



Modeling of environmental hazard intensity in forest habitats (Case study: forests of Doroud County, Lorestan Province)

Masoud Mahmoudi¹ | Nabiollah Yarali^{2✉} | Davood Mafi-Gholami³

1. Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: masoud.mah1385@yahoo.com

2. Corresponding Author, Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: nabiollah.yarali@sku.ac.ir

3. Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran. E-mail: d.mafigholami@sku.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article	Assessing the exposure of forest habitats to multiple environmental hazards is a fundamental step in understanding their ecological vulnerability and planning effective adaptation strategies. This study focuses on the forest ecosystems of Doroud County in Lorestan Province, western Iran, aiming to model the spatial intensity of multiple environmental hazards using a network-based approach. Ten major hazard factors were considered: drought, dust storms, annual evapotranspiration, maximum temperatures, flooding, destructive windstorms, landslides, proximity to rural settlements, road effects, and soil erosion. Hazard maps for each factor were developed using spatial data and satellite imagery. Through the Delphi method, expert opinions were used to assign relative weights to each hazard. The classified hazard maps were then combined according to their weights to create a composite Multi-Hazard Intensity Index (MHII), which was later reclassified into five intensity levels. The results showed that drought (0.182), dust storms (0.159), and proximity to villages (0.141) were the most influential hazards, while flooding (0.043) and landslides (0.036) had the lowest weights. The MHII values ranged from 0.128 to 0.414. The highest intensities were mainly found in central forest zones, while the southern areas generally had lower hazard levels. Overlay analysis with forest canopy density classes revealed that forests with moderate (25–50%) and low (10–25%) canopy cover accounted for 35.5% and 31.8% of the high-intensity hazard areas, respectively. Interestingly, 35.9% of the dense forest areas (>50%) were also exposed to high hazard intensities. These findings highlight the combined impact of climate change and human activities on increasing hazard exposure in forest landscapes. The spatial outputs of this study can support practical decision-making in conservation, risk management, and forest resilience planning across hazard-prone areas.
Article history: Received 26 April 2025 Received in revised form 30 June 2025 Accepted 07 August 2025 Published online 20 June 2025	
Keywords: <i>Delphi method,</i> <i>Ecological vulnerability,</i> <i>Forest canopy density classes,</i> <i>Geographic Information System (GIS).</i>	

Cite this article: Mohaamdi, M., Yarali, N., & Mafi-Gholami, D. (2025). Modeling of environmental hazard intensity in forest habitats (Case study: forests of Doroud County, Lorestan Province). *Journal of Natural Environment*, 78 (1), 73-92. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.396181.2811>



مدل سازی شدت وقوع مخاطرات محیطی در سطح رویشگاه های جنگلی (مطالعه جنگل های شهرستان دورود، استان لرستان)

مسعود محمودی^۱ | نبی اله یارعلی^۲ | داود مافی غلامی^۳

۱. گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: masoud.mah1385@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: nabiollah.yarali@sku.ac.ir
۳. گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. رایانامه: d.mafigholami@sku.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	ارزیابی شدت مواجهه رویشگاه های جنگلی با مخاطرات محیطی چندگانه، گامی بنیادین در تحلیل آسیب پذیری و برنامه ریزی سازگاری این زیست بوم های حساس به شمار می آید. این پژوهش با هدف مدل سازی شبکه مبنای شدت وقوع مخاطرات چندگانه در سطح رویشگاه های جنگلی شهرستان دورود، استان لرستان انجام شد. ابتدا با تکیه بر داده های مکانی، تصاویر ماهواره ای و بهره گیری از روش ساختاریافته دلفی، نقشه های ریسک برای ده مؤلفه مخاطره زا شامل خشکسالی، ریزگرد، تبخیر و تعرق سالانه، دمای بیشینه، سیلاب، تندباد، زمین لغزش، نزدیکی به روستاها، اثر جاده و فرسایش خاک تولید و وزن دهی شدند. سپس نقشه های طبقه بندی شده براساس پنج سطح شدت با وزن های اختصاص یافته ترکیب گردیدند و شاخص نهایی شدت وقوع مخاطرات با میانگین گیری شبکه ای در واحدهای تحلیلی محاسبه شد. نتایج نشان داد خشکسالی (۰/۱۸۲)، ریزگرد (۰/۱۵۹) و مجاورت با روستا (۰/۱۴۱) دارای بیشترین اهمیت نسبی بوده اند. شاخص نهایی بین ۰/۱۲۸ تا ۰/۴۱۴ متغیر بوده و نواحی مرکزی رویشگاه ها در معرض شدت بالاتر قرار گرفته اند. تحلیل همپوشانی شدت مخاطرات با طبقات تراکم تاج پوشش نشان داد که رویشگاه های با تراکم متوسط (۵۰-۲۵ درصد) و پایین (۲۵-۱۰ درصد) به ترتیب ۳۵/۵ درصد و ۳۱/۸ درصد از سطوح دارای شدت بالا را شامل می شوند. همچنین، ۳۵/۹٪ از نواحی با تراکم بیش از ۵۰٪ در طبقه با شدت زیاد مخاطرات قرار گرفته اند. نتایج بیانگر نقش ترکیبی تغییرات اقلیمی، مداخلات انسانی و فشارهای کاربری در افزایش شدت مخاطرات و تهدید پایداری اکولوژیک جنگل هاست. یافته های این مطالعه می توانند مبنایی کارآمد برای تصمیم سازی هدفمند در حوزه حفاظت، ارزیابی ریسک، مدیریت سازگاران و ارتقاء تاب آوری رویشگاه های جنگلی در مواجهه با چالش های فزاینده محیطی فراهم آورند.

کلیدواژه ها:
آسیب پذیری،
سامانه اطلاعات جغرافیایی،
طبقه های تراکم جنگل،
روش دلفی.

استاد: محمدی، مسعود؛ یارعلی، نبی اله؛ و مافی غلامی، داود (۱۴۰۴). مدل سازی شدت وقوع مخاطرات محیطی در سطح رویشگاه های جنگلی (مطالعه جنگل های شهرستان دورود، استان لرستان). محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۱)، ۹۲-۷۳.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.396181.2811>



مقدمه

جنگل‌ها از مهم‌ترین زیست‌بوم‌های زمین محسوب می‌شوند که با پوشش بیش از ۴/۶ میلیارد هکتار که معادل حدود ۳۰ درصد از مساحت خشکی‌های کره زمین است، نقشی اساسی در حفظ پایداری اقلیمی، چرخه‌های بیوشیمیایی، و حمایت از تنوع زیستی دارند. این اکوسیستم‌های پیچیده، به‌عنوان سامانه‌هایی با کارکردهای اکولوژیک، اقتصادی و اجتماعی متنوع، تأثیر عمیقی بر عملکرد سیاره‌ای و بقاء گونه‌های زنده دارند (FAO, 2020). این اکوسیستم‌ها، که زیستگاه بیش از ۸۰ درصد از گونه‌های گیاهی، جانوری و حشرات جهان هستند، ستون فقرات تنوع زیستی سیاره زمین محسوب می‌شوند و در حفظ تعادل عملکردی اکوسیستم‌های طبیعی نقش کلیدی دارند. از منظر کارکردهای اقلیمی، جنگل‌ها با ذخیره‌سازی حدود ۷۸ درصد از کل کربن آلی موجود در اکوسیستم‌های خشکی، یکی از مؤثرترین مخازن کربن در سطح جهان به‌شمار می‌روند (Sivrikaya and Bozali, 2012). به‌واسطه این ویژگی، جنگل‌ها نه تنها به‌عنوان فیلترهای زیستی در جذب دی‌اکسید کربن عمل می‌کنند، بلکه نقش مؤثری در کاهش آثار گرمایش جهانی و تنظیم الگوهای اقلیمی در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی دارند. فراتر از کارکردهای محیط‌زیستی، جنگل‌ها با تأمین کالاها و خدمات اکوسیستمی، نظیر چوب، خوراک، دارو، گردشگری و خدمات فرهنگی، نقشی اساسی در پشتیبانی از معیشت انسان‌ها ایفا می‌کنند. برآوردها نشان می‌دهد که بیش از یک‌چهارم جمعیت جهان به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم وابسته به محصولات و خدمات جنگلی هستند و حدود ۲۵ درصد از درآمد خانوارهای کشورهای در حال توسعه از طریق بهره‌برداری از منابع جنگلی حاصل می‌شود (FAO, 2020). بر این اساس، درک صحیح از ساختار، کارکرد و تهدیدات پیش‌روی این زیست‌بوم‌ها، پیش‌شرطی ضروری برای حفاظت پایدار آنها در برابر مخاطرات روزافزون محیطی است. علی‌رغم اهمیت بنیادین جنگل‌ها در تعادل‌های محیط‌زیستی، اقلیمی و اقتصادی، این اکوسیستم‌های پیچیده و شکننده در معرض طیفی از مخاطرات محیطی چندگانه قرار دارند. از جمله این تهدیدات می‌توان به افزایش میانگین دمای هوا، بروز خشکسالی‌های شدید، گسترش گردوغبار، وقوع طوفان‌ها، شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی، بهره‌برداری‌های بی‌رویه، تغییر کاربری اراضی، چرای بیش‌ازحد دام، وقوع آتش‌سوزی‌های گسترده و همچنین سیلاب‌ها اشاره کرد (Leberger *et al.*, 2020). این مخاطرات به‌صورت تجمعی، ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های جنگلی را تحت تأثیر قرار داده و منجر به فروپاشی بخشی از خدمات محیط‌زیستی قابل ارائه توسط آنها شده‌اند. در میان انواع اکوسیستم‌های جنگلی، جنگل‌های کوهستانی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند؛ به‌گونه‌ای که حدود ۲۵ درصد از کل جنگل‌های جهان را به‌خود اختصاص داده‌اند و معیشت بیش از ۹۰۰ میلیون نفر در مناطق مرتفع و حاشیه‌ای زمین به خدمات این جنگل‌ها وابسته است (Spehn *et al.*, 2011). جنگل‌های کوهستانی به‌واسطه قرارگیری در نواحی شیب‌دار، دارا بودن شرایط آب‌وهوایی خاص، و نقش کلیدی در تأمین منابع آبی، ذخیره‌سازی کربن، تعدیل دما، حفظ تنوع زیستی و پیشگیری از فرسایش خاک، اهمیت اکولوژیک فراوانی دارند. با این وجود، این جنگل‌ها نیز به‌طور فزاینده‌ای در معرض طیفی از مخاطرات پیچیده محیطی هستند؛ مخاطراتی نظیر پیامدهای تشدیدشونده تغییر اقلیم، بهره‌برداری ناپایدار از منابع، تغییر کاربری اراضی، آلودگی‌های محیطی، شیوع آفات و بیماری‌های نوظهور، که به‌صورت توأمان منجر به کاهش تنوع زیستی، تغییر الگوهای اکولوژیک، مهاجرت گونه‌ها، و حتی تغییر رژیم‌های آتش‌سوزی در این مناطق شده‌اند (Michelsen *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013; Valavi *et al.*, 2019; Thakur *et al.*, 2021). در راستای پایش و مدیریت اثرات این مخاطرات، ارزیابی آسیب‌پذیری جنگل‌ها به‌عنوان رویکردی راهبردی مورد توجه قرار گرفته است. این ارزیابی بر پایه سه مؤلفه کلیدی شامل در معرض قرار گرفتن (Exposure)، حساسیت (Sensitivity) و توان سازگاری (Adaptive Capacity) انجام می‌شود که در ترکیب، میزان تاب‌آوری یا شکنندگی یک اکوسیستم را در برابر مخاطرات چندگانه تعیین می‌کنند (Mafi-Gholami *et al.*, 2022). در این میان، سنجش دقیق مؤلفه در معرض قرار گرفتن به‌عنوان نخستین گام کلیدی، زمینه‌ساز شناخت الگوهای مکانی خطر و طراحی برنامه‌های حفاظتی و مدیریتی هدفمند است (Adger, 2006). در این راستا، مدل‌سازی دقیق شدت وقوع مخاطرات محیطی در سطح طبقه‌های تراکم پوشش جنگلی، به‌ویژه در اکوسیستم‌های کوهستانی حساس، می‌تواند نقش مؤثری در پایش روندهای تخریب، اولویت‌بندی مناطق بحرانی و تدوین سیاست‌های مبتنی بر شواهد داشته باشد.

جنگل‌های کوهستانی زاگرس با وسعتی بالغ بر ۵ میلیون هکتار، نزدیک به ۴۰ درصد از کل جنگل‌های ایران را دربر می‌گیرند و به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی کشور، تحت تأثیر اقلیم نیمه‌مدیترانه‌ای قرار دارند

(Pourhashemi et al., 2004). این جنگل‌ها با ایفای نقشی بنیادین در حفظ منابع آبی، تنظیم اقلیم منطقه‌ای، حفاظت خاک و پایداری معیشتی جوامع محلی، در کانون توجه برنامه‌های حفاظتی و توسعه پایدار قرار گرفته‌اند. با این وجود، این اکوسیستم‌های غنی طی دهه‌های اخیر با طیفی از مخاطرات طبیعی و انسانی همچون کاهش بارندگی، افزایش دما، گسترش ریزگردها، شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع، چرا و تخریب ناشی از دام، و آتش‌سوزی‌های گسترده، باعث فرسایش شدید پوشش گیاهی، اختلال در چرخه‌های اکولوژیک و تهدید بقاء گونه‌های بومی شده‌اند (Pouyan et al., 2021). جنگل‌های استان لرستان نیز به‌عنوان بخشی از گستره رویشگاه‌های جنگلی زاگرسی در دهه‌های گذشته بیشترین میزان تخریب را تجربه کرده‌اند؛ چنان‌که وقوع خشکسالی‌های شدید تا بسیار شدید، آتش‌سوزی، گسترش آفات و بیماری‌هایی نظیر زوال بلوط، تغییر کاربری اراضی، چرای مفراط دام، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع جنگلی و توسعه نامتوازن کشاورزی سبب افت گستره و ساختار این جنگل‌ها و تشدید روند تخریب آنها شده‌است (Mahmoudzadeh and Azizmoradi, 2019). این شرایط بحرانی، لزوم توسعه ابزارهای تحلیلی دقیق برای سنجش شدت و پراکندگی مخاطرات را در سطح رویشگاه‌های جنگلی زاگرس بیش از پیش برجسته می‌سازد. در این میان، ارزیابی‌های دقیق مکانی شدت مخاطرات، به‌ویژه با تفکیک طبقات تراکم پوشش جنگلی، می‌تواند مبنای علمی برای شناسایی کانون‌های بحرانی، تحلیل روندهای تغییرات اکوسیستمی، و طراحی سیاست‌های کنترلی مبتنی بر اولویت‌بندی خطر فراهم نماید. بر این اساس، مطالعات متعددی به‌منظور شناسایی، پهنه‌بندی و مدل‌سازی مخاطرات در این زیست‌بوم حساس کشور انجام شده‌است. در این میان، یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیق در رویشگاه‌های جنگلی زاگرسی، مدل‌سازی خطر آتش‌سوزی بوده‌است و مطالعات متعددی در این زمینه انجام شده‌است. Alimahmoudi Sarab و همکاران (۲۰۱۵) با کمک روش تلفیقی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی در ناحیه رویشی زاگرس واقع در شمال استان خوزستان، پهنه‌های مختلف خطر آتش‌سوزی را شناسایی کردند. نتایج تجزیه و تحلیل نقشه پتانسیل خطر آتش‌سوزی نشان داد که ۶۴/۸ درصد از کل منطقه در محدوده خطر آتش‌سوزی بسیار زیاد قرار دارد. نتایج صحت‌سنجی نیز نشان داد که ۶/۹ درصد از مناطق سوخته‌شده در محدوده خطر بسیار زیاد و ۳/۶۷ درصد در محدوده خطر زیاد قرار دارند. در مطالعه‌ای دیگر، Heydari و همکاران (۲۰۲۱) با بهره‌گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی بر پایه رگرسیون لجستیک، مدل‌سازی و پهنه‌بندی مناطق مستعد آتش‌سوزی در جنگل‌های استان ایلام را انجام دادند. نتایج نشان داد که ارتفاع از سطح دریا، فاصله از آبراهه و درصد شیب، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در آتش‌سوزی جنگل در منطقه بودند. مدل‌سازی براساس سه متغیری که ارتباط معنی‌داری با آتش‌سوزی جنگل در منطقه داشتند و نتایج نشان داد که ۸۱ درصد از مساحت منطقه در مناطق بحرانی و خطرناک قرار دارد. علاوه بر آتش‌سوزی، خشکسالی نیز به‌عنوان یکی دیگر از مخاطراتی که دارای اثرات مخرب بر رویشگاه‌های زاگرسی است، مورد توجه محققین قرار گرفته‌است. Alirezaei و همکاران (۲۰۱۹) آشکارسازی تأثیر خشکسالی بر پویایی زمانی-مکانی جنگل‌های بلوط زاگرس استان لرستان را انجام دادند. نتایج حاصل از نمونه‌برداری‌های میدانی نشان داد که آستانه $EVI > 0.4$ می‌توان به‌عنوان آستانه پوشش جنگلی استان در نظر گرفت. تحلیل همبستگی بیانگر آن بود که سری زمانی ۱۸ ساله پوشش جنگلی، با شاخص SPI همبستگی داشته است که این میزان همبستگی در سطح اطمینان ۰/۹۵ معنی‌دار بوده است. نتایج حاصل از توسعه تابع حساسیت به تغییرات شاخص SPI بیانگر آن بود که پهنه پوشش جنگلی دارای آستانه سبزی‌نگی تعیین شده، حساسیت قابل توجهی به خشکسالی دارد، به‌نحوی که به‌ازای هر ۰/۱ واحد تغییر در شاخص SPI ، میزان مساحت پهنه پوشش جنگلی ۱۴۸۸۰ هکتار در همان جهت تغییر خواهد کرد. Mirzapour و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی و تحلیل وضعیت خشکسالی در زاگرس میانی و جنوبی براساس مدل‌های گردش عمومی جو و شبکه عصبی در ارتباط با شاخص‌های سنجش پرداختند. برای بررسی روند خشکسالی و پیش‌بینی آن، از تصاویر سری زمانی ماهواره مودیس در دوره زمانی ۲۰ ساله استفاده شد. وضعیت خشکسالی به‌صورت ۲ دوره، براساس روش SPI برای ۲۰ سال وضعیت موجود (۲۰۰۰-۲۰۱۹) و براساس سناریوهای RCP و روش‌های سنجش‌ازدور و شبکه‌های عصبی برای ۲۰ سال آینده (۲۰۲۰-۲۰۳۹) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از ترسالی شدید و بسیار شدید در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ و دوره ۲۰ سال آینده در نواحی مرتفع منطقه می‌باشد. همچنین تحلیل فضایی و پیش‌بینی خشکسالی‌ها نشان‌دهنده الگوی نامنظمی در

همه شاخص‌ها بوده و تنها در شاخص‌های NDVI و SAVI، تحلیل فضایی خشکسالی‌ها توانسته است الگوی نسبتاً منظمی را ارائه کند.

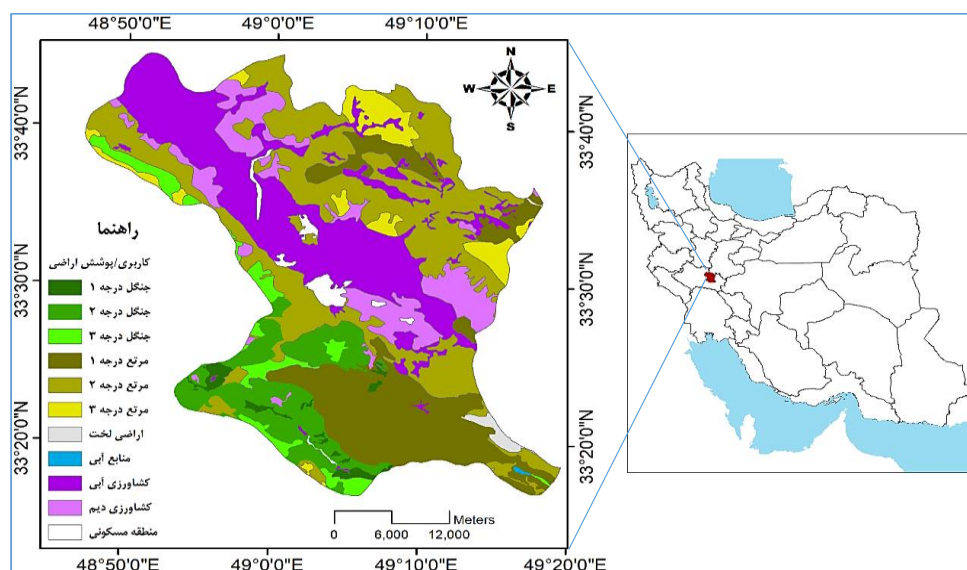
در بُعد روش‌شناسی، استفاده از مدل‌های بیزی و یادگیری ماشین نیز در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. Jaafari و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی با به‌کارگیری مدل بیزی Weights-of-Evidence به پیش‌بینی احتمال وقوع آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس پرداختند. آنها دریافتند که مدل بیزی، با بهره‌گیری از لایه‌های اطلاعاتی مختلف، توانایی بالایی در تبیین مناطق پرخطر دارد. همچنین در مطالعه‌ای مقایسه‌ای، روش‌های مبتنی بر یادگیری ماشین مانند درخت تصمیم و مدل‌های افزایشی بیزی (BART) دقت بالاتری نسبت به مدل‌های آماری کلاسیک در تحلیل خطرات محیطی نشان دادند (Jaafari et al., 2018). مرور پیشینه علمی نشان می‌دهد که تاکنون بخش عمده مطالعات در جنگل‌های زاگرس متمرکز بر مدل‌سازی یک‌بعدی و تک‌مخاطره‌ای، مانند آتش‌سوزی یا خشکسالی، بوده‌اند. این در حالی است که تعامل پیچیده بین مخاطرات مختلف و اثر تجمعی آنها بر رویشگاه‌های جنگلی به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، بسیاری از مطالعات فاقد تحلیل ساختاری براساس طبقات تراکم پوشش جنگلی بوده‌اند، درحالی‌که تراکم تاج‌پوشش یکی از عوامل کلیدی در شدت تأثیرپذیری از مخاطرات محیط‌زیستی است. از سوی دیگر، تمرکز مکانی اغلب پژوهش‌ها بر بخش‌هایی از زاگرس جنوبی یا میانی بوده و مناطق با ویژگی‌های توپوگرافی و تنوع تراکمی بالا مانند شهرستان دورود کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در واقع، جنگل‌های شهرستان دورود به‌عنوان یکی از پهنه‌های حساس و دارای تنوع تراکمی بالا می‌تواند به‌عنوان نمونه‌ای معرف برای تحلیل مکانی شدت مخاطرات محیط‌زیستی در رویشگاه‌های جنگلی زاگرس محسوب شود. از این‌رو، ضرورت دارد با بهره‌گیری از داده‌های فضایی، روش‌های تصمیم‌گیری ساختاریافته و تلفیق چندلایه‌ای، الگویی دقیق برای مدل‌سازی شدت مواجهه این رویشگاه‌ها با مخاطرات محیطی ارائه گردد. پژوهش حاضر با هدف مدل‌سازی شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در سطح رویشگاه‌های جنگلی شهرستان دورود، ضمن پرکردن خلأهای مذکور، تلاش دارد با بهره‌گیری از داده‌های ساختاری پوشش، تحلیل‌های فضا‌منا و رویکردهای مدل‌سازی ترکیبی، الگویی جامع و کاربردی برای پایش و مدیریت مخاطرات در جنگل‌های کوهستانی زاگرس ارائه دهد. نوآوری پژوهش حاضر در ارائه یک چارچوب مدل‌سازی فضا‌مبنای نوین برای تحلیل شدت مخاطرات چندگانه محیطی (خشکسالی، آتش‌سوزی، آفات و...) در اکوسیستم‌های جنگلی کوهستانی است. برخلاف اغلب مطالعات پیشین که رویکرد تک‌مخاطره‌ای و بدون تفکیک ساختاری داشتند، این پژوهش برای نخستین بار از یک رویکرد تلفیقی و شبکه‌منا بهره می‌گیرد که با تلفیق داده‌های تراکم تاج‌پوشش و شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه، قادر است الگوی توزیع شدت خطر را با دقت و تفسیرپذیری بالا در رویشگاه‌های جنگلی زاگرس بازنمایی کند. این رویکرد، افق جدیدی برای تحلیل فضایی سیستم‌های جنگلی در مواجهه با مخاطرات محیطی هم‌زمان گشوده است.

بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف درک الگوهای مکانی شدت مخاطرات محیطی در جنگل‌های کوهستانی زاگرس و توسعه ابزارهای تحلیلی برای مدیریت مبتنی بر شواهد، درصدد پاسخ‌گویی به این پرسش‌های اصلی است که چگونه می‌توان با بهره‌گیری از رویکرد شبکه‌منا، مدل‌سازی دقیقی از الگوی مکانی شدت وقوع مخاطرات در سطح رویشگاه‌های جنگلی زاگرس ارائه داد؟ شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در رویشگاه‌های جنگلی شهرستان دورود چه الگوی مکانی دارد؟ کدام طبقات تراکم تاج‌پوشش جنگلی در معرض بیشترین شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه قرار دارند؟

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه شامل گستره‌های جنگلی تحت مدیریت منابع طبیعی واقع در شهرستان دورود است که براساس آخرین نقشه کاربری/پوشش اراضی تهیه شده توسط دفتر فنی مهندسی و مطالعات سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، دارای وسعتی در حدود ۲۰۳۱۸ هکتار بوده و متشکل از گونه بلوط ایرانی است (شکل ۱). در گستره‌های جنگلی، درختان پراکنده‌ای در اشکوب فوقانی دیده می‌شوند، اما اشکوب زیرین تحت چرای شدید قرار گرفته و عمدتاً برای زراعت گندم دیم و مراتع بیلاقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. منطقه در برگیرنده رویشگاه‌های جنگلی شامل دامنه‌های شیب‌دار با بیرون‌زدگی‌های سنگی فراوان و در بسیاری نقاط فاقد پوشش خاکی یا با خاک کم‌عمق است. اقلیم منطقه از نیمه‌مرطوب سرد تا ارتفاعات متغیر

است. بارندگی‌ها عمدتاً رژیم مدیترانه‌ای داشته و حدود ۷۲/۳ درصد آن در نیمه اول سال آبی رخ می‌دهد، به‌طوری که میانگین سالانه بارندگی در حدود ۷۴۴ میلی‌متر است (Salarvand Shamsi et al., 2017).



شکل ۱- کاربری/پوشش اراضی و موقعیت رویشگاه‌های جنگلی در شهرستان دورود، استان لرستان

چارچوب تحقیق: به‌منظور ارزیابی جامع شدت مواجهه رویشگاه‌های جنگلی شهرستان دورود با طیفی از مخاطرات محیط‌زیستی، نقشه‌سازی مخاطرات چندگانه در این مطالعه با بهره‌گیری از داده‌های متنوع و تلفیقی انجام شد. در این راستا، ده شاخص کلیدی که نمایانگر اصلی‌ترین تهدیدات محیط‌زیستی در منطقه مورد مطالعه هستند انتخاب و تحلیل شدند. این شاخص‌ها شامل: خشکسالی، ریزگردها، تبخیر و تعرق سالانه، دمای بیشینه، سیلاب، تندباد، زمین‌لغزش، فاصله از روستاها، اثر شبکه جاده‌ای، و فرسایش خاک بودند. انتخاب این متغیرها بر پایه مطالعات پیشین (Mirzapour et al., 2022; Masoudian et al., 2025; Jaafari et al., 2017)، مشورت با خبرگان، و میزان دسترسی به داده‌های مکانی و زمانی قابل اتکا صورت گرفت. برای تهیه لایه‌های مکانی هریک از شاخص‌ها، از ترکیب داده‌های اقلیمی (نظیر بارش و دمای بلندمدت)، زمین‌شناسی (فرسایش خاک)، عوامل زیرساختی (فاصله از جاده‌ها و سکونتگاه‌ها) و نیز نتایج حاصل از مطالعات میدانی و پژوهش‌های پیشین معتبر استفاده شد. داده‌های مکانی اولیه در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پیش‌پردازش و نرمال‌سازی گردیدند تا قابلیت هم‌مقیاس‌سازی و ترکیب آنها در چارچوب یک مدل تحلیلی تلفیقی فراهم شود. در ادامه، با استفاده از رویکرد تلفیق وزن نسبی شاخص‌ها (بر مبنای روش دلفی) با لایه‌های طبقه‌بندی شده براساس پنج سطح شدت، نقشه نهایی شدت مواجهه با مخاطرات محیط‌زیستی چندگانه در سطح رویشگاه‌های جنگلی مورد مطالعه در پنج سطح خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد با میانگین‌گیری نقشه‌های طبقه‌بندی شده وزن‌دار در سلول‌های شبکه تهیه شد. در نهایت، گستره هر یک از طبقات شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در سطح طبقات مختلف تراکم جنگل (با تراکم تاج پوشش بیش از ۵۰ درصد، ۲۵-۵۰ درصد و ۱۰-۲۵ درصد) محاسبه شد.

نقشه‌سازی شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه: به‌منظور تحلیل روند تغییرات و تهیه نقشه‌های وقوع گرد و غبار در سطح جنگل‌های منطقه مورد مطالعه، از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS متعلق به ماهواره Terra استفاده گردید. به‌طور خاص، از محصول MCD19A2، نسخه ۶، که شامل پارامتر عمق نوری آئروسول‌ها بهره گرفته شد. این محصول، یکی از معتبرترین شاخص‌های ماهواره‌ای برای رصد و پایش ذرات معلق در جو و گرد و غبارهای جوی در مقیاس وسیع محسوب می‌شود (Ettehadhi Osgouei and Kaya, 2023). داده‌های AOD مورد استفاده در این پژوهش از طریق سامانه پردازش ابری گوگل ارث انجین (GEE)^۱ فراخوانی و پردازش شدند. به‌منظور تحلیل زمانی و کاهش نوسانات کوتاه‌مدت، ابتدا تصاویر روزانه AOD طی بازه ۲۰

^۱Google Earth Engine

ساله (۲۰۲۲-۲۰۲۰) استخراج و سپس به صورت میانگین های ماهانه و در مرحله بعد به صورت میانگین سالانه تبدیل شدند. استفاده از شاخص AOD برای برآورد شدت و توزیع گرد و غبار، پیش تر در مطالعات مختلف با موفقیت به کار گرفته شده و صحت و دقت آن از طریق مقایسه با داده های زمینی ایستگاه های کنترل کیفیت هوا به اثبات رسیده است (Mansourmoghaddam et al., 2022). این اعتبار علمی باعث شده که محصول AOD به عنوان یک شاخص جایگزین معتبر در مناطق فاقد ایستگاه زمینی سنجش کیفیت هوا نیز کاربرد وسیعی پیدا کند. پس از تولید سری زمانی نقشه های سالانه AOD، به منظور تحلیل مکانی شدت گرد و غبار در جنگل های منطقه، مقادیر این شاخص با استفاده از ابزارهای تحلیل مکانی در سامانه GEE و GIS طبقه بندی گردید. طبقه بندی نهایی براساس حدود آماری شاخص AOD در منطقه، در پنج طبقه با کدهای ۱ تا ۵ انجام شد. این نقشه ها امکان تحلیل فضایی تغییرات گرد و غبار در سطح جنگل ها را فراهم ساخته و پایه ای برای بررسی پیامدهای محیط زیستی پدیده گرد و غبار، از جمله کاهش فتوسنتز، خشکیدگی درختان و افزایش آسیب پذیری اکوسیستم های جنگلی فراهم می سازند.

برای تحلیل فضایی شدت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه، از داده های بارندگی بلندمدت به منظور محاسبه شاخص های خشکسالی استفاده شد. بدین منظور، سری زمانی ۳۹ ساله (۱۹۶۸ تا ۲۰۲۴) داده های بارش تجمعی سالانه، از پنج ایستگاه سینوپتیک پیرامون رویشگاه های جنگلی مورد مطالعه، جمع آوری گردید. به منظور ارزیابی وضعیت خشکسالی هواشناسی، از شاخص بارش استاندارد (SPI) یکساله بهره گرفته شد. این شاخص به دلیل ویژگی های آماری مطلوب، سادگی محاسبه و قابلیت مقایسه مکانی، یکی از پرکاربردترین شاخص ها در مطالعات مربوط به خشکسالی در سطح جهانی محسوب می شود. در این پژوهش، ابتدا با استفاده از نرم افزارهای آماری، سری زمانی مقادیر SPI برای هر ایستگاه محاسبه گردید. در مرحله بعد، برای کمی سازی شدت خشکسالی در هر ایستگاه، از شاخص بزرگی وقوع خشکسالی استفاده شد. این شاخص که توسط Mafi-Gholami و همکاران (۲۰۲۱) معرفی شده است، مجموع مقادیر منفی SPI را طی دوره های خشکسالی در هر ایستگاه محاسبه می کند (رابطه ۱):

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

که در آن، SPI_j : مقادیر منفی شاخص بارش استاندارد برای دوره زمانی j است.

با محاسبه مقادیر بزرگی وقوع خشکسالی در هر ایستگاه و با استفاده از دستور IDW در نرم افزار ArcGIS نقشه بزرگی وقوع خشکسالی در سطح منطقه تهیه شد و در پنج طبقه با کدهای ۱ تا ۵، طبقه بندی شد. به منظور ارزیابی فضایی ریسک وزش بادهای پرسرعت در سطح منطقه مورد مطالعه، از داده های سری زمانی بلندمدت سرعت باد سه ساعته در بازه ۳۹ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۲۴) بهره گرفته شد. داده های مورد استفاده مربوط به ۵ ایستگاه سینوپتیک پیرامون منطقه بودند که پوشش مناسبی از نظر پراکنش جغرافیایی برای مدل سازی مکانی فراهم کردند. در این پژوهش، بادهای با سرعت برابر یا بیشتر از ۱۰/۸ متر بر ثانیه (حد پایین طبقه ششم مقیاس بوفورت که معادل "باد شدید" محسوب می شود) به عنوان آستانه تعیین ریسک در نظر گرفته شد. این مقدار انتخاب شده، معرف آستانه ای است که در آن اثرات مخرب بر زیرساخت ها، پوشش گیاهی و فرسایش خاک در بسیاری از مناطق آغاز می شود. برای برآورد احتمال وقوع سرعت های مختلف باد در هر ایستگاه، از تابع توزیع ویبول (Weibull Distribution Function) استفاده گردید. تابع ویبول یکی از توابع آماری پر استفاده در تحلیل داده های سرعت باد به شمار می رود و به خوبی رفتار آماری باد در مقیاس زمانی بلندمدت را مدل سازی می کند. در گام بعدی، به منظور تعمیم فضایی مقادیر ریسک محاسبه شده به کل منطقه مورد مطالعه، از روش درون یابی وزنی معکوس فاصله (IDW) در محیط نرم افزار ArcGIS استفاده شد. این روش با فرض کاهش همبستگی مکانی با افزایش فاصله، امکان برآورد دقیق تر شرایط مکانی پدیده باد را فراهم ساخت. نقشه نهایی ریسک وزش بادهای پرسرعت به صورت یک لایه رستری پیوسته تولید و براساس توزیع آماری مقادیر به دست آمده، در پنج طبقه با کدهای ۱ تا ۵، طبقه بندی شد.

در این مطالعه، به منظور ارزیابی و نقشه سازی ریسک ناشی از افزایش دماهای بیشینه در منطقه مورد مطالعه، از سری زمانی ۳۹ ساله (۱۹۸۶ تا ۲۰۲۴) داده های دمای روزانه مربوط به پنج ایستگاه سینوپتیک پیرامون منطقه استفاده شد. در گام نخست، داده های دمای بیشینه فصل تابستان از هر سال در طول دوره آماری از داده های روزانه استخراج شد. سپس با بهره گیری از روش رگرسیون خطی ساده، روند تغییرات دماهای بیشینه تابستانه در طول زمان برای هر ایستگاه بررسی شد و شیب معادله رگرسیون به عنوان نرخ تغییرات سالانه دماهای بیشینه در آن ایستگاه محاسبه گردید. برای برآورد میزان ریسک گرمایش تابستانه در هر

ایستگاه، مقدار نرخ تغییرات سالانه به دست آمده در میانگین دمای بیشینه آن ایستگاه در طول دوره مطالعه ضرب شد. این شاخص ترکیبی به گونه ای طراحی شده است که هم روند افزایشی دماهای بیشینه و هم میانگین دمای تابستانه را به صورت همزمان در بر گیرد، و از این طریق نمایه ای دقیق تر از شدت و پتانسیل خطر گرمایش تابستانه ارائه نماید. در ادامه، برای پهنه بندی فضایی ریسک دماهای بیشینه، از روش درونیابی وزنی معکوس فاصله (IDW) در محیط نرم افزار ArcGIS استفاده شد. خروجی این تحلیل، نقشه ای رستری از توزیع فضایی مقادیر ریسک در سطح منطقه بود. به منظور تفسیر و تحلیل بهتر نتایج، مقادیر به دست آمده به پنج طبقه با کدهای ۱ تا ۵، طبقه بندی شد. این نقشه می تواند به عنوان ابزار تصمیم یار در برنامه ریزی مدیریت گرما، شناسایی مناطق آسیب پذیر به گرمایش شدید، و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم در مناطق بحرانی مورد استفاده قرار گیرد.

در این پژوهش، به منظور ارزیابی و تهیه نقشه های ریسک سه مخاطره زمین لغزش، سیلاب و شدت فرسایش خاک در سطح منطقه مورد مطالعه، از نتایج مطالعات پیشین از جمله پژوهش های انجام شده توسط NGO و همکاران (۲۰۲۱)، Khosravi و همکاران (۲۰۲۰) و داده ها و منابع موجود در اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان استفاده گردید. لایه های رستری تهیه شده از ریسک مخاطرات مذکور که در قالب خروجی مدل ها و تجزیه و تحلیل های مکانی ارائه شده اند، با استفاده از نقشه وکتوری مرز جنگل، از محدوده گسترده تر داده ها برش داده شدند تا تنها محدوده مورد نظر در تحلیل باقی بماند. پس از برش مکانی، هر یک از لایه های رستری ریسک برای مخاطرات زمین لغزش، سیلاب و فرسایش خاک به پنج طبقه با کد ۱ تا ۵ طبقه بندی شدند.

در این پژوهش، به منظور برآورد مکانی تبخیر-تعرق واقعی سالانه در سطح رویشگاه های جنگلی، ابتدا محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه (PET) برای هر یک از پنج ایستگاه سینوپتیک واقع در پیرامون منطقه مورد مطالعه انجام شد. برای این منظور، از نرم افزار تخصصی CropWat که براساس روش فائو (FAO) طراحی شده و قابلیت محاسبه نیاز آبی گیاهان و پارامترهای اقلیمی مرتبط را دارد، استفاده گردید. داده های اقلیمی مورد نیاز شامل دمای هوا، تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی از پایگاه های رسمی دریافت و در نرم افزار وارد شد. پس از محاسبه PET در هر ایستگاه، از رابطه تجربی پیشنهادی توسط Abdollahi و همکاران (۲۰۱۷) برای تخمین تبخیر-تعرق واقعی سالانه (AET) استفاده شد. این رابطه با در نظر گرفتن مقادیر بارندگی سالانه (P) و تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه (PET)، و با بهره گیری از دو پارامتر ثابت $\alpha = 0.9$ و $\beta = 2$ به صورت رابطه (۲) می باشد:

$$AET = \frac{P}{\left(\alpha + \left(\frac{P}{PET}\right)^\beta\right)^{\frac{1}{\beta}}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

با محاسبه مقادیر تبخیر-تعرق واقعی سالانه (AET) برای هر یک از ایستگاه های سینوپتیک پیرامون جنگل های مورد مطالعه، توزیع مکانی این پارامتر اقلیمی با استفاده از روش درونیابی وزنی معکوس فاصله (IDW) در محیط نرم افزار ArcGIS به نقشه رستری پیوسته تبدیل شد. در گام بعد، نقشه حاصل از تبخیر-تعرق واقعی به منظور ساده سازی تحلیل و تسهیل در تفسیر، در پنج طبقه مجزا با کدهای طبقه بندی از ۱ تا ۵ دسته بندی شد. در این مطالعه، به منظور برآورد و نقشه سازی شدت حضور انسان در محدوده رویشگاه های جنگلی مورد مطالعه، از داده های میدانی و اطلاعات موجود در اداره منابع طبیعی شهرستان دورود استفاده شد. براساس مشاهدات میدانی و اعلام های محلی، حداکثر شعاع نفوذ جوامع روستایی برای فعالیت هایی نظیر برداشت چوب و چرای دام، حدود ۲/۵ کیلومتر از محدوده هر روستا برآورد گردید. این شعاع به عنوان شعاع تأثیر انسانی مورد استفاده قرار گرفت تا محدوده نفوذ هر روستا بر محیط پیرامونی آن در قالب تحلیل های مکانی مشخص شود. برای مدل سازی شدت حضور انسان، در اطراف هر روستا دایره ای به شعاع ۲/۵ کیلومتر ترسیم گردید. این دایره در گام بعدی به ۵ حلقه بافر دایره ای هم مرکز با فاصله ۵۰۰ متر از یکدیگر (مجموعاً به شعاع ۲۵۰۰ متر) تقسیم شد. در ادامه، با استفاده از روابط تحلیلی در محیط نرم افزار ArcGIS 10.7، میزان احتمال حضور روستاییان در هر یک از این بافرها با بهره گیری از رابطه کاهش خطی فاصله (رابطه ۳) محاسبه گردید:

$$fd_{pi} = \frac{(D_{max} - D_c)}{D_{max}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این رابطه؛ D_{max} : حداکثر مسافتی که روستانشینان از روستا دور می شوند (در این مطالعه ۲/۵ کیلومتر) و D_c : فاصله میان بافر دایره ای تا روستا است. بنابراین، مقدار فاکتور fd_{pi} برابر با احتمال حضور روستاییان در بافرهای دایره ای گوناگون خواهد بود. فاکتور fd_{pi} در حقیقت به منزله شاخصی از احتمال حضور انسان در فواصل مختلف از روستا تلقی می شود؛ به طوری که این احتمال

در نزدیکی روستا بیشینه (نزدیک به ۱) و در فواصل دورتری از روستا کاهش می یابد. در نهایت نقشه رستری تغییرات احتمال حضور روستاییان در پیرامون روستاها با استفاده از توابع موجود در نرم افزار ArcGIS 10.7 تهیه شد و در پنج طبقه با کدهای ۱ تا ۵ طبقه بندی شد. براساس بازدیدهای میدانی و اطلاعات موجود در اداره منابع طبیعی شهرستان دورود، حداکثر شعاع اثرگذاری انسانی پیرامون مسیرهای موجود در رویشگاه های جنگلی منطقه مورد مطالعه برابر با ۵۰۰ متر برآورد شد. با توجه به اینکه میزان حضور و اثرگذاری انسان بر جنگل ها معمولاً رابطه ای معکوس با فاصله از جاده دارد (یعنی با افزایش فاصله از جاده، شدت اثرگذاری کاهش می یابد)، برای تحلیل مکانی این اثرگذاری، مدلی براساس فاصله طراحی شد. در این راستا، با استفاده از نرم افزار ArcGIS 10.7، در اطراف هر یک از مسیرهای جاده ای واقع در رویشگاه های جنگلی، پنج بافر فاصله ای به فواصل ۱۰۰ متری از یکدیگر (مجموعاً تا شعاع ۵۰۰ متر) ترسیم گردید. سپس در هر یک از این نواحی بافری، میزان نسبت اثرگذاری جاده (یا احتمال حضور انسان) براساس رابطه (۴) محاسبه شد (Mafi-Gholami et al., 2020):

$$RER = \frac{(D_{max} - DC)}{D_{max}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در این رابطه؛ RER: نسبت اثرگذاری جاده یا شاخص شدت تأثیر مسیرهای جاده ای، Dmax: حداکثر فاصله ای که حضور انسان یا اثرگذاری آن از جاده امکان پذیر است (در این مطالعه برابر با ۵۰۰ متر)، و DC: فاصله میان بافر دایره ای تا جاده می باشد. بنابراین، مقدار RER بیانگر احتمال حضور انسان در هر یک از بافرهای پیرامون جاده بوده و به عنوان شاخصی از نسبت اثرگذاری جاده در نظر گرفته می شود. این شاخص در فاصله نزدیک به جاده مقدار بالاتری دارد و با افزایش فاصله، به تدریج کاهش می یابد. پس از محاسبه RER در هر یک از بافرهای پیرامون جاده ها، نقشه رستری تغییرات نسبت اثرگذاری جاده با استفاده از توابع موجود در نرم افزار ArcGIS 10.7 در سطح رویشگاه های جنگلی تهیه شد و در پنج طبقه با کدهای ۱ تا ۵ طبقه بندی شد.

تعیین وزن نسبی مخاطرات محیطی چندگانه: در این مطالعه وزن نسبی هر یک از مخاطرات محیطی با بهره گیری از روش دلفی و از طریق تکمیل پرسشنامه توسط ۱۰ نفر از متخصصان محاسبه شد. این افراد همگی دارای حداقل ۱۵ سال سابقه حرفه ای در حوزه های منابع طبیعی، مدیریت جنگل، و شناخت میدانی جنگل های شهرستان دورود بودند (برای آگاهی بیشتر از جزئیات اجرای روش دلفی، به پژوهش Mafi-Gholami و همکاران، ۲۰۱۵ مراجعه شود). پس از تعیین وزن نسبی برای هر یک از مخاطرات مورد بررسی، نقشه رستری طبقه بندی شده مربوط به هر مخاطره در وزن نسبی متناظر با آن ضرب شد (Mafi-Gholami et al., 2021) تا تأثیر وزنی هر مخاطره در تحلیل نهایی لحاظ گردد.

تهیه نقشه قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه در سطح رویشگاه های جنگلی: به منظور تولید نقشه نهایی شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی چندگانه، محدوده جنگلی مورد مطالعه به ۱۰۰۲۹ سلول شبکه ای با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ متر تقسیم بندی شد. این ابعاد با هدف دستیابی به توازن میان دقت مکانی و قابلیت تحلیل منطقه ای انتخاب گردید و تقریباً معادل پنج برابر اندازه پیکسل تصاویر ماهواره ای لندست (۳۰×۳۰ متر) است. انتخاب این ابعاد، افزون بر افزایش قابلیت نمایش دقیق تغییرات در مقیاس رویشگاه، سازگاری نتایج را با تحلیل های آینده مبتنی بر داده های سنجش از دور تضمین می کند. در مرحله بعد، تمامی نقشه های رستری وزنی مرتبط با مخاطرات، به فرمت نقطه ای تبدیل شدند. سپس با محاسبه میانگین مقادیر نقاط موجود در هر سلول شبکه ای، مقدار ریسک نسبی هر مخاطره در آن سلول تعیین گردید. با تجمع مقادیر ریسک تمام مخاطرات در هر سلول، نمایه نهایی شدت قرارگیری در معرض مخاطرات چندگانه محاسبه شد. برای طبقه بندی فضایی این نمایه، از روش Natural Breaks بر مبنای انحراف معیار در نرم افزار ArcGIS 10.7 استفاده شد. بر این اساس، نمایه شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی به پنج طبقه شامل «خیلی کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد» تقسیم گردید جهت تحلیل شدت قرارگیری طبقات مختلف تراکم جنگل در معرض این مخاطرات، از نقشه طبقه بندی شده پوشش تاج پوشش جنگلی استفاده شد که شامل سه طبقه تراکمی بیش از ۵۰ درصد، بین ۵۰ تا ۲۵ درصد، و بین ۲۵ تا ۱۰ درصد بود. این نقشه توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان در سال ۱۳۹۹، با نظارت دفتر مهندسی و مطالعات سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور و بر پایه تفسیر تصاویر ماهواره ای Sentinel-2 و داده های میدانی تهیه شده است. در ادامه، لایه نمایه شدت مخاطرات چندگانه با استفاده از نقشه وکتوری طبقات تراکمی جنگل برش داده شد. سپس با بهره گیری از تحلیل های فضایی در محیط ArcGIS، درصد سطح هر طبقه از پوشش جنگلی که درون هر یک از طبقات شدت مواجهه قرار داشت، محاسبه گردید. این تحلیل به شناسایی نواحی

بحرانی جنگل که بیشترین تهدید را از جانب مخاطرات محیط‌زیستی تجربه می‌کنند کمک می‌نماید و پایه‌ای علمی برای برنامه‌ریزی حفاظتی، تخصیص منابع و تدوین راهبردهای مدیریتی اولویت‌محور در اکوسیستم‌های جنگلی فراهم می‌آورد.

یافته‌های پژوهش

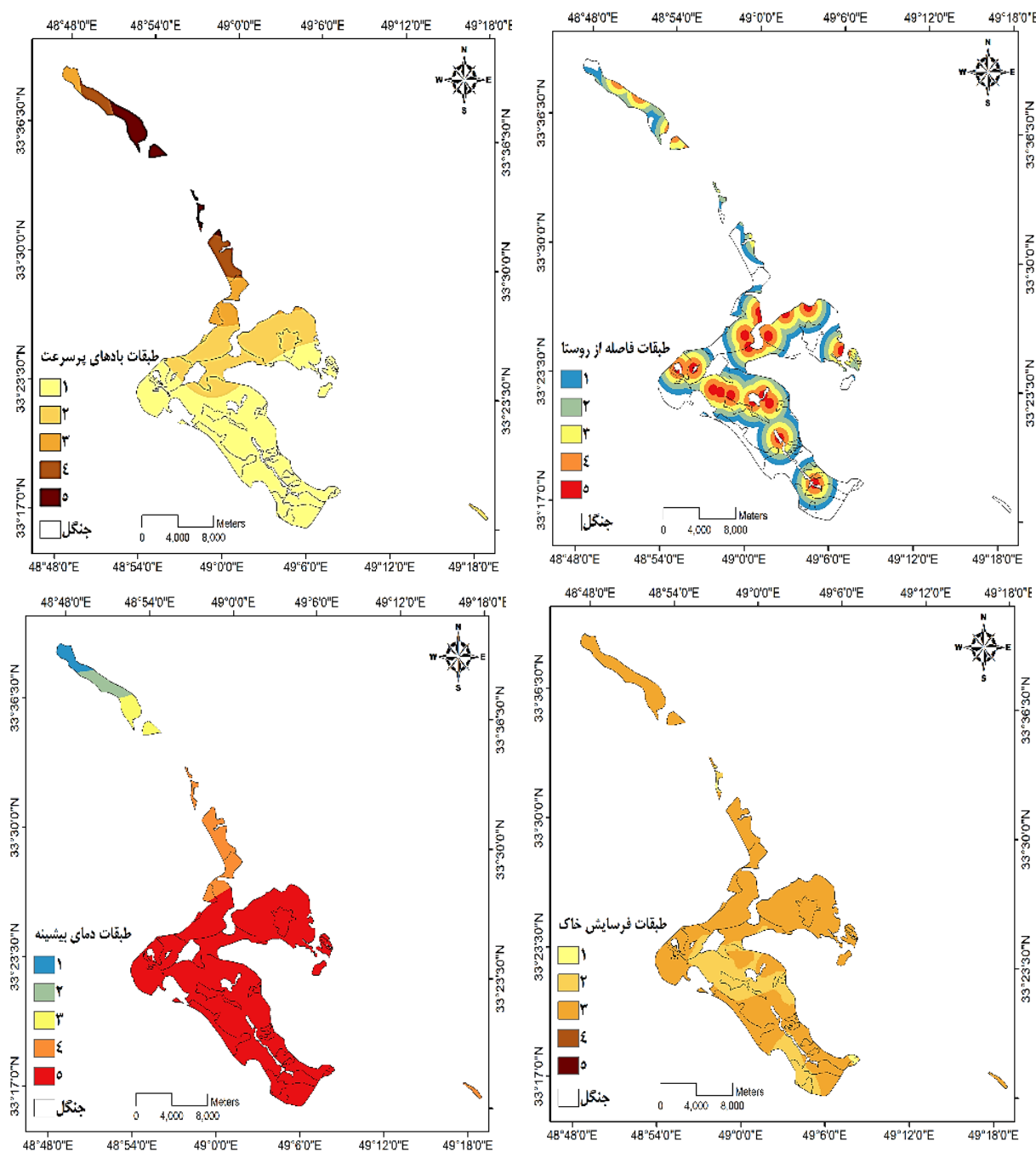
مدل‌سازی مکانی تغییرات تبخیر و تعرق سالانه در محدوده منطقه مورد مطالعه نشان داد که این شاخص اقلیمی در بازه‌ای بین ۲۹۵/۲ تا ۴۰۲/۰۸ میلی‌متر متغیر است. نتایج طبقه‌بندی مکانی این متغیر بیانگر یک گرادین مشخص از شمال به جنوب منطقه بود؛ به‌طوری‌که بخش‌های شمالی، با بیشترین مقادیر ثبت‌شده تبخیر و تعرق، در طبقه‌بندی "خیلی زیاد" قرار گرفتند، در حالی که پهنه‌های جنوبی منطقه عمدتاً در طبقه "کم" جای گرفتند (جدول ۱ و شکل ۲).

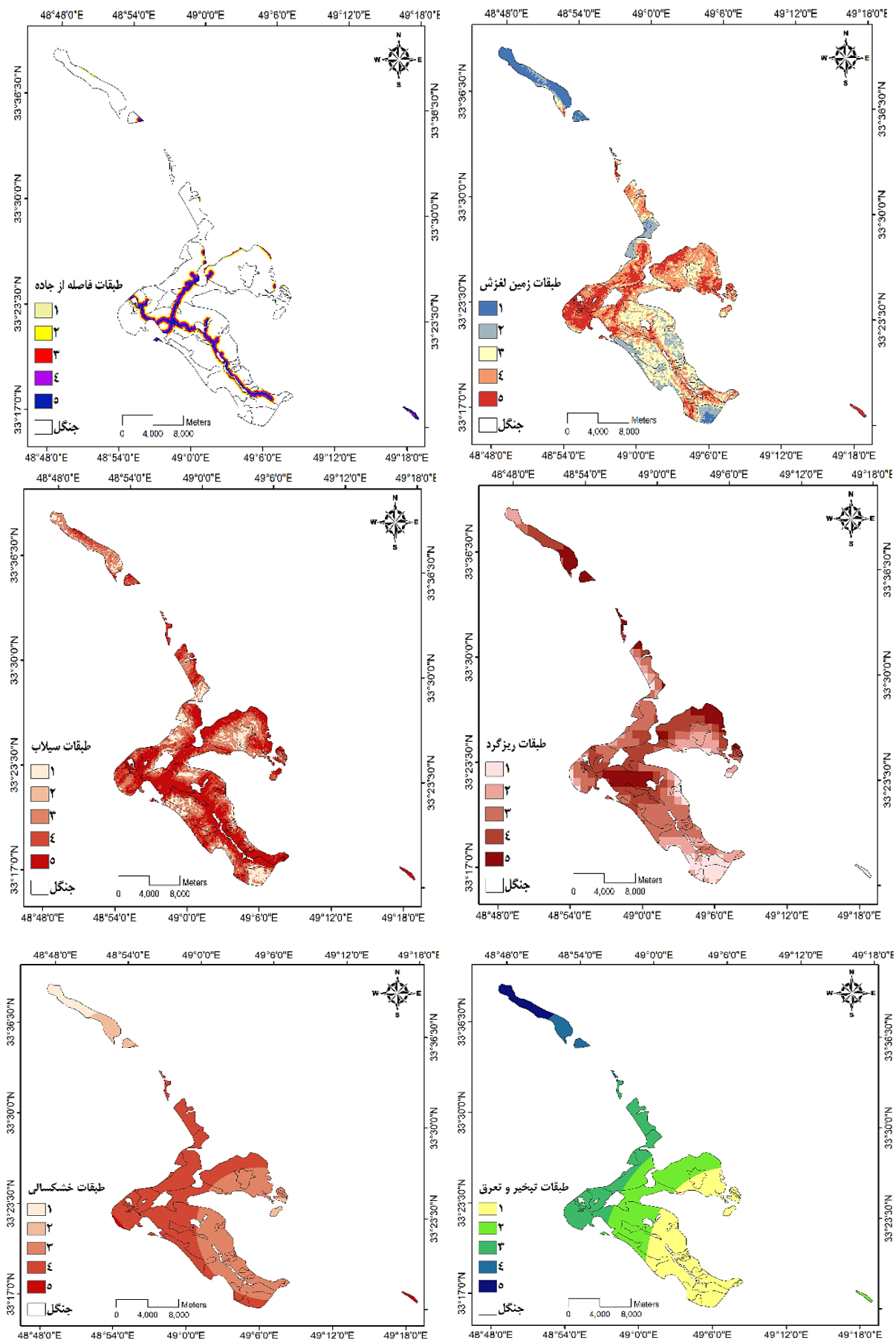
جدول ۱- طبقه‌های شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه در سطح رویشگاه‌های جنگلی شهرستان دورود

مخاطره	طبقه				
	۱	۲	۳	۴	۵
تبخیر و تعرق (میلی متر)	$30.8/4 >$	$30.8/4 - 32.4/4$	$32.4/4 - 35.5/7$	$35.5/7 - 38.4/9$	$38.4/9 >$
دماهای بیشینه	$0.429 >$	$0.429 - 0.431$	$0.431 - 0.435$	$0.435 - 0.439$	$0.439 >$
ریزگرد	$0.354 >$	$0.354 - 0.464$	$0.464 - 0.551$	$0.551 - 0.642$	$0.642 >$
خشکسالی	$39/42 >$	$39/42 - 40/13$	$40/13 - 40/63$	$40/63 - 41/14$	$41/14 >$
بادهای پرسرعت	$0.0093 >$	$0.0093 - 0.0094$	$0.0094 - 0.0095$	$0.0095 - 0.0096$	$0.0096 >$
زمین لغزش	$830 >$	$830 - 950$	$950 - 1032$	$1032 - 1109$	$1109 >$
سیلاب	$0.705 >$	$0.705 - 0.847$	$0.847 - 0.987$	$0.987 - 1.132$	$1.132 >$
شدت فرسایش خاک	کم	متوسط	زیاد	-	-
اثرروستا	$200 >$	$1500 - 2000$	$1000 - 1500$	$500 - 1000$	$500 >$
اثر جاده	$400 >$	$300 - 400$	$200 - 300$	$1000 - 200$	$100 >$

بررسی الگوهای فضایی شدت وقوع خشکسالی در سطح رویشگاه‌های جنگلی نشان داد که این شاخص در بازه‌ای محدود بین ۳۸/۸ تا ۴۴/۶ نوسان دارد. نقشه طبقه‌بندی‌شده حاصل از این تحلیل آشکار ساخت که ریسک بالا و بسیار بالای خشکسالی عمدتاً در بخش‌های مرکزی و غربی منطقه متمرکز بوده، در حالی که مناطق شمالی و جنوبی عمدتاً در طبقات ریسک متوسط تا پایین قرار گرفته‌اند (جدول ۱ و شکل ۲). در تحلیل مکانی ریسک دماهای بیشینه، دامنه تغییرات از ۰/۴۲۸ تا ۰/۴۴۲ ثبت شد. الگوی پراکنش فضایی این متغیر نشان داد که تمامی بخش جنوبی و بخش قابل توجهی از نواحی مرکزی رویشگاه‌ها در معرض سطوح بالای این ریسک اقلیمی قرار دارند، که می‌تواند به تشدید تنش‌های گرمایی و اختلال در عملکرد اکوسیستم منجر شود (جدول ۱ و شکل ۲). ریسک ناشی از بادهای پرسرعت با مقادیری در حدود ۰/۰۰۰۹۲۶ تا ۰/۰۰۰۹۵۲ در سطح منطقه ارزیابی شد. براساس طبقه‌بندی صورت گرفته، بیشترین مقادیر این شاخص در نواحی مرکزی و شمالی رویشگاه‌ها مشاهده گردید و نواحی جنوبی عمدتاً در طبقه ریسک پایین این مخاطره جای گرفتند (جدول ۱ و شکل ۲). در بررسی متغیر سیلاب، مقدار شاخص ریسک از ۰/۱۶۴ تا ۱/۴۴۸ متغیر بود. نتایج طبقه‌بندی نشان داد که بیش از ۹۰ درصد از سطح رویشگاه‌ها در محدوده طبقات ریسک بالا و بسیار بالا قرار گرفته‌اند، به‌طوری‌که تنها بخش‌های اندکی در طبقات پایین‌تر شناسایی شدند، که بیانگر حساسیت بالای منطقه به وقوع سیلاب است (جدول ۱ و شکل ۲). مقدار شاخص ریسک زمین‌لغزش در محدوده‌ای از ۳۶۷ تا ۱۲۸۴ نوسان داشت. نقشه طبقه‌بندی‌شده حاکی از آن بود که مناطق مرکزی عمدتاً در معرض ریسک بالا و بسیار بالا هستند، در حالی که مناطق شمالی و جنوبی به‌صورت پراکنده در طبقات کم‌ریسک و متوسط قرار دارند (جدول ۱ و شکل ۲). تحلیل شاخص سالانه AOD (عمق نوری آئروسول) نشان داد که مقادیر این متغیر بین ۰/۰۴۷۶ تا ۰/۹۰۲ متغیر است. در طبقه‌بندی نهایی، نواحی با سطوح ریسک بالا و بسیار بالا در بخش‌های مرکزی و شمالی رویشگاه‌های جنگلی متمرکز بودند، در حالی که تنها بخش‌های کوچکی از نواحی جنوبی در طبقات پایین‌تر قرار گرفتند (جدول ۱ و شکل ۲). در خصوص مخاطره فرسایش خاک، نقشه شدت آن نشان داد که عمده مناطق رویشگاهی در چهار جهت جغرافیایی (شمال، شرق، غرب و جنوب) در طبقات کم و متوسط قرار گرفته‌اند. نواحی با شدت بالای

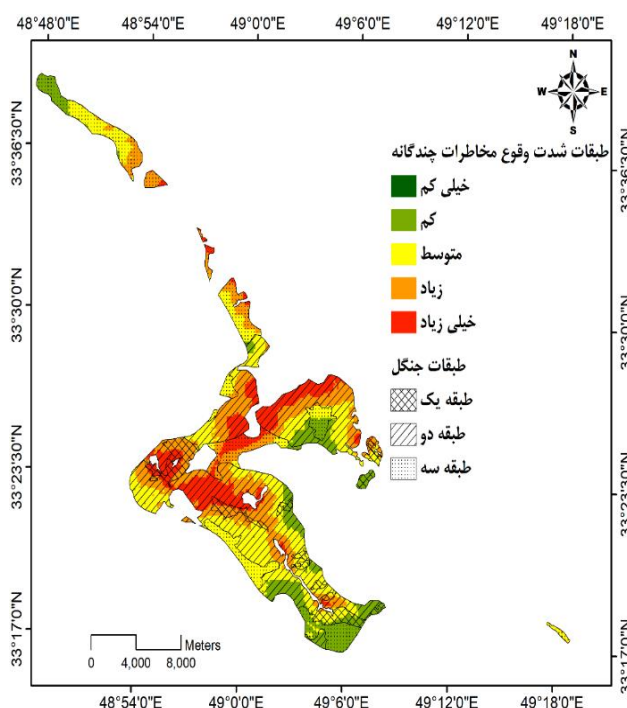
فرسایش عمدتاً به صورت لکه‌هایی پراکنده و محدود در سطح منطقه شناسایی شدند (جدول ۱ و شکل ۲). تحلیل اثرپذیری از نواحی روستایی، مبتنی بر فاصله مکانی تا سکونتگاه‌ها، نشان داد که حدود ۶۵ درصد از سطح رویشگاه‌های جنگلی در طبقات ریسک بالا و بسیار بالا قرار دارند. در مقابل، طبقات با ریسک پایین‌تر بخش کمتری از منطقه را در بر می‌گیرند که گویای فشار قابل توجه سکونتگاه‌های انسانی بر این اکوسیستم‌هاست (جدول ۱ و شکل ۲). در نهایت، تحلیل مکانی اثر جاده‌ها در سطح منطقه، که مقادیر آن از ۰/۱ تا ۰/۹ متغیر بود، نشان داد که بخش‌های مرکزی و جنوبی رویشگاه‌ها عمدتاً در طبقات بالاتر اثر جاده قرار دارند. این الگو با پراکنش فضایی جاده‌ها درون و پیرامون رویشگاه‌های جنگلی هم‌راستا است و نیازمند مدیریت ویژه جهت کاهش اثرات تخریبی ناشی از توسعه زیرساختی می‌باشد (جدول ۱ و شکل ۲).





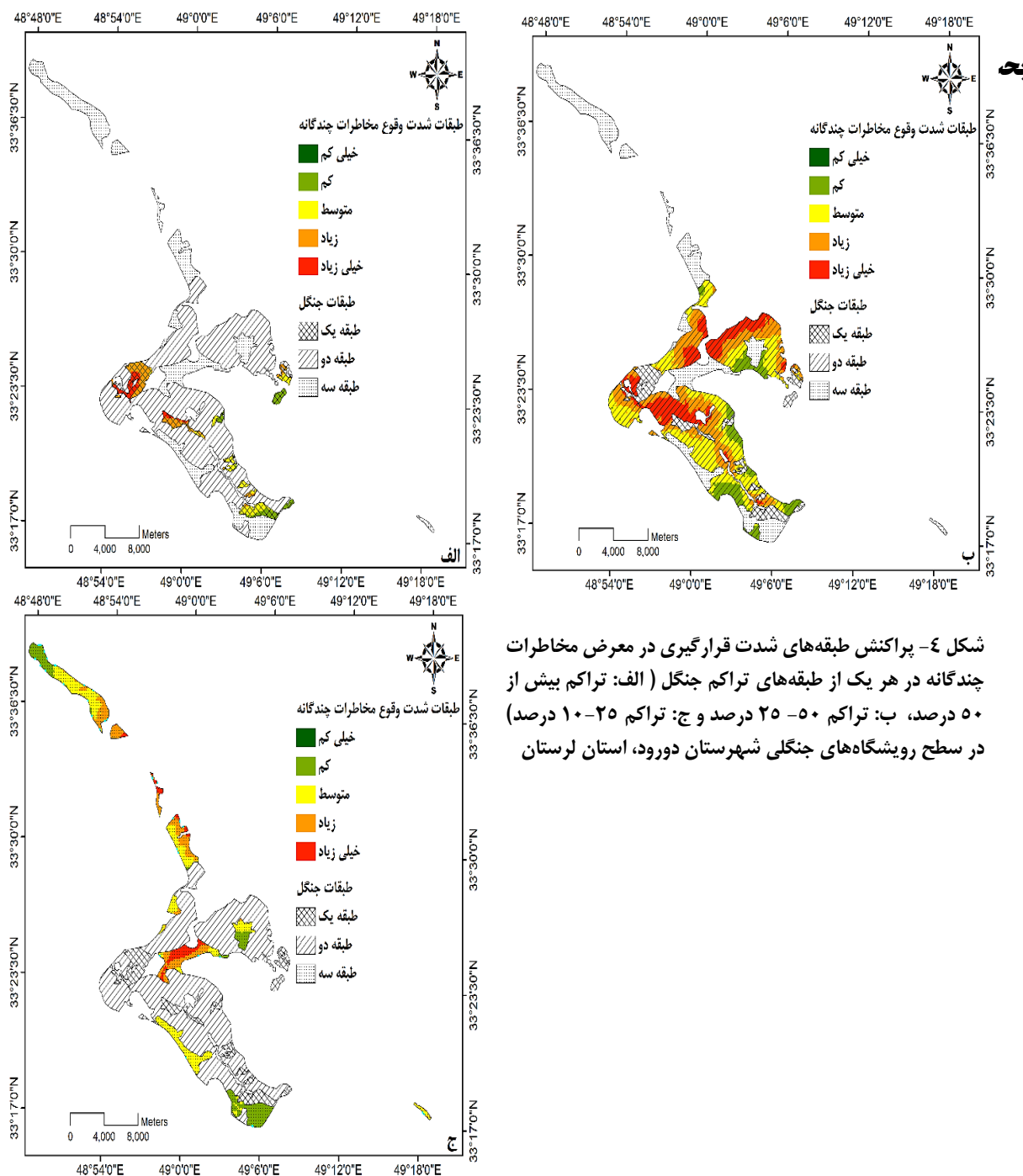
شکل ۲- طبقه‌بندی نقشه‌های مخاطرات چندگانه اثرگذار بر رویشگاه‌های جنگلی شهرستان دورود، استان لرستان

به منظور شناسایی اولویت نسبی مخاطرات محیطی در سطح رویشگاه های جنگلی، از روش دلفی مبتنی بر اجماع خبرگان استفاده شد. تحلیل نتایج حاصل از این فرآیند نشان داد که سه مخاطره خشکسالی، ریزگرد و اثر ناشی از مجاورت با روستاها، به ترتیب در رتبه های نخست تا سوم قرار گرفتند. این مخاطرات به ترتیب با وزن های نسبی ۰/۱۸۲، ۰/۱۵۹ و ۰/۱۴۱، بیشترین اهمیت و تأثیر را بر آسیب پذیری محیط زیستی منطقه دارا بودند. در مقابل، مخاطرات سیلاب و زمین لغزش با کسب پایین ترین وزن های نسبی به ترتیب معادل ۰/۰۴۳ و ۰/۰۳۶، در انتهای فهرست اولویت بندی جای گرفتند. این یافته ها نشان دهنده ادراک مشترک خبرگان در خصوص شدت اثرگذاری مخاطرات مختلف و نقش آنها در تغییرپذیری وضعیت زیست بومی رویشگاه های مورد مطالعه است. ادغام لایه های وزنی مخاطرات محیطی چندگانه و تولید نقشه تلفیقی شدت مواجهه منطقه با مخاطرات، دامنه تغییرات شاخص نهایی را در محدوده ای بین ۰/۱۲۸ تا ۰/۴۱۴ نشان داد. طبقه بندی این شاخص در پنج سطح شدت (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد) بیانگر آن بود که مناطق دارای شدت مواجهه خیلی کم و کم عمدتاً در پهنه های جنوبی و شمالی رویشگاه های جنگلی واقع شده اند (شکل ۳). در مقابل، مناطق با شدت مواجهه زیاد و بسیار زیاد به طور متمرکز در نواحی مرکزی رویشگاه های جنگلی مشاهده شدند، که این الگو نشان دهنده تمرکز نسبی همپوشانی مخاطرات مختلف در بخش های میانی منطقه است (شکل ۳). نتایج حاصل بر اهمیت رویکرد تلفیقی در شناسایی نقاط بحرانی از منظر آسیب پذیری مکانی در برابر مخاطرات محیطی تأکید دارد.



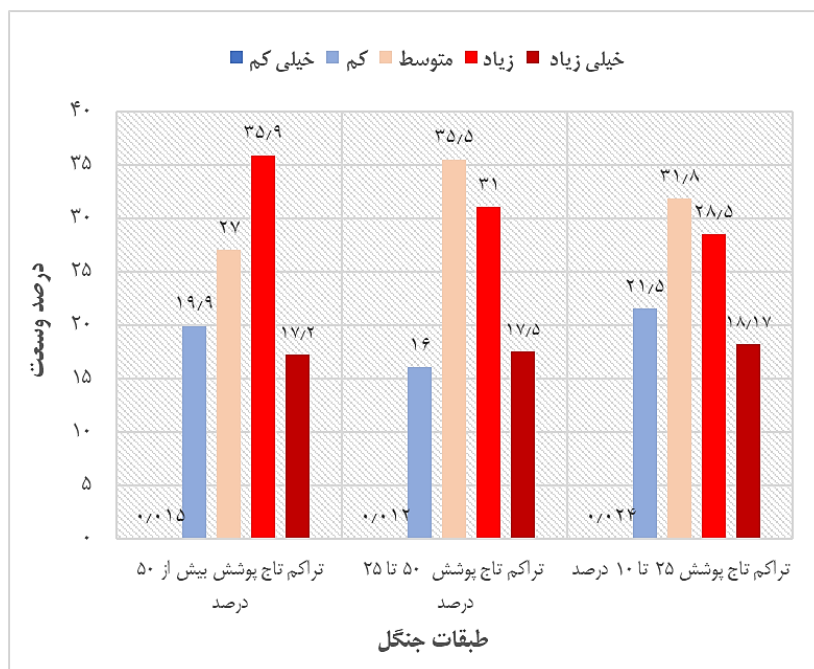
شکل ۳- تغییرات مکانی شدت قرارگیری در معرض مخاطرات محیطی در سطح رویشگاه های جنگلی شهرستان دورود، استان لرستان

نتایج هم نهشتی فضایی میان طبقات شدت مواجهه با مخاطرات چندگانه و طیف های مختلف تراکم جنگلی در سطح شهرستان دورود، بیانگر وجود یک پیوستار مکانی از ریسک پذیری است که به وضوح به الگوی پراکنش مکانی تراکم جنگل ها وابسته است (شکل ۴). بررسی های انجام شده نشان داد که واحدهای جنگلی با تراکم های متفاوت، متناسب با موقعیت جغرافیایی خود، در معرض طبقات گوناگونی از شدت وقوع مخاطرات، از "خیلی کم" تا "خیلی زیاد"، قرار دارند. بخش های شمالی، مرکزی و بخشی از نواحی جنوبی منطقه مورد مطالعه، عمدتاً با تراکم های بالا تا متوسط، در پهنه هایی با شدت زیاد و بسیار زیاد مخاطرات محیط زیستی جای گرفته اند. در مقابل، نواحی جنوبی با تراکم های پراکنده تر، بیشتر در طبقات شدت کم تا متوسط قرار گرفته اند (شکل ۴).



تحلیل فراوانی نسبی تراکم تاج‌پوشش جنگلی در شهرستان دورود نشان داد که از کل وسعت جنگل‌ها، حدود ۸/۹ درصد (معادل ۱۹۹۴/۵ هکتار) در طبقه تراکمی بیش از ۵۰ درصد، ۶۳/۵ درصد (۱۲۹۱۰ هکتار) در طبقه ۲۵-۵۰ درصد، و ۲۶/۷ درصد (۵۴۱۴/۴ هکتار) در طبقه ۱۰-۲۵ درصد قرار گرفته‌اند. بررسی همپوشانی مکانی این طبقات با نقشه شدت وقوع مخاطرات چندگانه نشان داد که طبقات تراکمی ۲۵-۵۰ درصد و ۱۰-۲۵ درصد، به ترتیب با پوشش ۳۵/۵ درصد و ۳۱/۸ درصد، بیشترین سهم را در تمامی طبقات شدت وقوع مخاطرات به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵). در میان شدت‌های مختلف مخاطرات، طبقه با شدت «زیاد» بیشترین درصد وسعت را در طبقه جنگلی با تراکم بیش از ۵۰ درصد به خود اختصاص داده است (۳۵/۹ درصد). همچنین، شدت مخاطره «خیلی کم» در هر سه طبقه تراکم جنگل، کمترین سهم از سطح منطقه را شامل می‌شود (شکل ۵). به طور خاص، شدت

وقوع مخاطرات «خیلی زیاد» به ترتیب در ۱۷/۲ درصد از وسعت طبقه بیش از ۵۰ درصد، ۱۷/۵ درصد از طبقه ۲۵-۵۰ درصد، و ۱۸/۱۷ درصد از طبقه ۱۰-۲۵ درصد مشاهده شده است (شکل ۵).



شکل ۵- درصد وسعت طبقه‌های شدت وقوع مخاطرات چندگانه در طبقه‌های تراکمی جنگل‌های شهرستان دورود، استان لرستان

بحث و نتیجه‌گیری

ارزیابی آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های جنگلی، مستلزم درک عمیق از الگوهای فضایی و زمانی قرارگیری این سامانه‌های پیچیده در معرض طیفی از مخاطرات محیطی است. یکی از گام‌های بنیادی در این فرآیند، مدل‌سازی شدت وقوع و تداخل مخاطرات چندگانه‌ای است که ساختار و عملکرد این رویشگاه‌ها را به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم تهدید می‌کند. در این راستا، محاسبه "نمایه شدت مواجهه با مخاطرات چندگانه به‌عنوان یک شاخص ترکیبی و مکانی، چارچوبی مؤثر برای سنجش بُعد مواجهه (Exposure) از ابعاد سه‌گانه آسیب‌پذیری (مواجهه، حساسیت، ظرفیت تطبیق‌پذیری) فراهم می‌آورد (Mahendra et al., 2011; IPCC, 2022). این شاخص به‌ویژه برای مناطق کوهستانی و شکننده‌ای نظیر زاگرس که همزمان با فشارهای اقلیمی، انسانی و ژئومورفولوژیکی روبه‌رو هستند، اهمیت دوچندان دارد. در مطالعه حاضر، ما با هدف ایجاد نقشه‌ای دقیق از شدت مواجهه جنگل‌های شهرستان دورود در استان لرستان با مخاطرات محیطی چندگانه، مجموعه‌ای از ۱۰ مخاطره کلیدی شامل خشکسالی، ریزگرد، تبخیر و تعرق، دماهای بیشینه، تندباد، سیلاب، زمین‌لغزش، اثرات روستا، اثرات جاده و شدت فرسایش خاک را مورد ارزیابی قرار دادیم. انتخاب این مخاطرات مبتنی بر پیشینه پژوهش‌های علمی، تحلیل تغییرات اقلیمی و بررسی میدانی مناطق مطالعاتی صورت گرفت. هر یک از این مخاطرات می‌توانند به‌تنهایی و یا به‌صورت هم‌افزا، موجب تضعیف پایداری اکولوژیک جنگل‌ها شده و روند تخریب و ازدست‌رفتن تنوع زیستی را تشدید کنند (Nguyen et al., 2019; Xia et al., 2021). برای تحلیل اهمیت نسبی هر مخاطره، از روش ساختاریافته و اجماع‌محور دلفی بهره گرفته شد؛ روشی که با مشارکت متخصصان حوزه‌های اقلیم‌شناسی، اکولوژی جنگل، مدیریت منابع طبیعی و سنجش از دور، امکان استخراج وزن‌های نسبی هر مخاطره را فراهم می‌کند. وزن‌دهی مخاطرات به روش دلفی نه‌تنها اعتبار علمی تحلیل را افزایش می‌دهد، بلکه به کاهش سوگیری در مدل‌سازی کمک می‌کند (Mafi-Gholami et al., 2015). تحلیل نتایج این فرآیند نشان داد که سه مخاطره خشکسالی، ریزگرد و اثر روستا بالاترین وزن‌های نسبی را در میان مخاطرات بررسی شده دارا بودند. این یافته‌ها نه‌تنها در هم‌راستایی با مطالعات قبلی در منطقه زاگرس قرار دارند (Rahimi and Dong, 2022; Mahmoudi et al., 2023)، بلکه تأییدکننده الگوهای جهانی در تحلیل آسیب‌پذیری سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیک نیز هستند (Mafi-Gholami et al., 2021).

خشکسالی به عنوان یک مخاطره اقلیمی شدید، با کاهش دسترسی به منابع آب و تغییر در تعادل هیدرولوژیکی خاک، اثرات مخربی بر رشد و باززایی گونه های جنگلی دارد. ریزگردها از طریق انسداد روزنه های برگ، کاهش فتوسنتز و آلوده سازی سطح برگ، سبب افت عملکرد زیستی درختان می شوند و همچنین با افزایش دمای سطحی خاک، چرخه تغذیه ای را مختل می سازند. اثرات روستا نیز که شامل بهره برداری های بی رویه، چرای دام، تبدیل کاربری اراضی، و استخراج منابع می شود، به صورت مستقیم با تخریب فیزیکی پوشش جنگلی و گسترش ناپایداری در شیب ها همراه است. وزن بالای این مخاطرات از منظر کارشناسان، بازتابی از تجربه میدانی و شواهد مشاهده شده در سطح منطقه ای و محلی است. این اولویت بندی نشان می دهد که برنامه ریزی حفاظتی و مدیریت مخاطرات جنگل های زاگرس نمی تواند بدون توجه به پیوندهای میان اقلیم، جامعه و محیط طبیعی شکل گیرد. نقشه های تولید شده از شدت مواجهه، امکان تحلیل تفصیلی در سطوح خرد (سلولی) تا کل منطقه را فراهم می سازند و بستری مناسب برای توسعه سامانه های هشدار سریع، اختصاص منابع حفاظت، و اولویت بندی مداخلات مدیریتی فراهم می نمایند.

محاسبه نمایه مواجهه در سطح رویشگاه های جنگلی شهرستان دورود و تحلیل ارتباط آن با طبقات مختلف تراکم تاج پوشش جنگل نشان داد که بخش قابل توجهی از عرصه های جنگلی این شهرستان، به ویژه در نواحی مرکزی و جنوبی با تراکم بیش از ۲۵ درصد، در معرض شدت بالا و بسیار بالای وقوع مخاطرات محیطی قرار دارد. در واقع تحلیل فضایی انجام شده در این مطالعه پیرامون همپوشانی شدت مخاطرات محیطی زیستی و طبقات مختلف تراکم تاج پوشش جنگلی در شهرستان دورود، به روشنی وجود یک پیوستار مکانی از ریسک پذیری اکولوژیک را نشان می دهد؛ پیوستاری که شدت و نوع مخاطرات را مستقیماً به الگوی تراکم پوشش جنگل ها مرتبط می سازد. به عبارت دیگر، نحوه توزیع مکانی پوشش جنگلی، چه در تراکم بالا و چه پایین، به طور معنی داری با شدت وقوع مخاطرات هم راستا بوده است. از مجموع سطح جنگل های شهرستان دورود، حدود ۸/۹ درصد (معادل ۱۹۹۴ هکتار) در طبقه تراکمی بالای ۵۰ درصد قرار دارد. یافته های این مطالعه نشان داد که در این محدوده، بیشترین سهم از شدت مخاطره «زیاد» دیده می شود، به طوری که ۳۵/۹ درصد از این سطح در این طبقه شدت قرار گرفته است. این نتیجه به ظاهر متناقض، که پوشش متراکم جنگلی، به جای کاهش شدت مخاطرات، بیشتر در معرض شدت های بالای آنها قرار دارد، در واقع ناشی از چند ویژگی درونی این اکوسیستم هاست؛ چنانکه انباشت بالای سوخت آلی، کاهش جریان هوای سطحی و رطوبت پذیری خاک که در تعامل با شرایط اقلیمی ناپایدار می توانند زمینه ساز گسترش آتش سوزی، شیوع آفات و تسریع روند زوال باشند. بنابراین، تراکم بالا نه تنها کاهش دهنده شدت قرائگیری در معرض مخاطرات محیطی نیست، بلکه در برخی مخاطرات خاص می تواند نقش تشدید کننده ایفا کند. در مقابل، پهنه هایی با تراکم ۵۰-۲۵ درصد که ۶۳/۵ درصد از کل وسعت جنگل های منطقه را شامل می شوند، به وضوح گسترده ترین طبقه مکانی برای شدت مخاطرات محسوب می شوند. تحلیل ها نشان داد که ۳۵/۵ درصد از این گستره جنگل ها، در تمامی طبقات شدت وقوع مخاطرات توزیع شده است، و در میان آنها، شدت های «زیاد» و «خیلی زیاد» سهم قابل توجهی را تشکیل داده اند. این طبقه تراکم، از نظر اکولوژیک وضعیتی انتقالی (میان) دارد؛ نه چنان از تراکم بالایی برخوردار است که به پایداری اکولوژیک کمک کند و نه چنان گسسته است که مانع از تشدید ریسک مخاطراتی نظیر آتش سوزی یا خشکسالی شود. این سطح تراکم، بیشترین شدت قرائگیری در معرض مخاطراتی مانند بهره داری های انسانی، چرای دام، بهره برداری و گسترش تغییرات کاربری را نیز دارد؛ عواملی که همگی به عنوان محرک های اولیه افزایش شدت مخاطرات در پژوهش های مشابه شناسایی شده اند (Perzl et al., 2021; Mo et al., 2024; Liu et al., 2025). طبقه با تراکم ۲۵-۱۰ درصد نیز که ۲۶/۷ درصد از سطح رویشگاه ها را پوشش می دهد، اگرچه تراکم کمتری دارد، اما به طور قابل توجهی در معرض شدت های بالا، از جمله «خیلی زیاد» مخاطرات محیطی چندان قرار گرفته است. نتایج نشان داد که شدت مخاطره «خیلی زیاد» به ترتیب در ۱۷/۲ درصد (تراکم بالای ۵۰ درصد)، ۱۷/۵ درصد (تراکم ۵۰-۲۵ درصد) و ۱۸/۱ درصد (تراکم ۲۵-۱۰ درصد) از وسعت این طبقات مشاهده شده است. این الگوی نسبتاً یکنواخت در طبقه شدیدترین سطح مخاطره، نشان دهنده آن است که تمامی سطوح تراکم، بسته به شرایط محیطی و فشارهای بیرونی، می توانند به شدت در معرض خطر قرار گیرند. مقایسه نتایج به دست آمده با مطالعات علمی مشابه به ویژه یافته های Masoudian و همکاران (۲۰۲۵) که با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین نقشه خطر آتش سوزی جنگل های زاگرس را تهیه کردند، بیانگر آن است که بیشترین شدت خطر در جنگل هایی با تراکم متوسط و مجاورت با عناصر انسانی از جمله

جاده و مزارع مشاهده می‌شود. نتایج مطالعات Jaafari و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) نیز نشان داده است که تراکم متوسط و نزدیکی به زیرساخت‌ها مهم‌ترین عوامل مکانی مؤثر در وقوع آتش هستند، یافته‌هایی که با نتایج مطالعه حاضر در دورود مطابقت دارند. به‌طور خاص، نتایج این مطالعه اهمیت تحلیل ساختاری جنگل‌ها را از منظر تراکم تاج‌پوشش در مطالعات مخاطره‌شناسی نشان می‌دهد. برخلاف اغلب پژوهش‌هایی که صرفاً بر عوامل اقلیمی یا توپوگرافی تمرکز دارند، این تحقیق نشان داد که نحوه توزیع و غلظت پوشش جنگلی می‌تواند به‌تنهایی نقش تعیین‌کننده‌ای در بروز یا تشدید مخاطرات محیط‌زیستی ایفا کند. به‌ویژه در جنگل‌های کوهستانی زاگرس که ساختارهای ناهمگن دارند، درک تفاوت‌های درون‌پهنه‌ای در تراکم می‌تواند به تصمیم‌سازی دقیق‌تری برای سیاست‌های حفاظتی و اقدامات مداخله‌گرایانه بینجامد. این یافته‌ها حاکی از آن است که بخش‌های با پوشش انبوه‌تر، علی‌رغم نقش کلیدی‌شان در پایداری اکولوژیک، خود به‌واسطه قرارگیری در مناطق توپوگرافیکی خاص و شرایط اقلیمی حساس، بیشتر در معرض اثرات هم‌افزای مخاطرات قرار دارند. هم‌راستا با الگوی مشاهده‌شده در سایر رویشگاه‌های جنگلی زاگرس، شدت بالای وقوع مخاطرات متعدد مانند خشکسالی، سیلاب، فرسایش، و گردوغبار طی دهه‌های اخیر، بدون تردید تأثیرات مخربی بر ساختار، تنوع زیستی، و عملکرد بوم‌سازگان جنگلی شهرستان دورود برجای گذاشته است.

پیش‌بینی‌های اقلیمی اخیر، افزایش احتمال وقوع پدیده‌های حادی مانند خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت در عرض‌های پایین جغرافیایی، به‌ویژه در منطقه خاورمیانه را تأیید می‌کنند (Etemadi et al., 2016; Sreeparvathy and Srinivas, 2022). این تغییرات می‌توانند به تشدید فشار بر جنگل‌های کوهستانی منجر شده و به‌طور خاص در طبقات تراکم بالای ۲۵ درصد، آسیب‌پذیری بیشتری ایجاد کنند. در چنین شرایطی، از یک‌سو کاهش بارندگی و افزایش دما سبب افت باززایی درختان، کاهش رطوبت خاک و ناپایداری پوشش گیاهی می‌شود و از سوی دیگر، تاب‌آوری ساختاری جنگل‌ها نسبت به سایر مخاطرات مانند آتش‌سوزی، آفات و زمین‌لغزش کاهش می‌یابد. افزون بر آن، شواهد علمی متعددی نشان می‌دهد که تغییر اقلیم منجر به افزایش فراوانی و شدت بارندگی‌های حادی در بسیاری از مناطق جهان شده است و انتظار می‌رود این روند در دهه‌های آتی نیز تداوم داشته باشد (Jia et al., 2022). وقوع بارش‌های شدید، به‌ویژه در مناطق دارای شیب تند، خاک‌های ناپایدار و پوشش گیاهی کم‌تراکم، به‌طور مستقیم موجب تشدید فرسایش خاک، وقوع سیلاب‌های مخرب و ناپایداری اکوسیستم‌های کوهستانی می‌شود (Marcinkowski et al., 2022).

بر مبنای نتایج این پژوهش، بخش‌های جنوبی و مرکزی رویشگاه‌های جنگلی شهرستان دورود، که بیشترین تراکم جنگل را نیز دارا هستند، با طبقه‌های "زیاد" و "خیلی زیاد" ریسک وقوع سیلاب همپوشانی دارند. این همپوشانی مکانی، زنگ خطری برای آینده این زیست‌بوم‌ها است؛ چرا که ترکیب سیلاب‌های شدید و تراکم زیاد پوشش جنگلی می‌تواند ساختار خاک، سیستم‌های ریشه‌ای و حتی چرخه مواد مغذی را مختل کند و بازسازی اکولوژیک را دشوار سازد. به‌عبارت دیگر، تمرکز جنگل‌های انبوه در مناطقی با بیشترین احتمال سیلاب‌های آتی، جنگل‌های شهرستان دورود را در معرض یک سناریوی ترکیبی از فرسایش ساختاری، ناپایداری هیدرولوژیکی و افزایش فشارهای انسانی قرار داده است. با توجه به نتایج حاصل، ضروری است تا اقدامات حفاظتی مؤثری در قالب برنامه‌های جامع آب‌خیزداری، مدیریت سیلاب، تثبیت شیب‌ها و تقویت پوشش گیاهی در اولویت اجرایی سازمان‌های مرتبط قرار گیرد. طراحی و اجرای این اقدامات، باید براساس تحلیل‌های مکانی دقیق، مدل‌سازی ریسک، و در نظر گرفتن پویایی‌های اقلیمی آینده انجام شود. استفاده از ابزارهای سنجش از دور، GIS و مدل‌سازی سناریوهای اقلیمی، می‌تواند در طراحی سیستم‌های هشدار سریع و برنامه‌ریزی تطبیقی بسیار مؤثر باشد.

با توجه به گزارش‌های متعدد مبنی بر گسترش شدید آفات در جنگل‌های زاگرس طی دهه اخیر، به‌ویژه در استان لرستان و منطقه شهرستان دورود، لزوم توجه به این مخاطره به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در ارزیابی مخاطرات چندگانه کاملاً محسوس است. براساس مطالعات Haghigian (۲۰۱۸)، پدیده خشکیدگی درختان، ناشی از حملات گسترده آفات چوب‌خوار و برگ‌خوار، به‌ویژه در گونه‌های شاخص مانند بلوط ایرانی (*Quercus brantii*)، به یکی از تهدیدات اصلی زیست‌پایداری اکوسیستم‌های جنگلی زاگرس تبدیل شده است. این تهدید نه‌تنها باعث افت شدید عملکرد اکولوژیک جنگل‌ها (نظیر تولید بیوماس، تثبیت خاک و تنظیم چرخه آب) شده، بلکه تاب‌آوری این رویشگاه‌ها در برابر سایر مخاطرات نظیر خشکسالی، آتش‌سوزی و سیلاب را نیز به‌شدت کاهش داده است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، تلفیقی از داده‌های سنجش از دور با تفکیک مکانی و

پایش‌های میدانی دقیق برای شناسایی، طبقه‌بندی و پایش مکانی و زمانی مناطق آلوده به آفات در سطح رویشگاه‌های جنگلی شهرستان دورود به کار گرفته شود. به‌ویژه استفاده از تصاویر چندطیفی و فراطیفی به‌همراه تحلیل سری‌زمانی می‌تواند برای شناسایی زودهنگام خشکیدگی و تغییرات پوشش گیاهی ناشی از حملات آفات بسیار مؤثر باشد. در گام بعد، با ثبت موقعیت جغرافیایی نواحی آلوده و تطبیق آنها با سایر لایه‌های مکانی نظیر تراکم تاج‌پوشش، شیب زمین، نوع خاک، و منابع آب سطحی، نقشه پهنه‌بندی ریسک آفات جنگلی در قالب زون‌های عملکردی مختلف تهیه گردد. این نقشه نه تنها می‌تواند به‌عنوان ورودی در مدل‌های چندمخاطره‌ای مورد استفاده قرار گیرد، بلکه برای مدیریت پیشگیرانه، تخصیص منابع حفاظتی، و طراحی سیستم‌های هشدار زودهنگام نیز ارزش عملیاتی بالایی خواهد داشت.

در نهایت، پیشنهاد می‌شود مخاطره ناشی از آفات جنگلی به‌عنوان یکی از متغیرهای مستقل و تأثیرگذار در فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری (خصوصاً در مؤلفه «حساسیت») لحاظ شود. بدین ترتیب، مدل آسیب‌پذیری نهایی منطقه مورد مطالعه، قادر خواهد بود بازتاب دقیق‌تری از هم‌افزایی بین انواع مخاطرات (نظیر خشکسالی، آفات و سیلاب) و تأثیرات آن بر عملکرد و ساختار جنگل‌های کوهستانی ارائه دهد. ادغام این مؤلفه در پایگاه داده‌های مدیریتی، امکان برنامه‌ریزی جامع‌نگرتر برای تاب‌آوری جنگل‌های زاگرس را فراهم خواهد کرد. در چارچوب این مطالعه، با تلفیق داده‌های مکانی چندمنبعه، رویکرد ساختاریافته وزن‌دهی شاخص‌ها، و تحلیل مکانی شدت قرارگیری طبقات مختلف تراکمی جنگل در معرض مخاطرات محیطی چندگانه، الگویی ترکیبی برای ارزیابی شدت مواجهه جنگل‌های کوهستانی با مخاطرات چندگانه ارائه شد. این چارچوب نه تنها امکان تحلیل فضایی دقیق‌تری از ریسک را فراهم می‌کند، بلکه قابلیت تعمیم به سایر مناطق جنگلی مشابه را در سطح کشور نیز دارد. همچنین، پیشنهاد تلفیق ریسک ناشی از آفات جنگلی در مؤلفه حساسیت و طراحی مدل‌های پیش‌آگاهی مکان‌مبنا، از جمله نوآوری‌های مفهومی و عملیاتی این پژوهش به‌شمار می‌رود.

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(198), 1-18.
- Adger, W.N., 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change* 16(3), 268-281.
- Alimahmoudi Sarab, A., Faghihi, J., Danekar, A., & Atarod, P., 2015. The effect of spatial criteria on the fire risk potential in the Zagros forests. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* 23(3): 425-438.
- Alirezadei, Z., Gandomkar, A., Khodagholi, M., Abbasi, A., 2019. Detection of drought impacts on the spatiotemporal dynamics of Zagros oak forests (Case study: Lorestan oak forests). *Journal of Forests and Rangelands Conservation Research* 17(1), 107-123.
- 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, 35-49.
- Ettehadi Osgouei, P., Kaya, Ş., 2023. A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of satellite-based aerosol optical depth in Marmara region of Türkiye during 2000-2021. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLVIII-M-1, 509-514.
- FAO., 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome.
- Haghigian, F., 2018. Biological aspects of Heart moth, *Dicycla oo* L. (Lep., Noctuidae) in Chaharmahal and Bakhtiari Oak forests. *Iranian Journal of Forests and Rangelands Protection Research (IJFRPR)* 17(2), 257-264. (In Persian)
- Heydari, M., Attar Roshan, S., Jafarian, E., Abyat, M., 2021. Modeling and zoning fire-prone areas in the Zagros forests using GIS based on logistic regression. *Geography and Environmental Hazards* 10(2): 43-58.
- Jaafari, A., Gholami, D. M., Zenner, E.K., 2017. A Bayesian modeling of wildfire probability in the Zagros Mountains, Iran. *Ecological Informatics* 39, 32-44.

- 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.
- Jaafari, A., Zenner, E.K., Pham, B.T., 2018. Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree-based classifiers. *Ecological Informatics* 43, 200-211.
- Jia, H., Wang, X., Sun, W., Mu, X., Gao, P., Zhao, G., Li, Z., 2022. Estimation of Soil Erosion and Evaluation of Soil and Water Conservation Benefit in Terraces under Extreme Precipitation. *Water* 14(11), 1675.
- 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., Rosa, I. M., Guerra, C.A., Wolf, F., Pereira, H.M., 2020. Global patterns of forest loss across IUCN categories of protected areas. *Biological Conservation* 241, 108299.
- Liu, H., Park Williams, A., 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.
- Liu, S., Csillik, O., Ordway, E. M., Chang, L.L., Longo, M., Keller, M., Moorcroft, P.R., 2025. Environmental drivers of spatial variation in tropical forest canopy height: Insights from NASA's GEDI spaceborne LiDAR. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 122(10), e2401755122.
- 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).
- 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.
- Mahendra, R.S., Mohanty, P.C., Bisoyi, H., Kumar, T.S., Nayak, S., 2011. Assessment and management of coastal multi-hazard vulnerability along the Cuddalore–Villupuram, east coast of India using geospatial techniques. *Ocean and Coastal Management* 54(4), 302-311.
- Mahmoudi, B., Zenner, E., Mafi-Gholami, D., Eshaghi, F., 2023. Livelihood analysis and a new inferential model for development of forest-dependent rural communities. *Sustainability* 15(11), 9008.
- Mahmoudzadeh, H., Azizmoradi, M., 2019. Modeling deforestation using neural networks and geographic information systems (Forests around Khorramabad). *Remote Sensing and GIS in Natural Resources* 10(4), 74-90.
- Mansourmoghaddam, M., Naghipur, N., Rousta, I., Ghaffarian, H.R., 2022. Temporal and spatial monitoring and forecasting of suspended dust using google earth engine and remote sensing data (Case Study: Qazvin Province). *Desert Management* 10(1), 77-98.
- Marcinkowski, P., Szporak-Wasilewska, S., Kardel, I., 2022. Assessment of soil erosion under long-term projections of climate change in Poland. *Journal of Hydrology* 607, 127468.
- Masoudian, E., Mirzaei, A., Bagheri, H., 2025. Assessing wildfire susceptibility in Iran: Leveraging machine learning for geospatial analysis of climatic and anthropogenic factors. *Trees, Forests and People* 19: 100774.
- Michelsen, O., McDevitt, J.E., Coelho, C.R., 2014. A comparison of three methods to assess land use impacts on biodiversity in a case study of forestry plantations in New Zealand. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 19, 1214-1225.
- Mirzapour, S., Kheirkhah Zarkesh, M., Azizi, Z., 2022. Assessment and prediction of drought conditions in the Zagros region based on remote sensing indices and general circulation models over a 20-year period. *Journal of Forests and Rangelands Conservation Research* 20(2), 317-335.
- Mo, L., Crowther, T. W., Maynard, D. S., Van den Hoogen, J., Ma, H., Bialic-Murphy, L., Ontikov, P., 2024. The global distribution and drivers of wood density and their impact on forest carbon stocks. *Nature Ecology & Evolution* 8, 2195-2212.
- Ngo, P.T.T., Panahi, M., Khosravi, K., Ghorbanzadeh, O., Kariminejad, N., Cerda, A., Lee, S., 2021. Evaluation of deep learning algorithms for national scale landslide susceptibility mapping of Iran. *Geoscience Frontiers* 12(2), 505-519.
- Nguyen, K.A., Liou, Y.A., Terry, J.P., 2019. Vulnerability of Vietnam to typhoons: A spatial assessment based on hazards, exposure and adaptive capacity. *Science of the Total Environment* 682, 32-44.

- Perzl, F., Bono, A., Garbarino, M., Motta, R., 2021. Protective effects of forests against gravitational natural hazards. In *Protective forests as Ecosystem-based solution for Disaster Risk Reduction (ECO-DRR)* (pp. 1-23). IntechOpen.
- 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 flooding, gully erosion, forest fires, and earthquakes in Iran. *Scientific Reports* 11(1), 14889.
- Rahimi, E., Dong, P., 2022. What are the main human pressures affecting Iran's protected areas?. *Journal of Environmental Studies and Sciences* 12(4), 682-691.
- Salarvand Shamsi, H., Amir Eslam, B., Pourbabaei, H., 2017. Investigating the effect of forest stratification on the accuracy of quantitative tree characteristics estimation using multi-tree sampling method in western Iran forests (Case study: Doroud, Lorestan). *Journal of Forest and Wood Products* 70(3), 469-478.
- Sivrikaya, F. and Bozali, N., 2012. Determining carbon stock: a case study from Türkoğlu planning unit. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi* 14(Special issue), 69-76.
- Spehn, E.M., Rudmann-Maurer, K., Körner, C., 2011. Mountain biodiversity. *Plant Ecology and Diversity* 4(4), 301-302.
- Sreeparvathy, V., Srinivas, V.V., 2022. Meteorological flash droughts risk projections based on CMIP6 climate change scenarios. *npj Climate and Atmospheric Science* 5(1), 77.
- 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.
- The General Department of Environmental of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad Province, (GDEEKBA), 2022. Management plan of Kooh-e-Dil Protected Area. 236 p.
- 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.
- Xia, M., Jia, K., Zhao, W., Liu, S., Wei, X., Wang, B., 2021. Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators* 123, 107274.