



ارتقاء دقت نقشه‌ها با گذار از مدل لجستیک به جمعی تعمیم یافته (پهنه‌بندی احتمال تخریب پوشش جنگلی در حوزه جنگلداری ناو اسالم در محیط GIS

و (R)

سعید شعبانی^{۱*}، مسعود علی دوست^۲، شهریار صبح‌زاهدی^۳، بهروز محسنی^۴

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۶ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۴ دسترسی اینترنتی: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

چکیده

با افزایش روند تخریب پوشش جنگلی در جنگل‌های
هیرکانی، نیاز به مدل‌سازی دقیق و پیش‌بینانه برای شناسایی
مناطق بحرانی پیش‌ازپیش احساس می‌شود. این پژوهش با

هدف بهبود دقت

سعید شعبانی (✉)، مسعود علی دوست^۲، شهریار صبح‌زاهدی^۳، بهروز محسنی^۴

۱. استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و
منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان،
ایران

۲. پژوهشگر بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و
منابع طبیعی استان گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت،
ایران

۳. پژوهشگر بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و
منابع طبیعی استان گیلان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، رشت،
ایران

۴. استادیار، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و
منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان،
ایران

Doi: 10.82447/girs.2025.1205013

پست الکترونیکی مسئول مکاتبات: s.shabani@areeo.ac.ir

نقشه‌های پهنه‌بندی احتمال تخریب پوشش جنگلی، عملکرد مدل
لجستیک و مدل جمعی تعمیم یافته را در محیط GIS و R مقایسه
کرده است. منطقه مورد مطالعه، حوزه جنگلداری ناو اسالم در
غرب جنگل‌های گیلان است که با چالش‌های متعددی نظیر
گسترش اراضی کشاورزی، جاده‌سازی و افزایش سکونت‌گاه‌های
انسانی مواجه است. در این مطالعه، تعداد ۱۴ متغیر محیطی و
انسانی به عنوان عوامل مؤثر اولیه شناسایی شد. پس از بررسی
هم‌خطی بین متغیرها و حذف سه متغیر شامل جهت، شکل زمین و
انحنای دامنه به دلیل هم‌خطی بالا، ۱۱ متغیر باقی‌مانده به عنوان
ورودی در هر دو مدل رگرسیونی مورد استفاده قرار گرفتند. مدل
جمعی تعمیم یافته توانست با برازش روابط غیرخطی، ساختار
پیچیده و آستانه‌دار تأثیر متغیرهایی همچون فاصله از مناطق
مسکونی، فاصله از جاده، نزدیکی به اراضی کشاورزی، اثر باد و
ارتفاع از سطح دریای آزاد را آشکار سازد؛ درحالی‌که مدل
لجستیک این روابط را صرفاً به صورت خطی تحلیل می‌کرد. نتایج
نشان داد که مدل جمعی تعمیم یافته با سطح زیر منحنی عملکرد
برابر ۰/۹۷۸، شاخص کاپای ۰/۸۷، حساسیت ۰/۹۵ و ویژگی
۰/۹۳، نسبت به مدل لجستیک (با سطح زیر منحنی عملکرد

توجه به وجود هم‌خطی بین برخی متغیرها، سه عامل شامل جهت شیب، شکل زمین و انحنای دامنه از تحلیل نهایی حذف شدند تا دقت مدل‌سازی افزایش یابد و اثرات واقعی متغیرها بهتر ارزیابی شوند. در این تحقیق، فرآیند تخریب جنگل به‌عنوان تبدیل غیرقابل بازگشت اکوسیستم‌های جنگلی به کاربری‌های غیرجنگلی تعریف شد که در بازه‌های میان‌مدت قابلیت احیا ندارند و ناشی از ترکیبی از مداخلات انسانی، مانند توسعه زمین‌های کشاورزی، جاده‌سازی و سکونتگاه‌ها، و عوامل طبیعی، مانند باد و تغییرات اقلیمی، است. داده‌های میدانی شامل ۱۵۶ کانون تخریب جنگل با دقت مکانی بالا بودند و به منظور آموزش و اعتبارسنجی مدل‌ها، ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای ارزیابی مدل‌ها اختصاص یافت. ارزیابی عملکرد مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های سطح زیر منحنی عملکرد و ضریب کاپا صورت گرفت.

نتایج و بحث: نتایج حاصل از مدل رگرسیون لجستیک نشان داد که ارتفاع از سطح دریا، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از اراضی کشاورزی، بارش سالانه و پارامترهای دمایی (کمینه و میانگین) اثرات معناداری بر احتمال تخریب جنگل دارند. مدل جمعی تعمیم‌یافته با انعطاف‌پذیری بیشتر، توانست الگوهای غیرخطی و پیچیده ارتباط بین عوامل محیطی و انسانی و وقوع تخریب جنگل را بهتر شبیه‌سازی کند. بررسی تابع وابستگی جزئی متغیرها نشان داد که احتمال تخریب جنگل با افزایش فاصله از جاده تا حدود ۱۰۰۰ متر کاهش یافته و سپس روندی افزایشی ملایم پیدا می‌کند، که بیانگر نقش جاده‌ها به‌عنوان تسهیل‌کننده دسترسی و شدت‌دهنده تخریب است. فاصله از مناطق مسکونی روند غیرخطی داشته و تا محدوده ۴۵۰۰ متر، احتمال تخریب کاهش می‌یابد، اما در نزدیکی سکونتگاه‌ها، فشارهای انسانی باعث افزایش شدت تخریب می‌شود. همچنین، فاصله از اراضی کشاورزی با روندی موج‌دار و نوسانی مرتبط با احتمال تخریب بود، زیرا مجاورت با زمین‌های زراعی و مراتع، فشار مستمر برای گسترش اراضی کشاورزی ایجاد می‌کند. ارتفاع از سطح دریا به طور پیوسته با کاهش احتمال تخریب همراه بود، به گونه‌ای که مناطق بالاتر نسبت به فعالیت‌های انسانی کمتر در معرض تخریب قرار دارند. این کاهش تدریجی به دلیل دسترسی دشوار، افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و محدودیت‌های طبیعی در مناطق مرتفع است، در حالی که مناطق کم‌ارتفاع‌تر به شدت تحت تأثیر توسعه کشاورزی، ساخت‌وساز و سایر فعالیت‌های انسانی قرار دارند. اثر باد نیز به صورت غیرخطی عمل می‌کند؛ در ابتدا کاهش

۰/۸۹۵، شاخص کاپای برابر ۰/۷۳، حساسیت ۰/۸۵ و ویژگی دقت بالاتری در پیش‌بینی مناطق تخریب‌شده دارد. مقایسه عملکرد دو مدل با آزمون *DeLong* نشان داد که تفاوت *AUC* برابر ۰/۰۸۳ است و این اختلاف با سطح معنی‌داری $p\text{-value} < 0.01$ معنادار است؛ همچنین فاصله اطمینان ۹۵ درصد این تفاوت در بازه (۰/۰۳۵ تا ۰/۱۳۱) قرار دارد که برتری دقت پیش‌بینی مدل جمعی تعمیم‌یافته را تأیید می‌کند. یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که استفاده از مدل‌های انعطاف‌پذیر مانند مدل جمعی تعمیم‌یافته می‌تواند ابزار مؤثری در پهنه‌بندی خطر، ارزیابی محیط‌زیستی و طراحی سیاست‌های حفاظتی باشد؛ به‌ویژه در اکوسیستم‌های ناهمگن و پیچیده مانند جنگل‌های هیرکانی، که تخریب آن‌ها تحت تأثیر تعامل عوامل طبیعی و انسانی است.

چکیده مبسوط

طرح مسئله: پوشش‌های جنگلی هیرکانی در شمال ایران، با گونه‌های گیاهی ویژه و تنوع زیستی غنی، در حفظ تعادل زیست‌محیطی منطقه، مدیریت جریان‌های آب، جلوگیری از فرسایش خاک، و کاهش پیامدهای ناشی از گرمایش جهانی، جایگاه مهمی دارند. با این حال، این اکوسیستم‌ها تحت فشار مضاعف عوامل انسانی و محیطی قرار دارند و تخریب پوشش جنگلی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت منابع طبیعی تبدیل شده است. توانایی شبیه‌سازی و پیش‌بینی دقیق نواحی آسیب‌پذیر، ابزاری حیاتی برای برنامه‌ریزی حفاظتی و توسعه پایدار جنگل‌ها محسوب می‌شود.

هدف: هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی و مقایسه عملکرد دو مدل آماری، شامل رگرسیون لجستیک و مدل جمعی تعمیم‌یافته، برای پهنه‌بندی دقیق تخریب جنگل در منطقه جنگلداری ناو اسالم بود تا بتوان رابطه پیچیده بین عوامل محیطی و انسانی و فرآیندهای تخریب جنگل را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرد.

روش تحقیق: در این پژوهش، ۱۴ متغیر محیطی و انسانی شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب، جهت شیب، طول شیب، انحنای دامنه، شکل زمین، اثر باد، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، فاصله از زمین‌های کشاورزی، بارش سالانه، کمینه دما، میانگین دما و بیشینه دما به عنوان پیش‌بین‌های مؤثر بر تخریب جنگل شناسایی شدند. با

نتیجه‌گیری: نتایج این مطالعه پیامدهای عملی و مدیریتی مهمی دارند. استفاده از مدل‌های غیرخطی پیشرفته، به ویژه مدل جمعی تعمیم‌یافته، می‌تواند به عنوان ابزار اصلی در پهنه‌بندی مناطق حساس به تخریب جنگل و ارزیابی اثرات فشارهای انسانی و محیطی مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس یافته‌ها، طراحی نوارهای حفاظتی چندمنظوره در نزدیکی جاده‌ها و اراضی کشاورزی توصیه می‌شود تا فشارهای انسانی کاهش یافته و روند تخریب مهار شود. همچنین، در مناطقی که تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، کمبود بارش و دمای بالاتر

واژگان کلیدی: تخریب جنگل، جنگل‌های هیرکانی، مدل جمعی تعمیم‌یافته، مدل‌سازی فضایی

۸۹

مقدمه

جنگل‌های هیرکانی یکی از ارزشمندترین اکوسیستم‌های جنگلی جهان محسوب می‌شوند. این جنگل‌ها که قدمتی بیش از ۲۵ میلیون سال دارند، به‌عنوان یکی از معدود بازماندگان جنگل‌های دوران سوم زمین‌شناسی شناخته می‌شوند (۳۷). جنگل‌های هیرکانی با پوشش گیاهی منحصربه‌فرد و تنوع زیستی بالا، نقش مهمی در تنظیم چرخه‌های هیدرولوژیکی، تثبیت خاک، و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی ایفا می‌کنند. با این حال، روند تخریب پوشش جنگلی در این منطقه به یکی از چالش‌های اساسی تبدیل شده که نتیجه تعامل عوامل انسانی و محیطی است (۲).

تخریب جنگل فرآیندی پیچیده و چندعاملی است که معمولاً با محرک‌های اولیه آغاز شده و به تدریج شدت می‌یابد (۸). این پدیده ناشی از دو دسته عوامل طبیعی و انسانی است. تغییرات اقلیمی، خشک‌سالی‌های مکرر، افزایش دمای زمین، آتش‌سوزی‌های گسترده، شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی، رانش زمین، و تغییرات در الگوی بارندگی می‌توانند تخریب جنگل‌ها را تسریع کنند (۶). در مقابل، عوامل انسانی همچون توسعه شهری و روستایی، بهره‌برداری غیرمجاز از منابع جنگلی، تغییرات کاربری زمین، و فعالیت‌های کشاورزی، فشار فزاینده‌ای بر منابع جنگلی وارد می‌کنند و موجب کاهش سطح پوشش جنگلی می‌شوند (۳۳).

پس از شروع تخریب، پوشش جنگلی به تدریج کاهش می‌یابد و پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی آن نمایان می‌شود. در این مرحله، جنگل‌های دست‌نخورده به اراضی باز تبدیل شده و ظرفیت اکولوژیکی آن‌ها کاهش می‌یابد (۲۵). کاهش تراکم درختان، افزایش فرسایش خاک، تغییرات در تعادل دمایی محلی، و کاهش تنوع زیستی از مهم‌ترین نشانه‌های این مرحله محسوب می‌شوند (۲۶). همچنین، تغییر کاربری زمین از جنگل به دیگر انواع اراضی مانند زمین‌های کشاورزی، مناطق مسکونی، و صنعتی، شدت تخریب پوشش جنگل را افزایش می‌دهد.

با افزایش سرعت تخریب پوشش درختی، اثرات مخرب آن نیز تشدید می‌شود. افزایش احتمال وقوع سیلاب‌ها، انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشدید تغییرات اقلیمی، برهم خوردن تعادل اکولوژیکی، و کاهش جمعیت گونه‌های وابسته به جنگل، تنها بخشی از پیامدهای این روند هستند (۲۷). در صورت ادامه تخریب، مناطق جنگلی کاملاً از بین رفته و قابلیت احیا و بازسازی طبیعی خود را از دست می‌دهند. کنترل این روند تنها از طریق برنامه‌های احیای جنگل، مدیریت پایدار منابع جنگلی، و اعمال سیاست‌های حفاظتی امکان‌پذیر است.

با توجه به ماهیت چندعاملی تخریب جنگل، شناسایی و مدل‌سازی دقیق این پدیده اهمیت بالایی دارد. روش‌های تحلیل داده‌های محیط‌زیستی در دهه‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته‌اند و استفاده از مدل‌های آماری و ریاضی برای بررسی روندهای مکانی و زمانی تخریب پوشش جنگل به یک راهکار اساسی در مطالعات اکولوژیکی تبدیل شده است (۳۵). در این میان، مدل جمعی تعمیم‌یافته به‌عنوان ابزار تحلیلی قدرتمند شناخته می‌شوند که امکان بررسی تأثیرات متغیرهای مختلف بر پدیده‌های محیطی را فراهم می‌کنند (۴).

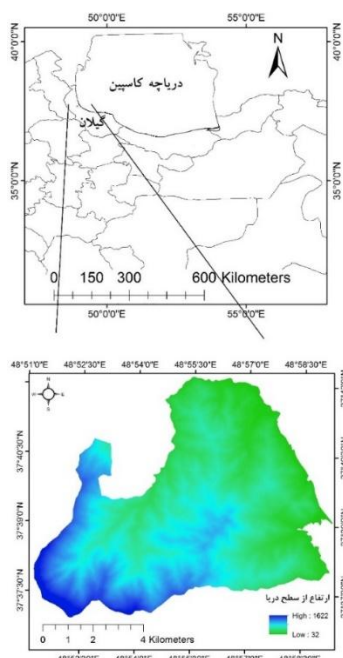
مدل‌های جمعی تعمیم‌یافته (Generalized Additive Model: GAM) نوع ارتقاءیافته مدل‌های خطی تعمیم تعمیم‌یافته (Generalized Linear Model: GLM) می‌باشند (۱۸). GLM یکی از روش‌های متداول برای تحلیل داده‌های محیطی و اکولوژیکی است که قابلیت پردازش متغیرهای وابسته با توزیع‌های مختلف را دارد (۱۱). این مدل، با بسط مدل‌های رگرسیونی کلاسیک مانند مدل لجستیک، بسیار کارآمد است. در مقابل، مدل‌های جمعی تعمیم‌یافته رویکرد منعطفی دارند و از توابع اسپلاین برای مدل‌سازی روابط پیچیده میان متغیرها بهره می‌برد. این ویژگی‌ها، GAM را به گزینه‌ای مناسب برای تحلیل روابط غیرخطی و بررسی روندهای فضایی و زمانی تخریب پوشش تبدیل کرده است (۲۴).

منطقه مورد مطالعه

به منظور اجرای پژوهش حاضر به علت وجود عوامل متعدد تخریب جنگل مانند گسترش زمین‌های کشاورزی، مناطق مسکونی، دامداری‌ها و آتش‌سوزی، طرح جنگلداری ناو اسالم در استان گیلان در نظر گرفته شده است. منطقه مورد مطالعه جزء جنگل‌های هیرکانی با اقلیم معتدله است که دارای زمستانی متعادل و تابستانی گرم و خشک می‌باشد. مطالعه موردی استان گیلان در سه سری جنگلداری از سری‌های چهارده‌گانه حوزه آبخیز ناو اسالم، در حدود ۳۰ کیلومتری شهرستان رضوان‌شهر در غرب جنگل‌های استان گیلان است انجام می‌شود که دارای طول جغرافیایی $48^{\circ} 54'$ تا $48^{\circ} 57'$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 39'$ تا $37^{\circ} 42'$ شمالی می‌باشد (شکل ۱). مساحت منطقه تحت بررسی بیش از ۶۰۰۰ هکتار و محدوده ارتفاعی آن حداقل ۳۲ و حداکثر ۱۶۲۲ متر از سطح دریای آزاد است.

پژوهش‌های پیشین در زمینه تخریب جنگل عمدتاً به بررسی اثرات عوامل انسانی پرداخته‌اند، اما ضرورت دارد که تعامل میان عوامل طبیعی و انسانی نیز مورد بررسی قرار گیرد (۱ و ۳). این پژوهش با هدف مدل‌سازی رگرسیونی احتمال تخریب جنگل با استفاده از دو مدل رگرسیون لجستیک و GAM در جنگل‌های هیرکانی انجام شده است. بررسی دقیق این مناطق، امکان ارائه راهکارهای مدیریتی و حفاظتی بهینه برای کاهش اثرات مخرب این پدیده را فراهم خواهد کرد. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر عوامل انسانی متمرکز بوده‌اند، این تحقیق با رویکردی جامع، تعامل عوامل طبیعی و انسانی را بررسی کرده و الگوی دقیقی از روندهای تخریب ارائه می‌دهد. همچنین، با مقایسه سیستماتیک کارایی مدل‌های ذکرشده، شرایط بهینه استفاده از هر یک در پیش‌بینی روندهای تخریب شناسایی شده و راه برای توسعه مدل‌های ترکیبی دقیق‌تر در مطالعات آینده هموار خواهد شد.

روش تحقیق



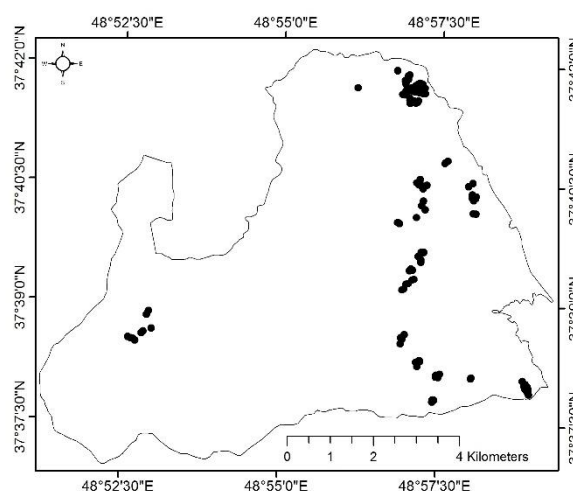
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig 1. Location of the study area

روش پژوهش

این تحقیق یک مطالعه تطبیقی-پیشبینانه کمی-مکانی است که با هدف ارتقای دقت پیش‌بینی تخریب جنگل از طریق مقایسه دو مدل آماری رگرسیون لجستیک و GAM در محیط GIS و R طراحی و اجرا شده است. این پارادایم بر پایه مطالعات پیشین استوار است که تأکید می‌کنند الگوهای مکانی تخریب جنگل تحت تأثیر ترکیب ثابتی از عوامل محیطی و انسانی تکرارپذیر هستند (۳۹). در این مطالعه، تخریب جنگل به فرآیند غیرقابل بازگشتی اطلاق می‌شود که در آن اکوسیستم‌های جنگلی به دلیل مداخلات انسانی یا بلایای طبیعی به کاربری‌های غیرجنگلی تبدیل می‌شوند، بدون آنکه در بازه‌های زمانی میان‌مدت قابلیت احیا داشته باشند (۳۸ و ۴۰). در منطقه مطالعاتی ناو اسالم گیلان،

۱۵۶ کانون تخریب جنگل با دقت مکانی ثبت و مستندسازی شدند (شکل ۲). تحلیل اولیه توزیع مکانی کانون‌های ثبت شده تخریب جنگل نشان‌دهنده الگوی خوشه‌ای در پراکنش داده‌ها است. این تمرکز فضایی عمدتاً در مجاورت زیرساخت‌های انسانی از جمله جاده‌های دسترسی، مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی مشاهده می‌شود. رفتار خوشه‌ای داده‌ها حاکی از آن است که فرآیند تخریب پوشش جنگلی، صرفاً تصادفی یا پراکنده نبوده، بلکه تحت تأثیر مستقیم عوامل انسانی و موقعیت‌های جغرافیایی خاص قرار دارد. این الگوی مکانی می‌تواند بیانگر نقش مهم نزدیکی به مراکز انسانی در تشدید فشار بر جنگل‌ها باشد و ضرورت توجه بیشتر به این متغیرها را در مدل‌سازی‌های بعدی نشان می‌دهد.



شکل ۲. موقعیت مکانی پهنه‌های تحت تأثیر تخریب جنگل در محدوده مورد پژوهش.

Fig 2. Location of forest degradation in the study area

الف- پیش‌پردازش داده‌ها: ۱۴ شاخص تأثیرگذار شامل ویژگی‌های فیزیوگرافی (ارتفاع از سطح دریا، شیب، طول شیب)، اقلیمی (اثر باد، بارش و دما) و عوامل انسانی (فاصله از جاده‌ها، فاصله از مناطق مسکونی، نزدیکی به اراضی کشاورزی) از منابع معتبر استخراج شد. تمامی لایه‌های اطلاعاتی پس از یکسان‌سازی دقت مکانی (۱۲/۵ متر × ۱۲/۵ متر) در محیط

برای انجام دقیق و منسجم مطالعات پهنه‌بندی خطر، لازم است داده‌های مختلف محیطی در قالب یک سیستم هماهنگ جمع‌آوری، پردازش و تفسیر شوند. در این پژوهش، با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی و تکنیک‌های داده‌کاوی، داده‌های خام به لایه‌های اطلاعاتی قابل تحلیل تبدیل شدند. فرایند انجام تحقیق در سه مرحله اصلی دنبال شد:

وجود دارد که برخی از متغیرها آستانه‌های بحرانی یا الگوهای واکنش پیچیده‌ای از خود نشان دهند.

رگرسیون لجستیک نوعی از مدل GLM است که رابطه بین متغیرهای مستقل و احتمال رخداد یک پاسخ دودویی را مدل‌سازی می‌کند؛ در نتیجه می‌توان با استفاده از پارامترهای برآوردشده احتمال رخداد (به‌عنوان یک متغیر پیوسته بین ۰ و ۱) را پیش‌بینی کرد و در صورت نیاز آن را با آستانه‌گذاری مناسب به خروجی‌های طبقه‌ای تبدیل نمود (۱۲). این مدل از تابع پیوند لجیت برای تبدیل داده‌های ورودی به احتمال وقوع پدیده موردنظر استفاده می‌کند. تابع این مدل در رابطه‌های ۱ و ۲ بیان شده است:

$$P = \frac{e^Z}{1 + e^Z} \quad [1]$$

$$Z = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n \quad [2]$$

در این روابط p احتمال وقوع جنگل‌زدایی، Z معادله خطی چندگانه حاصل‌شده از تابع لجیت که همان متغیر وابسته یا پاسخ است، β_0 عرض از مبدأ، β_1 تا β_n ضرایب مدل و X_1 تا X_n متغیرهای پیش‌بین هستند (۱۲). ضرایب این مدل با استفاده از روش بیشینه‌سازی درست‌نمایی برآورد شده و نشان‌دهنده میزان تأثیر متغیرهای مختلف بر وقوع تخریب جنگل هستند. در مرحله نهایی، مدل روی داده‌های مکانی در منطقه مورد مطالعه اعمال شد.

GAM، مدل آماری پیشرفته‌ای است که در برخی موارد در حوزه یادگیری ماشین نیز به‌کاررفته است (۱۹ و ۲۳). GAM با انعطاف‌پذیری بالا در برازش روابط غیرخطی، چارچوبی کارآمد برای مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده محیطی مانند تخریب جنگل ارائه می‌دهند. برخلاف مدل‌های خطی که نوع رابطه میان متغیرها را از پیش مشخص می‌کنند، مدل GAM با استفاده از داده‌ها، شکل واقعی این رابطه را شناسایی می‌کند و قادر است الگوهای غیرخطی و آستانه‌های اکولوژیک را آشکار سازد (۱۲). این روش به‌ویژه در مواردی که عوامل محرک پدیده موردنظر،

نرم‌افزاری Arc GIS 10.8 یکپارچه شدند. به دلیل وجود همبستگی بالا و تورم واریانس، سه متغیر جهت شیب، شکل زمین و انحنای دامنه از مدل نهایی حذف شدند (۳۱).

ب- یکپارچه‌سازی لایه‌ها: داده‌های توپوگرافی با تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر از مدل رقومی ارتفاعی مشتق شدند، درحالی‌که داده‌های اقلیمی پس از کنترل کیفی (شامل حذف نقاط پرت و تکمیل مقادیر مفقود) از شبکه ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه به‌دست آمدند. برای تبدیل داده‌های نقطه‌ای به سطح پیوسته، از الگوریتم وزن‌دهی معکوس فاصله استفاده شد که با توجه به تراکم مناسب ایستگاه‌ها و سادگی محاسبات، گزینه بهینه‌ای برای برآورد پارامترهای جوی محسوب می‌شود (۱۶). مبانی این روش بر اصل کاهش تأثیرپذیری از نقاط دورتر استوار است که منجر به تولید لایه‌های با خطای کمتر می‌گردد.

پ- مدل‌سازی پیش‌بینانه: با اتخاذ رویکرد دودویی، پهنه‌های واجد تخریب جنگل (مقدار ۱) و مناطق دست‌نخورده (مقدار ۰) به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شدند (۳۱). این چارچوب آماری امکان بررسی رابطه بین مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل و پیامدهای دودویی را فراهم می‌کند. در این راستا، دو مدل رگرسیون لجستیک و GAM به‌عنوان چارچوب‌های اصلی تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند.

با توجه به ماهیت پیچیده و چندبعدی پدیده تخریب پوشش جنگل، این مطالعه با به‌کارگیری یک رویکرد ترتیبی در مدل‌سازی، امکان ارزیابی تدریجی عملکرد مدل‌ها را فراهم می‌نماید. ابتدا مدل لجستیک به عنوان پایه‌ای برای درک روابط اولیه بین متغیرهای پیش‌بین و رخداد تخریب جنگل مورد استفاده قرار گرفت. سپس، با ارتقای ساختار مدل به فرم جمعی، این امکان ایجاد شد تا غیرخطی بودن ذاتی روابط بین عوامل محیطی و تخریب جنگل بهتر شناسایی شود. این گذار از مدل‌سازی خطی به غیرخطی، امکان بررسی دقیق‌تر تأثیر متقابل عوامل محرک را فراهم می‌آورد، به‌ویژه زمانی که این امکان

نتایج

تحلیل واریانس مدل خطی تعمیم‌یافته با استفاده از آزمون نسبت درست‌نمایی نشان داد که از ۱۱ متغیر وارد شده به مدل لجستیک، متغیرهایی که اثرشان در حضور سایر پیشگوها معنادار نبودند به طور خودکار کنار گذاشته شدند و در مدل نهایی هفت متغیر معنادار باقی ماندند. مقادیر p -value برای هفت متغیر ارتفاع از سطح دریا، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، نزدیکی به اراضی کشاورزی، بارش، کمینه دما و میانگین دما کمتر از سطح معنی‌داری ۰/۰۱ می‌باشد، که نشان‌دهنده تأثیر آماری قوی هر یک از آن‌ها بر متغیر وابسته (احتمال تخریب جنگل) است (جدول ۱). در این میان، سه متغیر ارتفاع از سطح دریا، نزدیکی به اراضی کشاورزی، و بارش دارای بیشترین مقدار آماره آزمون و در نتیجه بیشترین سهم در کاهش انحراف مدل هستند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که این سه متغیر نقش تعیین‌کننده‌تری در شکل‌گیری الگوی تخریب جنگل دارند.

ضرایب برآورد شده در مدل رگرسیون لجستیک بیانگر اثر هر متغیر بر لگاریتم شانس وقوع تخریب جنگل هستند. در این مدل، تمامی متغیرهای مستقل (به جز مقدار پایه) دارای ضرایب معنی‌داری بودند که هم‌راستا با نتایج آزمون نسبت درست‌نمایی است (جدول ۲).

بر اساس یافته‌ها با افزایش ارتفاع از سطح دریای آزاد، احتمال وقوع تخریب جنگل به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. هرچه فاصله از جاده بیشتر باشد، احتمال تخریب جنگل کاهش می‌یابد. همانند جاده، نزدیکی به سکونت‌گاه‌های انسانی نیز احتمال تخریب را افزایش

می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که اراضی جنگلی در مجاورت زمین‌های کشاورزی بیشتر در معرض تخریب هستند. با افزایش بارندگی سالانه، احتمال تخریب جنگل کاهش می‌یابد. افزایش دمای حداقل سالانه با افزایش احتمال تخریب جنگل همراه

دارای برهم‌کنش‌های فضایی یا پاسخ‌های ناهمگن هستند، مزیت محسوسی دارد. پارامترهای هموارسازی با روش اعتبارسنجی متقابل بهینه‌سازی شدند تا از بیش‌برازش جلوگیری شود. در نهایت، خروجی مدل این مدل نیز روی داده‌های مکانی اعمال شده و مناطق بحرانی تخریب مشخص می‌گردند.

در مجموع، مدل خطی تعمیم‌یافته بر تحلیل روابط آماری میان متغیرها تمرکز دارد، درحالی‌که مدل جمعی تعمیم‌یافته از قدرت یادگیری ماشین برای بهبود دقت پیش‌بینی بهره می‌برد. ترکیب این دو مدل در یک پژوهش می‌تواند منجر به تحلیل جامع‌تر و قابل‌اعتمادتر از الگوهای تخریب جنگل شود. بعد از اعمال داده‌های مکانی در هر دو مدل روی منطقه مورد مطالعه، نقشه نهایی هر مدل به‌صورت جداگانه با روش شکستگی‌های طبیعی در چهار طبقه احتمال تخریب پایین، متوسط، زیاد و خیلی زیاد گروه‌بندی شدند (۳۰).

ارزیابی مدل‌ها

برای سنجش میزان بهبود مدل‌سازی، از مجموعه‌ای از چهار معیار سطح زیر منحنی عملکرد، شاخص ضریب کاپا، حساسیت و ویژگی استفاده شد (۱۲، ۱۸ و ۳۱). همچنین آزمون DeLong به منظور سنجش معناداری دقت دو مدل مورد استفاده قرار گرفت. این رویکردهای مقایسه‌ای نه تنها قابلیت پیش‌بینی هر مدل را می‌سنجند، بلکه توانایی آن‌ها در شناسایی الگوهای مکانی-زمانی تخریب جنگل را نیز مورد ارزیابی قرار می‌دهد. برای اطمینان از قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج، مدل‌های توسعه‌یافته بر روی زیرمجموعه‌ای مستقل از داده‌های تخریب پوشش جنگل که در فرآیند آموزش استفاده نشده بودند، مورد آزمون قرار گرفتند. داده‌ها به صورت تصادفی به دو بخش آموزش (۷۰ درصد) و اعتبارسنجی (۳۰ درصد) تقسیم شدند.

است. مشابه با کمینه دما، افزایش میانگین دما نیز موجب افزایش احتمال تخریب می‌شود.

جدول ۱. نتایج تحلیل واریانس مدل خطی تعمیم‌یافته با آزمون نسبت درست‌نمایی.

Table 1. Results of analysis of variance for the GLM using the Likelihood Ratio Test (LRT)

متغیرهای پیشگو	درجه آزادی	انحراف	معیار آکائیک	آزمون نسبت درست‌نمایی	احتمال معنی‌داری
Predictor variables	Degree of freedom	Deviance	AIC	LRT	<i>p-value</i>
<None>	-	173.29	189.29	-	-
ارتفاع از سطح دریا (متر) Altitude (m)	1	208.09	222.09	34.80	0.0000
فاصله از جاده (متر) Distance from roads (m)	1	180.43	194.43	7.14	0.0075
فاصله از مناطق مسکونی (متر) Distance from Residential areas (m)	1	183.53	197.53	10.24	0.0014
نزدیکی به اراضی کشاورزی (متر) Distance from agricultural land (m)	1	196.99	210.99	23.70	0.0000
بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)	1	195.48	209.48	22.20	0.0000
کمینه دما (درجه سانتی‌گراد) Minimum Temperature (°C)	1	192.31	203.31	19.02	0.0000
میانگین دما (درجه سانتی‌گراد) Mean temperature (°C)	1	192.45	206.45	19.16	0.0000

جدول ۲. ضرایب برآورد شده مدل رگرسیون لجستیک برای پهنه‌بندی تخریب پوشش جنگلی.

Table 2. Estimated coefficients of the GLM for Mapping Forest Degradation

متغیرهای پیشگو	ضریب	اشتباه معیار	مقدار آماره Z	مقدار p
----------------	------	--------------	---------------	---------

Predictor variables	Coefficient	Standard of Error	Z-value	p-value
Intercept	10810	2858	3.78	0.0000
ارتفاع از سطح دریا (متر)	-0.01	0.002	-5.14	0.0000
Altitude (m)				
فاصله از جاده (متر)	-0.002	0.0006	-2.59	0.0095
Distance from roads (m)				
فاصله از مناطق مسکونی (متر)	-0.002	0.0009	-2.81	0.0049
Distance from Residential areas (m)				
نزدیکی به اراضی کشاورزی (متر)	-0.003	0.0006	-4.29	0.0000
Distance from agricultural land (m)				
بارش (میلی متر)	-1.30	0.32	-4.02	0.0000
Precipitation (mm)				
کمینه دما (درجه سانتی گراد)	2077	549.6	3.78	0.0002
Minimum Temperature (°C)				
میانگین دما (درجه سانتی گراد)	2382	628.5	3.79	0.0001
Mean temperature (°C)				

Intercept: مقدار پایه لجیت احتمال تخریب جنگل، زمانی که تمام متغیرها صفر باشند.

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

بر اساس تحلیل داده‌ها، مدل GAM با تابع پیوند لجیت برازش شد و نتیجه در رابطه ۳ نمایش داده شده است. میزان ضریب اهمیت نسبی هر متغیر پیش‌بین در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس میزان ضرایب اهمیت نسبی، سهم متغیرهای انسانی دخیل در جنگل‌زدایی بیش از عوامل محیطی و اقلیمی مورد بررسی می‌باشد. سه متغیر فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی و نزدیکی به اراضی کشاورزی بیش از ۵۶ درصد از تغییرات جنگل‌زدایی را در منطقه مورد مطالعه تبیین می‌کنند. این نشان‌دهنده نقش غالب عوامل انسانی در فرآیند تخریب جنگل

نسبت به عوامل طبیعی است. نمودار وابستگی جزئی هر متغیر نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج نمودار وابستگی جزئی هر متغیر تبیینی در مدل GAM، عامل ارتفاع از سطح دریا روندی یکنواخت و کاهشی از ابتدا تا انتهای بازه مقادیر داشته است. به عبارت دقیق‌تر، با افزایش ارتفاع، مقدار تابع هموارساز به صورت پیوسته کاهش یافته و هیچ نوسان یا تغییر جهت محسوسی در روند مشاهده نمی‌شود. این کاهش تدریجی احتمال تخریب جنگل از حدود ارتفاع صفر تا بیش از ۱۴۰۰ متر به صورت پیوسته ادامه داشته است. متغیر شیب زمین

تأثیری غیرخطی بر احتمال تخریب پوشش دارد. در بازه‌های اولیه، به‌ویژه تا حدود ۱۰ درجه، کاهش شدید در احتمال تخریب مشاهده می‌شود. در ادامه، بین ۱۰ تا ۲۰ درجه، این کاهش متوقف شده و مقدار تابع تقریباً ثابت باقی می‌ماند. اما با عبور از ۲۰ درجه، روند نزولی دوباره شدت می‌گیرد و در نهایت، در شیب‌های خیلی تند، کاهش ملایم‌تری دیده می‌شود. این الگوی رفتاری نشان می‌دهد که احتمال تخریب در شیب‌های کم بسیار بالا است، در شیب‌های متوسط (۱۰ تا ۲۰ درجه) دسترسی انسان‌ها همچنان ممکن است و تخریب ادامه دارد، اما در شیب‌های تندتر (بیش از ۲۰ درجه) به دلیل دشواری دسترسی، میزان تخریب کاهش محسوسی دارد. طول شیب روندی نیمه‌پایدار و سپس کاهشی را نشان داده است. در بازه‌ی مقادیر

کمتر از ۵۰ متر، اثر تغییر کاهشی است. اما از حدود مقدار ۵۰ متر به بعد، روند به‌طور مشخصی صعودی شده و سپس مقدار تابع احتمال تخریب جنگل از ۱۰۰ متر تا انتهای بازه کاهش شدید پیدا می‌یابد. عامل باد در بازه بین ۰/۸ تا حدود ۱/۰۰ مقدار تابع تقریباً به‌صورت کاهشی ادامه پیدا کرده است. اما پس‌ازاین مقدار، با افزایش شاخص باد، تابع به‌صورت صعودی تغییر کرده و در انتهای بازه شاهد افزایش قابل‌توجهی هستیم. این روند افزایشی در مقادیر بالای باد به‌وضوح قابل‌مشاهده است.

$$\log\left(\frac{p}{1-p}\right) = -0.82 + \sum_{j=1}^{11} f_j(X_j) + \epsilon, \epsilon \sim (0, 0.7^2) \quad [3]$$

جدول ۳. ضریب اهمیت نسبی متغیرهای پیش‌بین بر اساس مدل جمعی تعمیم‌یافته.

Table 3. Relative importance of predictor variables based on the GAM

ضریب اهمیت نسبی	متغیرهای پیش‌گو
Relative importance	Predictor variables
8.41	ارتفاع از سطح دریا (متر)
	Altitude (m)
5.80	درجه شیب
	Slope degree
2.24	طول شیب (متر)
	Slope-length (m)
9.78	اثر باد
	Wind effect
15.14	فاصله از جاده (متر)
	Distance from roads (m)
26.62	فاصله از مناطق مسکونی (متر)
	Distance from Residential areas (m)
15.18	نزدیکی به اراضی کشاورزی (متر)

Distance from agricultural land (m)	
بارش (میلی متر)	6.34
Precipitation (mm)	
کمینه دما (درجه سانتی گراد)	3.27
Minimum temperature (°C)	
میانگین دما (درجه سانتی گراد)	3.25
Mean temperature (°C)	
بیشینه دما (درجه سانتی گراد)	3.97
Maximum temperature (°C)	

جنگلی پایین و ۱۷ کیلومتر مربع در محدوده خیلی بالا قرار گرفته است (جدول ۴). همچنین در نقشه‌های خروجی مدل GAM، بیشتر سطح منطقه حدود ۱۶ کیلومتر مربع در محدوده احتمال تخریب خیلی بالا قرار گرفته است (جدول ۴).

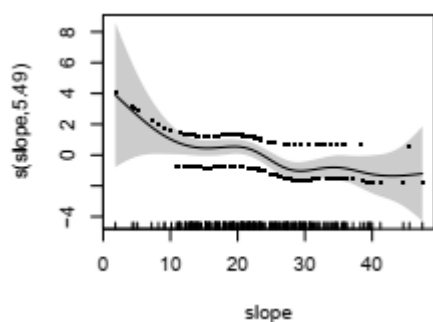
در این مطالعه، مقایسه بین خروجی‌های مدل رگرسیون لجستیک و GAM نشان داد که مدل GAM نتایج دقیق‌تر و تفسیرپذیری‌تر ارائه کرده است. در بسیاری از متغیرها که مدل GLM فقط یک ضریب خطی ارائه می‌داد، مدل GAM الگوهای نوسانی، آستانه‌دار یا چندمرحله‌ای را نمایان ساخت. در ارزیابی‌های عددی نیز، هر چهار شاخص اعتبارسنجی در مدل GAM از مقدار بالاتری برخوردار بودند (جدول ۵). مقایسه عملکرد دو مدل با استفاده از آزمون DeLong برای منحنی‌های ROC همبسته نیز انجام شد. مدل جمعی تعمیم یافته با داشتن مساحت زیر منحنی عملکرد برابر با ۰/۹۷۸، به طور معناداری بهتر از مدل رگرسیون لجستیک (۰/۸۹۵) عمل کرد، به طوری که تفاوت AUC برابر با ۰/۰۸۳ و با سطح معنی‌داری $p < 0.01$ مشخص شد. فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای تفاوت AUC در بازه (۰/۰۳۵ تا ۰/۱۳۱) قرار داشت که دقت پیش‌بینی بالاتر مدل جمعی تعمیم یافته را تأیید می‌کند. همچنین این مدل

به‌طور کلی متغیر فاصله از جاده روندی کاهشی داشته است. در ابتدا مقدار تابع تخریب جنگل تا فاصله‌ای حدود ۱۰۰۰ متر کاهش می‌یابد و سپس روند افزایشی ملایم پیدا می‌کند. در ادامه و در بازه‌های بالاتر، مجدداً مقداری افزایش مشاهده می‌شود. تابع فاصله از مناطق مسکونی روندی نوسانی داشته است. این نوسانات نشان‌دهنده پیچیدگی ارتباط بین این متغیر و تخریب جنگل است. اما به‌طور کلی با افزایش فاصله از مناطق مسکونی تا محدوده ۴۵۰۰ متر، میزان احتمال تخریب پوشش جنگلی کاهش پیدا کرده است. متغیر فاصله از زمین‌های کشاورزی نیز دارای روندی موج‌دار و نوسانی بوده است. عامل بارندگی سالانه رفتاری غیرخطی و ناپایدار داشته است. در ابتدا روند نزولی نسبتاً شدید تا حدود بارش ۱۰۷۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود، سپس تابع افزایشی ملایم پیدا کرده و در ادامه مجدداً افت کرده است. مشخصه‌های دمایی مورد بررسی روندی سینوسی بر تخریب پوشش جنگلی نشان داده‌اند. لیکن در یک روند کلی با افزایش دما، میزان احتمال تخریب افزایش پیدا کرده است.

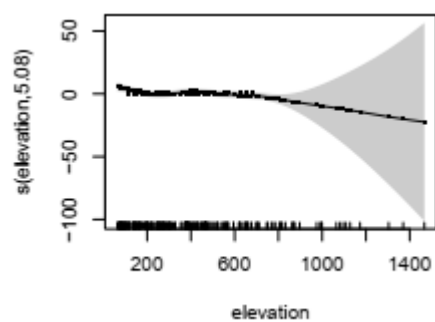
نقشه پهنه‌بندی هر دو مدل مورد بررسی به‌صورت جداگانه تهیه شد که نتایج در شکل‌های ۴ و ۵ به نمایش درآمده است. بر این اساس نقشه‌های حاصل از رگرسیون لجستیک حدود ۴۸ کیلومتر مربع از سطح منطقه در محدوده احتمال تخریب پوشش

۰/۷۸) بهبود قابل‌توجهی نشان داد که عملکرد بهتر آن در پیش‌بینی مناطق تخریب‌شده جنگل را تقویت می‌کند (جدول ۵).

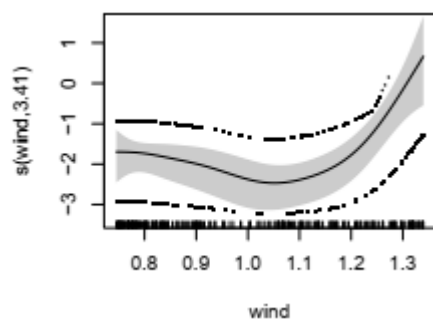
نسبت به مدل لجستیک، شاخص کاپا (۰/۸۷ در مقابل ۰/۷۳)، حساسیت (۰/۹۵ در مقابل ۰/۸۵) و ویژگی (۰/۹۳ در مقابل



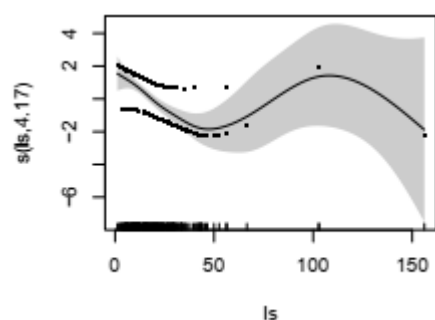
(ب)



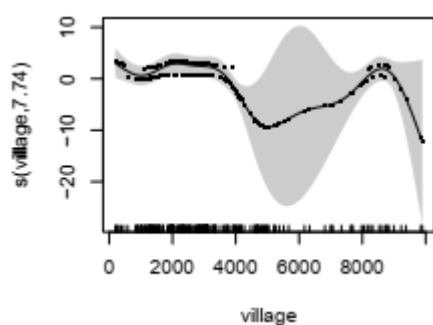
(الف)



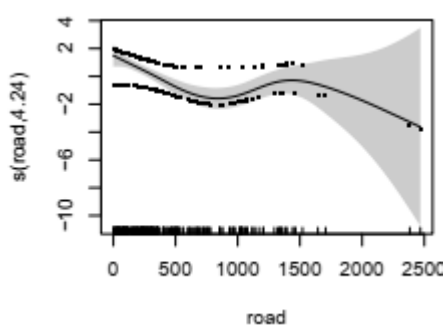
(ت)



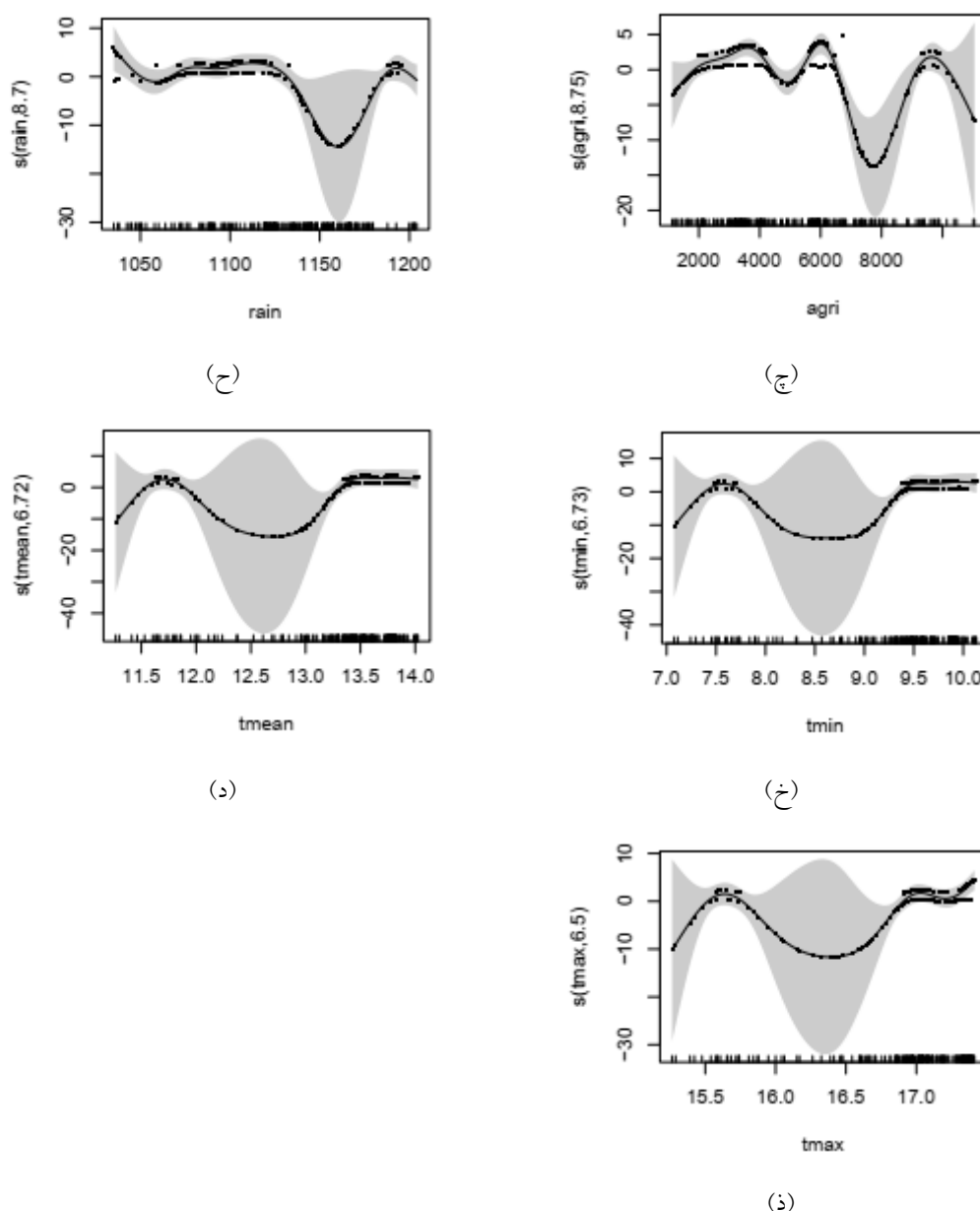
(پ)



(ج)



(ث)



شکل ۳. نمودار 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)

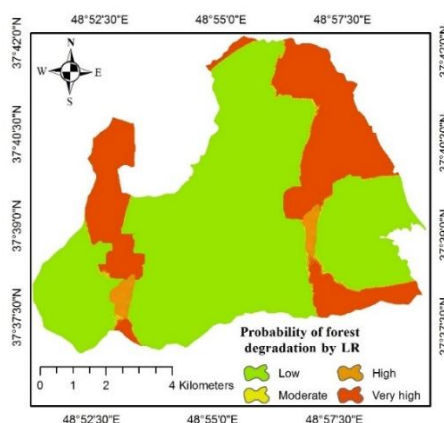
Fig 3. Partial dependency plot for each predictor variable (a: altitude, b: slope, c: slope-length, d: wind effect, e: distance from road, f: distance from residential areas, g: distance from agricultural land, h: precipitation, i: minimum temperature, j: mean temperature, k: maximum temperature)

آماده‌سازی زمین و کاهش خطرات فرسایش و رانش دارد. پس از آن، ارتفاع (۰.۱۸۱) به دلیل تأثیر بر اقلیم محلی، دسترسی به منابع آب و کاهش خطر سیلاب، در اولویت دوم قرار می‌گیرد.

بر اساس نتایج مدل تحلیل سلسله‌مراتبی، شیب زمین با وزن ۰.۲۸۹ مهم‌ترین معیار در تصمیم‌گیری نهایی برای مکانیابی است، زیرا نقش کلیدی در پایداری سازه‌ها، هزینه‌های

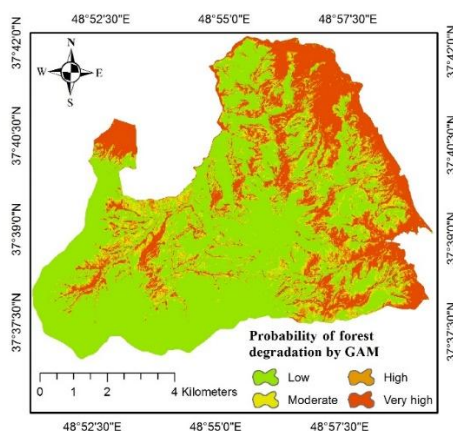
مکان مناسب دارند. به طور کلی با استفاده از مدل فازی (عملگر AND) حدود ۶۶ کیلومتر مربع از حوضه‌ی سد چراغ ویس جهت ساخت روستای میرده، نامناسب طبقه‌بندی گشته است (رنگ قرمز) این درحالی است که مدل، حدود ۱۷ کیلومتر مربع را مناسب جهت ایجاد روستا پیشنهاد داده است (رنگ سبز). این مقادیر برای مدل‌های فازی (عملگر SUM) و تحلیل سلسله‌مراتبی به ترتیب حدود ۸۰.۵ و ۷۶ کیلومتر مربع نامناسب و حدود ۲.۵ و ۷ کیلومتر مربع مناسب شناسایی شده است (شکل ۸). لذا قابل ذکر است که در هر ۳ مدل عمده‌ی حوضه جهت ساخت روستای جدید میرده مناسب نیست.

فاصله از مکان قدیمی روستا (۰.۱۳۶) به‌عنوان شاخصی اجتماعی-اقتصادی برای حفظ پیوستگی جمعیتی و بهره‌گیری از زیرساخت‌های موجود اهمیت دارد. معیارهای فاصله از جاده (۰.۱۰۶) و فاصله از گسل (۰.۰۹۶) به‌ترتیب برای بهبود دسترسی و کاهش ریسک زمین‌لرزه مؤثر هستند. همچنین فاصله از رودخانه (۰.۰۸۸) برای پیشگیری از خطرات سیلاب، فاصله از پلیس راه (۰.۰۵۶) برای ارتقای امنیت و کنترل ترافیک، و فاصله از روستاهای اطراف (۰.۰۴۸) برای جلوگیری از تعارضات کاربری و حفظ حریم سکونتگاه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. در مجموع، اولویت‌بندی نهایی نشان می‌دهد که عوامل توپوگرافی و ایمنی زمین بیشترین وزن را در فرآیند انتخاب



شکل ۴. پهنه‌بندی احتمال جنگل‌زدایی با مدل رگرسیون لجستیک.

Fig 4. Zoning of forest degradation probability using the logistic regression



شکل ۵. پهنه‌بندی احتمال جنگل‌زدایی با مدل GAM.

Fig 4. Zoning of forest degradation probability using the GAM

جدول ۴. مساحت (کیلومترمربع) احتمال تخریب جنگل بر اساس دو مدل رگرسیون لجستیک و GAM.

Table 4. Area forest degradation probability for each class based on logistic regression and GAM models

مدل‌ها Models	پایین Low	متوسط Moderate	زیاد High	خیلی زیاد Very high
Logistic regression	48.37	0.50	0.80	17.16
GAM	38.35	6.94	5.57	15.97

جدول ۵. نتایج اعتبارسنجی در دو مدل رگرسیون لجستیک و GAM.

Fig 6. Models performance in LR and GAM

مدل‌ها Models	سطح زیر منحنی عملکرد AUC	ضریب کاپا Kappa coefficient	حساسیت Sensitivity	ویژگی Specificity
Logistic regression	0.895	0.73	0.85	0.78
GAM	0.978	0.87	0.95	0.93

بحث

تخریب پوشش جنگل یک معضل محیط‌زیستی مهم است که تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. متغیرهای موردبررسی هر کدام با شدت‌های متفاوتی بر میزان تخریب پوشش جنگل اثر گذاشتند که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. همان‌گونه که از مقادیر ضریب اهمیت نسبی متغیرها و نمودارهای وابستگی جزئی برمی‌آید، عوامل انسانی شامل فاصله از جاده، مجاورت با اراضی کشاورزی، و نزدیکی به مناطق مسکونی، با تبیین بیش از ۵۶ درصد از واریانس مدل، سهم غالب را در تغییرات پوشش جنگلی و بروز پدیده تخریب جنگل ایفا کرده‌اند. این یافته با نتایج مطالعات متعددی همخوان است که فعالیت‌های انسانی را به‌عنوان مهم‌ترین محرک تغییرات کاربری اراضی در نظر گرفته‌اند (۱۴، ۲۱). با این حال، مدل GAM این امکان را فراهم کرد که علاوه بر برجسته‌سازی نقش متغیرهای انسانی، روابط غیرخطی و پیچیده‌ی برخی عوامل طبیعی نیز به‌درستی شناسایی و تبیین شوند. به‌ویژه، متغیرهایی چون اثر باد و ارتفاع، که در مدل‌های خطی یا از نظر آماری معنادار نبوده یا با یک ضریب ساده مدل‌سازی می‌شوند، در GAM توانستند تأثیر

معنادار و ساختارمند خود را در سطوح خاصی از شدت نشان دهند. بنابراین، اگرچه سهم عوامل انسانی در تبیین کل تغییرات بیشتر است، اما نقش عوامل طبیعی را نیز نمی‌توان نادیده گرفت، زیرا این عوامل گاه به‌صورت غیرخطی و در تعامل با تغییرات انسانی، موجب تشدید یا تسهیل تخریب می‌شوند. این تمایز رویکردی، ضرورت استفاده از مدل‌های انعطاف‌پذیر مانند GAM را برای تحلیل‌های دقیق‌تر در مطالعات اکولوژیکی روشن می‌سازد. در ادامه، به‌منظور تبیین دقیق‌تر سازوکار اثرگذاری عوامل اصلی، تحلیل تفصیلی هر یک از متغیرهای مؤثر ارائه می‌شود.

ارتفاع از سطح دریا یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در تخریب پوشش جنگل است، زیرا شرایط اکولوژیکی و اقتصادی مناطق مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۵). به‌طورکلی، مناطق با ارتفاع بالاتر از سطح دریا کمتر تحت تأثیر تخریب پوشش جنگل قرار می‌گیرند، چراکه دسترسی به این مناطق دشوارتر بوده و هزینه‌های بهره‌برداری جنگلی و تبدیل زمین به کاربری‌های دیگر در این ارتفاعات افزایش می‌یابد (۲۱). درحالی‌که مناطق کم‌ارتفاع‌تر بیشتر در معرض

فعالیت‌های انسانی نظیر کشاورزی، ساخت‌وساز و گسترش شهرها هستند، ارتفاعات بالاتر همچنان یکی از آخرین مناطق نسبتاً دست‌نخورده باقی‌مانده‌اند (۱۰).

مدل GAM نشان داد که متغیر شیب دارای یک رابطه کاهشی با تخریب جنگل در محدوده مورد مطالعه است؛ به عبارت دیگر، با افزایش مقدار شیب، احتمال تخریب جنگل به‌طور مشخصی کاهش یافته است. این الگوی کاهشی در مدل‌های انعطاف‌پذیر مانند GAM به‌روشنی قابل شناسایی بوده و بیانگر نقش متمایز شیب به‌عنوان یک عامل بازدارنده طبیعی در برابر دخالت انسانی است (۱۵). درواقع، نواحی با شیب‌های بالا اغلب دارای دسترسی فیزیکی پایین‌تری برای انسان‌ها هستند، که این امر مانع از انجام فعالیت‌هایی نظیر بهره‌برداری چوب، کشاورزی، ساخت‌وساز یا دامداری می‌شود (۲۲). به همین دلیل، تخریب جنگل‌ها در این نواحی محدودتر باقی‌مانده است. از منظر ژئومورفولوژیک، شیب زیاد موجب افزایش هزینه‌های عملیاتی و لجستیکی در فعالیت‌های بهره‌برداری از منابع طبیعی می‌شود. بنابراین، توسعه‌های انسانی عمدتاً در نواحی با شیب ملایم و متوسط متمرکز شده‌اند. تحلیل مدل GAM این پدیده را به‌صورت دقیق نشان داده و رفتار کاهش‌یابنده‌ی احتمال تخریب جنگل را در بازه‌های بالای شیب مدل کرده است؛ موضوعی که در مدل لجستیک با یک روند خطی ساده و بدون شناسایی این اثر بازدارندگی، مدل‌سازی شده بود.

با این حال، باید توجه داشت که شیب به‌تنهایی یک عامل مطلق در پیش‌بینی تخریب نیست. بلکه در ترکیب با متغیرهای دیگر نظیر دسترسی جاده‌ای، نزدیکی به سکونتگاه‌ها و کاربری‌های پیرامونی معنا پیدا می‌کند. مدل GAM با در نظر گرفتن روابط غیرخطی و ترکیبی، این تعاملات را بهتر از مدل‌های کلاسیک شناسایی می‌کند و نقشه‌های خروجی نیز

این تفاوت را به‌خوبی منعکس کرده‌اند. برای مثال، نواحی با شیب‌های متوسط ولی در مجاورت زمین‌های کشاورزی، همچنان در معرض خطر تخریب قرار گرفته‌اند؛ امری که تنها با مدل انعطاف‌پذیر GAM قابل‌شناسایی بوده است. این نتایج تأیید می‌کند که در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی کاربری زمین، توجه به اثر متغیرهایی مانند شیب در تعامل با سایر عوامل، امری ضروری برای پیش‌بینی صحیح تخریب جنگل‌هاست.

براساس نتایج مدل GAM، رابطه میان شدت یا اثر باد (به‌عنوان یک متغیر اکولوژیکی-فیزیکی) و تخریب جنگل در منطقه مورد مطالعه به‌صورت یک روند افزایشی نسبت به احتمال وقوع تخریب جنگل تفسیر شد. به عبارت دیگر، با افزایش شدت اثر باد، احتمال وقوع تخریب جنگل افزایش یافته است؛ به‌ویژه در سطوح میانی تا بالای شاخص اثر باد، این روند صعودی کاملاً مشهود بوده و در دامنه‌های مشخصی به پیک یا نقطه اوج نزدیک می‌شود. از منظر اکولوژیکی، این نتیجه کاملاً قابل توجیه است. بادهای شدید نه تنها می‌توانند به‌صورت مستقیم باعث شکستگی یا افتادگی درختان شوند (۳۶)، بلکه در جنگل‌های انبوه می‌توانند باعث افزایش خشکی سوخت‌های سطحی شده و در نتیجه، ریسک‌پذیری منطقه نسبت به آتش‌سوزی‌های جنگلی را افزایش دهند (۱۴). در جنگل‌های هیرکانی، که به دلیل تراکم بالا و شرایط اقلیمی مستعد آتش‌سوزی در فصل گرم هستند، نقش باد به‌ویژه از این منظر حائز اهمیت است. بررسی‌ها و گزارش‌های محلی در منطقه ناو اسالم نیز مؤید آن است که بخش قابل‌توجهی از آتش‌سوزی‌های گسترده در سال‌های اخیر هم‌زمان با وزش بادهای گرم و خشک رخ داده‌اند.

علاوه بر اثر غیرمستقیم باد بر تشدید پتانسیل آتش‌سوزی، باید

به اثرات انسانی مرتبط نیز توجه کرد. وزش باد، به‌ویژه در ترکیب با زمین‌های دارای پوشش گیاهی خشک‌شده، شرایط را برای گسترش سریع آتش‌سوزی‌هایی که ممکن است در نتیجه فعالیت‌های انسانی (نظیر سوزاندن زباله، فعالیت گردشگران یا حتی تعمد در جهت پاک‌سازی زمین برای استفاده کشاورزی) آغاز شوند، فراهم می‌سازد. در نتیجه، متغیر باد در این منطقه نه تنها به عنوان یک عامل طبیعی مؤثر در آسیب‌پذیری زیست‌محیطی مطرح است، بلکه به صورت یک عامل تشدیدکننده و تسهیلگر در روند تخریب جنگل نیز ایفای نقش می‌کند. تحلیل آماری صورت گرفته توسط مدل GAM توانست رابطه غیرخطی میان باد و تخریب جنگل را آشکار سازد. این در حالی است که در مدل لجستیک، متغیر باد به دلیل عدم معناداری آماری، حذف شد و بنابراین نتوانست اثر احتمالی آن را مدل‌سازی کند. این نکته تأکیدی است بر محدودیت مدل‌های خطی سنتی در شناسایی روابط پیچیده و رفتارهای آستانه‌ای، که در GAM امکان تفکیک اثر باد در دامنه‌های مختلف شدت فراهم شده و رفتار تشدید آن به درستی نمایان شده است. در نتیجه در جنگل‌های هیرکانی، متغیر باد با اثرگذاری افزایشی بر روند تخریب جنگل، باید به عنوان یک مؤلفه کلیدی در سنجش خطر و پهنه‌بندی آسیب‌پذیری مورد توجه قرار گیرد. شناسایی نواحی با شدت اثر باد بالا، به‌ویژه در ترکیب با داده‌های تاریخی آتش‌سوزی، می‌تواند نقش مؤثری در طراحی استراتژی‌های پیشگیرانه ایفا کند.

جاده‌ها یکی از عوامل تسهیل‌کننده دسترسی به جنگل‌ها هستند و ارتباط مستقیمی با شدت تخریب پوشش جنگل دارند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که هرچه فاصله از جاده بیشتر باشد، میزان تخریب پوشش جنگل کاهش می‌یابد (۷ و ۱۳).

این امر به دلیل دشواری حمل‌ونقل چوب، دسترسی محدود برای توسعه کشاورزی و ساخت‌وساز، و هزینه‌های بالای زیرساختی در مناطق دور از جاده است. جاده‌ها علاوه بر تسهیل حمل‌ونقل، باعث ایجاد تغییرات اکولوژیکی در محیط‌زیست جنگلی نیز می‌شوند. شکاف‌های ایجادشده در پوشش جنگلی توسط جاده‌ها، می‌تواند موجب ورود گونه‌های مهاجم، تغییر در ترکیب زیستی منطقه، و افزایش خطر آتش‌سوزی شود (۲۰). علاوه بر این، جاده‌ها اغلب به عنوان نقاط آغازین برای تبدیل جنگل‌ها به اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی و مراکز صنعتی عمل می‌کنند. در مناطق نزدیک به جاده، تخریب پوشش جنگل معمولاً با سرعت بیشتری رخ می‌دهد، زیرا استخراج منابع چوبی، چرای دام، و سایر فعالیت‌های اقتصادی به‌طور مستقیم از زیرساخت‌های جاده‌ای سود می‌برند.

نتایج حاصل از مدل جمعی تعمیم یافته نشان داد که متغیر فاصله از مناطق مسکونی با ضریب اهمیت نسبی ۲۶/۶۲ درصد، بیشترین سهم را در تبیین تغییرات تخریب پوشش جنگلی دارد. این یافته نشان‌دهنده نقش پررنگ فعالیت‌های انسانی مرتبط با بافت‌های جمعیتی در فرآیند جنگل‌زدایی در منطقه مورد مطالعه است (۵). با این حال، نمودار وابستگی جزئی این متغیر در مدل GAM نشان می‌دهد که اثر این متغیر بر احتمال وقوع تخریب، الگوی ساده و یکنواختی ندارد و به صورت نوسانی تغییر می‌کند. به بیان دیگر، هرچند در نگاه کلی، افزایش فاصله از مناطق مسکونی با کاهش خطر تخریب همراه است، اما این رابطه به صورت غیریکنواخت و تابع شرایط محلی تفسیر می‌شود. این نوسان‌ها، بازتاب‌دهنده واقعیت فضایی-اجتماعی و پیچیدگی پویایی بین سکونت انسانی و الگوهای تخریب پوشش جنگلی در مقیاس چشم‌انداز است.

(۵). در بسیاری از مناطق، فعالیت‌های انسانی حتی در فواصل نسبتاً دور از هسته‌های اصلی سکونتگاهی نیز می‌تواند به شدت مؤثر باشند. این تأثیر ممکن است ناشی از وجود کاربری‌های پراکنده و فصلی انسانی، زیرساخت‌های توسعه‌ای پراکنده یا بسترهای طبیعی با قابلیت دسترسی آسان حتی در فواصل نسبتاً زیاد باشد.

بنابراین، رفتار نوسانی این متغیر در مدل GAM را می‌توان به عنوان بازتابی از الگوی ناهمگن پراکنش فشارهای انسانی در سطح چشم‌انداز دانست. به بیان دیگر، در فواصل نزدیک به مناطق مسکونی، احتمال تخریب عموماً بالا بوده و ناشی از فشار مستقیم جمعیتی است. در فواصل میانی، شدت تخریب ممکن است بسته به ویژگی‌های محلی افزایش یا کاهش یابد. در فواصل دور نیز، اگرچه انتظار می‌رود شدت فشار انسانی کاهش یابد، اما در صورت وجود امکان دسترسی یا منابع اقتصادی محلی، همچنان احتمال وقوع تخریب بالا خواهد بود. از منظر تفسیر مدل، این ویژگی پیچیده نشان‌دهنده توان مدل GAM در درک روابط غیرخطی و چندوجهی بین متغیرهای انسانی و روند تخریب است. همچنین، این رفتار نوسانی کاملاً سازگار با وزن بالای این متغیر در مدل جمعی تعمیم یافته است، چرا که اهمیت عددی، صرفاً به میزان تأثیر در کل مدل اشاره دارد، نه لزوماً به یکنواختی یا خطی بودن اثر.

کشاورزی یکی از عوامل اصلی تخریب پوشش جنگل در سراسر جهان است و مناطق جنگلی که در نزدیکی اراضی کشاورزی قرار دارند، معمولاً بیشترین میزان تخریب پوشش جنگل را تجربه می‌کنند (۱۷). فاصله از اراضی کشاورزی تأثیر بسزایی در نرخ تخریب پوشش جنگل دارد، زیرا در مجاورت این اراضی، جنگل‌ها به‌طور مداوم برای گسترش زمین‌های زراعی و چراگاه‌های دام مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

بسیاری از مناطق جنگلی به دلیل نیازهای روزافزون به محصولات کشاورزی و دامداری، به زمین‌های زراعی تبدیل می‌شوند. این روند معمولاً با پاک‌سازی جنگل‌ها و جایگزینی آن‌ها با مزارع، باغات، و مراتع همراه است. علاوه بر این، در مناطق نزدیک به اراضی کشاورزی، احتمال آتش‌سوزی‌های عمدی برای آماده‌سازی زمین افزایش می‌یابد (۴۱). با افزایش فاصله از این اراضی، دسترسی به منابع برای کشاورزی دشوارتر شده و هزینه‌های توسعه زمین بالا می‌رود، در نتیجه میزان تخریب پوشش جنگل کاهش می‌یابد.

بارش یکی از عوامل مهم در حفظ پایداری جنگل‌ها است، و کاهش آن می‌تواند به‌طور مستقیم بر میزان تخریب پوشش جنگل تأثیر بگذارد. در شرایط کم‌آبی، رشد و زادآوری درختان کاهش می‌یابد و برخی گونه‌های حساس ممکن است در برابر خشکسالی آسیب‌پذیر شوند (۹). این شرایط موجب کاهش تراکم پوشش جنگلی و افزایش حساسیت جنگل‌ها به سایر عوامل تخریبی، مانند چرای دام یا قطع درختان، می‌شود. یکی از اثرات مستقیم کاهش بارش، تغییر الگوی رطوبت خاک است (۹). در مناطقی که بارندگی کاهش یافته، رطوبت خاک کمتر شده و درختان توانایی جذب آب مورد نیاز را از دست می‌دهند. این موضوع می‌تواند به افزایش نرخ خشکیدگی درختان و کاهش سطح جنگل‌های سالم منجر شود. علاوه بر این، کاهش بارش باعث کاهش منابع آبی می‌شود که جوامع انسانی و کشاورزان به آن وابسته هستند. این شرایط ممکن است فشار بیشتری بر جنگل‌ها وارد کند، زیرا جوامع محلی به دنبال جایگزین‌های اقتصادی مانند توسعه کشاورزی و دامداری در اراضی جنگلی باشند. همچنین، کاهش بارش می‌تواند بر ترکیب گونه‌ای جنگل‌های هیرکانی تأثیر بگذارد. درختانی که نیاز بیشتری به رطوبت دارند، ممکن است به تدریج از بین

بروند و گونه‌های مقاوم‌تر جایگزین آن‌ها شوند (۳۲). این تغییرات می‌توانند موجب کاهش تنوع زیستی جنگل‌ها شوند و اکوسیستم را به سمت شرایط جدیدی سوق دهند که ممکن است کمتر پایدار باشد. همچنین در این رابطه باید توجه داشت که نوع اثر متغیر بارش در مدل‌های مختلف، ناشی از ساختار آماری آن‌هاست. در مدل لجستیک، که رابطه‌ای خطی بین متغیرها و احتمال وقوع پدیده برقرار می‌کند، اثر بارش به صورت یک روند نزولی خطی ظاهر شده است. این در حالی است که مدل GAM با استفاده از توابع هموارساز، قادر به آشکارسازی روابط غیرخطی و پیچیده‌تری است. به همین دلیل، رفتار نوسانی و غیریکنواخت بارش در مدل GAM می‌تواند دقیق‌تر بازتاب‌دهنده‌ی واقعیت اکولوژیکی منطقه باشد. این تفاوت نشان‌دهنده‌ی مزیت استفاده از مدل‌های غیرپارامتریک برای تحلیل روابط زیست‌محیطی پیچیده است، بدون آنکه اعتبار مدل لجستیک در استخراج روندهای کلی زیر سؤال رود.

افزایش دما یکی از پیامدهای تغییرات اقلیمی است که می‌تواند به‌طور غیرمستقیم منجر به تخریب پوشش جنگل شود. افزایش دما موجب کاهش رطوبت خاک و افزایش نرخ تبخیر می‌شود که این عوامل می‌توانند تنش‌های محیطی برای درختان و پوشش گیاهی ایجاد کنند (۹). در نتیجه، برخی گونه‌های جنگلی ممکن است توانایی تطبیق با شرایط جدید را نداشته باشند و در اثر گرمادگی و خشکی آسیب ببینند. از سوی دیگر، افزایش دما احتمال وقوع آتش‌سوزی‌های جنگلی را افزایش می‌دهد. در مناطقی که دمای هوا بالا رفته و میزان رطوبت کاهش یافته است، پوشش گیاهی خشک‌تر شده و به‌شدت مستعد آتش‌سوزی می‌شود. این موضوع، همراه با افزایش فعالیت‌های انسانی مانند چرای دام یا کشاورزی،

می‌تواند سرعت تخریب پوشش جنگل را بالا ببرد. همچنین، تغییرات دمایی می‌توانند بر تنوع زیستی منطقه تأثیر بگذارند. گونه‌هایی که به شرایط معتدل‌تر وابسته هستند، ممکن است به تدریج از جنگل‌های هیرکانی عقب‌نشینی کنند، و به دنبال آن، اکوسیستم جنگلی دچار تغییرات بنیادی شود. اگرچه این تأثیرات نسبت به عوامل انسانی ضعیف‌تر هستند، اما در بلندمدت می‌توانند روند تخریب جنگل‌ها را تشدید کنند.

به‌طور مشخص، مدل رگرسیون لجستیک به‌عنوان نماینده‌ای از مدل‌های خطی و مدل GAM به‌عنوان مدلی انعطاف‌پذیرتر و غیرخطی برای پیش‌بینی تخریب جنگل در سری‌های ناو اسالم در جنگل‌های هیرکانی مورد استفاده قرار گرفت. هر دو مدل بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای زیست‌محیطی و انسانی آموزش داده شدند و دقت آن‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری معتبر ارزیابی گردید.

مدل رگرسیون لجستیک با فرض رابطه خطی بین متغیرهای پیشگو و تابع لجیت احتمال تخریب، تنها قادر به شناسایی اثرات یکنواخت و یکنوا بر متغیر پاسخ است. به عبارت دیگر، در این مدل اثر هر متغیر به‌صورت یک ضریب ثابت و مستقل از مقدار آن متغیر در نظر گرفته می‌شود. این ساده‌سازی اگرچه تفسیرپذیری مدل را تسهیل می‌کند، اما در عین حال توانایی مدل در شناسایی رفتارهای پیچیده، آستانه‌ای یا غیرخطی را کاهش می‌دهد (۳۴). برای مثال، در خروجی رگرسیون لجستیک، ارتفاع از سطح دریا، بارش، فاصله از اراضی کشاورزی، و میانگین دما همگی اثرات خطی منفی یا مثبت یکنواختی بر احتمال تخریب نشان دادند. این در حالی است که در واقعیت زیست‌محیطی، اثر چنین متغیرهایی به‌طور معمول تابعی پیچیده از میزان و دامنه تغییرات آن‌هاست.

در مقابل، مدل GAM این محدودیت را رفع کرده و با استفاده

از توابع هموارکننده مانند هموارسازهای مکعبی یا توابع هموارساز صفحه نازک، قادر است رابطه احتمالی بین متغیرها و تخریب جنگل را به شکل پیوسته و غیرفرضی تخمین بزند. این توابع به صورت ریاضی بر پایه کمینه کردن انرژی خمیدگی یک سطح تعریف می‌شود. به بیان ساده، این تابع سعی می‌کند یک سطح صاف را از میان داده‌ها عبور دهد به طوری که میزان خم شدن سطح به حداقل برسد (۲۹). این ویژگی آن را برای توصیف رابطه‌های پیچیده، ولی منظم، بین متغیرهای مستقل و متغیر پاسخ ایده‌آل می‌سازد. خروجی‌های مدل GAM نشان داد که بسیاری از متغیرهای ورودی دارای روندهایی غیریکسان، نوسانی، چندفازی یا آستانه‌دار نسبت به تخریب جنگل هستند. برای مثال، رابطه میان ارتفاع از سطح دریا و تخریب جنگل در GAM به صورت ملایم ابتدا کاهشی، سپس افزایشی و مجدداً کاهشی بود؛ امری که در رگرسیون لجستیک به صورت خطی نزولی مدل شده بود. این نوع بازنمایی دقیق‌تر روابط، به شکل‌گیری نقشه‌هایی با دقت فضایی بالاتر انجامیده است. برای ارزیابی کمی دقت مدل‌ها، از چهار شاخص رایج و معتبر آماری یعنی مساحت زیر منحنی عملکرد، ضریب کاپا، حساسیت و ویژگی استفاده شد. نتایج هر چهار معیار نشان‌دهنده توان بالاتر GAM در تفکیک بین مناطق تخریب‌شده و تخریب‌نشده است. از منظر فضایی نیز مقایسه بین نقشه‌های خروجی دو مدل مؤید برتری GAM است. مدل لجستیک به دلیل ساختار تابع لجستیکی، تمایل دارد نواحی با احتمال تخریب را به صورت قطعی به دو سر طیف پهنه‌بندی تقسیم کند. این امر باعث می‌شود مساحت مناطق با احتمال تخریب خیلی بالا در مدل لجستیک بیشتر به نظر برسد، زیرا نواحی انتقالی یا با احتمال متوسط کمتر مورد توجه قرار می‌گیرند. در مقابل، مدل جمعی تعمیم‌یافته با انعطاف‌پذیری

بالاتر و توانایی مدل‌سازی پیوسته، نواحی با احتمال‌های میانی را دقیق‌تر شناسایی و طبقه‌بندی می‌کند. به همین دلیل، مساحت طبقه احتمال تخریب خیلی بالا در GAM کمتر است؛ اما این کاهش مساحت نشان‌دهنده دقت و حساسیت بالاتر این مدل در تفکیک واقعی نواحی بحرانی است، زیرا بخش قابل توجهی از نواحی انتقالی به کلاس‌های میانی اختصاص یافته‌اند. بنابراین، تفاوت در مساحت طبقه‌بندی شده احتمال تخریب خیلی بالا بین دو مدل منعکس‌کننده تفاوت در رویکردهای مدل‌سازی و دقت تفکیک نواحی است، و کاهش مساحت در GAM به معنای دقت بالاتر آن در شناسایی دقیق‌تر نواحی بحرانی می‌باشد.

از نظر رفتار آماری متغیرها نیز، GAM این امکان را فراهم آورد تا بتوان تأثیر متغیرها بر تخریب جنگل را در نقاط مختلف دامنه آن‌ها به صورت جداگانه تحلیل کرد. به عنوان مثال، در متغیر بارش، مشاهده شد که تخریب جنگل در محدوده بارش‌های کم و زیاد به صورت متفاوتی رفتار می‌کند که تنها از طریق مدل‌های انعطاف‌پذیر مانند GAM قابل شناسایی است. در مقابل، رگرسیون لجستیک چنین تفاوت‌هایی را نادیده گرفته و تنها یک روند کلی را مدل می‌کند.

از منظر قابلیت تعمیم نیز می‌توان گفت GAM با توجه به لحاظ کردن تغییرات محلی در روابط بین متغیرها و متغیر پاسخ، توانایی بالاتری برای تعمیم مدل به سایر مناطق مشابه زیستی دارد (۲۸). این موضوع در مطالعات آینده برای مدل‌سازی در مقیاس بزرگ‌تر و یا در مناطق مشابه زیست‌اقلیمی می‌تواند مزیت محسوب شود.

یافته‌ها به وضوح نشان داد که استفاده از مدل GAM در این مطالعه منجر به افزایش دقت نقشه‌های خروجی پهنه‌بندی تخریب جنگل نسبت به مدل خطی شده است. این ارتقا نه تنها

از منظر آماری بلکه از منظر فضایی و تفسیری نیز قابل توجه است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که گذار از مدل‌های خطی کلاسیک به مدل‌های افزایشی تعمیم‌یافته، رویکردی مؤثر و علمی در مطالعات محیط‌زیستی، به‌ویژه در زمینه پیش‌بینی تغییرات کاربری و تخریب سرزمین محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که مدل‌های آماری غیرخطی همچون GAM با بهره‌گیری از ظرفیت انعطاف‌پذیری بالا در برآزش روابط پیچیده، توانایی بیشتری در شناسایی الگوهای مکانی و تشخیص آستانه‌های بحرانی تخریب پوشش جنگلی نسبت به مدل‌های خطی سنتی دارند. مقایسه شاخص‌های عملکردی مدل‌ها، مؤید آن است که مدل GAM نه تنها دقت پیش‌بینی بالاتری دارد، بلکه با ارائه نقشه‌های فضایی پیوسته‌تر، قابلیت شناسایی مناطق بحرانی را به مراتب دقیق‌تر فراهم می‌آورد. قابل ذکر است اضافه شدن سایر متغیرهای محیطی و انسانی مانند خصوصیات خاک یا شرایط اقتصادی و اجتماعی جوامع انسانی اطراف اکوسیستم‌های جنگلی، می‌تواند دقت نقشه‌های احتمال جنگل‌زدایی را افزایش دهد. مسئله‌ای که به علت فقدان لایه‌های دقیق از متغیرهای مورد اشاره در تحقیق حاضر امکان‌پذیر نبود. از سوی دیگر، تحلیل روابط غیرخطی و نوسانی متغیرهای کلیدی همچون ارتفاع، شیب، بارش و فاصله از اراضی کشاورزی، نشان داد که تخریب جنگل در مناطق هیرکانی نه به صورت یکنواخت، بلکه با واکنش‌های آستانه‌ای و مرحله‌ای نسبت به محرک‌های محیطی و انسانی رخ می‌دهد. این الگوها، صرفاً از طریق چارچوب‌های منعطف مانند GAM قابل شناسایی بوده و از دید مدل‌های خطی پنهان می‌مانند. یافته‌های پژوهش در سطح کاربردی می‌تواند مبنای طراحی هدفمندتر سیاست‌های

مدیریتی در انواع اکوسیستم‌های جنگلی قرار گیرد. نخست، در فرآیندهای برنامه‌ریزی فضایی و ارزیابی محیط‌زیستی، توصیه می‌شود از مدل‌های جمعی تعمیم‌یافته به عنوان ابزار اصلی پهنه‌بندی مناطق در معرض تخریب استفاده شود، چرا که این مدل‌ها به ویژه در اکوسیستم‌های ناهمگن و تحت تأثیر عوامل متعددی چون کاربری‌های انسانی و شرایط اقلیمی، عملکرد تفکیکی و حساسیت بالاتری ارائه می‌دهند. دوم، با توجه به نقش برجسته متغیرهای مکانی مانند نزدیکی به اراضی کشاورزی، فاصله از جاده‌ها و فاصله از مناطق مسکونی که در تحلیل‌ها به وضوح در نواحی شرقی و شمالی محدوده مورد مطالعه (منطقه ناو اسالم)، باعث افزایش احتمال تخریب شده‌اند، پیشنهاد می‌شود در این نواحی با ریسک بالاتر، نوارهای حفاظتی چندمنظوره طراحی و اجرا گردد. این نوارها باید به گونه‌ای باشند که فشارهای انسانی و اکولوژیکی را کاهش داده و به عنوان کمربندی حفاظتی عمل کنند. سوم، در سیاست‌های بهره‌برداری و احیای جنگل، لازم است محدودیت‌های فصلی یا منطقه‌ای به خصوص در بخش‌هایی با بارش کمتر و دمای بالاتر، مانند بخش‌های شرقی محدوده مورد مطالعه، اعمال شود تا از گسترش روند تخریب جلوگیری به عمل آید. در نهایت، تأکید می‌شود که مدیریت پایدار جنگل‌های هیرکانی نیازمند رویکردهای تصمیم‌گیری مکانی محور، تلفیقی و پیش‌نگرانه است که بر پایه شواهد مدل‌سازی دقیق و تحلیل‌های مکانی استوار باشد و توانایی انطباق با تغییرات زمانی و مکانی الگوهای تخریب را داشته باشد. چنین رویکردی می‌تواند ضامن حفظ کارکردهای بوم‌شناختی این اکوسیستم‌های بی‌نظیر و کنترل روند نگران‌کننده تخریب در سطوح محلی و منطقه‌ای باشد.

منابع مورد استفاده

1. Afrand Sarakhni H.R., Hasanzad Navroodi I, Naghdi R. 2012. Identification of wood smuggling offence centers by means of gis and planning for prevention thereof (Case study: violations of forest habitants and wood smugglers in forestry project of Siahrood-Amlash). Police Management Studies Quarterly, 7(4): 529–548. (in Persian)
2. Araei V, Alavian M, Ghasemi A. 2021. the policy-making of the forests of northern iran as a policy wicked problem, strategic recommendations. Strategic Studies of Public Policy (Strategic Studies of Globalization Journal), 11 (39): 326-351. (in Persian)
3. Beiranvand A, Asgari M, Javanmiri Pour M, Khaki Pour L, Etemad V. 2023. The study of causes and factors of illegal logging in Caspian Forests. Iranian journal of Forest, 15 (1): 35–51. (in Persian)
4. Bera D, Das Chatterjee N, Bera S. 2021. Comparative performance of linear regression, polynomial regression and generalized additive model for canopy cover estimation in the dry deciduous forest of West Bengal. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 22: 100502.
5. Boonyanuphap J. 2005. Spatial model for determining risk area of deforestation. Suranaree Journal of Science and Technology, 12 (2): 145–159.
6. Brando PM, Balch JK, Nepstad DC, Morton DC, Putz FE, Coe MT, Silvério D, Macedo MN, Davidson EA, Nóbrega CC, Alencar A, Soares-Filho BS. 2014. Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111: 6347–6352.
7. Cochrane MA. 2003. Fire science for rainforests. Nature, 421 (6926): 913-919.
8. Davison CW, Rahbek C, Morueta-Holme N. 2021. Land-use change and biodiversity: Challenges for assembling evidence on the greatest threat to nature. Global Change Biology, 27: 5414–5429.
9. de Oliveira BF, Bottino MJ, Nobre P, Nobre CA. 2021. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. communications earth & environment, 2: 207.
10. Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford CC, Bonan G, Carpenter SR, Chapin FS, Coe MT, Daily GC, Gibbs H, Helkowski JH, Holloway T, Howard E, Kucharik CJ, Patz J, Prentice IC, Ramankutty N, Snyder PK. 2005. Global consequences of land use. Science, 309 (5734): 570-574.
11. Halperin J, LeMay V, Coops N, Verchot L, Marshall P, Lochhead K. 2016. Canopy cover estimation in miombo woodlands of Zambia: Comparison of Landsat 8 OLI versus RapidEye imagery using parametric, nonparametric, and semiparametric methods. Remote Sensing of Environment, 179: 170-182.
12. Hastie TJ, Tibshirani RJ 1990. Generalized Additive Models, 2nd ed. Chapman and Hall, London. 16 pp.
13. Hosonuma N, Herold M, Sy VD, Fries RSD, Brockhaus M, Verchot L, Romijn E. 2012. An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. Environmental Research Letters, 7 (4): 044009.
14. Jellouli O, Bernoussi AS. 2022. The impact of dynamic wind flow behavior on forest fire spread using cellular automata: Application to the watershed BOUKHALEF (Morocco). Ecological Modelling, 468: 109938.
15. Kanade R, John R. 2018. Topographical influence on recent deforestation and degradation in the Sikkim Himalaya in India; Implications for conservation of East Himalayan broadleaf forest. Applied Geography, 92: 85–93.
16. 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. (in Persian)
17. Knapp M, Strobl M, Ventura A, Seidl M, Jakubíkova L, Tajovský K, Kadlec T, Gonzalez E. 2022. Importance of grassy and forest non-crop habitat islands for overwintering of ground-dwelling arthropods in agricultural landscapes: A multi-taxa approach. Biological Conservation, 275: 109757.
18. Korhonen L, Hadi A, Packalen P, Rautiainen M. 2017. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. Remote Sensing of Environment, 195: 259-274.
19. Kosicki J.Z. 2020. Generalised Additive Models and Random Forest Approach as effective methods for predictive species density and functional species richness. Environmental and Ecological Statistics, 27 (3): 27, 273–292.
20. Laurance WF, Goosem M, Laurance SGW. 2009. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. Trends in Ecology & Evolution, 24 (12): 659–669.
21. López S. 2022. Deforestation, forest degradation, and land use dynamics in the Northeastern Ecuadorian Amazon. Applied Geography, 145: 102749.
22. López-Bedoya PA, Bohada-Murillo M, Ángel-Vallejo MC, Audino LD, Davis ALV, Gurr G, Noriega JA. 2022. Primary forest loss and degradation reduces biodiversity and ecosystem functioning: A global meta-analysis using dung beetles as an indicator taxon. Journal of Applied Ecology, 59: 1572–1585.

23. Ma J, Li J, Wu W, Liu J. 2023. Global forest fragmentation change from 2000 to 2020. *Nature Communication*, 14: 3752.
24. Melin M, Korhonen L, Kukkonen M, Packalen P. 2017. Assessing the performance of aerial image point cloud and spectral metrics in predicting boreal forest canopy cover. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 129: 77-85.
25. Morreale LL, Thompson JR, Tang X, Reinmann AB, Hutyra LR. 2021. Elevated growth and biomass along temperate forest edges. *Nature Communications*, 12: 7181.
26. Netzel P, Tyminska L, Feleha DD, Socha J. 2024. New approach to assess forest fragmentation based on multiscale similarity index. *Ecological Indicators*, 158: 111530.
27. Ngo KM, Davies S, Hassan NFN, Lum S. 2016. Resilience of a forest fragment exposed to long-term isolation in Singapore. *Plant Ecological Diversity*, 9: 397-407.
28. Polansky L, Newman K, Nobriga M, Mitchell L. 2018. Spatiotemporal Models of an Estuarine Fish Species to Identify Patterns and Factors Impacting Their Distribution and Abundance. *Estuaries and Coasts*, 41 (2): 572-581.
29. Potts SE, Rose KA. 2018. Evaluation of GLM and GAM for estimating population indices from fishery independent surveys. *Fisheries Research*, 208: 167-178.
30. Saha S, Bhattacharjee S, Shit P.K, Sengupta N, Bera B. 2022. Deforestation probability assessment using integrated machine learning algorithms of Eastern Himalayan foothills (India). *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 14: 200077.
31. Sahana M, Hong H, Sajjad H, Liu J, Zhu AX. 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.
32. Sasikumar R, Indira S. 2019. Impact of climate factors through glm and gam methods. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8 (9): 3 pp.
33. Schwartz NB, Uriarte M, DeFries R, Bedka KM, Fernandes K, Gutiérrez-Vélez V, Pinedo-Vasquez MA. 2017. Fragmentation increases wind disturbance impacts on forest structure and carbon stocks in a western Amazonian landscape. *Ecological Applications*, 27: 1901-1915.
34. Sguotti C, Lynam CP, García-Carreras B, Ellis JR, Engelhard GH. 2016. Distribution of skates and sharks in the North Sea: 112 years of change. *Global Change Biology*, 22 (8): 2729-2743.
35. Shirk AJ., Cushman, SA, Waring KM, Wehenkel CA, Leal-Sáenz A, Toney C, Lopez-Sanchez CA. 2018. Southwestern white pine (*Pinus strobiformis*) species distribution models project a large range shift and contraction due to regional climatic changes. *Forest Ecology and Management*, 411: 176-186.
36. Silvério DV, Brando PM, Bustamante MMC, Putz FE, Marra DM, Levick SR, Trumbore SE. 2019. Fire, fragmentation, and windstorms: A recipe for tropical forest degradation. *Journal of Ecology*, 107 (2): 656-667.
37. Talebi KS, Sajedi T, Pourhashemi M. 2014. *Forests of Iran, A Treasure from the Past, a Hope for the Future*, Springer, Dordrecht, Germany, 149 pp.
38. Vásquez-Grandón A, Donoso PJ, Gerding V. 2018. Forest Degradation: When Is a Forest Degraded?. *Forests*, 9 (11): 726.
39. Vorpahl P, Elsenbeer H, Mrker M, Schrder S. 2012. How can statistical models help to determine driving factors of landslides? *Ecological Modeling*, 239: 27-39.
40. 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.
41. Yamamoto Y, Shigetomi Y, Ishimura Y, Hattori M. 2019. Forest change and agricultural productivity: Evidence from Indonesia. *World Development* 114: 196-207.



Enhancing map accuracy by transitioning from logistic to generalized additive model (Probability mapping of forest degradation in the Nav forest, Asalem, using GIS and R)

Saeid Shabani ^{1*}, Masoud Alidoost ², Shahryar Sobhzahedi ³, Behrooz Mohseni ⁴

Received: 2025-04-26 / Accepted: 2025-07-26 / Published: 2025-12-27

Abstract

As the degradation of forest cover in the Hyrcanian forests intensifies, the need for accurate and predictive modeling to identify critical areas has become increasingly urgent. This study aims to improve the accuracy of deforestation risk mapping by comparing the performance of the Logistic Regression (LR) model and the Generalized Additive Model (GAM) in a GIS and R environment. The study area is located in the Nav forests, Rezvanshahr county in the western part of

Saeid Shabani ¹(✉), Masoud Alidoost ², Shahryar Sobhzahedi ³, Behrooz Mohseni ⁴

1. Assistant Professor, Research Department of Natural Resources, Golestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

2. Researcher., Natural Resources Researches Department, Guilan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Rasht, Iran

3. Researcher., Natural Resources Researches Department, Guilan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Rasht, Iran

4. Assistant Professor, Research Department of Natural Resources, Golestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran

DOI: 10.82447/girs.2025.1205013

e-mail: s.shabani@areeo.ac.ir

the Gilan province, which faces multiple challenges such as agricultural expansion, road construction, and increasing human settlements. In this study, 14 environmental and anthropogenic variables were initially identified as influential factors. Following a multi collinearity analysis, three variables aspect, landform, and slope curvature were excluded due to high collinearity. The remaining 11 variables were subsequently included as inputs in both regression models. The GAM model was able to reveal the non-linear relationships and complex, threshold-driven interactions between variables such as distance to residential area, distance to road, distance to agricultural land, wind effect, elevation lands, whereas the LR model analyzed these relationships linearly. The results showed that the GAM model achieved higher predictive accuracy for identifying deforested areas with an Area Under the Curve (AUC) of 0.978, kappa index of 0.87, sensitivity of 0.95 and specificity of 0.93, compared to the LR model's AUC of 0.895, kappa index of 0.73, sensitivity of 0.85 and specificity of 0.78. The performance comparison of the two models using DeLong's test showed an AUC difference of 0.083, which was statistically significant (p -value < 0.01). The 95% confidence interval for this difference

ranged from 0.035 to 0.131, confirming the superior predictive accuracy of the generalized additive model. The findings indicate that the use of flexible models like GAM can be an effective tool for risk zoning, environmental assessment, and designing conservation policies, especially in heterogeneous and complex ecosystems like the Hyrcanian forests, where degradation is influenced by the interaction of both natural and human factors.

Extended Abstract

Statement of the problem: The Hyrcanian forest cover in northern Iran, with its distinctive plant species and high biodiversity, holds a vital role in maintaining regional environmental balance, regulating water flows, preventing soil erosion, and mitigating the consequences of global warming. Despite their ecological significance, these forests are increasingly threatened by a combination of anthropogenic and environmental pressures, making the accurate identification and prediction of areas at risk of degradation essential for effective forest management.

Purpose: This study aimed to enhance the spatial modeling of forest degradation in the Nav forests of Nav, Asalem, by comparing the predictive performance of Logistic Regression (LR) and Generalized Additive Models (GAM), focusing on capturing complex and nonlinear interactions among environmental and human-related factors.

Methodology: A total of 14 predictor variables, encompassing geographic, climatic, and anthropogenic factors—including elevation, slope, slope aspect, slope length, plane curvature, land form, wind effect, distance to road, distance to residential area, distance to agricultural land, annual precipitation, minimum temperature, mean temperature, and maximum temperature—were initially considered. To reduce multicollinearity, slope aspect, land form, and plane curvature were excluded from the final modeling. Forest degradation was operationally defined as the

irreversible conversion of forest ecosystems into non-forest land uses due to human interventions or natural disturbances, with minimal potential for mid-term recovery. Using high-resolution field surveys, 156 forest degradation hotspots were precisely mapped within the study area. 70 percent of the dataset was allocated for model training and 30 percent for validation. Model performance was evaluated using the Area Under the Curve (AUC) and Cohen's Kappa coefficient.

Results and Discussion: LR results indicated that elevation, distance to road, distance to residential area, distance to agricultural land, annual precipitation, and minimum and mean temperatures were significant predictors of forest degradation. GAM, by contrast, captured the nonlinear relationships and revealed a stronger influence of anthropogenic factors, in addition to elevation and wind effect, on the probability of degradation. Partial dependence analyses demonstrated that degradation probability generally decreased with increasing distance to road up to approximately 1,000 meters, followed by a gradual increase and a secondary rise at greater distances. This pattern highlights the role of roads as facilitators of forest access, thereby amplifying degradation risk, while remote areas experience reduced anthropogenic pressure. The relationship between distance to residential area and forest degradation exhibited a more complex, non-linear pattern. Overall, the probability of degradation declined up to about 4,500 meters, reflecting reduced exposure to activities such as wood harvesting, land conversion, and infrastructure development, which are typically concentrated near human settlements. For distance to agricultural land, an oscillatory trend was observed, indicating that forests adjacent to croplands are more susceptible to continuous degradation due to expansion for cultivation and grazing. Elevation consistently exhibited a declining effect on degradation risk, with higher-altitude forests less accessible and therefore less prone to exploitation, while lower-elevation areas face greater anthropogenic pressures. Wind effect

showed an initial slight decline in degradation probability, followed by a sharp increase at higher wind indices. Ecologically, strong winds can directly damage trees and indirectly elevate fire susceptibility by drying surface fuels, which is particularly relevant in the densely vegetated Hyrcanian forests with high fire potential during warm seasons. Human activities, such as waste burning, tourism, or intentional land clearing, can further amplify fire risk in combination with wind, reinforcing its role as a key driver of degradation. Model comparison confirmed the superior predictive performance of GAM, achieving an AUC of 0.978 and a Kappa coefficient of 0.87. DeLong's test indicated a statistically significant difference between LR and GAM (AUC difference = 0.083, $p < 0.01$), with a 95% confidence interval ranging from 0.035 to 0.131. These results demonstrate that GAM is more suitable for high-resolution applications, especially in regions with heterogeneous environmental conditions, providing more accurate and reliable risk maps for forest management

Conclusion: The findings of this study carry important practical implications for conservation

planning. The use of advanced nonlinear models such as GAM is recommended as a primary tool for zoning areas at risk of degradation in spatial planning and environmental assessment frameworks. Establishing multifunctional buffer zones near roads and agricultural lands can mitigate both ecological and anthropogenic pressures. In regions characterized by low precipitation and high temperatures, seasonal or regional restrictions on forest utilization are advised to limit further degradation. The study emphasizes the importance of flexible, evidence-based decision-making approaches capable of adapting to spatiotemporal variations in degradation patterns, thereby supporting sustainable management of the Hyrcanian forests. Moreover, the application of GAM provides valuable insights for other ecological domains, including climate change modeling and natural resource management under human pressures, enhancing our capacity to understand, predict, and respond to complex environmental challenges.

Keywords: Forest degradation, Hyrcanian forests, GAM, Spatial modeling.