



Spatial zoning and analysis of the spatial pattern of multi-hazard environmental exposure intensity in mountain ecosystems: a case study of forest stands in Lorestan province, Iran

Akram Nouri Kamari^{1✉} | Abolfazl Jaafari²

1. Corresponding Author, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran. E-mail: a.nourikamari@cfu.ac.ir

2. Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: jaafari@rifr-ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 14 July 2026

Received in revised form 6

September 2026

Accepted 11 September 2026

Keywords:

Multi-hazard assessment,

Environmental hotspots,

Forest vulnerability,

Mountain ecosystems,

Climate change adaptation.

ABSTRACT

The Zagros mountain forest ecosystems are among the most vulnerable ecosystems in Iran due to their exposure to a wide range of climatic, geomorphological, and anthropogenic stresses. Despite the increasing frequency and intensity of environmental hazards in recent decades, most previous studies have focused on individual hazards, while the spatial patterns of forest exposure to multiple interacting hazards have received considerably less attention. Therefore, this study aimed to spatially analyze and map the intensity of exposure to multiple environmental hazards across the forest ecosystems of Lorestan Province, western Iran. To achieve this objective, nine major environmental hazards, including drought, evapotranspiration, maximum temperature, wildfire, dust storms, high-speed winds, landslides, floods, and the spatial influence of rural settlements, were developed using remote sensing data, climatic information, and environmental datasets. After standardization and weighting, all hazard layers were integrated within a Geographic Information System (GIS) framework to generate a multi-hazard exposure index. The results revealed a pronounced spatial heterogeneity in multi-hazard exposure intensity, with index values ranging from 0.167 to 0.590. Areas characterized by high and very high exposure were predominantly concentrated in the southern, southwestern, and southeastern parts of the province and encompassed approximately 46.64% of the forest ecosystems, equivalent to nearly 568,000 ha. In contrast, areas with very low and low exposure intensities were mainly distributed across the northern and northwestern regions of the province. The findings demonstrate that a multi-hazard approach provides an effective framework for identifying environmental hotspots and prioritizing conservation and management interventions in the Zagros forests. Furthermore, the proposed framework can serve as a valuable decision-support tool for climate change adaptation planning and the sustainable management of mountain forest ecosystems.

Cite this article: Nouri Kamari, A., & Jaafari, A. (2026). Spatial zoning and analysis of the spatial pattern of multi-hazard environmental exposure intensity in mountain ecosystems: a case study of forest stands in Lorestan province, Iran. *Journal of Natural Environment*, 79 (3), 475-493. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.418553.2931>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

Introduction

Mountain forest ecosystems are among the most important and valuable natural ecosystems in the world and play a fundamental role in biodiversity conservation, hydrological regulation, carbon storage and sequestration, soil protection, and the provision of ecosystem services. The Zagros forests, covering nearly five million hectares, account for approximately 40% of Iran's total forest area and constitute one of the most significant forest regions in the Middle East. In addition to their ecological importance, these forests possess considerable socioeconomic value, as the livelihoods of millions of people in western Iran directly or indirectly depend on the services and resources they provide. However, during recent decades, these ecosystems have been exposed to a wide range of climatic, geomorphological, and anthropogenic stresses. Rising temperatures, intensifying droughts, expanding dust storms, recurrent wildfires, floods, landslides, and increasing human pressures associated with settlement expansion, land-use change, and unsustainable exploitation have seriously threatened the structure and functioning of these forests. Although numerous studies have recently addressed the assessment of natural and environmental hazards in the Zagros forests, most have focused primarily on individual hazards. In reality, environmental hazards do not operate independently; rather, they interact with one another through synergistic and cumulative effects, thereby intensifying ecosystem degradation and increasing environmental pressure. Consequently, multi-hazard approaches can provide a more comprehensive and realistic understanding of ecosystem conditions. Within the conceptual framework of vulnerability assessment, the exposure component represents the degree and intensity of a system's contact with environmental disturbances and stresses and constitutes the first step in vulnerability analysis and resilience planning. Accordingly, the main objective of the present study was to spatially model and map the intensity of exposure to multiple environmental hazards in the forest ecosystems of Lorestan Province and to identify the critical hotspots of these hazards.

Material and Methods

The study area comprised the forest ecosystems of Lorestan Province in the central Zagros Mountains, encompassing approximately 1.2 million hectares of predominantly Persian oak (*Quercus brantii*) forests. Owing to its topographic heterogeneity, climatic diversity, and pronounced altitudinal gradients, the province represents one of the most diverse and ecologically valuable forest regions of Iran. To evaluate the intensity of exposure to multiple environmental hazards, nine major hazards were selected, including drought, evapotranspiration, maximum temperature, wildfire, dust storms, high-speed winds, landslides, floods, and the spatial influence of rural settlements. The spatial layers associated with each hazard were generated using remotely sensed imagery, climatic data, digital elevation models, and other environmental datasets. To ensure comparability and integration, all spatial layers were standardized. Subsequently, the relative weights of the hazards were determined using the Delphi method based on the opinions of experts in environmental sciences, natural resources, and natural hazards. The standardized and weighted layers were then integrated within a Geographic Information System (GIS) environment to calculate the final index of exposure intensity to multiple environmental hazards. The resulting map was classified into five categories—very low, low, moderate, high, and very high—using the Natural Breaks (Jenks) classification method, and the area and relative proportion of each class within the provincial forests were estimated.

Results

The results revealed that the intensity of exposure to multiple environmental hazards in the forests of Lorestan Province exhibits a highly heterogeneous and complex spatial pattern, with the final index ranging from 0.167 to 0.590. The analysis of the final map indicated that hazard intensity is not uniformly distributed across the province and that substantial spatial variations exist among different forest areas. Areas characterized by high and very high exposure intensities were mainly concentrated in the southern, southwestern, and southeastern parts of the province, forming a relatively continuous belt of environmental hotspots. In contrast, areas with very low and low exposure intensities were predominantly distributed in the northern and northwestern regions. In addition, scattered patches of high values were observed in the central and eastern parts of the province, embedded within areas of moderate exposure. The classification results further demonstrated that approximately 568000 hectares

of forest land, representing 46.64% of the total forest area of the province, fall within the high and very high exposure classes. In contrast, areas classified as very low and low collectively account for nearly one-third of the provincial forests. Moreover, the high-exposure class, covering more than 318,000 hectares, represents the largest area among the five exposure categories.

Discussion and Conclusion

The findings of this study indicate that a considerable proportion of the forests of Lorestan Province are simultaneously exposed to multiple environmental hazards and that the cumulative pressures resulting from diverse climatic and anthropogenic stresses have generated a complex spatial pattern of environmental exposure across the forest landscapes. The concentration of high and very high exposure zones in the southern and southwestern parts of the province suggests that these regions have become critical environmental hotspots due to the simultaneous occurrence and interaction of several hazards. The results also demonstrate that individual hazards alone cannot adequately explain the ecological conditions of the Zagros forests and that single-hazard assessments often capture only part of the existing reality. In contrast, the multi-hazard approach employed in this study, through the simultaneous integration of climatic, geomorphological, and anthropogenic hazards, provided a more comprehensive representation of the spatial pattern of environmental hazards and enabled a more accurate identification of areas experiencing the highest levels of environmental stress. The maps generated in this study can serve as effective decision-support tools for prioritizing conservation actions, optimizing resource allocation, planning climate change adaptation strategies, and enhancing the resilience of the Zagros forests. Furthermore, the proposed methodological framework can be applied to other mountainous ecosystems and may provide a scientific basis for developing integrated environmental monitoring and multi-hazard management systems at both regional and national scales.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

پهنه‌بندی و تحلیل الگوی مکانی شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه در اکوسیستم‌های کوهستانی (مطالعهٔ رویشگاه‌های جنگلی استان لرستان)

اکرم نوری کمري^۱ | ابوالفضل جعفری^۲^۱. نویسنده مسئول، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. رایانامه: a.nourikamari@cfu.ac.ir^۲. مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: jaafari@rifr-ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	اکوسیستم‌های جنگلی کوهستانی زاگرس به دلیل قرارگیری در معرض طیف وسیعی از تنش‌های اقلیمی، ژئومورفولوژیکی و انسانی، از آسیب‌پذیرترین اکوسیستم‌های ایران در برابر مخاطرات محیطی محسوب می‌شوند. با وجود افزایش فراوانی و شدت مخاطرات محیطی در دهه‌های اخیر، اغلب مطالعات بر ارزیابی مخاطرات منفرد تمرکز داشته و الگوی فضایی قرارگیری جنگل‌ها در معرض مخاطرات چندگانه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل فضایی و پهنه‌بندی شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه در اکوسیستم‌های جنگلی استان لرستان انجام شد. بدین منظور، ۹ مخاطرهٔ اصلی شامل خشکسالی، تبخیر و ترق، دمای حداکثر، آتش‌سوزی، گردوغبار، بادهای پرسرعت، زمین‌لغزش، سیلاب و گسترهٔ اثرگذاری فضایی سکونتگاه‌های روستایی با استفاده از داده‌های سنجش از دور، اطلاعات اقلیمی و لایه‌های محیطی تهیه و پس از استانداردسازی و وزن‌دهی، در محیط سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی تلفیق شدند. نتایج نشان داد که شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه از الگوی فضایی ناهمگنی برخوردار بوده و مقادیر آن بین ۰/۱۶۷ تا ۰/۵۹۰ متغیر است. پهنه‌های با شدت زیاد و بسیار زیاد عمدتاً در بخش‌های جنوبی، جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی استان متمرکز بوده و حدود ۴۶/۶۴ درصد از رویشگاه‌های جنگلی استان، معادل نزدیک به ۵۶۸ هزار هکتار، را شامل می‌شوند. در مقابل، پهنه‌های با شدت بسیار کم و کم عمدتاً در بخش‌های شمالی و شمال‌غربی استان پراکنش دارند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد چندمخاطره‌ای، چارچوبی کارآمد برای شناسایی کانون‌های بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و مدیریتی در جنگل‌های زاگرس فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در برنامه‌ریزی سازگاری با تغییر اقلیم و مدیریت پایدار اکوسیستم‌های جنگلی مورد استفاده قرار گیرد.
کلیدواژه‌ها: برنامه‌ریزی سازگاری، تحلیل چندمعیاره، سنجش از دور، مدل‌سازی مکانی.	

استناد: نوری کمري، اکرم؛ و جعفری، ابوالفضل (۱۴۰۵). پهنه‌بندی و تحلیل الگوی مکانی شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه در اکوسیستم‌های کوهستانی (مطالعهٔ رویشگاه‌های جنگلی استان لرستان). محیط زیست طبیعی، ۷۹ (۳)، ۴۹۳-۴۷۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.418553.2931>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

جنگل‌ها به‌عنوان یکی از ارکان بنیادین سامانه زیست‌کره، با وسعتی در حدود ۴/۶ میلیارد هکتار، نزدیک به یک‌سوم سطح خشکی‌های زمین را پوشش می‌دهند و زیستگاه غالب تنوع زیستی سیاره محسوب می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که بیش از ۸۰ درصد گونه‌های گیاهی، جانوری و حشرات در این بوم‌سازگان‌ها استقرار یافته‌اند (FAO, 2020). افزون بر این، جنگل‌ها با ذخیره‌سازی بیش از ۷۰ درصد کربن آلی اکوسیستم‌های خشکی، به‌عنوان یکی از کلیدی‌ترین مخازن کربن جهانی ایفای نقش کرده و از طریق جذب و تثبیت کربن، سهم تعیین‌کننده‌ای در تعدیل تغییرات اقلیمی دارند (Sivrikaya and Bozali, 2012). از منظر اجتماعی-اقتصادی نیز، این اکوسیستم‌ها پشتوانه معیشتی بخش قابل‌توجهی از جمعیت جهان به‌شمار می‌روند؛ به‌طوری‌که حدود یک‌چهارم جمعیت جهانی به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم به کالاها و خدمات جنگلی وابسته بوده و در کشورهای در حال توسعه، سهمی مشابه از درآمد خانوارها از این منابع تأمین می‌شود (FAO, 2020). با وجود چنین کارکردهای حیاتی، جنگل‌ها در دهه‌های اخیر تحت تأثیر همزمان مجموعه‌ای از تنش‌ها و مخاطرات محیطی چندانگانه قرار گرفته‌اند که دامنه‌ای از عوامل اقلیمی و انسانی را دربرمی‌گیرد. افزایش دمای هوا، بروز دوره‌های مکرر خشکسالی، گسترش ریزگردها و طوفان‌ها، شیوع آفات و بیماری‌ها، بهره‌برداری‌های ناپایدار، تغییر کاربری اراضی، چرای مفرط دام، آتش‌سوزی و سیلاب از جمله مهم‌ترین محرک‌هایی هستند که منجر به تضعیف ساختار و کارکرد این اکوسیستم‌ها شده‌اند (Leberger *et al.*, 2020). برهم‌کنش این مخاطرات، پیچیدگی الگوهای تخریب را افزایش داده و ارزیابی آنها را از رویکردهای تک‌مخاطره‌ای به چارچوب‌های چندبعدی سوق داده است.

در این میان، جنگل‌های کوهستانی به‌دلیل ویژگی‌های اکولوژیک خاص و حساسیت بالا نسبت به تغییرات محیطی، از آسیب‌پذیرترین زیرسامانه‌های جنگلی محسوب می‌شوند. این جنگل‌ها که حدود ۲۵ درصد از کل جنگل‌های جهان را تشکیل می‌دهند، نقش حیاتی در تأمین معیشت بیش از ۹۰۰ میلیون نفر ایفا می‌کنند (Spehn *et al.*, 2011). با این حال، آنها نیز در معرض طیفی از فشارهای ترکیبی شامل پیامدهای تغییر اقلیم، بهره‌برداری انسانی، تغییرات کاربری/پوشش اراضی، آلودگی‌ها و گسترش آفات و بیماری‌ها قرار دارند (Thakur *et al.*, 2021). پیامد این فشارها، بروز تغییرات اساسی در ساختار و پویایی این اکوسیستم‌ها از جمله کاهش توان تولیدی، تغییر رژیم‌های آتش‌سوزی، تشدید شیوع آفات، جابه‌جایی گونه‌ها و افت تنوع زیستی بوده است (Michelsen *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; Valavi *et al.*, 2019). به‌دلیل تهدیدات دائمی ناشی از مخاطرات مختلف، برنامه‌ریزی و فراهم‌سازی ابزارهای مدیریتی برای کاهش اثرات منفی این مخاطرات بر جنگل‌ها ضروری است. برای تحقق این هدف و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی، شناخت دقیق سطح آسیب‌پذیری و ارزیابی شدت تخریب در سطح رویشگاه‌های جنگلی ناشی از این مخاطرات، حیاتی است (Mafi-Gholami *et al.*, 2021; Kanwar and Kuniyal, 2022). در چارچوب مفهومی ارزیابی آسیب‌پذیری، این مفهوم به‌طور کلاسیک بر پایه سه مؤلفه در معرض قرار گرفتن (Exposure)، حساسیت (Sensitivity) و ظرفیت سازگاری (Adaptive Capacity) تبیین می‌شود (Mafi-Gholami *et al.*, 2022). مطابق با تعریف Adger (۲۰۰۶)، در معرض قرار گرفتن بیانگر میزان، شدت، تداوم و گستره تماس یک سیستم با آشفتنی‌ها و تنش‌های محیطی است. از این‌رو، سنجش این مؤلفه به‌عنوان گام اولیه در تحلیل آسیب‌پذیری، مستلزم شناسایی، کمی‌سازی و پهنه‌بندی فضایی مخاطرات محیطی است؛ فرآیندی که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی حفاظتی در مقیاس‌های مختلف قرار گیرد.

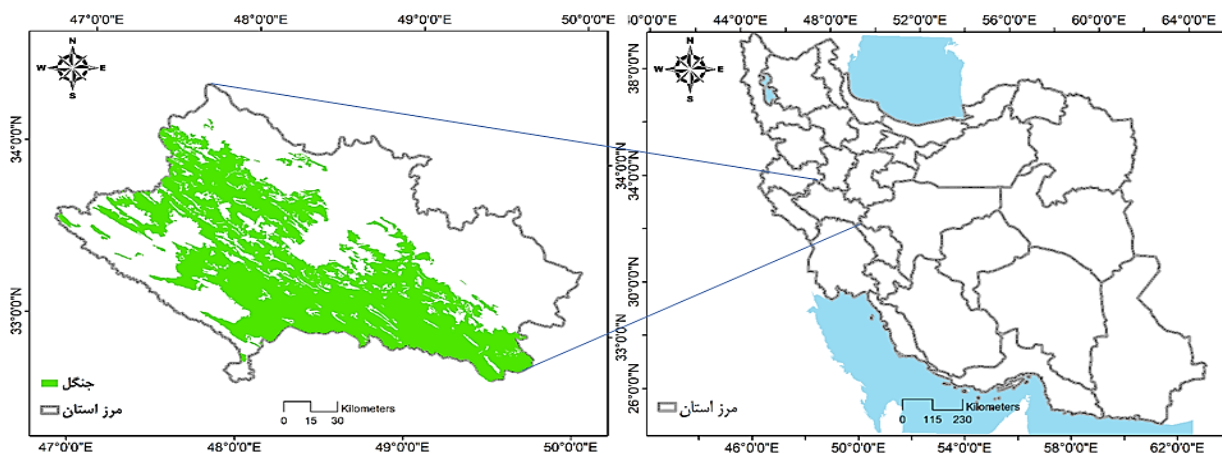
در مقیاس ملی، جنگل‌های کوهستانی زاگرس با گستره‌ای در حدود ۵ میلیون هکتار و سهمی نزدیک به ۴۰ درصد از کل جنگل‌های ایران، یکی از مهم‌ترین پهنه‌های جنگلی کشور به‌شمار می‌روند. این جنگل‌ها که در اقلیم نیمه‌خشک مدیترانه‌ای استقرار یافته‌اند، نقشی اساسی در تنظیم چرخه‌های هیدرولوژیک، حفاظت از خاک، تعدیل شرایط اقلیمی و پشتیبانی از ساختارهای اقتصادی-اجتماعی ایفا می‌کنند (Pourhashemi *et al.*, 2004). با این وجود، در دهه‌های اخیر این اکوسیستم‌ها با مجموعه‌ای از تهدیدات طبیعی و انسان‌زاد شامل کاهش بارش، تشدید خشکسالی، افزایش دما، پدیده گردوغبار، گسترش آفات و بیماری‌ها، بهره‌برداری بی‌رویه، چرای مفرط دام و آتش‌سوزی‌های مکرر مواجه بوده‌اند که به کاهش سطح و کیفیت این جنگل‌ها انجامیده است (Pouyan *et al.*, 2021). در چنین شرایطی، توسعه رویکردهای تحلیلی پیشرفته و ابزارهای تصمیم‌یار برای حفاظت مؤثر از این اکوسیستم‌ها، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود. تحقق این امر در گرو ارزیابی دقیق میزان آسیب‌پذیری و به‌ویژه

سنجش مؤلفه در معرض قرار گرفتن در برابر مخاطرات محیطی چندگانه است. از این منظر، شناسایی و مدل سازی الگوهای مکانی شدت و توزیع مخاطرات، می تواند اطلاعات پایه ای ارزشمندی را برای طراحی راهبردهای مدیریتی و افزایش تاب آوری جنگل ها فراهم سازد. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، مدل سازی فضایی شدت قرارگیری رویشگاه های جنگلی زاگرس استان لرستان در معرض مخاطرات محیطی چندگانه و پهنه بندی الگوی مکانی آن است.

روش شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه: استان لرستان با گستره ای در حدود ۱۶۴۰۳ کیلومتر مربع، در زمره نواحی کوهستانی واقع در بخش غربی فلات ایران قرار می گیرد و از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۶ دقیقه طول شرقی مستقر است (شکل ۱). این استان به عنوان یکی از پهنه های شاخص جنگل های زاگرس، از غنای زیستی قابل توجه، ناهمگنی توپوگرافیک بالا و شرایط اقلیمی نیمه مرطوب کوهستانی برخوردار است که در مجموع، بستر مناسبی برای شکل گیری رویشگاه های جنگلی متنوع فراهم آورده است. سطح جنگل های لرستان در حدود ۱/۲ میلیون هکتار برآورد می شود که بخش غالب آن را توده های بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) تشکیل می دهد. این توده ها بسته به شرایط ارتفاعی و محیطی، به صورت پیوسته یا گسسته در سیمای سرزمین پراکنش یافته اند. ساختار اکولوژیک این جنگل ها با ویژگی هایی نظیر تنوع گونه ای بالا، حضور گونه های بومی و ارزشمند، و الگوی ناهمگن پوشش گیاهی شناخته می شود که بیانگر پویایی و پیچیدگی عملکردی این اکوسیستم ها است (Shiranvand and Hosseini, 2020).

از منظر کارکردی، جنگل های لرستان نقش چندوجهی و تعیین کننده ای در ارائه خدمات اکوسیستمی ایفا می کنند؛ به گونه ای که در تنظیم چرخه های هیدرولوژیک، کاهش فرسایش و حفظ پایداری خاک، ترسیب و ذخیره کربن، و تعدیل شرایط اقلیمی منطقه ای سهم به سزایی دارند. با این حال، این اکوسیستم ها در سال های اخیر تحت تأثیر مجموعه ای از فشارهای فزاینده قرار گرفته اند که منشأ آنها ترکیبی از عوامل انسان زاد و تغییرات اقلیمی است. بهره برداری غیراصولی از منابع، چرای بیش از ظرفیت، گسترش الگوهای توسعه ناپایدار و تشدید نوسانات اقلیمی، از جمله مهم ترین محرک هایی هستند که روند تخریب، زوال تدریجی و افت کارکردهای اکولوژیک این جنگل ها را تسریع کرده اند. در این چارچوب، ویژگی های منحصربه فرد فیزیکی و زیستی این رویشگاه ها، ضرورت به کارگیری رویکردهای تحلیلی دقیق برای ارزیابی میزان آسیب پذیری و طراحی مداخلات مدیریتی مبتنی بر شواهد را بیش از پیش برجسته می سازد؛ رویکردی که می تواند زمینه ساز مدیریت پایدار و افزایش تاب آوری این اکوسیستم های ارزشمند در برابر مخاطرات محیطی باشد (Shiranvand and Hosseini, 2020).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و گستره رویشگاه های جنگلی در استان لرستان

Figure 1. Geographical location and extent of forest habitats in Lorestan Province

نقشه‌سازی مخاطرات محیطی چندگانه: در این مطالعه با بررسی اسناد و گزارشات موجود و بازدیدهای میدانی از رویشگاه‌های جنگلی و نیز دسترسی به داده‌ها و اطلاعات قابل اعتماد در زمینه نقشه‌سازی شدت وقوع مخاطرات محیطی، تعداد ۸ مخاطره محیطی موثر بر رویشگاه‌های مورد مطالعه شامل خشکسالی، بزرگی تبخیر و تعرق، آتش‌سوزی، دماهای بیشینه، سیلاب، زمین لغزش، شدت برداشت چوب و فرسایش خاک برای نقشه‌سازی نمایه در معرض قرار گرفتن در سطح رویشگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور استانداردسازی و ایجاد قابلیت مقایسه میان لایه‌های مختلف، تمامی نقشه‌های تولیدشده پس از تهیه، با استفاده از روش شکست‌های طبیعی (Natural Breaks یا Jenks) در محیط نرم‌افزار ArcGIS به پنج طبقه شامل خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد طبقه‌بندی شدند. روش Jenks با هدف بیشینه‌سازی واریانس بین طبقات و کمینه‌سازی واریانس درون طبقات انتخاب شد، زیرا این روش با شناسایی الگوهای طبیعی توزیع داده‌ها، امکان تفکیک بهتر تغییرات مکانی را فراهم کرده و نسبت به روش‌هایی مانند Equal Interval یا Quantile، برای داده‌های محیطی با توزیع ناهمگن و غیرنرمال، از دقت و کارایی بیشتری برخوردار است. به‌همین دلیل، از این روش برای طبقه‌بندی تمامی لایه‌های اطلاعاتی در این پژوهش استفاده شد. با توجه به اینکه لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در این پژوهش از منابع مختلف و با دوره‌های زمانی متفاوت تهیه شده‌اند، به‌منظور حفظ سازگاری زمانی، تمامی داده‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که بیانگر شرایط بلندمدت یا نسبتاً پایدار محیطی باشند. داده‌های اقلیمی بر پایه میانگین‌های بلندمدت، شاخص گردوغبار براساس روند چندین ساله تصاویر ماهواره‌ای و سایر لایه‌ها نیز بر مبنای آخرین اطلاعات معتبر و یا ویژگی‌های نسبتاً پایدار محیطی تهیه شدند. از آنجا که هدف پژوهش، ارزیابی الگوی فضایی بلندمدت شدت قرارگیری رویشگاه‌های جنگلی در معرض مخاطرات محیطی چندگانه بوده است، نه تحلیل تغییرات کوتاه‌مدت یا سالانه، تفاوت محدود در بازه‌های زمانی داده‌ها تأثیر معنی‌داری بر الگوی نهایی پهنه‌بندی نداشته و تمامی لایه‌ها پس از استانداردسازی و هم‌مقیاس‌سازی در چارچوب یک تحلیل مکانی تلفیق شدند. پهنه‌بندی ریسک رخداد بادهای پرسرعت در محدوده مورد مطالعه با تمرکز بر آستانه سرعت‌های برابر یا بیش از ۱۰/۸ متر بر ثانیه (معادل حد آغازی طبقه ششم در مقیاس بوفورت) که دارای اثرات منفی بلند مدت بر پوشش گیاهی است، انجام گرفت. در این راستا، از مجموعه داده‌های سرعت باد با تفکیک زمانی سه‌ساعته طی یک دوره بلندمدت ۳۶ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۵) مربوط به ۱۲ ایستگاه سینوپتیک پیرامون و درون رویشگاه‌های جنگلی استفاده شد تا نمای قابل اتکا از الگوهای زمانی و مکانی این مخاطره فراهم گردد. برای مدل‌سازی رفتار آماری سرعت باد و برآورد احتمال وقوع مقادیر مختلف، تابع توزیع ویبول به‌کار گرفته شد که به‌دلیل انعطاف‌پذیری بالا، یکی از متداول‌ترین توابع در تحلیل داده‌های باد محسوب می‌شود (Wang and Okaze, 2022). در ادامه، احتمال وقوع برآوردشده برای هر ایستگاه در میانگین سرعت‌های باد بالاتر از آستانه ۱۰/۸ متر بر ثانیه در کل دوره آماری ضرب شد تا شاخص کمی ریسک بادهای پرسرعت برای هر ایستگاه استخراج گردد. به‌منظور تعمیم فضایی شاخص خطر بادهای پرسرعت و تولید یک سطح پیوسته، از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (Inverse Distance Weighting; IDW) در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد. انتخاب این روش بر این مبنای بود که داده‌های باد حاصل از تعداد محدودی ایستگاه سینوپتیک بوده و انتظار می‌رود شباهت مقادیر بین نقاط مجاور بیش از نقاط دورتر باشد. همچنین، روش IDW بدون نیاز به برآورد ساختار واریوگرام، برای داده‌های پراکنده با تراکم محدود، روشی پایدار و مناسب در بازسازی تغییرات مکانی محسوب می‌شود. در مقابل، روش‌های Natural Neighbor عمدتاً برای تولید سطوح هموار از داده‌های پراکنده نسبتاً بالا و توزیع یکنواخت مناسب‌تر هستند و قابلیت کنترل تأثیر فاصله را ندارند. همچنین، روش Spline با هدف ایجاد سطوح کاملاً هموار، ممکن است در مناطق کوهستانی با تغییرات شدید توپوگرافی و گرادیان‌های مکانی، موجب ایجاد مقادیر برآوردی غیرواقعی شود (Li and Heap, 2011). از این‌رو، با توجه به تعداد ایستگاه‌ها، پراکنش مکانی داده‌ها و هدف پژوهش، روش IDW به‌عنوان مناسب‌ترین روش درون‌یابی انتخاب شد.

شواهد پژوهشی متعدد حاکی از آن است که پویایی‌های ساختاری و کارکردی اکوسیستم‌ها در مقیاس‌های مختلف، به‌شدت تحت تأثیر نوسانات زمانی و ناهمگنی مکانی الگوهای بارش و رخداد‌های خشکسالی قرار دارند؛ به‌گونه‌ای که تغییر در رژیم‌های بارندگی می‌تواند مسیرهای اکولوژیک این سامانه‌ها را به‌طور معنی‌داری دگرگون سازد (Eslami-Andargoli *et al.*, 2009). به‌منظور پهنه‌بندی شدت خشکسالی در محدوده مورد مطالعه، از داده‌های بارش ثبت‌شده در قالب یک سری زمانی بلندمدت ۳۶ ساله (۱۹۹۰ تا ۲۰۲۵) مربوط به ۱۲ ایستگاه سینوپتیک پیرامون و درون رویشگاه‌های جنگلی

بهره‌گیری شد. در راستای کمی‌سازی خشکسالی هواشناسی، شاخص بارش استاندارد (SPI) در مقیاس زمانی یک‌ساله به کار گرفته شد. پس از استخراج سری زمانی مقادیر SPI برای هر ایستگاه، به منظور برآورد شدت تجمعی خشکسالی، شاخص بزرگی خشکسالی براساس مجموع مقادیر منفی SPI محاسبه گردید. این شاخص بیانگر شدت و تداوم رخدادهای خشکسالی در دوره مورد بررسی بوده و مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود (Mafi-Gholami *et al.*, 2021):

$$\text{رابطه ۱} \quad \text{Meteorological Drought Magnitude} = -(\sum_{j=1}^x \text{SPI}_j)$$

که در آن، SPI_j : مقادیر منفی شاخص بارش استاندارد برای دوره زمانی j است. در ادامه، با محاسبه مقدار بزرگی خشکسالی برای هر ایستگاه، فرآیند تعمیم فضایی این شاخص از طریق روش IDW در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام شد و نقشه رستری توزیع مکانی شدت خشکسالی تولید گردید.

میزان بهره‌برداری از منابع طبیعی و سطح وابستگی معیشتی جوامع محلی به خدمات و تولیدات اکوسیستم‌ها، یکی از عوامل کلیدی در تبیین شدت و الگوی تخریب ساختار و کارکرد بوم‌سازگان‌ها به‌شمار می‌رود. در واقع، در جوامعی که با سطح پایین‌تر رفاه اقتصادی و آسیب‌پذیری اجتماعی بالاتر مواجه هستند، برای جبران محدودیت‌های معیشتی و افزایش ظرفیت سازگاری، فشار بهره‌برداری از منابع طبیعی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد؛ امری که می‌تواند به تشدید روند فرسایش اکولوژیک منجر شود (Timberlake and Schultz, 2019; Mafi-Gholami *et al.*, 2021). در همین راستا، نقشه تغییرات شدت برداشت چوب توسط جوامع روستایی در پهنه پیرامونی سکونتگاه‌ها (به‌عنوان محدوده اثرگذاری روستا بر محیط اطراف) در رویشگاه‌های جنگلی منطقه مورد مطالعه تهیه گردید. براساس بازدهی‌های میدانی و اطلاعات گردآوری‌شده از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان، حداکثر شعاع اثرگذاری مستقیم فعالیت‌های روستایی شامل برداشت چوب و چرای دام در محدوده جنگلی، حدود ۲/۵ کیلومتر برآورد شد؛ محدوده‌ای که بیانگر دامنه نفوذ فضایی فشارهای انسانی از سکونتگاه‌های روستایی به اکوسیستم‌های مجاور است. به‌منظور مدل‌سازی تغییرات مکانی شدت این اثرگذاری، در اطراف هر روستا یک بافر دایره‌ای با شعاع ۲/۵ کیلومتر ایجاد شد. سپس این محدوده به ۵ حلقه دایره‌ای هم‌مرکز با فواصل منظم ۵۰۰ متری (در مجموع ۲۵۰۰ متر از مرکز تا مرز بیرونی) با استفاده از توابع تحلیلی نرم‌افزار ArcGIS تقسیم‌بندی گردید. در هر یک از این نوارهای حلقه‌ای، نسبت فاصله از مرکز روستا به‌عنوان شاخصی از شدت اثرگذاری انسانی محاسبه شد و مقدار آن براساس رابطه ۲ برآورد گردید (Mafi-Gholami *et al.*, 2020):

$$\text{رابطه ۲} \quad fd_{Pi} = \frac{(D_{max} - D_c)}{D_{max}}$$

در این رابطه، D_{max} بیانگر بیشینه فاصله قابل دسترس روستاییان از سکونتگاه (در این مطالعه معادل ۲/۵ کیلومتر) و D_c فاصله هر بافر دایره‌ای تا مرکز روستا است. بر این اساس، پارامتر fd_{Pi} به‌عنوان تابعی از فاصله، احتمال حضور یا شدت حضور روستاییان در هر یک از حلقه‌های فضایی پیرامونی را بازنمایی می‌کند؛ به‌گونه‌ای که با افزایش فاصله از روستا، این احتمال به‌صورت تدریجی کاهش می‌یابد و الگوی افت فضایی فشار انسانی را منعکس می‌سازد.

پس از برآورد مقدار fd_{Pi} ، میزان اثرگذاری هر روستا بر محیط پیرامونی در هر یک از بافرهای دایره‌ای با بهره‌گیری از رابطه ۳ محاسبه شد (Mafi-Gholami *et al.*, 2020). این مرحله امکان کمی‌سازی گرادیان فضایی فشار انسانی از مرکز سکونتگاه به‌سمت رویشگاه‌های جنگلی مجاور را فراهم کرده و مبنایی برای تحلیل الگوهای مکانی شدت بهره‌برداری در مقیاس خرد ارائه می‌دهد.

$$\text{رابطه ۳} \quad LV = fd_{Pi} \times P_i$$

که در این رابطه، شاخص LV به‌عنوان نمایانگر شدت و گستره اثرگذاری فضایی هر روستا بر محیط پیرامونی تعریف می‌شود که به‌صورت تابعی از سه مؤلفه اصلی شامل عامل کاهش فاصله fd_{Pi} (با دامنه تغییرات بین صفر تا یک)، و جمعیت سکونتگاه (P_i) برآورد می‌گردد. این شاخص در واقع بازتابی از برهم‌کنش اندازه جمعیتی و افت تدریجی نفوذ انسانی در فاصله از هسته سکونتگاه بوده و امکان کمی‌سازی گرادیان فشار انسانی در مقیاس فضایی را فراهم می‌سازد. پس از محاسبه مقدار LV برای تمامی حلقه‌های

دایره‌ای پیرامون روستاها، فرآیند تولید سطح پیوسته فضایی با استفاده از ابزارهای تحلیلی نرم‌افزار ArcGIS انجام شد و نقشه رستری توزیع مکانی شدت اثرگذاری روستاها استخراج گردید.

به‌منظور تحلیل فضایی-زمانی رخداد ریزگردها در محدوده جنگل‌های مورد مطالعه، از داده‌های سنجنش‌ازدور مبتنی بر محصول استاندارد MCD19A2 نسخه ۶ حاصل از سنجنده MODIS بر روی ماهواره Terra استفاده شد (Ettehadi Osgouei and Kaya, 2023). در این راستا، پارامتر عمق نوری آتروسول (Aerosol Optical Depth: AOD) به‌عنوان شاخصی معتبر برای برآورد غلظت ذرات معلق در جو، در بستر پردازشی سامانه ابری Google Earth Engine (GEE) مورد پردازش قرار گرفت. ابتدا مجموعه تصاویر روزانه AOD مربوط به یک دوره ۲۲ ساله (۲۰۰۲ تا ۲۰۲۴) در محیط GEE فراخوانی و سازمان‌دهی شد. در گام بعد، به‌منظور کاهش نویزهای زمانی و استخراج الگوهای غالب، داده‌ها در دو مقیاس زمانی تجمیع گردیدند؛ به‌طوری‌که ابتدا میانگین‌های ماهانه و سپس میانگین‌های سالانه محاسبه شد تا نمای پایدار از توزیع زمانی ریزگردها حاصل شود. شایان ذکر است که کارایی و دقت داده‌های AOD سنجنده MODIS در پایش و کمی‌سازی پدیده گرد و غبار، در مطالعات پیشین و از طریق مقایسه با داده‌های ایستگاه‌های پایش کیفیت هوا مورد تأیید قرار گرفته است (Mansourmoghaddam et al., 2022). در نهایت، به‌منظور تحلیل فضایی شدت ریزگردها، نقشه پهنه‌بندی تغییرات AOD در سطح جنگل‌های مورد بررسی تهیه شد. افزایش دماهای حدی (بیشینه) از طریق اثرگذاری مستقیم بر فرآیندهای رشد، بقا و استقرار نهال‌ها، می‌تواند ساختار ترکیب گونه‌ای جوامع گیاهی را دستخوش تغییرات اساسی نماید. این تغییرات عمدتاً از مسیر کاهش کارایی فیزیولوژیک گونه‌ها و تضعیف توان رقابتی آنها در بهره‌برداری از منابع محدود رخ داده و در نهایت می‌تواند به جابه‌جایی یا حذف گونه‌ها از آشیان اکولوژیک خاص منجر شود (Ellison, 2000; Macek et al., 2019). در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی الگوی مکانی ریسک دماهای حدی، از داده‌های دمای روزانه ثبت‌شده در یک طی یک دوره بلندمدت ۳۶ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۵) مربوط به ۱۲ ایستگاه سینوپتیک پیرامون و درون رویشگاه‌های جنگلی استفاده شد. در گام نخست، مقادیر دمای بیشینه مربوط به فصل تابستان برای هر سال استخراج گردید تا تمرکز تحلیل بر دوره‌های اوج تنش حرارتی قرار گیرد. سپس، به‌منظور شناسایی روند تغییرات دما در طول زمان، رابطه رگرسیونی بین دماهای بیشینه سالانه و مؤلفه زمانی (سال) برای هر ایستگاه برقرار شد و نرخ تغییرات سالانه این متغیر به‌عنوان شیب خط رگرسیون محاسبه گردید. در ادامه، به‌منظور ترکیب شدت حرارتی و روند افزایشی آن، مقدار نرخ تغییرات سالانه در میانگین دماهای بیشینه ضرب شد تا شاخص کمی از ریسک دماهای بیشینه برای هر ایستگاه به‌دست آید. در مرحله بعد، به‌منظور تعمیم فضایی این شاخص و تولید سطح پیوسته، از روش IDW در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد و نقشه رستری ریسک دماهای بیشینه تهیه گردید.

نوسانات در حجم رواناب و ذخایر آب سطحی در حوضه‌های آبخیز، به‌واسطه تغییر در مؤلفه‌های تبخیر و تعرق، نقش تعیین‌کننده‌ای در تنظیم ساختار پوشش گیاهی و پویایی توان تولیدی آن ایفا می‌کند. این تغییرات از طریق اثرگذاری بر دسترسی رطوبتی و تعادل آبی خاک، می‌توانند به‌طور مستقیم بر الگوهای رشد، تراکم و کارکرد اکوسیستم‌های گیاهی تأثیرگذار باشند (Xiao et al., 2016; Donmez and Berberoglu, 2013). به‌منظور برآورد الگوی مکانی تبخیر-تعرق واقعی در محدوده مورد مطالعه، در گام نخست مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه (PET) برای ۱۲ ایستگاه سینوپتیک پیرامون و درون رویشگاه‌های جنگلی با استفاده از نرم‌افزار CropWat محاسبه شد. این مقادیر به‌عنوان نمایانگر تقاضای تبخیری جو، مبنای محاسبات بعدی قرار گرفتند. در ادامه، با تلفیق داده‌های بازنگری سالانه و PET، تبخیر-تعرق واقعی (AET) از طریق یک رابطه تجربی غیرخطی برآورد گردید که توانایی مناسبی در بازنمایی محدودیت‌های رطوبتی محیط دارد (رابطه ۴) (Abdollahi et al., 2017):

$$\text{رابطه ۴} \quad AET = \frac{P}{(\alpha + (\frac{P}{PET})^\beta)^{\frac{1}{\beta}}}$$

در این رابطه، P بیانگر بازنگری سالانه، PET تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه، و ضرایب $\alpha = 0.9$ و $\beta = 2$ پارامترهای تنظیمی مدل هستند که شرایط اقلیمی را در برآورد AET لحاظ می‌کنند. پس از محاسبه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برای هر یک از ایستگاه‌ها، به‌منظور تعمیم فضایی و تولید سطح پیوسته این متغیر، از روش درون‌یابی معکوس فاصله در محیط نرم‌افزار ArcGIS استفاده شد و نقشه رستری AET سالانه تهیه گردید.

به منظور تأمین لایه‌های اطلاعاتی مربوط به مخاطرات ثانویه شامل آتش‌سوزی، زمین‌لغزش، سیلاب و فرسایش خاک، از ترکیب نتایج مطالعات پیشین و داده‌های سازمانی معتبر استفاده شد. به‌طور مشخص، نقشه‌های ریسک این مخاطرات بر پایه خروجی‌های پژوهش‌های Jaafari (۲۰۲۴)، Ngo و همکاران (۲۰۲۱)، Khosravi و همکاران (۲۰۲۰) و همچنین داده موجود در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان گردآوری و یکپارچه‌سازی شدند. در گام بعد، به‌منظور انطباق فضایی داده‌ها با محدوده مورد مطالعه، تمامی لایه‌های رستری ریسک با استفاده از مرز برداری (وکتوری) روی‌نگاه‌های جنگلی استخراج (Clip) شدند تا تحلیل‌ها به‌صورت دقیق در محدوده هدف متمرکز گردد.

تعیین وزن نسبی مخاطرات محیطی: در این پژوهش، به‌منظور تعیین اهمیت نسبی هر یک از مخاطرات محیطی، از رویکرد دلفی مبتنی بر قضاوت خبرگان استفاده شد. بدین‌منظور، پرسشنامه‌ای تخصصی طراحی و در اختیار ۱۵ نفر از کارشناسان دارای تجربه در حوزه حفاظت، مدیریت و حمایت از روی‌نگاه‌های جنگلی زاگرس قرار گرفت تا اهمیت نسبی هر یک از مخاطرات را ارزیابی کنند. به‌منظور بررسی پایایی و میزان همگرایی پاسخ‌های خبرگان، ضریب آلفای کرونباخ برای پرسشنامه محاسبه شد که مقدار آن در دور نخست ۰/۹۱ به‌دست آمد. این مقدار بیانگر پایایی بسیار مطلوب و توافق قابل‌قبول میان پاسخ‌های خبرگان است؛ ازاین‌رو، با توجه به کفایت میزان اجماع حاصل‌شده، اجرای دورهای بعدی دلفی ضروری تشخیص داده نشد و وزن نهایی هر مخاطره براساس نتایج همان دور نخست استخراج گردید. این رویکرد، با اتکا به قضاوت‌های تخصصی و برخورداری از پایایی مناسب، امکان اولویت‌بندی نظام‌مند مخاطرات را در چارچوب تحلیل‌های چندمعیاره فراهم ساخت. (برای تشریح کامل فرآیند اجرای روش دلفی، به Mafi-Gholami و همکاران (۲۰۱۵) مراجعه شود).

تهیه نقشه قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه: پیش از تلفیق لایه‌ها، احتمال همپوشانی مفهومی میان برخی مخاطرات، به‌ویژه خشکسالی، دمای حداکثر و تبخیر و تعرق، مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه این متغیرها از نظر اقلیمی دارای ارتباط متقابل هستند، اما هر یک بیانگر جنبه‌ای متفاوت از تنش‌های محیطی مؤثر بر اکوسیستم‌های جنگلی بوده و از نظر ماهیت، فرآیند شکل‌گیری و آثار اکولوژیک، اطلاعات مکملی را ارائه می‌کنند. به‌طور مشخص، خشکسالی نمایانگر کمبود تجمعی آب در مقیاس زمانی مشخص، دمای حداکثر بیانگر شدت تنش حرارتی و تبخیر و تعرق معرف میزان تقاضای اتمسفر برای آب است. ازاین‌رو، در این پژوهش این متغیرها به‌عنوان شاخص‌های مستقل ولی مکمل در چارچوب تحلیل چندمخاطره‌ای در نظر گرفته شدند و تلفیق آنها با استفاده از روش ترکیب خطی وزنی، با هدف بازنمایی ابعاد مختلف مواجهه محیطی انجام شد. در نهایت شاخص نهایی شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه، از تلفیق خطی وزنی لایه‌های استانداردشده و وزن‌دهی‌شده حاصل شد. از آنجا که تمامی لایه‌های ورودی پیش از تلفیق به یک مقیاس یکسان تبدیل شده بودند، مقدار شاخص نهایی به‌صورت مجموع وزنی مقادیر استانداردشده محاسبه گردید. دامنه مقادیر به‌دست‌آمده بیانگر حداقل و حداکثر مقادیر مشاهده‌شده شاخص در محدوده مورد مطالعه است و مستقیماً از فرآیند تلفیق لایه‌ها حاصل شده است. این مقادیر دارای مفهوم فیزیکی مستقل یا آستانه مدیریتی از پیش تعیین‌شده نیستند، بلکه یک شاخص نسبی برای مقایسه شدت قرارگیری نواحی مختلف در معرض مخاطرات محیطی چندگانه محسوب می‌شوند. بنابراین، مقادیر بالاتر نشان‌دهنده شدت بیشتر قرارگیری نسبت به سایر بخش‌های منطقه مورد مطالعه بوده و کاربرد اصلی آنها در رتبه‌بندی، مقایسه فضایی و اولویت‌بندی مدیریتی پهنه‌های جنگلی است.

یافته‌های پژوهش

طبقه‌بندی شاخص‌های مخاطرات محیطی: به‌منظور استانداردسازی شاخص‌ها و ایجاد قابلیت مقایسه میان مخاطرات مختلف، تمامی لایه‌های محیطی به پنج طبقه شامل بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم‌بندی شدند (جدول ۱). براساس این طبقه‌بندی، برای هر یک از مخاطرات، نقشه‌های طبقه‌بندی‌شده‌ای تهیه شد که الگوی فضایی شدت مخاطرات را در پنج سطح متمایز نشان می‌دهند (شکل ۲).

بررسی حدود طبقات بیانگر آن است که تبخیر و تعرق دارای دامنه تغییرات گسترده‌ای است؛ به‌گونه‌ای که مقادیر بیش از ۵۸۰ میلی‌متر در طبقه «بسیار زیاد» قرار گرفته‌اند، در حالی که مقادیر کمتر از ۴۲۰ میلی‌متر به‌عنوان مناطق با شدت بسیار کم این

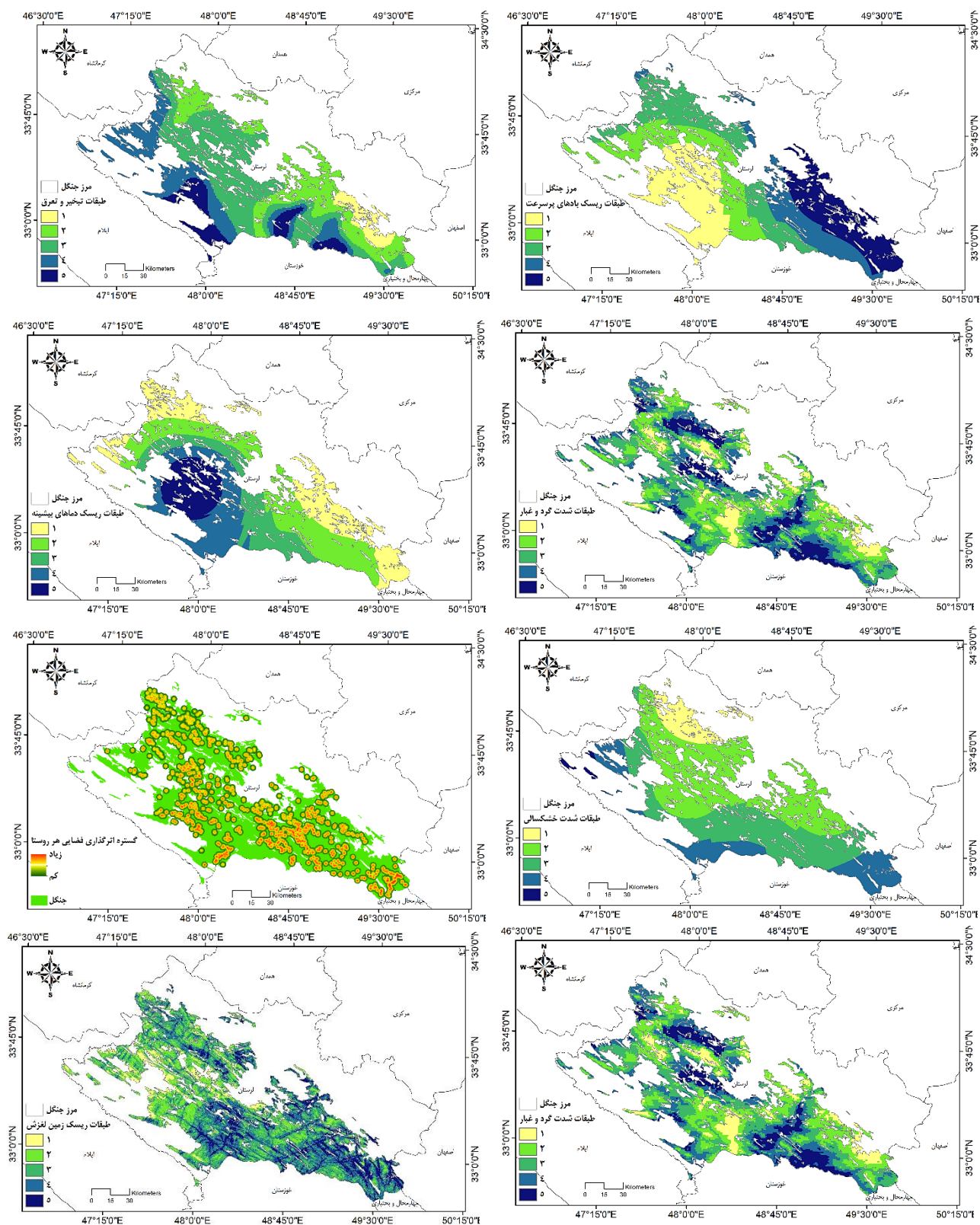
مخاطره شناخته می‌شوند. این اختلاف قابل توجه نشان‌دهنده تنوع مکانی چشمگیر این شاخص در سطح استان است. برای دمای حداکثر، اگرچه دامنه تغییرات عددی نسبتاً محدود است، اما عبور شاخص از آستانه 0.223 بیانگر ورود به طبقه «بسیار زیاد» بوده و مقادیر کمتر از 0.170 در پایین‌ترین سطح شدت قرار می‌گیرند. این موضوع بیانگر حساسیت بالای این شاخص به تغییرات کوچک در مقادیر عددی آن است. شاخص گستره اثرگذاری فضایی هر روستا نیز از دامنه نسبتاً وسیعی برخوردار است. بر این اساس، مقادیر کمتر از 0.26 نشان‌دهنده گستره فضایی محدود، در حالی که مقادیر بالاتر از 0.74 بیانگر گستره اثرگذاری بسیار زیاد روستاها در محیط پیرامونی است. این دامنه تغییرات، امکان تفکیک مناسب سطوح مختلف اثرگذاری فضایی را فراهم می‌سازد. در مورد طوفان گردوغبار، مقادیر بیش از 0.770 در بالاترین طبقه شدت قرار گرفته‌اند، در حالی که مقادیر کمتر از 0.360 نشان‌دهنده شدت بسیار پایین این مخاطره هستند. همچنین، شاخص خشکسالی دارای دامنه‌ای از کمتر از 0.67 تا بیش از 0.82 است که بیانگر وجود تفاوت‌های مکانی قابل توجه در شدت این مخاطره در سطح منطقه مورد مطالعه است. شاخص بادهای پرسرعت اگرچه از نظر عددی دارای دامنه کوچکی است، اما عبور از مقدار 0.125 به عنوان مرز طبقه «بسیار زیاد» نشان‌دهنده افزایش محسوس شدت این مخاطره محسوب می‌شود. در مقابل، مقادیر کمتر از 0.103 در پایین‌ترین طبقه قرار گرفته‌اند. برای زمین‌لغزش، دامنه تغییرات شاخص بسیار گسترده‌تر از سایر مخاطرات است؛ به گونه‌ای که مقادیر بیش از 0.770 در بالاترین طبقه و مقادیر کمتر از 0.67 در پایین‌ترین طبقه قرار دارند. این تفاوت زیاد در حدود طبقات، ناهمگنی بالای پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در سطح استان را نشان می‌دهد. در خصوص سیلاب، مقادیر بیشتر از یک در طبقه «بسیار زیاد» قرار گرفته و مقادیر کمتر از 0.550 به عنوان نواحی با شدت بسیار پایین شناخته می‌شوند. همچنین، در شاخص آتش‌سوزی جنگل، عبور از آستانه 0.720 بیانگر قرارگیری در بالاترین سطح شدت بوده، در حالی که مقادیر کمتر از 0.370 کمترین شدت این مخاطره را نشان می‌دهند (جدول ۱).

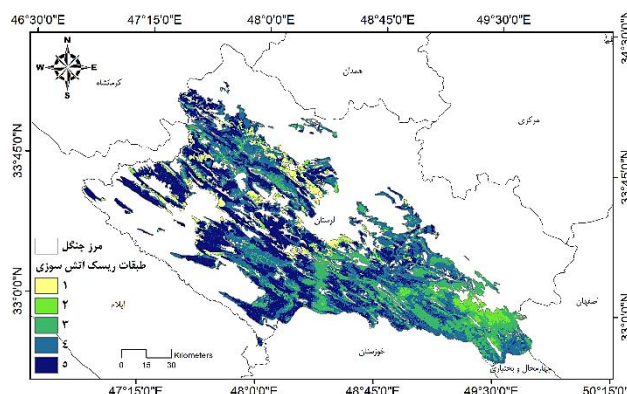
براساس محدوده طبقات موجود در جدول ۲، برای هر یک از مخاطرات، نقشه‌های طبقه‌بندی شده تهیه شد که توزیع فضایی شدت هر مخاطره را در قالب پنج سطح مجزا نمایش می‌دهند (شکل ۲). نقشه‌های طبقه‌بندی شده نشان داد که الگوهای مکانی متفاوتی از پراکنش مخاطرات در سطح اکوسیستم‌های جنگلی استان لرستان قابل مشاهده است. به طور کلی، نتایج طبقه‌بندی نشان می‌دهد که تمامی مخاطرات مورد مطالعه با استفاده از یک چارچوب یکسان استاندارد شده‌اند و نقشه‌های حاصل، مبنای اصلی برای تحلیل‌های بعدی و تهیه نقشه نهایی شدت وقوع مخاطرات چنگانه در جنگل‌های استان لرستان را تشکیل می‌دهند.

جدول ۱- طبقه‌بندی مخاطرات محیطی چنگانه در سطح جنگل‌های استان لرستان

Table 1. Classification of Multiple Environmental Hazards at the Forest Level in Lorestan Province

مخاطره	بسیار کم	کم	متوسط	زیاد	بسیار زیاد
تخیر و تعرق (میلی‌متر)	<0.420	$0.420-0.480$	$0.480-0.530$	$0.530-0.580$	>0.580
دمای حداکثر	<0.170	$0.170-0.188$	$0.188-0.205$	$0.205-0.223$	>0.223
گستره اثرگذاری فضایی روستا	<0.26	$0.26-0.42$	$0.42-0.58$	$0.58-0.74$	>0.74
گردوغبار	<0.360	$0.360-0.500$	$0.500-0.630$	$0.630-0.770$	>0.770
خشکسالی	<0.67	$0.67-0.72$	$0.72-0.77$	$0.77-0.82$	>0.82
بادهای پرسرعت	<0.00103	$0.00103-0.00110$	$0.00110-0.00117$	$0.00117-0.00125$	>0.00125
زمین‌لغزش	<0.650	$0.650-0.800$	$0.800-0.930$	$0.930-1.060$	>1.060
سیلاب	<0.550	$0.550-0.700$	$0.700-0.850$	$0.850-1.000$	>1.000
آتش‌سوزی	<0.370	$0.370-0.500$	$0.500-0.610$	$0.610-0.720$	>0.720

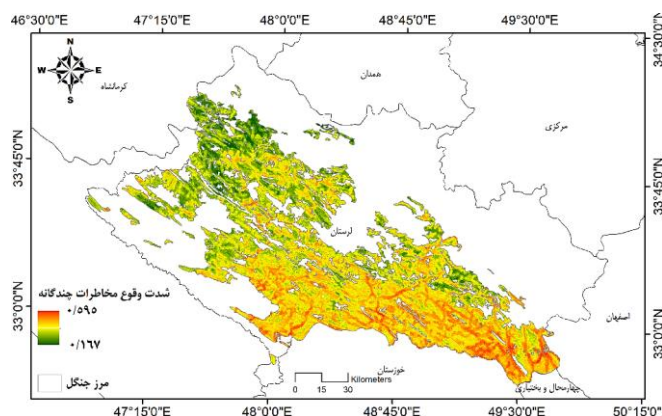




شکل ۲- طبقه بندی وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در سطح رویشگاه‌های جنگلی استان لرستان

Figure 2. Classification of the occurrence of multiple environmental hazards across forest habitats in Lorestan Province

الگوی مکانی شدت وقوع مخاطرات چندگانه در اکوسیستم‌های جنگلی استان لرستان: نتایج حاصل از مدل‌سازی شدت وقوع مخاطرات چندگانه نشان می‌دهد که این شاخص در سطح اکوسیستم‌های جنگلی استان لرستان از پراکنش فضایی ناهمگنی برخوردار است و مقادیر آن در محدوده ۰/۱۶۷ تا ۰/۵۹۰ تغییر می‌کند (شکل ۳). الگوی مکانی این شاخص بیانگر وجود یک گرادیان مشخص از شمال غرب به جنوب شرق استان است. بیشترین مقادیر شدت وقوع مخاطرات چندگانه در بخش‌های جنوبی و جنوب شرقی استان مشاهده می‌شود. این مناطق به صورت لکه‌های نسبتاً پیوسته و گسترده با مقادیر بالا و بسیار بالا در امتداد ارتفاعات زاگرس مرکزی پراکنده شده‌اند. کانون‌های اصلی این پهنه‌ها در نواحی جنگلی هم‌مرز با استان‌های کرمانشاه و همدان قرار گرفته و بخش قابل توجهی از جنگل‌های شمالی استان را دربر می‌گیرند. در مقابل، بخش‌های شمالی، شمال غربی و قسمت‌هایی از نواحی مرکزی استان عمدتاً دارای مقادیر کم تا متوسط شدت وقوع مخاطرات چندگانه هستند. این مناطق به طور عمده در طبقات قرمز و زرد نقشه قرار گرفته و پهنه‌های وسیعی از جنگل‌های جنوب استان را شامل می‌شوند. همچنین، نواحی با شدت پایین به صورت یک کمر بند نسبتاً پیوسته در امتداد مرزهای شرقی و جنوب شرقی استان گسترش یافته‌اند. بررسی الگوی پراکنش فضایی نشان می‌دهد که مناطق با شدت بالای وقوع مخاطرات چندگانه به صورت خوشه‌های کشیده و نواری در راستای جنوب غربی- جنوب شرقی توزیع شده‌اند. علاوه بر این، لکه‌های کوچک و پراکنده‌ای از مقادیر بالا در بخش‌های مرکزی و شرقی استان نیز مشاهده می‌شود که در میان پهنه‌های با شدت متوسط قرار گرفته‌اند. به طور کلی، نقشه شدت وقوع مخاطرات چندگانه بیانگر آن است که اکوسیستم‌های جنگلی استان لرستان از نظر میزان وقوع همزمان و تجمعی مخاطرات محیطی دارای الگوی فضایی کاملاً متمایزی هستند؛ به گونه‌ای که بیشترین شدت مخاطرات در نیمه شمالی و شمال غربی استان و کمترین مقادیر در نیمه جنوبی و جنوب شرقی متمرکز شده است. این الگوی مکانی به خوبی وجود نواحی متمایز با شدت‌های متفاوت وقوع مخاطرات چندگانه را در سراسر جنگل‌های استان نشان می‌دهد.



شکل ۳- شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در سطح رویشگاه‌های جنگلی استان لرستان

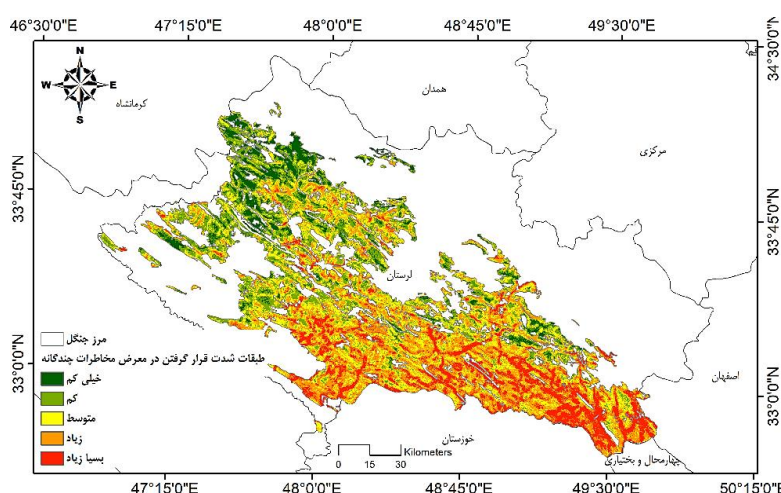
Figure 3. Intensity of occurrence of multiple environmental hazards across forest habitats in Lorestan Province

نتایج حاصل از طبقه‌بندی شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه نشان می‌دهد که رویشگاه‌های جنگلی استان لرستان از نظر میزان مواجهه با مخاطرات، دارای الگوی فضایی ناهمگن و قابل تفکیکی هستند (شکل ۴). بر این اساس، کل سطح جنگل‌های استان به پنج طبقه شامل بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد تقسیم شد که هر یک از آنها بیانگر سطوح متفاوتی از شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه هستند. بررسی نقشه طبقه‌بندی شده نشان می‌دهد که طبقات بسیار کم و کم عمدتاً در بخش‌های شمالی و شمال غربی استان متمرکز شده‌اند و به صورت پهنه‌های نسبتاً پیوسته در امتداد ارتفاعات شمالی و شمال غربی زاگرس مشاهده می‌شوند. در مقابل، طبقات زیاد و بسیار زیاد عمدتاً در بخش‌های جنوبی، جنوب غربی و جنوب شرقی استان گسترش یافته‌اند و یک کمربند نسبتاً پیوسته از پهنه‌های با شدت بالا را در بخش وسیعی از رویشگاه‌های جنگلی تشکیل می‌دهند. همچنین، طبقه متوسط به عنوان یک ناحیه گذار، در بخش‌های مرکزی استان پراکنش بیشتری داشته و میان پهنه‌های کم‌خطر و پرخطر قرار گرفته است (شکل ۴). از نظر وسعت، نتایج نشان می‌دهد که طبقه زیاد با مساحتی در حدود ۳۱۸ هزار هکتار، بزرگ‌ترین پهنه را در میان طبقات پنج‌گانه به خود اختصاص داده و حدود ۲۶ درصد از کل جنگل‌های استان را شامل می‌شود (جدول ۲). پس از آن، طبقات متوسط و بسیار زیاد به ترتیب با حدود ۲۸۱ هزار هکتار و ۲۴۹ هزار هکتار، سهم قابل توجهی از رویشگاه‌های جنگلی را در بر می‌گیرند. در مقابل، طبقه بسیار کم کمترین وسعت را داشته و حدود ۱۲۹ هزار هکتار از جنگل‌های استان را شامل می‌شود. به طور کلی، نتایج حاصل از تحلیل فضایی نشان می‌دهد که حدود ۵۶۸ هزار هکتار از رویشگاه‌های جنگلی استان لرستان، معادل ۴۶/۶۴ درصد از کل سطح جنگل‌ها، در طبقات زیاد و بسیار زیاد قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه قرار دارند (جدول ۲). همچنین، طبقات بسیار کم و کم در مجموع حدود ۳۰ درصد از سطح جنگل‌های استان را به خود اختصاص داده‌اند. این تفاوت در وسعت طبقات مختلف به خوبی در نقشه طبقه‌بندی شده قابل مشاهده است و بیانگر پراکنش نامتوازن شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه در سطح رویشگاه‌های جنگلی استان است.

جدول ۲- وسعت و درصد طبقات شدت قرارگیری در معرض مخاطرات چندگانه در رویشگاه‌های جنگلی استان لرستان

Table 2. Area and percentage of intensity classes of exposure to multiple hazards across forest habitats in Lorestan Province

طبقه شدت	درصد از مساحت جنگل‌ها (درصد)	وسعت (هکتار)
بسیار کم	10.62	129245
کم	19.65	239168
متوسط	23.09	280951
زیاد	26.14	318149
بسیار زیاد	20.50	249487



شکل ۴- پراکنش فضایی طبقات پنج‌گانه شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه در جنگل‌های استان لرستان

Figure 4. Spatial distribution of the five intensity classes of exposure to multiple environmental hazards across the forests of Lorestan Province

بحث و نتیجه‌گیری

درک الگوی فضایی قرارگیری اکوسیستم‌های جنگلی در معرض مخاطرات محیطی چندگانه، یکی از پیش‌نیازهای اساسی برای ارزیابی جامع آسیب‌پذیری و تدوین راهبردهای سازگاری و مدیریت ریسک در شرایط تغییرات شتابان محیطی و اقلیمی محسوب می‌شود. تلفیق همزمان مخاطرات اقلیمی، ژئومورفولوژیکی، هیدرولوژیکی و اجتماعی در یک چارچوب یکپارچه، امکان شناسایی پهنه‌هایی را فراهم می‌کند که تحت فشار تجمعی و همزمان چندین تنش محیطی قرار دارند و در نتیجه، از پتانسیل بیشتری برای تجربه تغییرات اکولوژیک برخوردارند (Mafi-Gholami *et al.*, 2021; Pirasteh *et al.*, 2024).

در مطالعه حاضر، شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه در اکوسیستم‌های جنگلی استان لرستان از طریق تلفیق ۹ مخاطره اصلی شامل خشکسالی، تبخیر و تعرق، آتش‌سوزی جنگل، بادهای پرسرعت، دمای حداکثر، سیلاب، زمین‌لغزش، طوفان گردوغبار و گستره اثرگذاری فضایی سکونتگاه‌های روستایی مدل‌سازی شد. نتایج نشان داد که الگوی فضایی قرارگیری در معرض مخاطرات چندگانه از ناهمگنی قابل‌توجهی برخوردار بوده و شدت مخاطرات در سطح استان به‌صورت یکنواخت توزیع نشده است. نقشه نهایی نشان داد که پهنه‌های با شدت زیاد و بسیار زیاد عمدتاً در بخش‌های جنوبی، جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی استان متمرکز هستند، در حالی که بخش‌های شمالی و شمال‌غربی استان بیشتر در طبقات بسیار کم و کم قرار گرفته‌اند. برآوردهای فضایی نشان داد که نزدیک به نیمی از رویشگاه‌های جنگلی استان، معادل حدود ۵۶۸ هزار هکتار، در طبقات زیاد و بسیار زیاد قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه واقع شده‌اند. چنین وسعت قابل‌توجهی نشان می‌دهد که بخش مهمی از جنگل‌های لرستان تحت تأثیر همزمان چندین عامل تنش‌زای محیطی قرار دارند و از این منظر، مخاطرات منفرد نمی‌توانند به‌تنهایی الگوی ریسک اکولوژیک منطقه را تبیین کنند. این یافته اهمیت به‌کارگیری رویکردهای چندمخاطره‌ای را در ارزیابی آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های جنگلی بیش از پیش آشکار می‌سازد. وسعت پهنه‌های دارای شدت زیاد و بسیار زیاد قرارگیری در معرض مخاطرات، که حدود ۴۶/۶۴ درصد از کل رویشگاه‌های جنگلی استان را در بر می‌گیرد، از دیدگاه مدیریت اکوسیستم، مقدار قابل‌توجهی محسوب می‌شود. اگرچه به‌دلیل تفاوت در چارچوب‌های مفهومی، نوع مخاطرات، شاخص‌های مورد استفاده و مقیاس مکانی مطالعات، مقایسه مستقیم این مقدار با سایر پژوهش‌ها امکان‌پذیر نیست، اما نتایج مطالعات انجام‌شده در اکوسیستم‌های کوهستانی زاگرس و سایر مناطق جهان نیز نشان می‌دهد که مخاطرات محیطی معمولاً به‌صورت خوشه‌ای و همپوشان در بخش قابل‌توجهی از این اکوسیستم‌ها متمرکز یافته و الگوهای ناهمگن فضایی ایجاد می‌کنند (Forzieri *et al.*, 2022; Jaafari *et al.*, 2022). از این منظر، قرارگیری نزدیک به نیمی از جنگل‌های استان در طبقات زیاد و بسیار زیاد، بیانگر آن است که بخش گسترده‌ای از این اکوسیستم به‌طور همزمان تحت تأثیر چندین عامل تنش‌زای محیطی قرار دارد و بنابراین، برنامه‌ریزی حفاظتی و تخصیص منابع مدیریتی باید بر پایه اولویت‌بندی فضایی و رویکرد مدیریت یکپارچه مخاطرات چندگانه انجام گیرد. این یافته، بیش از آنکه بیانگر عبور از یک آستانه بحرانی مطلق باشد، نشان‌دهنده وسعت نسبی پهنه‌هایی است که در مقایسه با سایر بخش‌های منطقه، از شدت قرارگیری بیشتری در معرض مخاطرات برخوردار هستند. الگوی مشاهده‌شده در استان لرستان را می‌توان در چارچوب ویژگی‌های اقلیمی و محیطی زاگرس مرکزی تفسیر کرد. بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی استان طی دهه‌های اخیر با روند فزاینده افزایش دما، کاهش بارش، افزایش فراوانی خشکسالی‌ها و تشدید تنش‌های هیدرولوژیک مواجه بوده‌اند (Etemadi *et al.*, 2016; Zittis *et al.*, 2022). این شرایط، زمینه را برای همپوشانی چندین مخاطره محیطی فراهم می‌کند و موجب شکل‌گیری پهنه‌های دارای قرارگیری بالا در معرض مخاطرات می‌شود. در مقابل، تمرکز طبقات بسیار کم و کم در بخش‌هایی از شمال و شمال‌غرب استان نشان می‌دهد که فشار تجمعی مخاطرات در این نواحی نسبتاً کمتر است.

یکی از نتایج قابل‌توجه این پژوهش، الگوی فضایی مشخص و تقریباً نواری طبقات شدت قرارگیری در معرض مخاطرات چندگانه در امتداد محور شمال‌غربی-جنوب‌شرقی زاگرس است. چنین الگویی نشان می‌دهد که ساختار توپوگرافی، گرادیان‌های ارتفاعی و تغییرات اقلیمی مرتبط با آنها نقش تعیین‌کننده‌ای در سازمان‌دهی فضایی مخاطرات محیطی در جنگل‌های استان دارند. مطالعات متعددی در اکوسیستم‌های کوهستانی جهان نیز نشان داده‌اند که توپوگرافی و ناهمگنی محیطی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده توزیع فضایی مخاطرات چندگانه محسوب می‌شوند (Valavi *et al.*, 2019; Forzieri *et al.*, 2022). از سوی دیگر، نتایج این مطالعه بار دیگر بر ماهیت برهم‌کنشی مخاطرات محیطی تأکید می‌کند. مخاطراتی نظیر خشکسالی، افزایش دما،

آتش‌سوزی و فرسایش، اغلب به‌صورت مستقل عمل نمی‌کنند، بلکه از طریق سازوکارهای متقابل و هم‌افزایی، اثرات یکدیگر را تشدید می‌کنند. در چنین شرایطی، افزایش شدت یک مخاطره می‌تواند احتمال وقوع یا شدت سایر مخاطرات را نیز افزایش دهد و در نهایت به شکل‌گیری چرخه‌های تقویت‌کننده تخریب اکوسیستم منجر شود (Jaafari *et al.*, 2022; Nazaripour *et al.*, 2024). اهمیت این نتایج زمانی دوچندان می‌شود که در چارچوب تغییر اقلیم آینده مورد توجه قرار گیرد. اغلب سناریوهای اقلیمی برای خاورمیانه و به‌ویژه زاگرس، افزایش دما، کاهش منابع آب، تشدید خشکسالی‌ها و افزایش نوسانات اقلیمی را در دهه‌های آینده پیش‌بینی می‌کنند (Zittis *et al.*, 2022). چنین روندی می‌تواند نه تنها شدت مخاطرات کنونی را افزایش دهد، بلکه موجب گسترش فضایی پهنه‌های با قرارگیری زیاد و بسیار زیاد در معرض مخاطرات محیطی نیز شود. بنابراین، نقشه‌های حاصل از این پژوهش می‌توانند به‌عنوان یک مبنای علمی برای پایش تغییرات آینده و ارزیابی سناریوهای مختلف تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گیرند.

از دیدگاه مدیریتی، شناسایی قانون‌های دارای قرارگیری بالا در معرض مخاطرات چندگانه، ابزار ارزشمندی برای اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی و تخصیص بهینه منابع فراهم می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که راهبردهای مدیریتی در جنگل‌های زاگرس باید از رویکردهای تک‌مخاطره‌ای فاصله گرفته و به‌سمت مدیریت یکپارچه مخاطرات چندگانه حرکت کنند. فراتر از ارزش تحلیلی، نقشه نهایی شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه می‌تواند به‌عنوان یک ابزار پشتیبان تصمیم در مدیریت اکوسیستم‌های جنگلی زاگرس مورد استفاده قرار گیرد. مهم‌ترین کارکرد این نقشه، اولویت‌بندی فضایی اقدامات مدیریتی است؛ به‌گونه‌ای که مدیران منابع طبیعی بتوانند مناطق دارای شدت زیاد و بسیار زیاد قرارگیری را به‌عنوان قانون‌های اولویت‌دار برای برنامه‌ریزی و مداخله شناسایی کنند. بر این اساس، این نقشه می‌تواند مبنایی برای هدفمند کردن پروژه‌های احیای جنگل، تخصیص بهینه منابع حفاظتی، استقرار شبکه‌های پایش بلندمدت، طراحی برنامه‌های کاهش خطر آتش‌سوزی، حفاظت خاک و آب، مدیریت پوشش گیاهی و اجرای راهبردهای سازگاری مبتنی بر اکوسیستم در برابر تغییر اقلیم فراهم آورد. از دیدگاه این پژوهش، اولویت‌بندی مکانی اقدامات مدیریتی مهم‌ترین کاربرد عملی این نقشه محسوب می‌شود، زیرا اثربخشی تمامی اقدامات حفاظتی و مدیریتی، از تخصیص منابع تا پایش و احیا، در گرو شناسایی دقیق پهنه‌هایی است که بیشترین شدت قرارگیری در معرض مخاطرات را تجربه می‌کنند. از این منظر، نقشه تولیدشده صرفاً یک خروجی توصیفی نیست، بلکه چارچوبی عملیاتی برای هدایت تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر شواهد، افزایش کارایی سرمایه‌گذاری‌های حفاظتی و ارتقای تاب‌آوری اکوسیستم‌های جنگلی در برابر مخاطرات محیطی چندگانه به‌شمار می‌رود. اجرای برنامه‌های احیای جنگل، حفاظت خاک و آب، مدیریت سوخت‌های جنگلی، تقویت پایش مخاطرات و توسعه برنامه‌های سازگاری مبتنی بر اکوسیستم می‌تواند در کاهش قرارگیری در معرض مخاطرات و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های جنگلی مؤثر باشد.

محدودیت در دسترسی به داده‌های بلندمدت اقلیمی، عدم یکنواختی توزیع ایستگاه‌های هواشناسی، عدم لحاظ برخی تنش‌های زیستی نظیر آفات و بیماری‌های جنگلی و همچنین عدم استفاده از سناریوهای آینده تغییر اقلیم، از جمله مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش حاضر به‌شمار می‌روند. علاوه بر این، مخاطرات محیطی ماهیتی پویا و غیرایستا دارند و الگوهای مشاهده‌شده در این مطالعه لزوماً در دوره‌های زمانی آینده ثابت نخواهند ماند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالاتر، شبکه‌های پایش اکولوژیک بلندمدت و سناریوهای تغییر اقلیم، ارزیابی‌های چندمخاطره‌ای را توسعه دهند. همچنین، تلفیق مؤلفه‌های حساسیت و ظرفیت سازگاری در کنار مؤلفه قرارگیری در معرض مخاطرات، می‌تواند به توسعه یک چارچوب جامع‌تر برای ارزیابی آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های جنگلی زاگرس و ارتقای قابلیت پیش‌بینی و کاربرد مدیریتی این‌گونه مطالعات منجر شود.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی بنیاد ملی علم ایران و تحت شماره طرح ۴۰۴۵۸۶۰ انجام شد.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهاد مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظراتی و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- Abdollahi, K., Bashir, I., Verbeiren, B., Harouna, M.R., Van Griensven, A., Huysmans, M., Batelaan, O., 2017. A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin. *Environmental Earth Sciences* 76(5), 198.
- Adger, W.N., 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change* 16(3), 268-281.
- Donmez, C., Berberoğlu, S., 2016. A comparative assessment of catchment runoff generation and forest productivity in a semi-arid environment. *International Journal of Digital Earth* 9(10), 942-962.
- Ellison, A.M., 2000. Mangrove restoration: Do we know enough? *Restoration Ecology* 8(3), 219-229.
- Eslami-Andargoli, L., Dale, P., Sipe, N., Chaseling, J., 2009. Mangrove expansion and rainfall patterns in Moreton Bay, Southeast Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 85(2), 292-298.
- Etemadi, H., Samadi, S.Z., Sharifikia, M., Smoak, J.M., 2016. Assessment of climate change downscaling and non-stationarity on the spatial pattern of a mangrove ecosystem in an arid coastal region of southern Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 126(1-2), 35-49.
- Ettehadi Osgouei, P., Kaya, Ş., 2023. Monitoring the surface heat island (SHI) effects of industrial enterprises. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVIII-M-1-2023*, 509-514.
- FAO, UNEP, 2020. The State of the World's Forests 2020: Forests, biodiversity and people. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Forzieri, G., Dakos, V., McDowell, N.G., Ramdane, A., Cescatti, A., 2022. Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature* 608(7923), 534-539.
- Jaafari, A., Rahmati, O., Zenner, E. K., Mafi-Gholami, D., 2022. Anthropogenic activities amplify wildfire occurrence in the Zagros eco-region of western Iran. *Natural Hazards* 114(1), 457-473.
- Jafari, A., 2024. Zoning of climate change and natural hazards in the Zagros region. *Forests and Rangelands Research Institute*. (In Persian)
- Kanwar, N., Kuniyal, J.C., 2022. Vulnerability assessment of forest ecosystems focusing on climate change, hazards and anthropogenic pressures in the cold desert of Kinnaur district, northwestern Indian Himalaya. *Journal of Earth System Science* 131, 51.
- Khosravi, K., Panahi, M., Golkarian, A., Keesstra, S.D., Saco, P.M., Bui, D.T., Lee, S., 2020. Convolutional neural network approach for spatial prediction of flood hazard at national scale of Iran. *Journal of Hydrology* 591, 125552.
- Leberger, R., Geijzendorffer, I.R., Gaget, E., Guelmami, A., Galewski, T., 2020. Mediterranean wetland conservation in the context of climate and land cover change. *Regional Environmental Change* 20, 67.
- Li, J., Heap, A. D. 2011. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. *Ecological Informatics* 6(3-4), 228-241.

- Liu, H., Williams, A.P., Allen, C. D., Guo, D., Wu, X., Anenkhonov, O.A., Badmaeva, N.K., 2013. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology* 19(8), 2500–2510.
- Macek, M., Kopecký, M., Wild, J., 2019. Maximum air temperature controlled by landscape topography affects plant species composition in temperate forests. *Landscape Ecology* 34(11), 2541-2556.
- Mafi-Gholami, D., Feghhi, J., Danehkar, A., Yarali, N., 2015. Classification and prioritization of negative factors affecting on mangrove forests using Delphi method (a case study: Mangrove forests of Hormozgan Province, Iran). *Advances in Bioresearch* 6(3), 96-104.
- Mafi-Gholami, D., Jaafari, A., Zenner, E. K., Nouri Kamari, A., Tien Bui, D., 2020. Spatial modeling of exposure of mangrove ecosystems to multiple environmental hazards. *Science of the Total Environment* 740, 140167.
- Mafi-Gholami, D., Pirasteh, S., Ellison, J.C., Jaafari, A., 2021. Fuzzy-based vulnerability assessment of coupled social-ecological systems to multiple environmental hazards and climate change. *Journal of Environmental Management* 299, 113573.
- Mafi-Gholami, D., Zenner, E. K., Jaafari, A., Riyahi Bakhtyari, H.R., Tien Bui, D., 2019. Multi-hazards vulnerability assessment of southern coasts of Iran. *Journal of Environmental Management* 252, 109628.
- Mansourmoghaddam, M., Naghipur, N., Rousta, I., Ghaffarian, H. R., 2022. Temporal and spatial monitoring and forecasting of dust using Google Earth Engine and remote sensing data (case study of Qazvin Province). *Desert Management* 10(1), 77-98.
- Michelsen, O., McDevitt, J.E., Coelho, C.R., 2014. A comparison of three methods to assess land use impacts on biodiversity in forestry plantations in New Zealand. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19, 1214-1225.
- Nazaripour, H., Sedaghat, M., Sadeghinia, A., 2024. Observed changes in the contribution of extreme precipitation over the Zagros Mountains, Iran. *Időjárás* 128(3), 367-377.
- Ngo, P.T.T., Panahi, M., Khosravi, K., Ghorbanzadeh, O., Kariminejad, N., Cerdà, A., Lee, S., 2021. Evaluation of deep learning algorithms for national scale landslide susceptibility mapping of Iran. *Geoscience Frontiers* 12(2), 505-519.
- Pirasteh, S., Fang, Y., Mafi-Gholami, D., Abulibdeh, A., Nouri-Kamari, A., Khonsari, N., 2024. Enhancing vulnerability assessment through spatially explicit modeling of mountain social-ecological systems exposed to multiple environmental hazards. *Science of the Total Environment* 930, 172744.
- Pourhashemi, M., Marvi Mohajer, M. R., Zobeiri, M., Zahedi Amiri, G., Panahi, P., 2004. Identification of forest vegetation units in support of government management objectives in Zagros forests, Iran. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(Suppl. 4), 72-77.
- Pourhashemi, M., Mohajer, M.R.M., Zobeiri, M., Amiri, G.Z., Panahi, P., 2004. Identification of forest vegetation units in support of government management objectives in Zagros forests, Iran. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(S4), 72-77.
- Pouyan, S., Pourghasemi, H. R., Bordbar, M., Rahmanian, S., Clague, J.J., 2021. A multi-hazard map-based assessment of flooding, gully erosion, forest fires, and earthquakes in Iran. *Scientific Reports* 11(1), 14889.
- Shiravand, H., Hosseini, S.A., 2020. A new evaluation of the influence of climate change on Zagros oak forest dieback in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 141(1), 685-697.
- Sivrikaya, F., Bozali, N., 2012. Karbon depolama kapasitesinin belirlenmesi: Türkoğlu planlama birimi örneği [Determining carbon stock: A case study from Türkoğlu planning unit]. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi* 14(1, Special Issue), 69-76.
- Spehn, E.M., Rudmann Maurer, K., Körner, C., 2011. Mountain biodiversity. *Plant Ecology & Diversity* 4(4), 301-302.
- Thakur, S., Negi, V.S., Dhyani, R., Satish, K.V., Bhatt, I.D., 2021. Vulnerability assessments of mountain forest ecosystems: A global synthesis. *Trees, Forests and People* 6, 100156.
- Timberlake, T. J., Schultz, C. A., 2019. Climate change vulnerability assessment for forest management: The case of the U.S. Forest Service. *Forests* 10(11), 1030.

- Valavi, R., Shafizadeh Moghadam, H., Matkan, A., Shakiba, A., Mirbagheri, B., Kia, S. H., 2019. Modelling climate change effects on Zagros forests in Iran using individual and ensemble forecasting approaches. *Theoretical and Applied Climatology* 137, 1015-1025.
- Wang, J., Okaze, T., 2022. Evaluation of wind speed distributions using Weibull parameters in complex terrains. *Energy Reports*, 8, 560-572.
- Zittis, G., Almazroui, M., Alpert, P., Ciais, P., Cramer, W., Dahdal, Y., Fnais, M., Francis, D., Hadjinicolaou, P., Howari, F., Jrrar, A., Kaskaoutis, D. G., Kulmala, M., Lazoglou, G., Mihalopoulos, N., Lin, X., Rudich, Y., Sciare, J., Stenchikov, G., Xoplaki, E., Lelieveld, J., 2022. Climate change and weather extremes in the Eastern Mediterranean and Middle East. *Reviews of Geophysics* 60(3), e2021RG000762.