42	0.54 η^2	0.54 η^2	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	1		
فاصله از مناطق مسکونی Distance from Residential areas	0.54 η^2	0.42	0.42	0.54 η^2	0.54 η^2	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	1	
نزدیکی به اراضی کشاورزی Distance from agricultural land	0.54 η^2	0.42	0.42	0.54 η^2	0.54 η^2	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	1

ضرایب ارائه شده در جدول بر اساس نوع متغیرها متفاوت هستند. ضرایب بدون علامت مربوط به همبستگی پیرسون بین متغیرهای کمی هستند. η^2 نشان دهنده ضریب همبستگی اتا-مربع بین متغیرهای کیفی و کمی است؛ (C) بیانگر ضریب همبستگی Cramér's V بین دو متغیر کیفی است.

The correlation coefficients vary based on variable types. Coefficients without a suffix indicate Pearson's correlation between continuous variables.

η^2 denotes the Eta-squared coefficient used for correlations between categorical and continuous variables; (C) indicates Cramér's V coefficient for associations between two categorical variables.

جدول ۳- نتایج تحلیل واریانس مدل خطی تعمیم‌یافته با آزمون نسبت درست‌نمایی

Table 3. Results of the analysis of variance for the GLM using the Likelihood Ratio Test (LRT)

متغیرهای پیشگو Predictor variables	درجه آزادی Degree of freedom	انحراف Deviance	معیار آکائیک AIC	آزمون نسبت درست‌نمایی LRT	احتمال معنی‌داری p-value
Intercept	-	81.68	93.68	-	-
ارتفاع از سطح دریا Altitude	1	152.20	162.20	70.52	0.0000
اثر باد Wind effect	1	101.88	111.88	20.20	0.0000
فاصله از جاده Distance from roads	1	99.11	109.11	17.43	0.0000
فاصله از مناطق مسکونی Distance from residential areas	1	110.29	120.29	28.61	0.0000
میانگین دما Mean temperature	1	112.66	122.66	30.98	0.0000

جدول ۴- ضرایب برآورده شده مدل رگرسیون لجستیک برای پیش‌بینی احتمال جنگل‌زدایی

Table 4. Estimated coefficients of the GLM for predicting deforestation probability

متغیرهای پیشگو Predictor variables	ضریب Coefficient	اشتباه معیار Standard of Error	مقدار آماره Z Z-value	مقدار p p-value
Intercept	322.7	74.73	4.32	0.0000
ارتفاع از سطح دریا Altitude	-0.02	0.004	-4.90	0.0000
اثر باد Wind effect	24.17	7.19	3.36	0.0000
فاصله از جاده Distance from roads	-0.005	0.002	-3.51	0.0004
فاصله از مناطق مسکونی Distance from residential areas	-0.003	0.0007	-4.47	0.0000
میانگین دما Mean temperature	-21.64	5.18	-4.18	0.0000

Intercept: مقدار پایه لوجیت احتمال جنگل‌زدایی، زمانی که تمام متغیرها صفر باشند.

Intercept: The baseline logit of deforestation probability when all predictor variables are set to zero.

نگه داشته شده‌است، بررسی شده‌است (شکل ۳). براساس یافته‌ها، متغیرهای ارتفاع از سطح دریا، اثر باد، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی و نزدیکی به اراضی کشاورزی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر الگوی جنگل‌زدایی در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شوند (جدول ۵).

متغیر ارتفاع نشان‌دهنده تأثیر غیر یکنواخت بر جنگل‌زدایی است. در ارتفاعات کمتر از ۸۰۰ متر، اثر مثبت است که حاکی از تخریب بیشتر در این ارتفاعات است. در میانه‌های ارتفاعی، اثر نوسانی و نسبتاً خنثی است و در ارتفاعات بالا (بیش از ۱۴۰۰ متر) اثر به‌طور محسوسی منفی می‌شود. اثر متغیر شیب بر جنگل‌زدایی دارای روندی سینوسی است؛ در شیب‌های کم، تأثیر منفی است (کاهش جنگل‌زدایی)، ولی در بازه ۱۰ تا ۲۰ درجه، اثر مثبت می‌شود. با افزایش بیشتر شیب، اثر مجدداً کاهش می‌یابد. در بخش اعظم دامنه متغیر طول شیب، اثر نزدیک به صفر است، اما در مقادیر بالاتر از حدود ۶۰۰ متر روند افزایشی مشخصی در اثر مشاهده می‌شود به این معنا که در مناطقی با طول بالای شیب، احتمال جنگل‌زدایی نیز افزایش می‌یابد. اثر باد در این مدل به صورت خطی مثبت است؛ با کاهش سرعت باد، میزان اثرگذاری متغیر به سمت کاهش جنگل‌زدایی می‌رود. متغیر فاصله از جاده‌ها نشان‌دهنده یک روند مشخص منفی در بخش بالای دامنه است، به این معنی که هرچه فاصله از جاده‌ها بیشتر شود (خصوصاً پس از حدود ۱۰۰۰ متر)، احتمال وقوع جنگل‌زدایی کاهش می‌یابد. نمودار وابستگی جزئی فاصله از مناطق مسکونی نشان می‌دهد که در فاصله‌های کم از سکونتگاه‌های انسانی (زیر ۱۰۰۰ متر)، اثر مثبت و نسبتاً ناپایدار است. با افزایش فاصله، جنگل‌زدایی

مقادیر ضرایب مدل نشان می‌دهند که ارتفاع از سطح دریا، رابطه معکوس و معناداری با احتمال جنگل‌زدایی دارد. این یافته نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع، احتمال جنگل‌زدایی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که احتمالاً به‌دلیل دشواری دسترسی و کاهش فعالیت‌های انسانی در ارتفاعات بالاتر است. اثر باد نیز رابطه مثبت و قوی با جنگل‌زدایی نشان داد. متغیر فاصله از جاده با ضریب منفی نشان می‌دهد که با افزایش فاصله از جاده‌ها، احتمال جنگل‌زدایی کاهش می‌یابد. فاصله از روستا نیز با ضریب منفی، رابطه معکوس معناداری نشان داد که حاکی از تأثیر بیشتر فعالیت‌های انسانی در نزدیکی سکونتگاه‌ها بر تخریب جنگل‌ها است. میانگین دما نیز با ضریب منفی، رابطه معکوس بسیار قوی با جنگل‌زدایی نشان داد که می‌تواند بیانگر تأثیر منفی افزایش دما بر بقای پوشش جنگلی باشد (جدول ۴). شاخص‌های برازش مدل شامل کاهش قابل توجه انحراف از مقدار اولیه ۲۰۷/۹۴ به ۸۱/۶۸ و مقدار آکائیک برابر با ۹۳/۶۸ نشان‌دهنده برازش مطلوب مدل و توانایی بالای آن در پیش‌بینی الگوهای جنگل‌زدایی است (جدول ۳). تعداد تکرارهای لازم برای همگرایی مدل (هفت تکرار) نیز نشان‌دهنده پایداری الگوریتم در برآورد پارامترها است.

مدل جمعی تعمیم‌یافته مورد استفاده در این تحلیل، با استفاده از توابع هموارکننده، امکان بررسی تأثیرات غیرخطی و پیچیده متغیرهای محیطی و انسانی را بر پدیده جنگل‌زدایی فراهم کرده است. بر این اساس، میزان و چگونگی تأثیر هر متغیر مستقل بر احتمال وقوع جنگل‌زدایی، در حالی که اثر سایر متغیرها ثابت

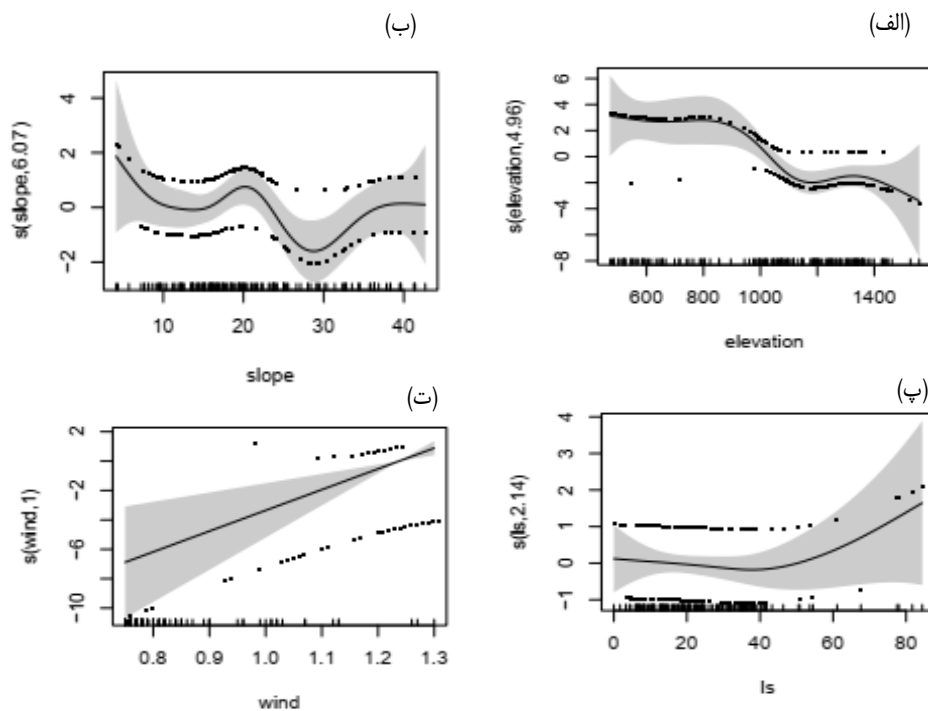
مثبت است و خطر جنگل زدایی بیشتر است. اثر بارندگی نسبتاً پیچیده است. در بازه های پایین (۶۱۵ تا ۶۲۰ میلی متر)، اثر مثبت شدید بر افزایش احتمال جنگل زدایی کاملاً قابل مشاهده است. تاثیر دما نیز پیچیدگی بالای رابطه این متغیر با میزان احتمال جنگل زدایی را نشان می دهد. این روند نشان می دهد که رابطه ی بارش و دما با احتمال جنگل زدایی به عوامل همراه دیگری نیز شدیداً وابسته است.

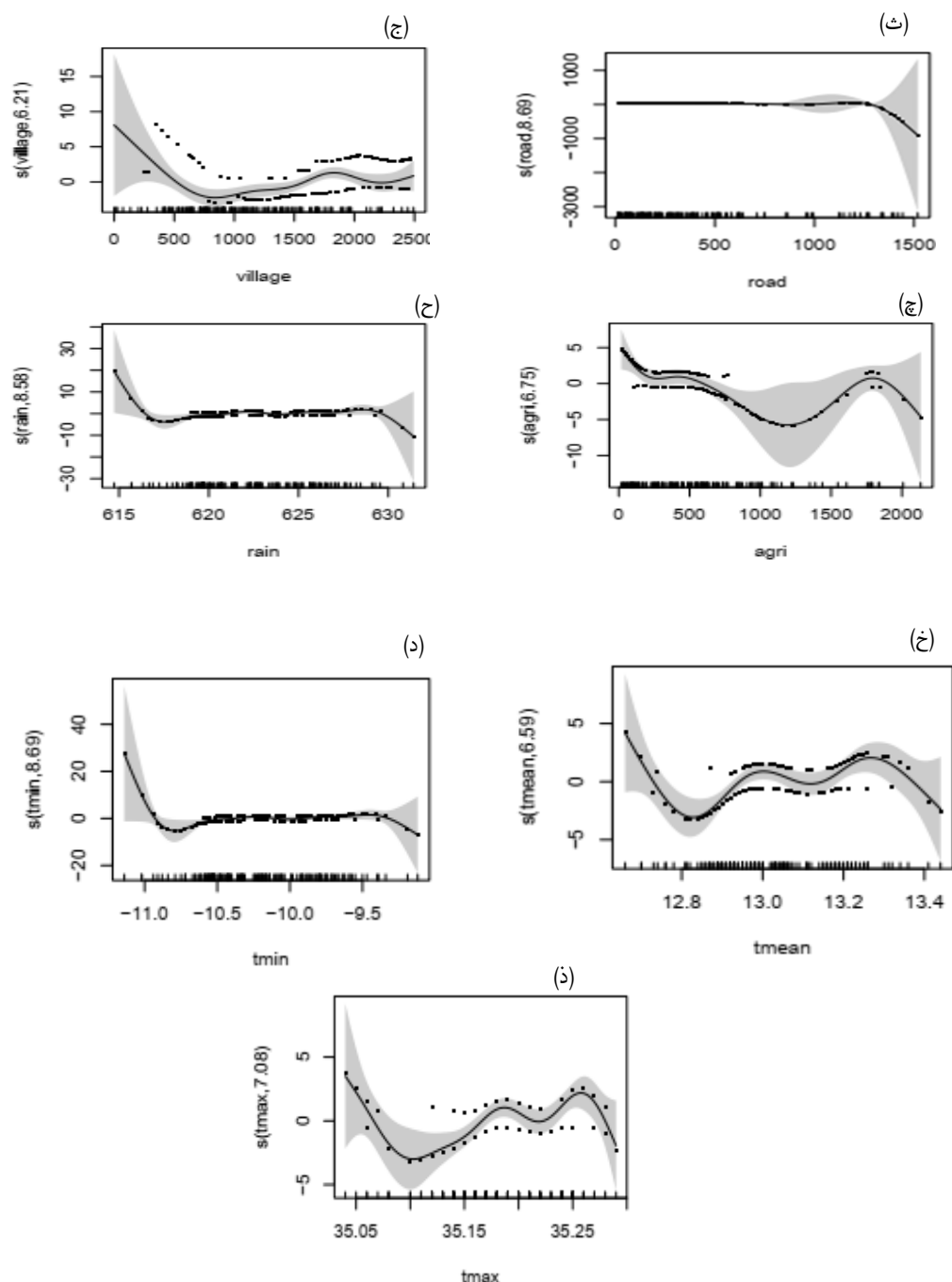
کاهش و سپس مجدداً در فواصل بیش از ۱۶۰۰ متر افزایش می یابد که ممکن است ناشی از فعالیت های انسانی در مناطق جدید یا نفوذ عوامل دیگر مانند جاده های جنگلی باشد. به طور کلی الگوی نمودار مربوط به فاصله از مناطق مسکونی بعد از فاصله حدود ۷۵۰ تا ۸۰۰ متر، روندی سینوسی دارد. نمودار مربوط به نزدیکی به اراضی کشاورزی نشان می دهد که تاثیر این عامل بر احتمال جنگل زدایی دارای یک الگوی غیر خطی است. بر این اساس در فواصل کم (زیر ۵۰۰ متر)، اثر

جدول ۵- اهمیت نسبی متغیرهای پیشگو بر اساس مدل جمعی تعمیم یافته

Table 5. Relative importance of predictor variables based on the GAM

اهمیت نسبی Relative importance	متغیرهای پیشگو Predictor variables
25.6	فاصله از مناطق مسکونی Distance from residential areas
22.1	نزدیکی به اراضی کشاورزی Distance from agricultural land
18.3	فاصله از جاده Distance from roads
17	اثر باد Wind effect
14.9	ارتفاع از سطح دریا Altitude
1.2	میانگین دما Mean temperature
0.4	شیب Slope
0.3	طول شیب Slope-length
0.1	بارش Precipitation
0.05	کمینه دما Minimum temperature
0.05	بیشینه دما Maximum temperature





شکل ۳- نمودارهای وابستگی جزئی هر متغیر پیشگوی موثر بر جنگل‌زدایی (الف- ارتفاع از سطح دریا، ب- شیب، پ- طول شیب، ت- اثر باد، ث- فاصله از جاده، ج- فاصله از مناطق مسکونی، چ- نزدیکی به اراضی کشاورزی، ح- بارش، خ- کمینه دما، د- میانگین دما، ذ- بیشینه دما)

Figure 3. Partial dependency plots for each predictor variable (a: altitude, b: slope, c: slope-length, d: wind effect, e: distance from road, f: distance from residential areas, g: distance from agricultural land, h: precipitation, i: minimum temperature, j: mean temperature, k: maximum temperature)

از آن هستند که مدل GAM با مقدار عددی آکائیک حدود ۲۱ و شاخص سطح زیر منحنی عملکرد برابر ۰/۹۴۷ از دقت بالاتری نسبت به مدل GLM برخوردار است (جدول ۷).

نقشه‌های نهایی حاصل از دو مدل GLM و GAM نشان می‌دهند که در هر دو مدل، طبقه‌های احتمال جنگل‌زدایی خیلی بالا و پایین به ترتیب بیشترین سطح منطقه را در بر گرفته‌اند (شکل‌های ۴ و ۵، جدول ۶). همچنین، نتایج اعتبارسنجی حاکی

جدول ۶- درصد سطح هر طبقه احتمال جنگل زدایی بر اساس دو مدل GLM و GAM

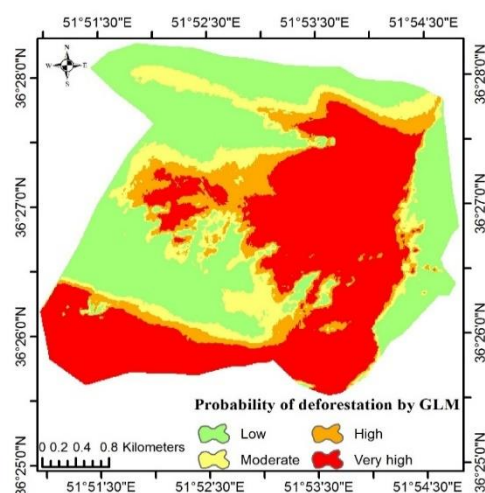
Table ۶ Percentage of the area for each deforestation probability class based on GLM and GAM models

مدل ها	پایین Low	متوسط Moderate	زیاد High	خیلی زیاد Very high
GLM	36	13	11	40
GAM	41	0.5	0.5	58

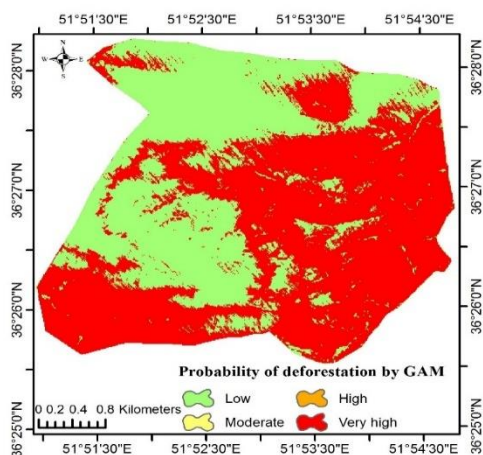
جدول ۷- نتایج ارزیابی مدل ها

Table 7. Results of model validation

شاخص های ارزیابی	GLM	GAM
معیار آکائیک AIC	93.68	21.07
سطح زیر منحنی عملکرد AUC	0.903	0.947



شکل ۴- پهنه بندی احتمال جنگل زدایی با مدل GLM
Figure 4. Zoning of deforestation probability using the GLM



شکل ۵- پهنه بندی احتمال جنگل زدایی با مدل GAM
Figure 5. Zoning of deforestation probability using the GAM

می‌تواند در سیاست‌گذاری کاربری اراضی نقش محوری ایفا کند (Karamage et al., 2016).

اثر مثبت و خطی متغیر باد در این تحلیل حاکی از آن است که با کاهش سرعت باد، احتمال جنگل‌زدایی کاهش می‌یابد. این یافته ممکن است با نقش باد در انتقال بذرها، خشکاندن خاک و حتی افزایش احتمال آتش‌سوزی در عرصه‌های جنگلی نزدیک به اراضی کشاورزی به‌ویژه در مناطق بادخیز مرتبط باشد (Silvério, 2018; Silvério et al., 2018). با این حال، تأثیر دقیق باد بر جنگل‌زدایی بستگی به تعامل آن با سایر متغیرها دارد که در مطالعات آینده نیازمند بررسی بیشتر است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، فاصله از جاده اثر منفی و مشخصی بر احتمال جنگل‌زدایی دارد، به طوری که در فواصل کمتر از ۱۰۰۰ متر، احتمال جنگل‌زدایی بیشتر است. این یافته با اجماع علمی در زمینه‌ی نقش جاده‌ها در تسهیل دسترسی به منابع طبیعی و افزایش بهره‌برداری انسانی هماهنگ است (Marsik et al., 2011; Bagley et al., 2014; Pendrill et al., 2021; Engert et al., 2025). تأثیر فاصله از سکونتگاه‌ها نیز نشان‌دهنده‌ی الگوی دوقله‌ای است، به این معنا که نه تنها در فواصل نزدیک، بلکه در فواصل دورتر (بیش از ۲۰۰۰ متر) نیز احتمال جنگل‌زدایی مجدداً افزایش می‌یابد. این الگو می‌تواند ناشی از فعالیت‌های بهره‌برداری غیرقانونی یا توسعه‌ی جاده‌های جنگلی جدید برای دسترسی به منابع دورتر باشد، مسئله‌ای که در مطالعات منطقه‌ای، از جمله پژوهش فیروزآبادی و عظیم‌زاده (Firouzabadi & Azimzadeh, 2012) و عوافقی‌همت و همکاران (Avatefi Hemmat et al., 2013) نیز گزارش شده است.

نزدیکی به اراضی کشاورزی یکی از مهم‌ترین متغیرهای پیشگو در مدل بود. در فواصل کمتر از ۵۰۰ متر، اثر مثبت و مشخصی بر افزایش جنگل‌زدایی مشاهده شد. این نتیجه تأییدکننده‌ی نقش تغییر کاربری زمین و گسترش کشاورزی به عنوان یکی از مهم‌ترین محرک‌های جنگل‌زدایی است (Brun et al., 2017; Wang & Qiu, 2015). علاوه بر این، اثر غیر خطی این متغیر نشان‌دهنده‌ی آن است که حتی در فواصل بیشتر، خطر توسعه‌ی مرزهای کشاورزی همچنان باقی است. در واقع، هم‌جواری با کاربری‌های زراعی نه تنها به عنوان یک شاخص فضایی هشداردهنده شناخته می‌شود، بلکه اغلب به مثابه‌ی ناحیه گذار برای نفوذ تدریجی به عرصه‌های جنگلی عمل می‌کند، پدیده‌ای که در بسیاری از نواحی در حال توسعه با گسترش کشاورزی معیشتی تشدید می‌شود (Bazgir et al., 2020).

تأثیر متغیر بارندگی در این مطالعه پیچیده و غیرخطی بود. کاهش احتمال جنگل‌زدایی در بازه‌های کم‌بارش ممکن است به دلیل کم‌بودن پوشش گیاهی و در نتیجه عدم جذابیت اقتصادی برای بهره‌برداری باشد. از سوی دیگر، در شرایط بارندگی بالاتر، افزایش پوشش گیاهی می‌تواند زمینه‌ی بهره‌برداری بیشتر را فراهم کند. یافته‌های مشابهی در مطالعات سیلور و همکاران (Silver et al., 2024) و دفرون و همکاران (De Frenne et al., 2021) گزارش شده‌اند. در خصوص دما، رابطه‌ی غیرخطی و پیچیده‌ای با جنگل‌زدایی مشاهده شد که

نتایج حاصل از مدل GAM در این مطالعه، چشم‌اندازی جامع از الگوهای پیچیده و غیرخطی تأثیر متغیرهای محیطی و انسانی را بر جنگل‌زدایی در منطقه‌ی طرح جنگل‌داری پیمت (استان مازندران) فراهم کرده‌اند. بهره‌گیری از توابع هموارکننده در مدل GAM این امکان را فراهم می‌سازد که روابط غیرخطی و پیچیده میان متغیرهای مستقل و احتمال وقوع جنگل‌زدایی به‌دقت بررسی گردد، امری که در مدل‌های خطی سنتی قابل دستیابی نیست (Elith et al., 2008).

الگوی مشاهده‌شده برای متغیر ارتفاع از سطح دریا نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ای غیرخطی و نوسانی است که با مطالعات پیشین نیز سازگار است (Mon et al., 2012; Bax & Francesconi, 2018; Zeng et al., 2021). احتمال بالای جنگل‌زدایی مشاهده شده در ارتفاعات پایین (زیر ۸۰۰ متر) می‌تواند ناشی از دسترسی آسان‌تر انسان، وجود اراضی مستعد کشاورزی و تمرکز سکونتگاه‌های روستایی در این نواحی باشد. مطالعات داخلی نیز به همین نتایج رسیدند، از جمله تحقیق رضوانی و هاشم‌زاده (Rezvani & Hashemzadeh, 2013) در جنگل‌های هیرکانی که نشان داد نرخ تخریب جنگل‌ها در ارتفاعات پایین‌تر بیشتر بود. در ارتفاعات بالاتر، کاهش تدریجی جنگل‌زدایی محتمل است که می‌تواند ناشی از کاهش دسترسی، شرایط نامناسب توپوگرافی و محدودیت‌های فیزیکی برای بهره‌برداری انسانی باشد. این الگو در جنگل‌زدایی با نظریه‌های بوم‌شناختی نیز همخوانی دارد؛ به گونه‌ای که فشارهای انسانی اغلب به سمت مناطق پست و حاصلخیز هدایت می‌شوند، در حالی که ارتفاعات بالاتر به دلیل پیچیدگی بیشتر زمین و کاهش انگیزه‌های اقتصادی، به عنوان مانعی طبیعی در برابر تخریب عمل می‌کنند (Bax & Francesconi, 2018).

اثر متغیر شیب، روندی نوسانی و غیرخطی را نشان می‌دهد. جنگل‌زدایی کمتر در شیب‌های کم به واسطه‌ی قابل استفاده بودن زمین برای کشاورزی در این شیب‌ها و همچنین حضور سکونتگاه‌ها است. در بازه‌ی ۱۰ تا ۲۰ درجه، افزایش نسبی جنگل‌زدایی نشان‌دهنده‌ی بهره‌برداری از زمین‌های شیب‌دارتر به‌ویژه در مناطق نیمه‌کوهستانی است. در شیب‌های بالاتر، کاهش مجدد اثر می‌تواند به محدودیت‌های بهره‌برداری بازگردد. شیب زمین یکی از مهم‌ترین عوامل کنترلی در پراکنش فعالیت‌های انسانی محسوب می‌شود، چرا که تغییرات کوچک در شیب می‌تواند هزینه‌های دسترسی، کشاورزی، یا ساخت‌وساز را به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد؛ بنابراین نقش شیب به عنوان یک فیلتر طبیعی در فرایند جنگل‌زدایی از منظر اکولوژیکی و کاربری زمین قابل تأمل است (Bennett et al., 2016). این یافته‌ها با تحقیقاتی نظیر دیپکر و همکاران (Depicker et al., 2021) در شرق آفریقا و بنت و همکاران (Bennett et al., 2016) در ایالت کالیفرنیا ایالات متحده (۲۰۱۶) همخوان هستند. همچنین، تأثیر مثبت طول شیب در مقادیر بالا نشان می‌دهد که هرچه دامنه‌ی شیب گسترش یابد، سطح در معرض دسترسی و بهره‌برداری نیز افزایش می‌یابد؛ مسئله‌ای که در مطالعات داخلی به آن کمتر پرداخته شده و

نشان می دهد اثرات اقلیمی باید با توجه به سایر متغیرهای همراه (از جمله ارتفاع و کاربری اراضی) تفسیر شوند. این موضوع با یافته های اسمیت و همکاران (Smith *et al.*, 2023) در جنگل های گرمسیری همراستا است که تأکید بر درهم تنیدگی متغیرهای اقلیمی و انسانی در فرایند جنگل زدایی دارد.

مدل سازی پدیده های زیست محیطی مانند جنگل زدایی، به دلیل تنوع بالا، پیچیدگی روابط، و درهم تنیدگی متغیرهای مؤثر، نیازمند استفاده از چارچوب های آماری پیشرفته و انعطاف پذیر است. در این میان، مدل های خطی و جمعی تعمیم یافته دو ابزار آماری رایج برای تحلیل داده های اکولوژیکی و مکانی محسوب می شوند. اگرچه هر دو مدل در دسته ی مدل های رگرسیونی با توزیع های غیر نرمال قرار می گیرند، اما مدل جمعی تعمیم یافته با بهره گیری از توابع هموارکننده، نسبت به نوع خطی از انعطاف پذیری بسیار بالاتری برخوردار است و در بسیاری از موارد عملکرد دقیق تر و معنادارتری از خود نشان می دهد (Hastie & Tibshirani, 1990).

مطالعات تجربی و مقایسه ای فراوانی اثبات کرده اند که مدل های خطی در مقایسه با جمعی دارای خطای کمتر و دقت بالاتری در پیش بینی هستند، به ویژه در شرایطی که روابط متغیرها با پاسخ به صورت غیرخطی یا ناپارامتریک باشد (Sasikumar & Indira, 2019). در مطالعه حاضر نیز بررسی معیارهایی چون آکائیک، انحراف و سطح زیر منحنی نشان می دهد که مدل جمعی نسبت به خطی عملکرد بهتری در برآورد احتمال وقوع جنگل زدایی دارد. این افزایش دقت، به ویژه در برنامه ریزی مکانی و اولویت بندی مناطق پرخطر، اهمیت بالایی دارد.

نتیجه گیری کلی

در این پژوهش، با بهره گیری از رویکردهای آماری پیشرفته، به تحلیل و مدل سازی الگوهای مکانی جنگل زدایی در چارچوب یکی از طرح های جنگلداری شمال ایران پرداخته شد. استفاده هم زمان از دو مدل خطی و جمعی تعمیم یافته این امکان را فراهم کرد تا هم روابط خطی و هم روابط غیر خطی میان متغیرهای محیطی و انسانی با پدیده جنگل زدایی مورد ارزیابی قرار گیرند. نتایج این تحلیل ها نشان می دهند که مدل جمعی به دلیل انعطاف پذیری بالا در شناسایی الگوهای پیچیده، عملکرد دقیق تری در تبیین روابط حاکم بر جنگل زدایی در مقایسه با مدل خطی دارد و توانست سهم نسبی و نحوه اثرگذاری هر یک از عوامل مؤثر را با دقت و جزئیات بیشتری آشکار سازد.

از میان متغیرهای مورد بررسی، عوامل توپوگرافی نظیر ارتفاع از سطح دریا، شیب، و طول شیب، و همچنین عوامل انسانی نظیر فاصله از جاده، فاصله از سکونتگاه ها و مجاورت با

اراضی کشاورزی به عنوان مهم ترین محرک های جنگل زدایی شناسایی شدند. مدل جمعی نشان داد که رابطه بین این متغیرها و احتمال وقوع جنگل زدایی غالباً به صورت غیرخطی و همراه با آستانه های مشخص تغییرپذیر بود. به عنوان مثال، احتمال جنگل زدایی در ارتفاعات پایین تر از ۸۰۰ متر به طور قابل توجهی بالا است، در حالی که در ارتفاعات بالاتر از ۱۴۰۰ متر این احتمال کاهش می یابد. همچنین، فاصله از جاده و مناطق مسکونی نیز به صورت تابعی پیچیده بر الگوی جنگل زدایی اثر گذارند، به گونه ای که در فاصله های کم احتمال تخریب بالا است و در فواصل میانی کاهش می یابد، اما در برخی فواصل دورتر مجدداً افزایش می یابد که می تواند ناشی از گسترش فعالیت های انسانی به مناطق جدید باشد.

از نظر روش شناسی، کاربرد مدل جمعی در این مطالعه مزایای قابل توجهی نسبت به مدل های سنتی خطی ارائه داد. توانایی این مدل در استخراج الگوهای غیرخطی، نمایش اثرات جزئی و آستانه ای متغیرها، و نیز کاهش فرضیات محدودکننده، آن را به ابزاری کارآمد برای تحلیل پدیده های پیچیده زیست محیطی نظیر جنگل زدایی تبدیل کرده است. همچنین، نمودارهای وابستگی جزئی تولید شده توسط مدل جمعی، درک دقیق تری از نحوه تعامل متغیرهای مستقل با متغیر پاسخ ارائه داد و می تواند به عنوان مبنایی برای تصمیم گیری های مدیریتی و فضایی به کار رود.

یافته های این پژوهش، علاوه بر روشن ساختن محرک های اصلی جنگل زدایی در منطقه مطالعه شده، نشان می دهند که در تحلیل پدیده های اکولوژیکی، استفاده از مدل های منعطف و چندوجهی، مانند مدل جمعی تعمیم یافته، نه تنها موجب افزایش دقت پیش بینی می شود، بلکه به ارائه توصیه های سیاستی هدفمندتر نیز کمک می کند. بر این اساس، پیشنهاد می شود که برنامه ریزی های آتی در مدیریت منابع طبیعی و حفاظت از جنگل ها، با تکیه بر تحلیل های فضایی پیشرفته و بهره گیری از مدل های داده محور، طراحی و اجرا شوند تا بتوان با مداخلات هوشمندانه، روندهای مخرب جنگل زدایی را شناسایی، کنترل و معکوس کرد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش، بخشی از یافته های پروژه ملی «مدل سازی و پیش بینی احتمال جنگل زدایی در ناحیه ریشی هیرکانی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش های داده کاوی جنگل های استان مازندران» مؤسسه تحقیقات جنگل ها و مراتع کشور و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی ایران با شماره ۲۰۱۵۱-۰۲۰۰۹-۰۲۷-۰۹-۶۰-۱۲ است. بنا بر این، از همه دست اندرکاران اجرای پروژه مزبور صمیمانه قدردانی و تشکر می شود.

References

- Abdul-Nabi, S.S., Al Karaki, V., Khalil, A., & El Zahran, T. (2025). Climate change and its environmental and health effects from 2015 to 2022: A scoping review. *Heliyon*, 28, 11(3), e42315. <https://10.1016/j.heliyon.2025.e42315>

- Akbari, H., & Kalbi, S. (2019). Tree species diversity monitoring using GeoEye satellite image in Gardeshi forest district. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 26(2), 51–62. <https://sid.ir/paper/368839/en> [In Persian]
- Austin, K. G., Schwantes, A., Gu, Y., & Kasibhatla, P. S. (2019). What causes deforestation in Indonesia? *Environmental Research Letters*, 14(2), 24007. <https://www.10.1088/1748-9326/aaf6db>
- Avatefi Hemmat, M., Shamekhi, T., Zobeiry, M., Arab, D. R., & Ghazi Tabatabaei, M. (2013). Forest Degradation: an Investigation of Forestry Organization Experts and Local Herders' Mental Models. *Journal of Forest and Wood Product (Iranian Journal of Natural Resources)*, 66(1), 39–54. <https://10.22059/JFWP.2013.35340> [In Persian]
- Bagley, J. E., Desai, A. R., Harding, K. J., Snyder, P. K., & Foley, J. A. (2014). Drought and deforestation: has land cover change influenced recent precipitation extremes in the Amazon?. *Journal of Climate*, 27(1), 345–361. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00369.1>
- Bax, V., & Francesconi, W. (2018). Environmental predictors of forest change: an analysis of natural predisposition to deforestation in the tropical Andes region, Peru. *Applied Geography*, 91, 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.01.002>
- Bazgir, M., Hydari, M., Zeynali, N., & Kohzadean, M. (2020). Effect of land use change from forest to agriculture and abundance of agriculture on soil physical and chemical properties in zagros forest ecosystem. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22 (92), 201–214. <https://sid.ir/paper/364235/en> [In Persian]
- Bennett, G. L., Miller, S. R., Roering, J. J., & Schmidt, D. A. (2016). Landslides, threshold slopes, and the survival of relict terrain in the wake of the Mendocino Triple Junction. *Geology*, 44(5), 363–366. <https://doi.org/10.1130/G37530.1>
- Bijani-Nejad A, Fallah A, Jalilvand H, & Asadi H. (2024). Evaluation of Understory Plant Species Biodiversity in Buaxus hyrcana Habitats within Hyrcanian Forests. *Ecology of Iranian Forest*. 12(2), 41-58. <https://doi:10.61186/ifej.12.2.41> [In Persian]
- Bonsoms, J., & Ninyerola, M. (2024). Comparison of linear, generalized additive models and machine learning algorithms for spatial climate interpolation. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 1777–1792. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04725-5>
- Brun, C., Cook, A. R., Lee, J. S. H., Wich, S. A., Koh, L. P., & Carrasco, L. R. (2015). Analysis of deforestation and protected area effectiveness in Indonesia: A comparison of Bayesian spatial models. *Global Environmental Change*, 31, 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.02.004>
- Budniak, P., & Zięba, S. (2022). Effects of forest fragmentation on the volume of wood resources in managed. Pine-Dominated Forests in Poland. *Forests*, 13 (4), 590. <https://doi.org/10.3390/f13040590>
- Chavan, S. B., Reddy, C. S., Rao, S. S., & Rao, K. K. (2018). Assessing and predicting decadal forest cover changes and forest fragmentation in kinnerasani wildlife sanctuary, Telangana, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46, 729–735. <https://doi.org/10.1007/s12524-017-0739-x>
- De Frenne, P., Lenoir, J., Luoto, M., Scheffers, B. R., Zellweger, F., Aalto, J., Ashcroft, M. B., Christiansen, D. M., Decocq, G., De Pauw, K., Govaert, S., Greiser, C., Gril, E., Hampe, A., Jucker, T., Klimes, D. H., Koelemeijer, I. A., Lembrechts, J. J., Marrec, R., Meeussen, C., Ogée, J., Tyystjärvi, V., Vangansbeke, P., & Hylander, K. (2021). Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, 27(11), 2279–2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
- Depicker, A., Govers, G., Jacobs, L., Campforts, B., Uwihirwe, J., & Dewitte, O. (2021). Interactions between deforestation, landscape rejuvenation, and shallow landslides in the North Tanganyika–Kivu rift region, Africa. *Earth Surface Dynamics*, 9, 445–462. <https://doi.org/10.5194/esurf-9-445-2021>
- Dimobe, K., Ou' edraogo, A., Soma, S., Goetze, D., Porembski, S., & Thiombiano, A. (2015). Identification of driving factors of land degradation and deforestation in the wildlife Reserve of bontioli (Burkina Faso, west africa). *Global Ecology and Conservation*, 4, 559–571.
- Elith, J., Leathwick, J. R., & Hastie, T. (2008). A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 77–4, 802–813. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x>
- Engert, J. E., Souza, C. M., Kleinschroth, F., Bignoli, D. J., Costa, S. C. P., Botelho, J., Ishida, F. Y., Nursamsi, I., & Laurance, W. F. (2025). Explosive growth of secondary roads is linked to widespread tropical deforestation. *Current Biology*, 35(7), 1641–1648.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2025.02.017>
- FAO. (2021). Transformational change to reduce deforestation and climate change impacts. FAO, Rome, Italy, 62 p. <https://doi.org/10.4060/cb7314en> [In Persian]
- Ferrari, C., Evangelista, C., Basiricò, L., Castellani, S., Biffani, S., & Bernabucci, U. (2025). Application of a generalized additive mixed model in time series study of dairy cow behavior under hot summer conditions. *Journal of Dairy Science*, 108(2), 1554–1572. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25001>
- Firouzabadi, S. A., & Azimzadeh, D. (2012). Poverty and the environment (The case study in Sarkhoon and Bidele in Chahrmahal Va Bakhtiari Province). *Community Development*, 4(2), 99–120. <https://10.22059/JRD.2013.30288> [In Persian]

- Florence Pendrill, U., Persson, M., Godar, J., Kastner, T., Moran, D., Schmidt, S., & Wood, R. (2019). Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. *Global Environmental Change*, 56, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.03.002>.
- Fynn, I. E. M., & Campbell, J. B. (2019). Forest fragmentation analysis from multiple imaging formats. *Journal of Landscape Ecology*, 12 (1), 1–15. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2019-0001>.
- Hajjarian, M., Hosseinzadeh, O., & khalledi, F. (2016). Using combined madm approach for hyrcanian forests management. *Environmental Sciences*, 14 (3), 1–12. <https://sid.ir/paper/117511/en> [In Persian]
- Hastie T. J., & Tibshirani R. J. (1990). Generalized Additive Models, 2nd ed. Chapman and Hall, London. 16 pp.
- Karami, M., & Sarvestan, R. (2022). Locate solar panels using climate indices and GIS (Case study: Khuzestan). *Journal of Environmental Science and Technology*, 24 (2, 117), 169–180. <https://doi:10.30495/JEST.2022.27496.3652> [In Persian]
- Javanmiri Pour M. (2024). A Study on the Structure Complexity Index and Stand Quality in Managed Mixed Habitats in Kheyroud Fores. *Ecology of Iranian Forest*. 12(1), 99-112. <https://www.doi:10.61186/ifej.12.1.99> [In Persian]
- Kayet, N., Pathak, K., Kumar, S., Singh, C. P., Chowdary, V.M., Chakrabarty, A., Sinha, N., Shaik, I., & Ghosh, A. (2021). Deforestation susceptibility assessment and prediction in hilltop mining-affected forest region. *Journal of Environmental Management*, 289, 112504. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112504>
- Lemus-Canovas, M., Lopez-Bustins, J.A., Trapero, L., & Martin-Vide, J. (2019). Combining circulation weather types and daily precipitation modelling to derive climatic precipitation regions in the Pyrenees. *Atmospheric Research*, 220, 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.01.018>
- Marsik, M., Stevens, F. R., & Southworth, J. (2011). Amazon deforestation: rates and patterns of land cover change and fragmentation in Pando, northern Bolivia, 1986 to 2005. *Progress in Physical Geography*, 35 (3), 353–374. <https://www.10.1177/0309133311399492>
- Mazgajski, T. D., Zmihorski, & M., Abramowicz, K. (2010). Forest habitat loss and fragmentation in Central Poland during the last 100 years. *Silva Fennica*, 44(4), 715-723. <https://doi.org/10.14214/sf.136>.
- Mon, M. S., Mizoue, N., Htun, N. Z., Kajisa, T., & Yoshida, S. (2012). Factors affecting deforestation and forest degradation in selectively logged production forest: A case study in Myanmar. *Forest Ecology and Management*, 267, 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.036>
- Karamage, F., Shao, H., Chen, X., Ndayisaba, F., Nahayo, L., Kayiranga, A., Omifolaji, J. K., Liu, T., & Zhang, C. 2016. Deforestation effects on soil erosion in the Lake Kivu basin, D.R. Congo–Rwanda. *Forests*, 7(11), 281. <https://doi.org/10.3390/f7110281>
- Ogundele, A. T., & Adebisi, O. M. (2016). Deforestation in Nigeria: the needs for urgent mitigating measures. *International Journal of Geography. Geology and Environment*, 2(1), 15–26. <https://www.ajol.info/index.php/gjg/article/download/263708/248935>
- R Core Team. (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- Rezvani, M., & Hashemzadeh, F. (2013). Investigating the effective factors on forest degradation and impact of moving out livestock from district 14 of the northern forests of Iran: an environmental and economic perspective (Fuman). *Journal of Wood and Forest Science Technology*, 20(3), 125–138. <https://20.1001.1.23222077.1392.20.3.8.0> [In Persian]
- Sadeghi, A. (2019). The Hyrcanian Forests are the 24th monument in Iran to be registered as a UNESCO World Heritage Site. *Research in Social Studies Education*, 1(2). <https://sid.ir/paper/525478/fa>
- Sahana, M., Hong, H., Sajjad, H., Liu, J., & Zhu, A. X. (2018). Assessing deforestation susceptibility to forest ecosystem in Rudraprayag district, India using fragmentation approach and frequency ratio model. *Science of the Total Environment*, 627, 1264–1275. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2018.01.290>
- Sasikumar, R., & Indira, S. (2019). Impact of Climate Factors through GLM and GAM Methods. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8, 1221-1223.
- Silver, B., Spracklen, D. V., DellaSala, D. A., & Smith, C. (2024). Large Reductions in Temperate Rainforest Biome Due to Unmitigated Climate Change. *Earth's Future*, 12(11), e2024EF004812. <https://doi.org/10.1029/2024EF004812>
- Silvério, D. V. (2018). Data from: Fire, fragmentation, and windstorms: A recipe for tropical forest degradation. *Dryad Digital Repository*, <https://doi.org/10.5061/dryad.3g14b02>.
- Silvério, D. V., Brando, P. M., Bustamante, M. M. C., Putz, F. E., Marra, D. M., Levick, S. R., & Trumbore, S. E. (2018). Fire, fragmentation, and windstorms: A recipe for tropical forest degradation. *Journal of Ecology*, 107(2), 656–667. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13076>
- Smith, C., Baker, J. C. A. & Spracklen, D. V. (2023). Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. *Nature*, 615, 270–275 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05690-1>
- Vásquez-Grandón, A., Donoso, P. J., & Gerding, V. (2018). Forest Degradation: When Is a Forest Degraded? *Forests*, 9 (11), 726. <https://doi:10.3390/f9110726>
- Wang, H., & Qiu, F. (2017). Investigating the Impact of Agricultural Land Losses on Deforestation: Evidence from a Peri-urban Area in Canada. *Ecological Economics*, 139, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.04.002>.

- Wood, S.N., (2017). Generalized additive models: an introduction with R. CRC press. <http://reseau-mexico.fr/sites/reseau-mexico.fr/files/igam.pdf>
- Worku, A. (2023). Review on drivers of deforestation and associated socio-economic and ecological impacts. *Advances in Agriculture. Food Science and Forestry*, 11(1), 1–12. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- Zeng, Z., Wang, D., Yang, Wu, J., Ziegler, A. D., Liu, M., Ciais, P., Searchinger, T. D., Yang, Z. L., Chen, D., Chen, A., Li, L. Z. X., Piao, S., Taylor, D., Cai, X., Pan, M., Peng, L., Lin, P., Gower, D., Feng, Y., Zheng, C., Guan, K., Lian, X., Wang, T., Wang, L., Jeong, S-J., Wei, Z., Sheffield, J., Caylor K., & Wood, E. F. (2021). Deforestation-induced warming over tropical mountain regions regulated by elevation. *Nature Geoscience*, 14, 23–29. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-00666-0>