Kharazmi University

Spatial Analysis Environmental Hazards

Online ISSN: 2588-5146
Homepage: https://khu.ac.ir

Predicting Deforestation Susceptibility in the Iran's Hyrcanian Forests: Integrating Climatic, Topographic, and Anthropogenic Factors

Saeid Shabani [1]✉ | Behrooz Mohseni [2] | Aiding Kornejady [3] | Akram Ahmadi [4] | Hassan Faramarzi [5] | Esmaeil Silakhori [6]

1. Corresponding Author, Research Department of Natural Resources, Golestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. E-mail: s.shabani@areeo.ac.ir
2. Research Department of Natural Resources, Golestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. E-mail: b.mohseni@areeo.ac.ir
3. Research Department of Natural Resources, Golestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. E-mail: aidin.kornejady@gmail.com
4. Research Department of Natural Resources, Golestan Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Gorgan, Iran. E-mail: ahmadi.1870@gmail.com
5. Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, TMU, Iran. E-mail: faramarzi.hassan@yahoo.com
6. Department of Arid Zone Management, Gorgan University, Iran. E-mail: esmaeil.silakhori@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 02 May 2025
Accepted 10 June 2025
Published online 10 August 2025

Keywords:
Probability of Occurrence,
Road Development,
Kappa Coefficient,
Human Factors,
Kappa coefficient,
Sustainable Management.

ABSTRACT

Objective: Deforestation is one of the primary challenges and environmental threats facing forest ecosystems, including the Hyrcanian forests, and occurs under the influence of various natural and anthropogenic drivers. This study aimed to model the probability of deforestation occurrence within the Loveh forest management district located in northern Iran.

Methods: The dataset comprised 104 documented deforestation points and 14 explanatory variables, derived through spatial analysis using GIS and environmental, topographic, and anthropogenic data. To assess the relationships among variables and predict the likelihood of deforestation, two statistical models were employed: logistic regression and the Generalized Additive Model (GAM).

Results: The results revealed that the GAM outperformed the logistic regression model, achieving a higher Kappa coefficient (0.84) and Area Under the Curve (AUC) value (0.956), and providing a more realistic spatial distribution of deforestation risk. The most influential variables included distance from roads, slope, wind effect, and elevation. Based on the GAM output, approximately 20% of the study area was categorized as high and very high risk.

Conclusions: These findings underscore the pivotal role of access infrastructure, human pressure, and climatic factors in accelerating deforestation processes. The results of this study can serve as a scientific basis for prioritizing conservation interventions, reassessing road development policies, and enhancing spatial planning for sustainable forest management in northern Iran.

Cite this article: Shabani, S., Mohseni, B., Kornejady, A., Ahmadi, A., Faramarzi, H., & Silakhori, E. (2025). Predicting Deforestation Susceptibility in the Iran's Hyrcanian Forests: Integrating Climatic, Topographic, and Anthropogenic Factors. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 12 (1 & 45), 49-64. http//doi.org/10.61882/jsaeh.12.1.45.49

© The Author(s)
Publisher: Kharazmi University
DOI: http//doi.org/10.61882/jsaeh.12.1.45.49

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Hyrcanian forests of Iran, as a unique natural heritage, are under threat from deforestation. This study aims to identify the key factors influencing forest degradation in the Loveh region of Golestan Province and predict its spatial patterns. The research examines the relationships between topographic, climatic, and anthropogenic factors and deforestation, employing a combination of spatial analysis and advanced statistical modeling techniques.

Methods

The required data included 104 deforested points collected through rigorous field surveys and local inspections. Fourteen environmental and anthropogenic variables—comprising topographic features (elevation, slope, aspect), climatic factors (mean temperature, maximum temperature, precipitation), and human-induced indicators (distance from roads, distance from settlements, distance from agricultural lands)—were incorporated as thematic maps. Two modeling approaches, logistic regression and Generalized Additive Model (GAM), were applied to analyze the data and estimate model parameters. The statistical modeling outputs were computed as continuous probability values (ranging from 0 to 1) for each cell in the study area. These values were extracted using prediction functions in the R software environment and subsequently transferred to a Geographic Information System (GIS). Point data were converted into a raster layer with a spatial resolution of 12.5 meters. For final map preparation, optimization of intra-group deviation was performed using the natural breaks classification method, categorizing the maps into four probability levels: low, moderate, high, and very high. Model validation was conducted using two criteria: the Area Under the Curve (AUC) and the Kappa coefficient.

Results

The findings revealed that the GAM model, with an AUC of 0.956 and a Kappa coefficient of 0.84, outperformed logistic regression in accurately modeling the complex relationships between deforestation drivers. The GAM's capability enabled more precise identification of high-risk zones, assigning elevated probabilities only to areas with strong statistical evidence of deforestation likelihood. In contrast, traditional linear models like logistic regression classified a broader range of areas as at-risk. This selective approach of GAM offers significant practical advantages in natural resource management, particularly in reducing Type I errors (false positives), where low-risk areas are mistakenly labeled as high-risk. This feature is especially critical when financial and human resources for conservation programs are limited. Analysis of key deforestation drivers in the study area identified four primary variables with the highest relative importance: distance from roads (29%), slope (24.5%), wind effect (18.4%), and elevation (16%).

Conclusion

A detailed examination of these relationships showed that distance from roads, as the most influential factor, exhibits an inverse exponential relationship with deforestation probability. The results demonstrated that deforestation likelihood increases significantly as proximity to roads decreases, highlighting the exacerbating effect of accessibility on forest degradation. Slope, the second most important factor, displayed a nonlinear relationship with deforestation, peaking in moderately sloped areas. This pattern likely results from a combination of concentrated human activities and higher ecological vulnerability in such terrains. Wind, as the third key factor, played a crucial role in modeling deforestation probability. Its most notable impact is the spread of wildfires, particularly when agricultural residue burning occurs near

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]

[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

forest edges. Studies indicate that during dry seasons, strong winds rapidly transfer fires from farmlands to forests. Additionally, wind reduces soil and vegetation moisture, increasing susceptibility to fires and degradation, ultimately accelerating deforestation. Elevation, the fourth significant factor, showed a decreasing relationship with deforestation, with higher probabilities observed at lower altitudes. This distribution clearly reflects intensified anthropogenic pressure in low-lying areas. The study underscores the urgent need for a fundamental revision of regional development policies. Key management priorities include restricting road expansion in sensitive zones and enforcing strict measures against illegal logging, particularly in low-elevation forests. Complementary strategies—such as community engagement, education, and economic incentives for rehabilitating degraded areas—could significantly enhance forest conservation efforts. These integrated approaches not only improve cost-effectiveness but also yield more sustainable long-term outcomes.

Keywords: Probability of Occurrence, Road Development, Kappa Coefficient, Human Factors, Kappa coefficient, Sustainable Management.

Author Contributions

First author: Conceptualization, methodology, project administration;
Second author: Writing—original draft preparation;
Third author: Writing—review and editing;
Fourth author: Formal analysis;
Fifth author: Visualization;
Sixth author: Data curation;
All authors contributed to the interpretation of results and approved the final manuscript.

Data Availability Statement

The datasets used and analyzed during this study are available from the corresponding author upon reasonable request. The precipitation data were obtained from the Iranian Meteorological Organization and are subject to their data-sharing policies.

Acknowledgements

This research is part of the findings of the national project "Modeling and predicting the probability of deforestation in the Hyrcanian vegetation zone using geographic information systems and data mining methods - forests of Golestan province" of the National Forest and Rangeland Research Institute and the Iranian Agricultural Research, Education and Extension Organization with the number 12-57-09-014-02009-020138. Therefore, we sincerely appreciate and thank all those involved in the implementation of the aforementioned project.

Ethical considerations

This study adheres to ethical research practices. All data used in this research were obtained from publicly available sources or provided by authorized institutions. No human or animal subjects were involved, and thus, no ethical approval was required.

Funding

This article was supported by the National Forest and Rangeland Research Institute and the Agricultural Research, Education and Extension Organization of Iran.

Conflict of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

دانشگاه خوارزمی

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی

شاپا الکترونیکی: ۵۱۴۶– ۲۵۸۸

Homepage: https://khu.ac.ir

پیش‌بینی حساسیت به جنگل‌زدایی در جنگل‌های هیرکانی ایران: تلفیق عوامل اقلیمی، توپوگرافی و انسانی

سعید شعبانی [۱] ✉ | بهروز محسنی [۲] | آیدینگ کرنژادی [۳] | اکرم احمدی [۴] | حسن فرامرزی [۵] | اسماعیل سیلاخوری [۶]

۱. نویسنده مسئول، بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: s.shabani@areeo.ac.ir

۲. بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: b.mohseni@areeo.ac.ir

۳. بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: aidin.kornejady@gmail.com

۴. بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، گرگان، ایران. رایانامه: ahmadi.1870@gmail.com

۵. دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: faramarzi.hassan@yahoo.com

۶. دانشکده بیابان، دانشگاه علوم کشاورزی گرگان، ایران. رایانامه: esmaeil.silakhori@gmail.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹

کلیدواژه‌ها:
احتمال وقوع، توسعه جاده، ضریب کاپا، عوامل انسانی، مدیریت پایدار.

چکیده

هدف: پدیده جنگل‌زدایی یکی از چالش‌ها و مخاطرات اصلی در اکوسیستم‌های جنگلی از جمله جنگل‌های هیرکانی است که تحت تأثیر عوامل متنوع طبیعی و انسانی رخ می‌دهد. این مطالعه با هدف مدلسازی احتمال وقوع جنگل‌زدایی در حوزه جنگلداری لوه واقع در شمال ایران انجام شد.

روش پژوهش: داده‌های این پژوهش شامل ۱۰۴ نقطه جنگل‌زدایی ثبت‌شده و ۱۴ متغیر تبیینی بود که از طریق تحلیل مکانی در محیط GIS و داده‌های اقلیمی، توپوگرافی و انسانی استخراج گردید. برای تحلیل رابطه بین متغیرها و پیش‌بینی احتمال جنگل‌زدایی، از دو مدل آماری شامل رگرسیون لجستیک و مدل جمعی تعمیم‌یافته استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل جمعی تعمیم‌یافته با ضریب کاپای ۰/۸۴ و سطح زیر منحنی عملکرد برابر ۰/۹۵۶ عملکرد بهتری نسبت به مدل لجستیک داشته و توزیع واقع‌گرایانه‌تری از سطوح خطر ارائه داده است. متغیرهای فاصله از جاده، شیب، اثر باد و ارتفاع از سطح دریا بیشترین تأثیر را بر احتمال جنگل‌زدایی داشتند. بر اساس خروجی مدل GAM، حدود ۲۰ درصد منطقه در طبقه خطر بالا و بسیار بالا قرار گرفت.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها حاکی از نقش تعیین‌کننده زیرساخت‌های دسترسی، فشار انسانی و عوامل اقلیمی در تسریع روند جنگل‌زدایی است. نتایج این پژوهش می‌تواند در اولویت‌بندی مداخلات حفاظتی، بازنگری در توسعه جاده‌ها و برنامه‌ریزی فضایی مؤثر برای مدیریت پایدار جنگل‌های شمال کشور مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: شعبانی، سعید؛ محسنی، بهروز؛ کرنژادی، آیدینگ؛ احمدی، اکرم؛ فرامرزی، حسن؛ و سیلاخوری، اسماعیل (۱۴۰۴). پیش‌بینی حساسیت به جنگل‌زدایی در جنگل‌های هیرکانی ایران: تلفیق عوامل اقلیمی، توپوگرافی و انسانی. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۱ و ۴۵)، ۴۹-۶۴.
http//doi.org/10.61882/jsaeh.12.1.45.49

ناشر: دانشگاه خوارزمی

© نویسندگان

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

مقدمه

در دهه‌های اخیر، سه عامل اصلی شامل افزایش غلظت دی‌اکسیدکربن جو، تغییرات در چرخه جهانی نیتروژن، و تغییر کاربری اراضی و پوشش زمین، به‌عنوان مهم‌ترین محرک‌های تغییرات زیست‌محیطی در سطح جهانی شناخته شده‌اند (تاوارس داس نوس[۱]، ۲۰۲۱؛ دیویسن[۲] و همکاران ۲۰۲۱؛ نتزل[۳] و همکاران، ۲۰۲۴). این تغییرات پیامدهای گسترده‌ای همچون افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش تنوع زیستی و تشدید رسوب‌گذاری در دریاچه‌ها و جریان‌های سطحی را به همراه داشته‌اند. در این میان، جنگل‌زدایی به‌عنوان یکی از مظاهر بارز تغییر کاربری زمین، در بسیاری از مناطق جنگلی جهان گزارش شده است (ساهانا[۴] و همکاران، ۲۰۱۸).

اگرچه طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ نرخ خالص کاهش سطح جنگل‌های جهان با روندی کاهشی همراه بوده است، اما این کاهش عمدتا ناشی از کاهش سرعت جنگل‌زدایی در برخی کشورها و توسعه جنگل‌کاری یا احیای طبیعی در کشورهایی مانند ایالات متحده، روسیه و کشورهای اتحادیه اروپا بوده است (فائو[۵]، ۲۰۲۰). به‌طور خاص، نرخ خالص جنگل‌زدایی از ۷/۸ میلیون هکتار در سال طی دهه ۱۹۹۰–۲۰۰۰، به ۵/۲ میلیون هکتار در دهه ۲۰۰۰–۲۰۱۰ و نهایتاً به ۴/۷ میلیون هکتار در دهه ۲۰۱۰–۲۰۲۰ کاهش یافته است. با این حال، کاهش اخیر از سرعت کمتری نسبت به دهه‌های پیش برخوردار بوده و نشان‌دهنده کند شدن برنامه‌های احیا و گسترش جنگل در سطح جهانی است.

در ایران نیز شواهد متعددی از کاهش قابل توجه پوشش جنگلی به‌ویژه در ناحیه جنگل‌های هیرکانی وجود دارد. یافته‌های مطالعات ملی حاکی از آن است که بین سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵، حدود ۹ درصد از سطح جنگل‌های هیرکانی از بین رفته است (میرآخورلو و اخوان، ۱۳۹۶). علیرغم آن‌که تنها حدود ۱۴ میلیون هکتار از اراضی جنگلی در کشور باقی مانده است، اقدامات حفاظتی ناکارآمد، بهره‌برداری ناپایدار، و ضعف در اجرای سیاست‌های کلان زیست‌محیطی، روند تخریب این میراث طبیعی ارزشمند را تسریع کرده است. مطابق گزارش فائو، ۱۱/۵ درصد از جنگل‌های هیرکانی بیش از برآوردهای پیش‌بینی‌شده تخریب شده‌اند و این امر ایران را در میان ۱۰ کشور نخست آسیا–اقیانوسیه از نظر نرخ جنگل‌زدایی قرار داده است (فائو، ۲۰۲۰). خسارت اقتصادی ناشی از این پدیده بالغ بر ۶۸۰۰ هزار بیلیارد ریال برآورد شده است.

جنگل‌های هیرکانی در شمال ایران، یکی از قدیمی‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی جهان با تنوع زیستی منحصربه‌فرد محسوب می‌شوند، اما در دهه‌های اخیر، به‌ویژه تحت تأثیر گسترش سکونتگاه‌ها، کشاورزی و دامداری سنتی، به شدت آسیب‌پذیر شده‌اند. توسعه باغات، شهرک‌سازی در اراضی شیب‌دار و جلگه‌ای، و چرای مفرط دام در مناطق میان‌بند، از مهم‌ترین عوامل انسانی تأثیرگذار بر تخریب این جنگل‌ها به شمار می‌آیند. در عین حال، عوامل طبیعی مانند اقلیم، شیب، ارتفاع، نوع خاک و تغییرات اقلیمی نیز در تعامل با عوامل انسانی، نقش مهمی در تحریک فرآیند جنگل‌زدایی ایفا می‌کنند (یخکشی و آفتاب‌طلب، ۱۳۸۷؛ عبدالله[۶] و ناکاگوشی[۷]، ۲۰۰۷). فرآیند جنگل‌زدایی اغلب با قطعه‌قطعه شدن توده‌های جنگلی و تبدیل آن‌ها به لکه‌های کوچک‌تر آغاز می‌شود؛ پدیده‌ای که نه‌تنها به کاهش پوشش گیاهی منجر می‌شود، بلکه انسجام زیستگاه‌ها، پویایی تجدید حیات طبیعی، و تنوع زیستی را نیز به خطر می‌اندازد. شناسایی و تحلیل دقیق محرک‌های مؤثر بر جنگل‌زدایی، از پیش‌شرط‌های اساسی در طراحی سیاست‌های کاربری زمین و مدیریت پایدار منابع طبیعی به‌شمار می‌آید. به‌ویژه، درک تعامل پیچیده میان عوامل انسانی و طبیعی، برای پایش سلامت جنگل و پیش‌بینی روندهای آتی تخریب، اهمیت بسزایی دارد.

---

[1] - Tavares dos Neves
[2] - Davison
[3] - Netzel
[4] - Sahana
[5] - FAO
[6] -Abdullah
[7] - Nakagoshi

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری‌های مکانی مانند سامانه اطلاعات جغرافیایی در کنار الگوریتم‌های نوین مدل‌سازی مانند مدل‌های یادگیری ماشین، ابزارهای قدرتمندی را برای شناسایی و پیش‌بینی مناطق حساس به جنگل‌زدایی فراهم کرده‌اند (لوز[۱]، ۲۰۰۹). این فناوری‌ها امکان تحلیل مکانی الگوهای طبیعی، تأثیرات اقلیمی و الگوهای کاربری زمین را در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌سازند و در تصمیم‌سازی‌های محیط‌زیستی و منابع طبیعی نقش فزاینده‌ای ایفا می‌کنند.

در این پژوهش، با بهره‌گیری از تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی و دو مدل آماری شامل رگرسیون لجستیک و مدل جمعی تعمیم‌یافته (Generalized Additve Model: GAM)، تلاش شده است تا مناطق حساس به جنگل‌زدایی در جنگل‌های هیرکانی شناسایی و مدل‌سازی شوند. هدف اصلی، تهیه نقشه حساسیت به جنگل‌زدایی و تحلیل سهم نسبی عوامل اقلیمی، توپوگرافی و انسانی در وقوع جنگل‌زدایی و پیش‌بینی مناطق پرخطر در آینده است. علیرغم آن‌که محرک‌های اصلی جنگل‌زدایی در ادبیات شناخته شده‌اند، اما ارزیابی کمی تأثیرات آن‌ها و تبیین روابط پیچیده میان این عوامل، همچنان یکی از چالش‌های جدی در علوم زیست‌محیطی به‌شمار می‌آید. پیش‌بینی دقیق و مکان‌مند خطر جنگل‌زدایی، ابزاری حیاتی برای سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان و مدیران منابع طبیعی است تا با شناخت مناطق آسیب‌پذیر، نسبت به تدوین و اجرای راهبردهای حفاظت، احیاء و استفاده پایدار از این زیست‌بوم ارزشمند اقدام نمایند.

پیشینه پژوهش

۱. پیشینه تجربی

در تحلیل پدیده جنگل‌زدایی، پژوهش‌های داخلی و بین‌المللی از مدل‌ها و متغیرهای مختلفی استفاده کرده‌اند و هر یک بر مجموعه‌ای خاص از عوامل مؤثر تمرکز داشته‌اند. برای نمونه، سیلوا[۲] و همکاران (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از مدل شبکه بیزی مکانی–زمانی و داده‌های چندمنظوره، نشان دادند که عوامل انسانی، به‌ویژه فاصله از مراکز مسکونی، نقش مهمی در روند جنگل‌زدایی در مناطق گرمسیری برزیل دارند. آن‌ها پیشنهاد کردند که ایجاد دالان‌های حفاظتی بین مناطق مسکونی و جنگل‌ها می‌تواند از شدت تخریب بکاهد. در مطالعات مشابه، اوجاتره[۳] و همکاران (۲۰۲۳) در شرق آفریقا و فنگ[۴] و همکاران (۲۰۱۸) در چین، با استفاده از مدل جمعی تعمیم‌یافته، نشان دادند که گسترش کشاورزی و مناطق شهری از مهم‌ترین دلایل کاهش پوشش جنگلی هستند. همچنین تیزیرا[۵] و همکاران (۲۰۲۵) گزارش کردند که نزدیکی به اراضی کشاورزی و تعارض با اراضی ملی، عامل ۸۳ درصد از جنگل‌زدایی در جنگل‌های آمازون بوده است. عامل دیگری که بارها در پژوهش‌ها به آن اشاره شده، توسعه جاده‌ها و افزایش دسترسی انسان به بخش‌های داخلی جنگل‌هاست که باعث تشدید تخریب عرصه‌های طبیعی می‌شود (احمدی[۶]، ۲۰۱۸). داسیلوا[۷] و همکاران (۲۰۲۵) نیز در بررسی جنگل‌زدایی در منطقه ساوانا در آفریقا، کشاورزی و دامداری را اصلی‌ترین عوامل تخریب جنگل‌ها دانستند. در کنار آن، فعالیت‌های معدنی و گسترش گیاهان مهاجم نیز به‌عنوان تهدیدهایی جدی برای این اکوسیستم‌ها معرفی شده‌اند.

افزون بر این عوامل انسانی، برخی مطالعات تغییرات اقلیمی، افزایش تنش‌های محیطی و خشکسالی را نیز از دلایل مهم جنگل‌زدایی در سطح جهانی دانسته‌اند (کایت[۸] و همکاران، ۲۰۲۱؛ چن[۹] و همکاران، ۲۰۲۳). در همین زمینه، جعفری[۱۰] و همکاران

[1]- Looze
[2] - Silva
[3] - Ojatre
[4] - Feng
[5]- Teixeira
[6] - Ahmadi
[7] - Dasilva
[8] - Kayet
[9] - Chen
[10] - Jjafari

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

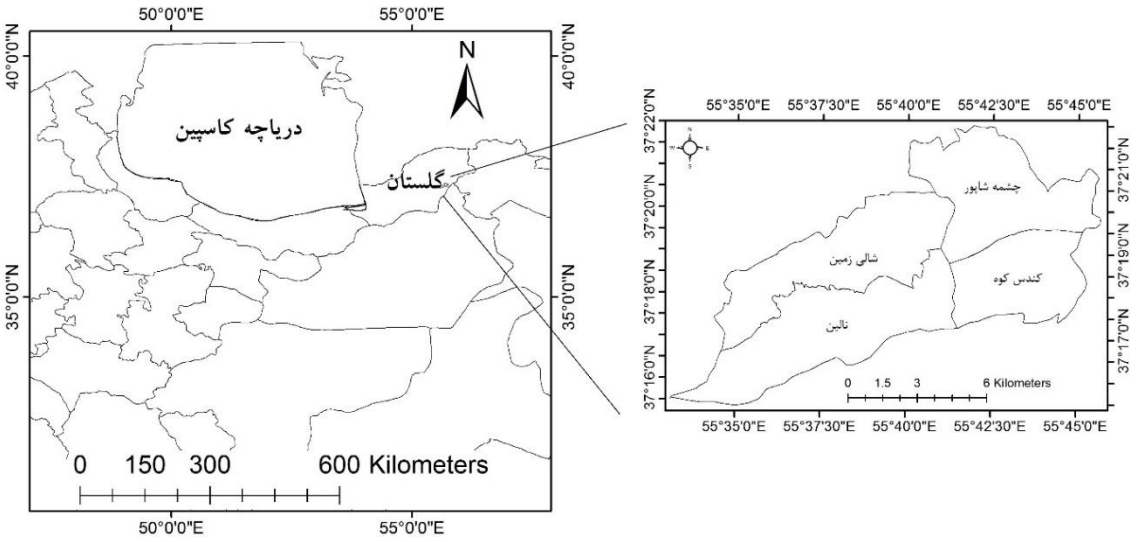
(۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک برای تهیه نقشه جنگل‌زدایی، نشان دادند که شیب زمین یکی از عوامل طبیعی تأثیرگذار در تخریب جنگل است، گرچه متغیرهایی مانند شرایط اقلیمی، طول شیب یا اثر باد در تحلیل آن‌ها لحاظ نشده بود.

در ایران، مطالعاتی مانند صالح[1] و همکاران (۲۰۲۱)، به عوامل اقتصادی از جمله بحران‌های مالی و ضعف در اجرای قوانین، به‌عنوان محرک‌های جنگل‌زدایی اشاره کرده‌اند. همچنین، تأثیر سیاست‌های نادرست در تغییر کاربری اراضی و برخی فعالیت‌های اقتصادی در بسیاری از پژوهش‌ها مورد تأکید قرار گرفته است (ساهانا[2] و همکاران، ۲۰۱۸؛ برا[3]، ۲۰۲۰). در مجموع، آنچه در تمام این مطالعات مشترک است، نقش برجسته عوامل انسانی مانند کشاورزی، توسعه مناطق مسکونی و ساخت جاده‌ها در کنار عوامل طبیعی در پدیده جنگل‌زدایی است. در همین راستا، در این مطالعه تلاش شده با استفاده از مجموعه‌ای از لایه‌های اطلاعاتی مربوط به عوامل انسانی و محیطی و به‌کارگیری مدل جمعی تعمیم‌یافته در کنار مدل لجستیک، بخشی از پیچیدگی‌ها و اثرات ترکیبی عوامل مختلف روشن شود. شایان ذکر است که اگرچه در این پژوهش داده‌های دقیق جمعیتی در دسترس نبود، اما از لایه مناطق مسکونی به‌عنوان شاخص جایگزین استفاده شد؛ روشی که در بسیاری از مطالعات بین‌المللی نیز رایج است (برا، ۲۰۲۰؛ سیلوا[4] و همکاران، ۲۰۲۰).

روش‌شناسی پژوهش

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با نام «لوه» بخشی از جنگل‌های هیرکانی با اقلیم معتدل است که دارای زمستان‌هایی ملایم و تابستان‌هایی گرم و خشک می‌باشد. این پژوهش، هر چهار سری از طرح‌های جنگلداری لوه را در بر می‌گیرد؛ این طرح‌ها در حوزه آبخیز شماره ۹۴ اداره کل منابع طبیعی استان گلستان واقع شده‌اند و در فاصله ۲۴ کیلومتری شرق شهرستان گالیکش و در غرب جنگل‌های پارک ملی گلستان قرار دارند. محدوده مورد بررسی در زون ۴۰ شمالی واقع شده و بین طول‌های جغرافیایی ′۴۱ °۵۵ تا ′۴۶ °۵۵ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ′۱۷ °۳۳ تا ′۲۲ °۳۳ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). وسعت این منطقه بیش از ۱۰ هزار هکتار بوده و ارتفاع آن از سطح دریا بین ۵۰۰ تا ۱۸۲۰ متر متغیر است.



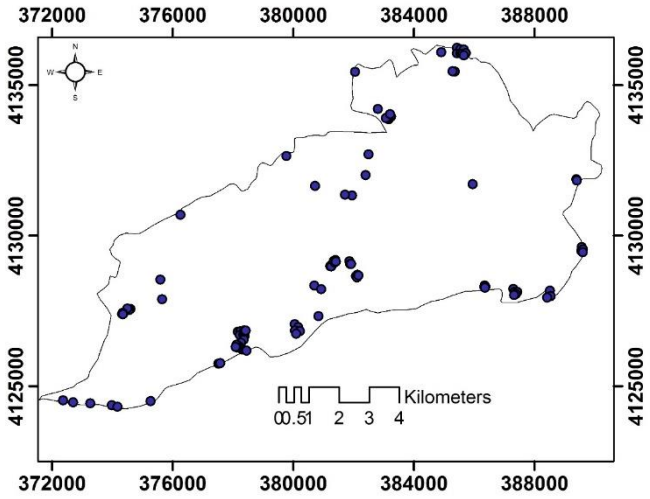
شکل ۱. منطقه مورد مطالعه واقع در طرح جنگلداری لوه در استان گلستان

[1] - Saleh
[2] - Sahana
[3] - Bera
[4] - Silva

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

۲. داده‌ها و روش کار

یکی از مؤثرترین روش‌ها جهت کنترل و شناسایی جنگل‌زدایی، مدلسازی وقوع می‌باشد. در این روش فرض بر آن است شرایطی که منجر به وقوع جنگل‌زدایی در گذشته شده است، می‌تواند باعث وقوع آن پدیده در آینده شود. بنابراین نمونه‌برداری از مناطق قبلی همراه با اطلاعات توپوگرافیک و نقشه‌های پایه از عوامل کنترل کننده به عنوان نمونه‌های تعلیمی یا متغیرهای پیشگو می‌تواند در مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در منطقه مورد مطالعه، به صورت تصادفی، ۱۰۴ عرصه واجد جنگل‌زدایی ثبت و به عنوان متغیر پاسخ لحاظ شد (شکل ۲). در این مطالعه، جنگل‌زدایی 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 (ورکو[1]، ۲۰۲۳). همزمان ۱۴ متغیر تبیینی شامل ارتفاع از سطح دریا، جهت شیب، شیب، شکل زمین، انحنای دامنه، طول شیب، اثر باد، فاصله از جاده، فاصله از مناطق مسکونی، نزدیکی به اراضی کشاورزی، بارندگی، کمینه دما، میانگین دما و بیشینه دما به‌عنوان متغیرهای مستقل درنظر گرفته شد. در این مطالعه از مدل‌های کاربردی با تحلیلی دودویی از داده‌ها استفاده شد. بر این اساس مناطق واجد جنگل‌زدایی به صورت "یک" و مناطق بدون جنگل‌زدایی به صورت "صفر" تعریف شد (ساهانا و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل ۲. موقعیت عرصه‌های واجد جنگل‌زدایی در منطقه مورد مطالعه

از متغیرهای تبیینی مورد اشاره لایه‌های موضوعی در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی با ابعاد سلول ۱۲/۵ در ۱۲/۵ متر تهیه شد. لازم به ذکر است به دلیل وجود هم‌خطی، سه متغیر جهت شیب، شکل زمین و انحنای دامنه از مدل‌سازی کنار گذاشته شدند. در این تحقیق از دو مدل رگرسیون لجستیک و GAM جهت پیش‌بینی احتمال جنگل‌زدایی استفاده شد. در تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از رگرسیون لجستیک، روش گام به گام و نوع پیش‌رونده به کار رفت. شکل کلی و عمومی معادله رگرسیون لجستیک به صورت زیر است:

$$p = \frac{e^z}{1 + e^z}$$ رابطه (۱)

$$Z = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \ldots + B_nX_n$$ رابطه (۲)

در معادلات فوق Z معادله خطی چند گانه حاصل شده از تابع لجیت که همان متغیر وابسته یا پاسخ است، Bi بیان گر ضرایب مدل رگرسیونی و Xi متغیر های مستقل محیطی است.

[1] -Worku

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

در این مطالعه، برای تحلیل رابطه غیرخطی و پیچیده میان جنگل‌زدایی و عوامل محیطی و انسانی، از مدل GAM استفاده شد. GAM نوعی توسعه‌یافته از مدل‌های خطی است که به جای فروض سخت‌گیرانه در مورد شکل تابع ارتباطی بین متغیر پاسخ و متغیرهای پیش‌بینی، اجازه می‌دهد که این روابط به‌صورت انعطاف‌پذیر و غیرخطی، از طریق توابع هموارکننده مدل‌سازی شوند (هستی و تیبشیرانی[1]، ۱۹۹۰). این ویژگی، GAM را به ابزار قدرتمندی برای مدل‌سازی پدیده‌های اکولوژیکی پیچیده از جمله جنگل‌زدایی تبدیل کرده است که در آن روابط بین متغیرها به‌ندرت خطی هستند. توابع هموارکننده در این مطالعه با استفاده از اسپلاین‌های مکعبی تنظیم شدند. انتخاب GAM به دلیل مزیت‌هایی نظیر توانایی در مدل‌سازی اثرات غیرخطی، اجتناب از فروض محدودکننده در مورد شکل روابط، و تفسیرپذیری بالا صورت گرفت.

به‌منظور ارزیابی مدل‌ها از دو شاخص سطح زیر منحنی عملکرد (Area Under the Curve: AUC) و ضریب کاپا استفاده شد. از این‌رو داده‌ها به دو نسبت ۷۰ به ۳۰ برای بخش آموزش و اعتبارسنجی تقسیم شد. هچنین نقشه پهنه‌بندی جنگل‌زدایی منطقه با انتقال نقاط پیش‌بینی شده به محیط نرم‌افزار Arc GIS 10.8 و تبدیل آن به لایه رستری تعریف و نقشه‌های مذکور برای درک بهتر با روش شکستگی‌های طبیعی در چهار گروه احتمال پایین، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند.

یافته‌های پژوهش

نتایج مدل رگرسیون لجستیک نشان داد که سه متغیر مستقل ارتفاع از سطح دریای آزاد، میانگین و بیشینه دما به‌طور معنی‌داری به تبیین احتمال جنگل‌زدایی کمک کرده‌اند. در این مدل، رابطه متغیرهای مستقل با تابع لوجیت احتمال جنگل‌زدایی بررسی می‌شود. مقدار احتمال و میزان آکائیک نسبت به مدل پایه نیز نشان‌دهنده بهبود برازش مدل است. ارتفاع از سطح دریا بیشترین مقدار نسبت درست‌نمائی را دارد که نشان می‌دهد اثر کاهشی آن بر احتمال تخریب، قوی و معنادار است. میانگین دما و بیشینه دما نیز اثرات مثبت و معنی‌داری دارند، که بیانگر آن است که نواحی با دمای بالا، احتمال بیشتری برای جنگل‌زدایی دارند.

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

متغیرهای پیشگو	درجه آزادی	انحراف	معیار آکائیک	آزمون نسبت درست‌نمایی	احتمال معنی‌داری
<None>	–	۱۷۵/۵۱	۱۸۳/۵۱	–	–
ارتفاع از سطح دریا	۱	۱۸۶/۹۷	۱۹۲/۹۷	۱۱/۴۶	۰/۰۰۰۷
میانگین دما	۱	۱۸۲/۹۱	۱۸۸/۹۱	۷/۴۰	۰/۰۰۶۵
بیشینه دما	۱	۱۸۴/۵۳	۱۹۰/۵۳	۹/۰۲	۰/۰۰۲۷

جدول ۲. ضرایب برآورد شده مدل رگرسیون لجستیک برای پهنه‌بندی احتمال جنگل‌زدایی

متغیرهای پیشگو	ضریب	اشتباه معیار	مقدار آماره Z	مقدار p
Intercept	۵۴۰/۷۹	۱۹۵/۳۶	۲/۷۶۸	۰/۰۰۵۶
ارتفاع از سطح دریا	-۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	-۳/۱۹۳	۰/۰۰۱۴
میانگین دما	۱/۱۶۳	۰/۴۳۳	۲/۶۸۲	۰/۰۰۷۳
بیشینه دما	۲۳/۲۷۸	۸/۰۷۳	۲/۸۸۴	۰/۰۰۳۹

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

نتایج نمودارهای وابستگی جزئی در مدل جمعی تعمیم‌یافته نشان داد که ارتفاع از سطح دریا اثر منفی و معناداری بر احتمال جنگل‌زدایی دارد. به‌این‌صورت که در ارتفاع‌های کمتر از حدود ۱۰۰۰ متر، احتمال جنگل‌زدایی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد، اما در ارتفاع‌های بالاتر این تأثیر کمتر می‌شود و تقریباً در سطحی ثابت باقی می‌ماند. این روند نشان می‌دهد که فعالیت‌های انسانی در مناطق پست‌تر بیشتر است. شیب زمین برخلاف انتظار رابطه‌ای مثبت با جنگل‌زدایی داشت؛ یعنی در مناطق پرشیب‌تر، احتمال تخریب جنگل بیشتر بوده است. شاخص طول‌شیب نقش خاصی در پیش‌بینی جنگل‌زدایی نداشت و نمودار آن تقریبا یکنواخت بود، فقط در بخش‌های بالایی کمی نوسان داشت. این موضوع ممکن است به دلیل پراکندگی نامتعادل داده‌ها یا تأثیرات غیرمستقیم

[1] - Hastie & Tibshirani

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

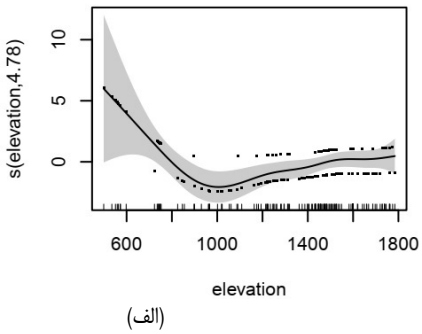
این شاخص باشد. متغیر باد هم الگوی افزایشی و نوسانی داشت؛ به‌طوری‌که با بیشتر شدن شدت باد، احتمال جنگل‌زدایی بالا می‌رفت.

نزدیکی به جاده یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر جنگل‌زدایی بود. در فاصله‌های کمتر از ۱۰۰۰ متر از مسیرهای دسترسی، احتمال جنگل‌زدایی به‌طور معناداری بیشتر است و هرچه فاصله از جاده بیشتر می‌شود، این احتمال کاهش می‌یابد. الگوی مشابهی برای فاصله از زمین‌های کشاورزی نیز مشاهده شد، با این تفاوت که نمودار تغییرات در این متغیر شکل پیچیده‌تری داشت و چندین نقطه اوج و افت را نشان می‌داد. این نوسانات می‌تواند ناشی از تنوع الگوهای کاربری زمین و تفاوت شدت بهره‌برداری کشاورزی در مناطق مختلف باشد. در مورد فاصله از روستا نیز رابطه‌ای غیرخطی دیده شد. تا فاصله حدود دو کیلومتر از مناطق مسکونی، میزان جنگل‌زدایی کاهش پیدا می‌کند، اما در فواصل بیشتر، نمودار شکل سینوسی دارد که احتمالاً نشان‌دهنده تأثیرگذاری عوامل دیگر بر جنگل‌زدایی در این مناطق است.

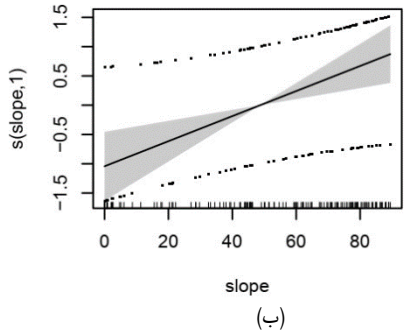
بارندگی سالانه رابطه‌ای معکوس با احتمال جنگل‌زدایی داشت؛ به این معنا که در مناطقی با بارندگی کمتر از ۸۷۰ میلی‌متر، احتمال تخریب جنگل بیشتر بود، اما با افزایش بارندگی، این اثر کاهش پیدا می‌کند. در بررسی دما، مشخص شد که دمای حداقل، میانگین و بیشینه، همگی الگوهایی غیرخطی و نوسانی دارند. بااین‌حال، بیشترین تأثیر مربوط به دمای بیشینه بود. در محدوده‌ای نزدیک به ۲۳/۹۵ درجه سانتی‌گراد، احتمال جنگل‌زدایی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یافت. این نتیجه می‌تواند بیانگر اثرات تنش گرمایی، افزایش تبخیر و کاهش مقاومت جنگل‌ها در دماهای بالا باشد.

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

متغیرهای پیشگو	ضریب اهمیت نسبی
ارتفاع از سطح دریا	۱۶
شیب	۲۴/۵
طول شیب	۰/۳
اثر باد	۱۸/۴
فاصله از جاده	۲۹
فاصله از مناطق مسکونی	۲/۵
نزدیکی به اراضی کشاورزی	۳/۵
بارش	۴/۱
کمینه دما	۰/۵
میانگین دما	۰/۵
بیشینه دما	۰/۷

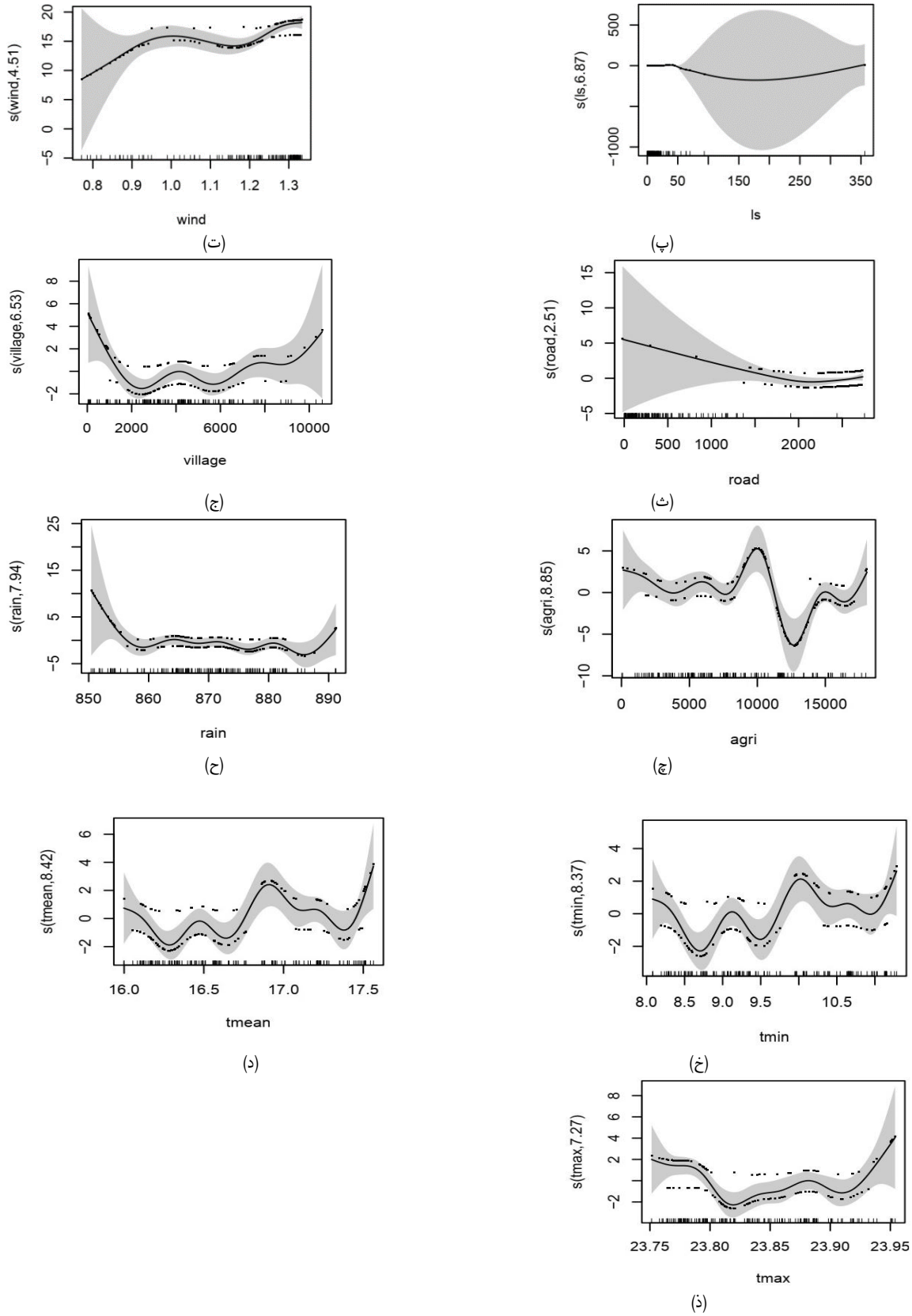


(الف)



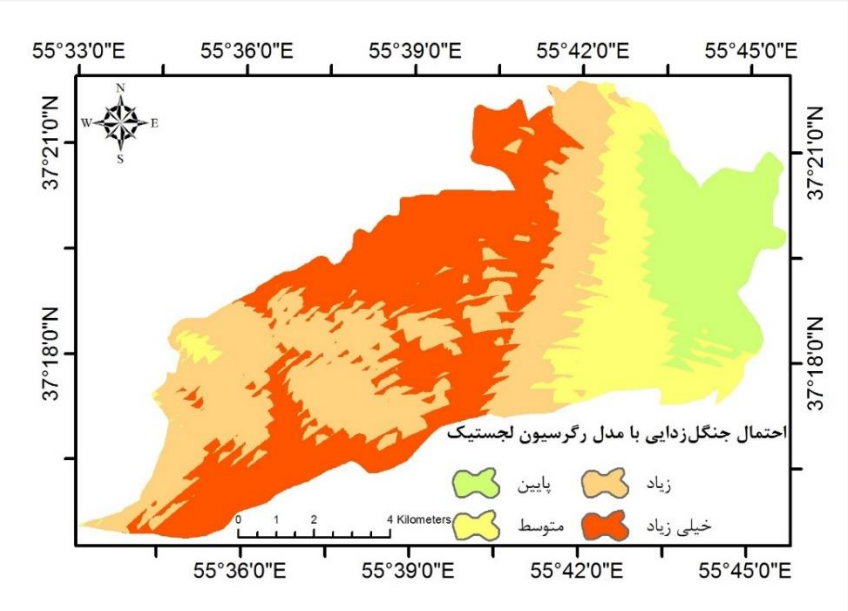
(ب)

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

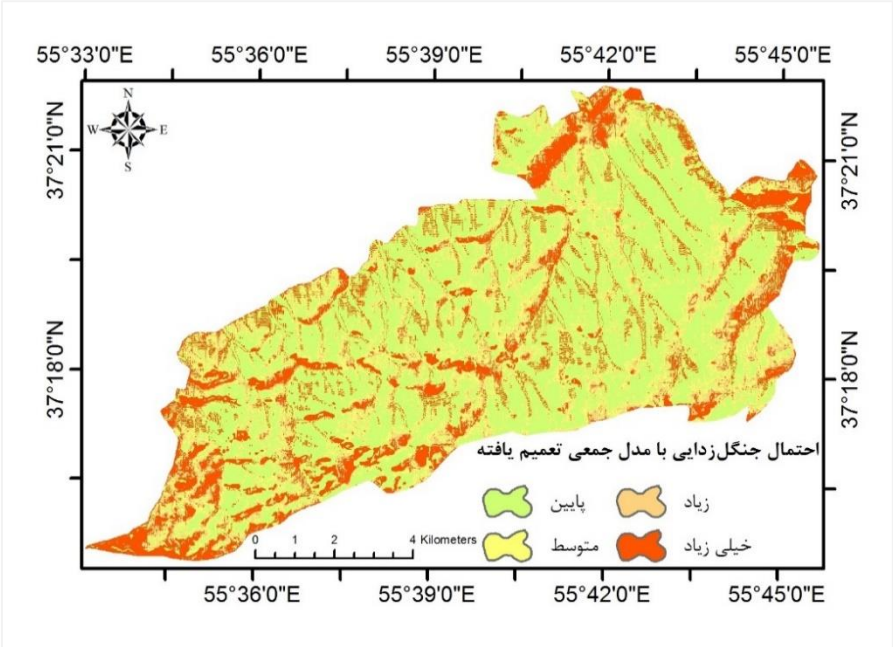


شکل ۳. نمودار وابستگی جزئی متغیرهای تبیینی بر احتمال جنگل‌زدایی (الف- ارتفاع از سطح دریا، ب- شیب، پ- طول شیب، ت- اثر باد، ث- فاصله از جاده، ج- فاصله از مناطق مسکونی، چ- نزدیکی به اراضی کشاورزی، ح- بارش، خ- کمینه دما، د- میانگین دما، ذ- بیشینه دما)

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]



شکل ۴. پهنه‌بندی احتمال جنگل‌زدایی با مدل رگرسیون لجستیک



شکل ۵. پهنه‌بندی احتمال جنگل‌زدایی با مدل GAM

جدول ۴. درصد مساحت احتمال جنگل‌زدایی بر اساس دو مدل رگرسیون لجستیک و GAM

مدل‌ها	پایین	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
رگرسیون لجستیک	۱۴/۴۳	۱۵/۳۱	۳۴/۸۹	۳۵/۳۷
مدل جمعی تعمیم‌یافته	۴۹/۷۲	۱۸/۹۴	۱۱/۶۹	۱۹/۶۵

جدول ۵. ارزیابی مدل‌ها

مدل‌ها	سطح زیر منحنی عملکرد	ضریب کاپا
رگرسیون لجستیک	۰/۹۰۱	۰/۶۹
مدل جمعی تعمیم‌یافته	۰/۹۵۶	۰/۸۴

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

نقشه پهنه‌بندی احتمال جنگل‌زدایی حاصل از مدل رگرسیون لجستیک در شکل (۴) نشان داده‌شده‌است. در این نقشه، بیش از ۷۰ درصد از منطقه در دو طبقه «زیاد» و «خیلی زیاد» قرار گرفته است که نشان‌دهنده تمرکز بالا در سطوح خطر بالا است. این وضعیت ممکن است به حساسیت زیاد مدل نسبت به برخی متغیرهای مکانی یا انسانی مربوط باشد و همچنین می‌تواند منجر به افزایش هشدارهای کاذب شود. در مقابل، مدل GAM الگوی متفاوتی از توزیع احتمال جنگل‌زدایی ارائه می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۵) و جدول (۴) دیده می‌شود، این مدل حدود نیمی از منطقه را در طبقه «احتمال پایین» قرار داده است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل GAM محافظه‌کارانه‌تر عمل می‌کند و تنها در نواحی‌ای که شواهد قوی‌تری از خطر وجود دارد، احتمال بالا نسبت می‌دهد. این ویژگی می‌تواند به کاهش مثبت‌های کاذب کمک کند و ابزار مفیدی برای اولویت‌بندی مناطق نیازمند مداخله در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار دهد.

بر اساس نتایج ارزیابی دقت مدل‌ها جدول (۵)، هر دو شاخص به کار رفته نشان می‌دهند که مدل GAM عملکرد بهتری نسبت به مدل رگرسیون لجستیک داشته است. این یافته‌ها بیانگر آن است که مدل GAM در طبقه‌بندی داده‌ها دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتر عمل کرده است.

بحث

تحلیل مدل‌های آماری به‌ویژه مدل GAM در این مطالعه، بینشی دقیق و موثق از الگوهای مکانی و عوامل مؤثر بر جنگل‌زدایی در حوزه جنگلداری لوه گالیکش ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان داد که متغیرهای محیطی و انسانی نقش‌های متفاوتی در تبیین احتمال جنگل‌زدایی ایفا می‌کنند؛ با این حال، چهار متغیر فاصله از جاده، شیب، اثر باد و ارتفاع از سطح دریای آزاد دارای بیشترین اهمیت نسبی بودند.

یافته‌ها حاکی از وجود یک رابطه منفی معنادار بین ارتفاع از سطح دریا و احتمال جنگل‌زدایی است. بر اساس نمودار وابستگی جزئی، در ارتفاعات پایین‌تر از حدود ۱۰۰۰ متر، احتمال تخریب پوشش جنگلی به‌طور چشمگیری افزایش یافته و در ارتفاعات بالاتر، این روند به سطحی نسبتاً ثابت و پایین می‌رسد. این الگو بیانگر دسترسی‌پذیری بیشتر ارتفاعات پایین برای فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت غیرمجاز چوب، چرای دام، توسعه زمین‌های کشاورزی و ساخت‌وساز است (فولی[1] و همکاران، ۲۰۰۵؛ لوپز[2]، ۲۰۲۲). در مقابل، ارتفاعات بالاتر معمولاً دور از دسترس، دارای شرایط اکولوژیک سخت‌تر، و اغلب تحت حفاظت بیشتر هستند؛ که این عوامل احتمال جنگل‌زدایی را کاهش می‌دهد.

در تضاد با انتظار اولیه، شیب زمین رابطه‌ای مثبت با احتمال جنگل‌زدایی نشان داد. به‌عبارتی، در مناطق با شیب‌های بالاتر، احتمال تخریب جنگل بیشتر است. این نتیجه می‌تواند ناشی از بهره‌برداری‌های غیرمجاز در شیب‌های تند، جاده‌کشی‌های غیراصولی، و حتی وقوع رانش و لغزش در مناطق شیب‌دار باشد که تخریب پوشش جنگلی را تسهیل می‌کند (لوپز–بدویا[3] و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین، در برخی مناطق کوهستانی، تخریب در امتداد یال‌ها و دامنه‌ها رخ می‌دهد که معمولاً شیب بیشتری دارند و این امر می‌تواند تأثیر شیب را تقویت کند.

نتایج حاکی از آن بود که شاخص طول‌شیب تأثیر معناداری در مدل نداشته و نمودار آن شکل یکنواخت با نوساناتی در دامنه‌های بالا داشت. این امر می‌تواند به دلایل مختلفی از جمله توزیع نامتوازن مقادیر این شاخص در منطقه، هم‌پوشانی با متغیر شیب، یا اثرات غیرمستقیم آن بر جنگل‌زدایی باشد. با وجود نقش بالقوه این شاخص در فرسایش و پایداری زمین، ارتباط مستقیمی با تصمیمات انسانی در مورد تخریب جنگل‌ها مشاهده نشد.

متغیر شدت باد رفتار افزایشی و نوسانی در ارتباط با احتمال جنگل‌زدایی دارد. در شرایطی با افزایش سرعت باد، احتمال وقوع جنگل‌زدایی به‌صورت معناداری افزایش یافته است. این روند، به‌ویژه در بازه‌های مشخصی از شدت باد که با اوج در نمودار وابستگی

[1] - Foley
[2] - López
[3] - López-Bedoya

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

جزئی همراه بود، حاکی از وجود یک رابطه غیرخطی اما مهم بین شدت باد و تخریب پوشش جنگلی است. برای تبیین این رابطه، باید اثرات باد را در سطوح مختلف بررسی کرد.

بادهای شدید می‌توانند به صورت مستقیم منجر به آسیب درختان شوند. این آسیب ممکن است به شکل شکستن تنه‌ها، سقوط درختان، شکافتن تاج‌ها یا حتی ریشه‌کن شدن درختان باشد (سیلویرو[1] و همکاران، ۲۰۱۹). در جنگل‌های نیمه‌کوهستانی شمال ایران، این پدیده به‌ویژه در گونه‌هایی با تاج‌های گسترده یا سیستم ریشه‌ای ضعیف مشاهده شده است. در مواردی، توده‌ای از درختان بر اثر باد شکسته می‌شود که نه‌تنها پوشش جنگلی را به‌صورت موضعی از بین می‌برد، بلکه زمینه‌ساز دسترسی انسان به آن منطقه برای برداشت چوب یا تغییر کاربری نیز می‌شود. این پدیده نقطه آغازی برای روندهای پیچیده‌تر جنگل‌زدایی است. به‌ویژه در شرایطی که نظارت جنگلبانی ضعیف است یا قوانین برداشت چوب صراحت و ضمانت اجرایی ندارند، حضور چوب‌های افتاده در اثر باد، بهانه‌ای برای نفوذ به عمق جنگل و برداشت چوب‌های سالم اطراف نیز فراهم می‌آورد.

یکی از مهم‌ترین سازوکارهای غیرمستقیم باد در تخریب جنگل‌ها، نقش آن در انتقال آتش از اراضی کشاورزی به درون محدوده جنگلی است (جلولی و برنوسی[2]، ۲۰۲۲). در بسیاری از روستاهای مجاور جنگل، کشاورزان پس از برداشت محصول یا برای آماده‌سازی زمین، اقدام به آتش‌زدن بقایای گیاهی می‌کنند. اگرچه این اقدام ممکن است از منظر محلی یک روش سنتی تلقی شود، اما در شرایطی که باد شدید بوزد، شعله‌های آتش به‌سرعت به سمت مرزهای جنگل کشیده شده و وارد پوشش جنگلی می‌شود. به‌ویژه در فصول خشک سال یا در مناطقی که مواد سوختنی خشکی مانند برگ خشک، سرشاخه‌ها یا درختان افتاده در بستر جنگل انباشته شده‌اند، این انتقال می‌تواند منجر به حریق‌های گسترده جنگلی شود. مطالعات میدانی در مناطق جنگلی شمال ایران نشان داده‌اند که در بسیاری از موارد آتش‌سوزی‌های جنگلی، منشأ اولیه در مزارع یا باغ‌های حاشیه‌ای بوده است و باد عامل کلیدی در توسعه و گسترش آتش به داخل جنگل بوده است. این یافته‌ها با نتایج مدل حاضر هم‌راستا هستند و نشان می‌دهند که باد نه‌تنها یک عامل طبیعی بلکه یک محرک اجتماعی–زیست‌محیطی برای تشدید جنگل‌زدایی است. باد علاوه بر اثرات فیزیکی، با افزایش نرخ تبخیر از سطح خاک و پوشش گیاهی، می‌تواند سطح رطوبت خاک را کاهش داده و جنگل را مستعد خشکی، زوال و آتش‌سوزی سازد. در اکوسیستم‌های مرطوب مانند جنگل‌های هیرکانی، کاهش جزئی در رطوبت نیز می‌تواند منجر به اختلال در باززایی طبیعی، تضعیف رشد درختان و افزایش نفوذپذیری برای گونه‌های مهاجم یا تخریبگر شود. بنابراین، باد می‌تواند یک عامل آغازگر در زنجیره‌ای از تأثیرات زیست‌محیطی و انسانی باشد که نهایتاً به جنگل‌زدایی می‌انجامد.

نزدیکی به جاده یکی از مؤثرترین عوامل انسانی در وقوع جنگل‌زدایی بود. بر اساس نتایج، در فاصله‌های کمتر از ۲۰۰۰ متر از مسیرهای دسترسی، احتمال جنگل‌زدایی به‌طور معناداری بالاتر است. این یافته با مطالعات مشابه در جنگل‌های شمال ایران هم‌راستا است و نشان می‌دهد که زیرساخت‌های دسترسی یکی از مهم‌ترین پیشران‌های جنگل‌زدایی هستند (لارنس[3] و همکاران، ۲۰۱۷؛ دوت[4] و همکاران، ۲۰۲۴). جاده‌ها امکان ورود ماشین‌آلات، انسان و دام را فراهم کرده و فضا را برای بهره‌برداری غیرمجاز و تغییر کاربری مهیا می‌سازند. با افزایش فاصله از جاده، این اثر به‌تدریج کاهش می‌یابد.

الگوی وابستگی متغیر فاصله از مناطق مسکونی غیرخطی و نوسانی بود. احتمال جنگل‌زدایی در فواصل نزدیک به روستاها تا حدود ۲ کیلومتر کاهش یافته و پس از آن، نوساناتی با دامنه متغیر دیده می‌شود. یکی از تبیین‌های ممکن برای این روند، وجود اقدامات حفاظتی در حاشیه روستاها است که می‌تواند نقش بازدارنده‌ای در تخریب داشته باشد؛ در حالی که در فواصل دورتر، مناطق بدون نظارت یا حفاظت مؤثر بیشتر در معرض تخریب قرار دارند (یاماموتو[5] و همکاران، ۲۰۱۹).

منحنی وابستگی جزئی برای متغیر نزدیکی به اراضی کشاورزی شکل پیچیده و نوسانی داشت و نشان‌دهنده تأثیرات متغیر و محلی است. در برخی فواصل، افزایش نزدیکی به زمین‌های کشاورزی موجب افزایش جنگل‌زدایی شده و در برخی نقاط کاهش

[1] - Silvério
[2] - Jellouli and Bernoussi
[3] - Laurance
[4] - Dutt
[5] - Yamamoto

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

یافته است. این الگوی سینوسی ممکن است ناشی از ناهمگنی در کاربری‌های کشاورزی، میزان بهره‌برداری از زمین، شدت حضور انسانی در بخش‌های مختلف منطقه یا فشار همزمان سایر متغیرها بر پدیده تخریب باشد. به‌طور کلی، مجاورت با اراضی کشاورزی یکی از عوامل بالقوه تغییر کاربری و قطع درختان برای توسعه زمین‌های زراعی و باغی محسوب می‌شود (آبمن و کارنی[1]، ۲۰۲۰؛ ناپ[2] و همکاران، ۲۰۲۲).

رابطه‌ای معکوس بین میانگین بارندگی سالانه و جنگل‌زدایی مشاهده شد. در مناطقی با بارندگی کمتر از ۸۷۰ میلی‌متر، احتمال جنگل‌زدایی بالاتر بود. این ارتباط می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر تنش آبی و خشکی خاک بر شکنندگی اکوسیستم‌های جنگلی و همچنین کاهش باززایی طبیعی در شرایط خشک باشد (دسوزا باتیستا[3] و همکاران، ۲۰۲۳). در مقابل، در مناطق پربارش، شرایط برای حفظ پوشش جنگلی و ترمیم آن مساعدتر است.

هر سه پارامتر دمایی الگوهای نوسانی و غیرخطی را نشان دادند، اما بیشترین تأثیر مربوط به دمای بیشینه بود. در مقادیر نزدیک به ۲۳/۹۵ درجه سانتی‌گراد، احتمال جنگل‌زدایی به‌طور محسوسی افزایش یافته است. این آستانه دمایی می‌تواند حاکی از افزایش تبخیر، کاهش رطوبت خاک، و آسیب‌پذیری بیشتر پوشش گیاهی در برابر تنش حرارتی باشد (داولیویرا[4] و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین ممکن است این شرایط دمایی با فصل‌های گرم و خشک‌تر در ارتباط باشد که معمولاً با فعالیت‌های انسانی بیشتر مانند بهره‌برداری یا آتش‌سوزی همراه هستند.

نتایج حاصل از مقایسه دو مدل در پیش‌بینی احتمال وقوع جنگل‌زدایی در حوزه جنگلداری لوه نشان می‌دهد که مدل GAM از دقت بالاتری برخوردار بوده و عملکرد محافظه‌کارانه‌تری در شناسایی نواحی پرخطر دارد. این مدل با بهره‌گیری از قابلیت‌های غیرخطی‌سازی و انعطاف‌پذیری بالا، توانسته است روابط پیچیده و احتمالا غیرخطی میان متغیرهای تبیینی و پاسخ را بهتر نمایان سازد. این ویژگی باعث شده که این مدل تنها در نواحی‌ای که شواهد قوی از وقوع جنگل‌زدایی وجود دارد، احتمال بالا را اختصاص دهد، در حالی‌که مدل سنتی با رویکردی خطی، دامنه وسیع‌تری از مناطق را در معرض خطر ارزیابی کرده است. این محافظه‌کاری مدل GAM مزایای مهمی برای کاربردهای مدیریتی و سیاست‌گذاری دارد. اولاً، این رویکرد منجر به کاهش موارد مثبت کاذب می‌شود؛ یعنی مناطقی که به اشتباه به عنوان پرخطر شناخته می‌شوند. کاهش این نوع خطاها به‌ویژه در شرایطی که منابع مالی و انسانی برای اقدامات حفاظتی محدود هستند، از اهمیت زیادی برخوردار است. در چنین شرایطی، اولویت‌بندی دقیق مناطق نیازمند مداخله می‌تواند اثربخشی برنامه‌های مدیریت منابع طبیعی را به نحو چشمگیری افزایش دهد. مدل GAM از این نظر ابزاری توانمند برای هدایت اقدامات حفاظتی و تخصیص منابع در مناطق جنگلی محسوب می‌شود.

ثانیاً، خروجی مدل GAM امکان تحلیل فضایی دقیق‌تری از خطر جنگل‌زدایی را فراهم می‌آورد. به دلیل ماهیت انعطاف‌پذیر این مدل، می‌توان روابط پیچیده‌تری را میان عوامل طبیعی (مانند شیب، جهت دامنه و دمای میانگین سالانه) و انسانی (نزدیکی به زمین‌های کشاورزی یا جاده) شناسایی و تفسیر کرد. این سطح از جزئیات تحلیلی، ارزش افزوده قابل توجهی برای مطالعات آینده‌نگر و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریتی فراهم می‌کند.

از سوی دیگر، هرچند مدل GAM مزایای بارزی دارد، اما باید توجه داشت که پیچیدگی محاسباتی آن بیشتر از مدل‌های کلاسیک مانند لجستیک است و تفسیر نتایج آن برای کاربران غیرفنی ممکن است دشوار باشد. بنابراین، برای بهره‌برداری عملی از این مدل در فرآیند تصمیم‌سازی، ضروری است تا نتایج به شکلی قابل فهم و قابل استفاده برای مدیران منابع طبیعی و مسئولان محلی ترجمه و تبیین شود. به همین دلیل، ترکیب توان تحلیلی مدل‌های پیشرفته با ابزارهای ارتباطی مناسب مانند نقشه‌های موضوعی و گزارش‌های تفسیرپذیر، از اهمیت بالایی برخوردار است.

[1] - Abman and Carney
[2] - Knapp
[3] - De Souza Batista
[4] - De Oliverira

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

یافته‌های این پژوهش به‌روشنی نشان می‌دهند که جنگل‌زدایی در جنگل‌های هیرکانی تحت تأثیر طیف وسیعی از عوامل محیطی و انسانی قرار دارد که در تعامل با یکدیگر، الگوهای مکانی پیچیده‌ای از تخریب پوشش جنگلی را شکل می‌دهند. تحلیل مقایسه‌ای بین دو مدل آماری نشان داد که مدل GAM با تکیه بر انعطاف‌پذیری در مدل‌سازی روابط غیرخطی و امکان شناسایی تأثیرات ترکیبی، عملکرد دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری در پیش‌بینی احتمال جنگل‌زدایی دارد. این دقت بیشتر، به‌ویژه در تمایزگذاری بین نواحی با خطر بالا و پایین، ارزش مدیریتی بالایی دارد و می‌تواند مبنای علمی معتبری برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی باشد.

در میان متغیرهای بررسی‌شده، عواملی نظیر ارتفاع از سطح دریا، فاصله از جاده، شیب، اثر باد و مجاورت با اراضی کشاورزی بیشترین نقش را در تبیین الگوی جنگل‌زدایی ایفا کردند. به‌طور مشخص، افزایش خطر جنگل‌زدایی در نواحی پایین‌دست و در نزدیکی زیرساخت‌های دسترسی، بر نقش محوری مداخلات انسانی در این پدیده تأکید دارد. همچنین تأثیر نوسانی برخی متغیرها نظیر شدت باد، فاصله از روستا و دمای بیشینه، ضرورت توجه به روابط غیرخطی و پیچیده در فرآیندهای تخریب زیست‌محیطی را برجسته می‌سازد.

از منظر مدیریتی، مدل GAM ابزار ارزشمندی برای بهینه‌سازی تخصیص منابع حفاظتی است؛ زیرا با کاهش موارد مثبت کاذب، امکان تمرکز بر مناطق با اولویت بالاتر را فراهم می‌سازد. این ویژگی به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع مالی و انسانی اهمیت مضاعف می‌یابد. همچنین خروجی مدل می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی در برنامه‌ریزی مکانی، اعمال محدودیت‌های کاربری، اجرای طرح‌های قرق، یا بازبینی طرح‌های جنگلداری به‌کار رود.

از سوی دیگر، نتایج این مطالعه بر ضرورت بازنگری در الگوی توسعه زیرساخت‌ها، محدودسازی گسترش جاده‌ها در مناطق حساس، و کنترل بهره‌برداری‌های غیرقانونی در ارتفاعات پایین جنگل تأکید دارد. همچنین اتخاذ رویکردهای مشارکتی در حفاظت جنگل، آموزش ساکنان محلی، و استفاده از سیاست‌های تشویقی برای احیای پوشش جنگلی در مناطق بحرانی می‌تواند از مسیرهای مؤثر برای مقابله با روند فزاینده جنگل‌زدایی باشد.

به‌علاوه، این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های پیشرفته آماری در کنار سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحلیل‌های مکانی، ظرفیت بالایی برای پیش‌بینی، پایش و مدیریت پدیده‌های تخریبی در چشم‌اندازهای طبیعی دارد. توسعه مدل‌های ترکیبی، درنظر گرفتن سناریوهای تغییر اقلیم، و گسترش مطالعات به سایر نواحی جنگل‌های هیرکانی و مناطق مشابه، می‌تواند مسیر پژوهشی آینده را برای تصمیم‌سازی‌های دقیق‌تر و علمی‌تر هموار سازد.

شایان ذکر است که اگرچه در مطالعه حاضر از مجموعه‌ای از مهم‌ترین متغیرهای محیطی و مکانی مؤثر بر جنگل‌زدایی استفاده شده، اما به‌کارگیری داده‌های دقیق‌تر به‌ویژه در حوزه‌های تراکم جمعیت، سطح درآمد خانوارها و وابستگی اقتصادی جوامع محلی به منابع جنگلی می‌تواند در آینده به افزایش توان پیش‌بینی و عمق تحلیلی مدل‌ها کمک شایانی نماید. همچنین، تغییر کاربری اراضی به عنوان یکی از عوامل اصلی و در عین حال پیامدهای جنگل‌زدایی، پدیده‌ای پویا و پیچیده است که در صورت استفاده از آن، می‌توان قدرت تبیینی مدل را به‌ویژه در شناسایی و پیش‌بینی دگرگونی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌طور چشمگیری ارتقاء داد.

ملاحظات اخلاقی

این مطالعه مطابق با شیوه‌های پژوهش اخلاقی انجام شده است. تمام داده‌های استفاده شده در این تحقیق از منابع عمومی در دسترس یا توسط مؤسسات مجاز تأمین شده‌اند. هیچ انسانی یا حیوانی در این مطالعه درگیر نبود و بنابراین نیازی به اخذ تأییدیه اخلاقی نبود.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی و مدیریت پروژه؛

نویسنده دوم: تهیه پیشنویس مقاله؛

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

نویسنده سوم: بازبینی و ویرایش مقاله؛

نویسنده چهارم: انجام محاسبات؛

نویسنده پنجم: تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها؛

نویسنده ششم: مدیریت داده‌ها؛

همه نویسندگان در تفسیر نتایج مشارکت داشتند و نسخه نهایی مقاله را تأیید کردند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این مقاله تحت حمایت مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی ایران انجام شده است.

سپاسگزاری

این پژوهش، بخشی از یافته‌های پروژه ملی «مدل‌سازی و پیش‌بینی احتمال جنگل زدایی در ناحیه رویشی هیرکانی با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و روش های داده کاوی – جنگل‌های استان گلستان» مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی ایران با شماره ۰۲۰۱۳۸-۰۲۰۰۹-۰۱۴-۰۹-۵۷-۱۲ است، بنابراین از همه دست‌اندرکاران اجرای پروژه مزبور، صمیمانه قدردانی و تشکر می‌شود.

منابع

میرآخورلو، خسرو و اخوان، رضا (۱۳۹۶). ارزیابی تغییرات سطح جنگل های هیرکانی از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۵. *نشریه طبیعت ایران*، ۲ (۳)، ۴۵-۴۰. https://doi.org/10.22092/irn.2017.112967

یخکشی، علی و آفتاب طلب، نوشین (۱۳۸۷). *منابع تجدید پذیر و توسعه پایدار*. تهران، انتشارات سازمان حفاظت محیط زیست.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

References

Abdullah, S. A., & Nakagoshi, N. (2007). Forest fragmentation and its correlation to human land use change in the state of Selangor, peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 241 (1–3), 39–48. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.12.016

Abman, R., & Carney, C. (2020). Land rights, agricultural productivity, and deforestation. *Food Policy*, 94, 101841. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101841

Ahmadi, V. (2018). Using GIS and Artificial Neural Network for Deforestation Prediction. *Remote Sensing*, 2018030048, pp. 15. https://doi.org/10.20944/preprints201803.0048.v1

Bera, B., Saha, S., & Bhattacharjee, S. (2020). Forest cover dynamics (1998 to 2019) and prediction of deforestation probability using binary logistic regression (BLR) model of Silabati watershed, India. *Trees, Forests and People*, 100034. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100

Chen, S., Woodcock, C., Dong, L., Tarrio, K., Mohammadi, D., & Olofsson, P. (2024). Review of drivers of forest degradation and deforestation in Southeast Asia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101129, 11 pp. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101129

Da Silva, C. F. A., Dos Santos, A. M., Rudke, A. P., Nunes, F. G., & Alvarado, S. T. (2025). Insights from remote sensing for the study of deforestation drivers in savannas. *Journal for Nature Conservation*, 86, 126918. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.126918

Davison, C. W., 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. https://doi.org/10.1111/gcb.15846

Dutt, S., Batar, A. K., Sulik, S., & Kunz, M. (2024). Forest ecosystem on the edge: Mapping forest fragmentation susceptibility in Tuchola Forest, Poland. *Ecological Indicators*, 161, 111980. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111980

FAO (Food and Agriculture Organization). (2020). Global Forest Resources Assessment 2020, (Iran Report). Rome, 54 pp. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/70aae432-4a3e-4d96-9083-f0800bd959af/content

Feng, Y., Yang, Q., Tong, X., & Chen, L. (2018). Evaluating land ecological security and examining its relationships with driving factors using GIS and generalized additive model. *Science of the Total Environment*, 633, 1469–1479. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.272

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C.C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E., Kucharik, C. J., Patz, J., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global consequences of land use. Science. *Science*, 309 (5734), 570-574. https://doi.org/10.1126/science.11117

Hosonuma, N., Herold, M., Sy, V. D., Fries, R. S. D., Brockhaus, M., Verchot, L., Angelsen, A., & Romijn, E. (2012). An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 7 (4), 044009. https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009

Jjafari , M. R., Hosseini, A., Hoseinzadeh, J. (2021). Spatial Distribution Map of Degradation in Zagros Forests of Ilam city. *Ecology of Iranian Forests*, 8 (15), 1-9. https://doi.org/10.52547/ifej.8.15.1

Jellouli, O., & Bernoussi, A.S. (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. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.109938

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*, 112504. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112504

Knapp, M., Strobl, M., Venturo, 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. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2022.109757

Laurance, W.F., Goosem, M., & Laurance, S.G.W. (2009). Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. *Trends in Ecology and Evolution*, 24 (12), 659–669. https:// https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.06.009

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]

Looze, B.E. (2009). Forest fragmentation patterns in Maine watersheds and prediction of visible crown diameter in recent undisturbed forest, MSc thesis, University of Wisconsin-Superior, 130 pp. https://digitalcommons.library.umaine.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2772&context=etd

López, S. (2022). Deforestation, forest degradation, and land use dynamics in the Northeastern Ecuadorian Amazon. *Applied Geography*, 145, 102749. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102749

López-Bedoya, P. A., Bohada-Murillo, M., Ángel-Vallejo, M. C., Audino, L. D., Davis, A. L. V., Gurr, G., & Noriega, J. A. (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. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14167

Mirakhorlou, Kh., & Akhavan, R. (2017). Area changes of Hyrcanian Forests during 2004 to 2016. *Nature Iran*, 2 (3), 40–45. https://doi:10.22092/irn.2017.112967 (in Persian)

Netzel, P., Tyminska, L., Feleha, D. D., Socha, J. (2024). New approach to assess forest fragmentation based on multiscale similarity index. *Ecological Indicators*, 158, 111530. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111530

Ojoatre, S., Zhang, C., Yesuf, G., & Rufino, M.C. (2023). Mapping deforestation and recovery of tropical montane forests of East Africa. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1084764. 17 pp. https://www.10.3389/fenvs.2023.1084764

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.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.290

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.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.290

Saleh, I., Rafiee, H., & Mirbagheri, S. Sh. (2021). Investigating the effects of climatic and economic variables on forest degradation of Iran. *Iranian Journal of Forest*, 12 (4), 467-489. https://doi.org/10.22034/IJF.2021.127786

Silva, A.C.O., Fonseca, L.M.G., Körting, T.S., & Escada, M.I.S. (2020). A spatio-temporal Bayesian Network approach for deforestation prediction in an Amazon rainforest expansion frontier. *Spatial Statistics*, 35, 100393. https://doi.org/10.1016/j.spasta.2019.100393

Silvério, D. V., Brando, P. M., Bustamante, M. M. C., Putz, F. E., Marra, D. M., Levick, S. R., & Trumbore, S. E. (2019). 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

Teixeira, M. J., Machado, L. A. T., Artaxo, P., Calheiros, A., Corrêa, P., Franco, M. A., Shimbo, J., & Rizzo, L. V. (2025). Analyzing and forecasting the morphology of Amazon deforestation. *Forest Ecology and Management*, 586, 122662. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122662

Tavares das Neves, P. B., Blanco, C. J. C., Duarte, A. A. A. M., das Neves, F. B. S., das Neves, L. B. S., & De Paula dos Santos, M. H. (2021). Amazon rainforest deforestation influenced by clandestine and regular roadway network. *Land Use Policy*, 108, 105510. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105510

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/

Yakhkeshi, A., & Aftabtalab, N. (2008). Renewable resources and sustainable development. *Department of Environment press*, 176 pp. (in Persian)

Yamamoto, Y., Shigetomi, Y., Ishimura, Y., & Hattori, M. (2019). Forest change and agricultural productivity: Evidence from Indonesia. *World Development*, 114, 196–207. https://ideas.repec.org/a/eee/wdevel/v114y2019icp196-207.html

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.1.4.1]
[DOI: 10.61882/jsaeh.12.1.45.49]