

Research Paper

Classification of the sensitivity of the forests in Lordegan County based on structural and biophysical characteristics**Mina Raeisi Gahrooei¹, Davoud Mafi Gholami^{*2} and Mozhgan Abbasi³**

1- Ph.D. Student of Forest management, Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, ShahreKord University, ShahreKord, I. R. Iran. (raiesi@stu.sku.ac.ir)

2,*- (Corresponding author) Associate Professor, Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, ShahreKord University, ShahreKord, I. R. Iran. (d.mafigholami@sku.ac.ir)

3- Associate Professor, Department of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, ShahreKord University, ShahreKord, I. R. Iran. (mozhgan.abbasi@sku.ac.ir)

Received: 01 May 2024

Accepted: 08 October 2024

Extended Abstract

Background and Objective: Forests around the world have become increasingly vulnerable due to their exposure to a range of environmental and human-induced threats. As the detrimental effects of forest degradation and declining ecosystem quality are widely recognized as major risks, it is essential to develop effective tools and strategies to prevent or mitigate these impacts. Understanding the degree of forest sensitivity is a critical step in this process. This study aims to classify the sensitivity of forest ecosystems in Lordegan County based on both structural characteristics of forest stands and biophysical factors, including topographic and hydrological features.

Material and Methods: This research assessed the sensitivity levels of forest habitats in Lordegan County using key indicators of forest health—specifically the Leaf Area Index (LAI) and forest density—alongside physiographic variables (slope, aspect, and elevation), rainfall patterns, and land use/land cover data. Structural and land use maps were generated and validated using satellite imagery, while physiographic data were derived from the province's topographic maps. Average annual precipitation was calculated using long-term monthly rainfall data from nearby synoptic and rain gauge stations. A regression model was developed to estimate annual rainfall variability at each station, which was then spatially mapped. All input layers were converted into raster format in ArcGIS 10.7 and classified into four sensitivity categories: low, moderate, high, and very high. The standardized indicator maps were weighted using the Delphi method, and a composite sensitivity index map was created by averaging the weighted layers. The relationship between the sensitivity index and the contributing indicators was examined using Pearson correlation analysis.

Results: The integrated sensitivity analysis revealed that 18,386.34 hectares (14.44%) of the forest area were categorized as low sensitivity, 48,333.58 hectares (37.96%) as moderate, 38,179.18 hectares (30%) as high, and 22,405.90 hectares (17.60%) as very high sensitivity. Statistical analysis showed that spatial variations in forest sensitivity were strongly influenced by a positive correlation with both LAI and forest density, while precipitation had a significant negative correlation with sensitivity. Additionally, the combination of physiographic variables demonstrated that sensitivity

and vulnerability increased as slope, aspect, and elevation values approached higher threshold classes (i.e., classes 3 and 4).

Conclusion: This study highlights that a high-resolution spatial evaluation of sensitivity indicators—using a 30x30 meter grid—can effectively reveal the relationships between key factors influencing forest vulnerability in Lordegan. The projected increase in climatic variability and its growing impact on forest sensitivity underscore the urgent need for proactive monitoring and management. Without timely intervention, these forests are likely to face escalating threats from climate change, natural hazards, and human activities, leading to further degradation. Future research should incorporate the other two core dimensions of vulnerability—exposure and adaptive capacity—alongside sensitivity. Emphasizing the role of local communities within a social-ecological systems framework could offer a more comprehensive understanding of forest vulnerability and inform more resilient conservation strategies.

Keywords: Vulnerability, Remote sensing, LAI.

How to Cite This Article: Raeisi Gahrooei, M., Mafi Gholami, D., and Abbasi, M. (2025). Classification of the sensitivity of the forests in Lordegan County based on structural and biophysical characteristics. Forest Research and Development, 11(1), 1-23. DOI: [10.30466/frd.2024.55330.1726](https://doi.org/10.30466/frd.2024.55330.1726)



Copyright ©2024 Raeisi Gahrooei et al. Published by Urmia University.

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

طبقه‌بندی حساسیت جنگل‌های شهرستان لردگان براساس ویژگی‌های ساختاری و بیوفیزیکی

مینا رئیسی گهرونی^۱، داود مافی غلامی^{۲*} و مژگان عباسی^۳

۱- دانشجوی دکتری مدیریت جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. (raiesi@stu.sku.ac.ir)

۲- دانشیار، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. (d.mafigholami@sku.ac.ir)

۳- دانشیار، گروه علوم جنگل، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران. (mozhgan.abbasi@sku.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۲

چکیده

مقدمه و هدف: جنگل‌ها در سراسر جهان به علت قرارگیری در معرض خطرات گوناگون، به زیست‌بوم‌هایی حساس و نیازمند به حفاظت تبدیل شده‌اند. با در نظر گرفتن اینکه پیامدهای منفی تخریب و کاهش کیفیت جنگل‌ها، همیشه به عنوان تهدیدات جدی برای زیست‌بوم‌های جنگلی شناخته می‌شوند، برنامه‌ریزی و فراهم کردن ابزارهای مؤثر برای جلوگیری یا کاهش این تخریب‌ها و شناسایی مقدار حساسیت آنها، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. از این رو، هدف از این پژوهش طبقه‌بندی حساسیت جنگل‌های شهرستان لردگان براساس ویژگی‌های ساختاری رویشگاه‌های جنگلی و بیوفیزیکی (ویژگی‌های زمین‌ریخت‌شناسی و آب‌شناختی) است.

مواد و روش‌ها: در پژوهش پیش‌رو، درجه حساسیت رویشگاه‌های جنگلی شهرستان لردگان بر مبنای شاخص‌های مهم ساختاری مربوط به سلامت جنگل (شاخص سطح برگ و تراکم جنگل)، شاخص‌های فیزیوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع) همراه با وضعیت بارندگی و کاربری/ پوشش اراضی طبقه‌بندی شدند. بدین منظور نقشه‌های مربوط شاخص‌های ساختاری به همراه کاربری با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای تهیه و صحت‌سنجی شدند. نقشه شاخص‌های فیزیوگرافی با استفاده از نقشه توپوگرافی استان تهیه شد و در ادامه متوسط بارندگی سالانه با استفاده از سری زمانی مقادیر بارندگی ماهانه مربوط به ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی واقع و نزدیک در منطقه مورد پژوهش، محاسبه و پس از توسعه رابطه رگرسیونی، نرخ تغییرات سالانه این متغیر در هر ایستگاه به دست آمد و نقشه‌سازی شد. تمامی نقشه‌های مورد نیاز با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.7، به رستر تبدیل و در چهار طبقه کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند. نقشه‌های طبقه‌بندی شده (استاندارد شده) شاخص‌ها در وزن نسبی محاسبه شده با استفاده از روش دلفی ضرب شدند و نقشه طبقه‌بندی شده نمایه حساسیت در سطح رویشگاه‌های جنگلی بر اساس میانگین

نقشه‌های وزن‌دار محاسبه شد. در نهایت، همبستگی آماری (درجه تأثیر) میان نمایه حساسیت و شاخص‌ها با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون ارزیابی شد.

یافته‌ها: تلفیق نقشه‌های وزن‌دار شاخص‌ها، محاسبه و طبقه‌بندی نقشه نمایه حساسیت در سطح رویشگاه‌های جنگلی نشان داد که ۱۸۳۸۶/۳۴ هکتار (۱۴/۴۴ درصد)، ۴۸۳۳۳/۵۸ هکتار (۳۷/۹۶ درصد)، ۳۸۱۷۹/۱۸ هکتار (۳۰ درصد) و ۲۲۴۰۵/۹۰ هکتار (۱۷/۶۰ درصد) از کل وسعت کل رویشگاه به ترتیب در طبقات با سطح حساسیت کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار داشتند. تجزیه و تحلیل رابطه آماری (درجه تأثیر) میان نمایه حساسیت و شاخص‌ها نشان داد که طیف تغییرات مکانی درجات حساسیت در گستره‌های مختلف رویشگاه متأثر از همبستگی بالا و مستقیم آن با شاخص‌های سطح برگ و درصد تراکم جنگل و همبستگی منفی (تأثیر منفی) مقادیر بارندگی است. همچنین تلفیق شاخص‌های فیزیوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع)، نشان داد که در صورت افزایش مقادیر این شاخص‌ها به سمت حد آستانه (طبقات سه و چهار)، مقدار حساسیت و آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی نیز افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری: این پژوهش نشان داد که ارزیابی دقیق مکانی شاخص‌های مربوط به حساسیت در رویشگاه‌های جنگلی لردگان با سلول‌های شبکه ۳۰ در ۳۰ متر امکان تجزیه و تحلیل و توصیف رابطه میان شاخص‌های حساسیت را امکان‌پذیر می‌سازد. روند افزایشی بودن متغیرهای اقلیمی و در ادامه تأثیر آنها بر افزایش مقدار حساسیت و آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی در بازه بلندمدت نشان می‌دهد که در سال‌های آینده در صورت عدم نظارت و مدیریت، این جنگل‌ها بیش از پیش تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، مخاطرات طبیعی و انسانی قرار خواهند گرفت و در ادامه، افت کیفیت و تخریب این جنگل‌ها را به همراه خواهد داشت. پژوهش‌های آینده می‌تواند با بررسی دو بعد اساسی دیگر آسیب‌پذیری (در معرض قرار گرفتن و ظرفیت سازش‌پذیری) در کنار بعد آسیب‌پذیری و توجه به نقش جوامع انسانی با توجه به رویکرد سامانه زوجی اجتماعی- بوم‌شناسی انجام شود و تصویر دقیق‌تری از مقدار آسیب‌پذیری مناطق جنگلی ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: آسیب‌پذیری، سنجش از دور، شاخص سطح برگ.

مقدمه

جنگل‌ها در سراسر جهان در معرض خطر هستند و پایداری جنگل‌ها توسط مجموعه‌ای از عوامل مانند تبدیل زیستگاه، تکه‌تکه شدن و تغییر شرایط محیطی در سطح جهان تهدید می‌شود (Lambin and Meyfroidt, 2011). درختان به دلیل عمر طولانی، به‌طور خاص آسیب‌پذیر هستند، به‌طوری‌که با پیشرفت تغییرات محیطی ناسازگارتر می‌شوند و حساسیت آنها نسبت به تغییرات افزایش می‌یابد (Lindner et al., 2010).

در این میان، بوم‌سازگان جنگل‌های زاگرس با گذشت زمان، بی‌توجهی‌های زیادی را تجربه کرده است. مقدار تخریب جنگل در این ناحیه، دارای قدمتی طولانی‌مدت است (Amiri et al., 2017). وابستگی شدید مردم به عرصه‌های جنگلی با قطع درختان برای توسعه کشت در زیرآشکوب جنگل و تأمین سوخت مورد نیاز و همچنین حضور مداوم دام در این عرصه‌ها سبب حذف گونه‌های درختی و درختچه‌ای و کاهش تنوع و تراکم در این جنگل‌ها شده است (Iranmanesh and Jahanbazi Gojani, 2007).

جنگل‌های استان چهارمحال و بختیاری نه تنها از نظر تجاری و اقتصادی، استفاده از محصولات فرعی، محیا کردن شرایط زیستی برای جوامع انسانی، تأمین مصارف سوختی و چرای دام دارای اهمیت هستند؛ بلکه نقش مهمی در حفاظت و حمایت منابع آب و خاک بر عهده دارند (Mohammad nejad Kiasari et al., 2010; Fatahi et al., 2016). این درحالی‌ست که جنگل‌های این استان به‌طور دائمی در معرض تخریب ناشی از مخاطرات طبیعی و انسانی مختلفی قرار می‌گیرند که می‌توان به چرای بی‌رویه دام، تأمین سوخت و مصارف روستایی، آفات، امراض درختان جنگلی، افزایش دمای هوا، کاهش بارش سالانه، هجوم

ریزگردها و غیره اشاره کرد. همه این عوامل سبب افزایش حساسیت این جنگل‌ها شده است (Jazirehi and Ebrahimi Rastaghi, 2004; Jaafari et al., 2011). با توجه به اینکه پیامدهای نامطلوب ناشی از این دست از عوامل، همواره از تهدیدات جدی برای زیست‌بوم‌های جنگلی به‌ویژه جنگل‌های زاگرس محسوب می‌شوند، اهمیت برنامه‌ریزی و شناخت این زیست‌بوم‌های جنگلی انکارناپذیر و امری ضروری است (Sharma et al., 2017; Paul et al., 2020). دستیابی به این هدف در گرو آگاهی و اطلاعات کافی و دقیق درباره حساسیت این زیست‌بوم‌ها است (Mafi-Gholami et al., 2021b; Sharma et al., 2017; Paul et al., 2020)؛ چرا که حساسیت به ویژگی‌های ذاتی یک گونه یا سامانه طبیعی اشاره دارد و مقدار تأثیر عامل خارجی بر سامانه را زمانی که در معرض قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد (Turner et al., 2003a,b; Ebi et al., 2006) و یکی از ارکان اصلی آسیب‌پذیری محسوب می‌شود.

آسیب‌پذیری هر نوع سیستمی (در هر مقیاسی) انعکاسی از در معرض قرار گرفتن و حساسیت سامانه نسبت به شرایط پرخطر و ظرفیت سازش‌پذیری و یا بازیابی از اثرات مربوط به شرایط ذکر شده است (Kelly and Adger, 2000; Turner et al., 2003a,b; Smit and Pilifosova, 2003). به عبارتی آسیب‌پذیری در سه بعد مفهوم‌سازی شده است: قرار گرفتن در معرض عوامل اثرگذار خارجی (تنش‌ها و آشفتگی‌های محیطی)، حساسیت نسبت به عوامل خارجی و ظرفیت سازش‌پذیری (یا ظرفیت سازگاری یا توان‌سازشی) (Adger, 2006; Polsky et al., 2007).

شناخت و پهنه‌بندی حساسیت جنگل‌ها نسبت به تنش‌های گوناگون به‌عنوان یک پیش‌نیاز اساسی برای ارزیابی آسیب‌پذیری جنگل‌ها محسوب می‌شود و

سازمان‌ها و مدیران متولی را به پیش‌بینی اثرات و انتخاب گزینه‌های سازگار مناسب برای تعدیل پیامدهای مخرب وارد آمده بر این زیست‌بوم‌ها رهنمود خواهند کرد (Mafi-Gholami et al., 2021b).

سابقه بررسی‌ها در زمینه حساسیت جنگل‌ها مربوط به شاخص‌هایی است که از مخاطره‌ها اثر می‌پذیرد و توانمندبودن این شاخص‌ها سبب کاهش حساسیت و تأثیرپذیری آنها می‌شود. در همین راستا Upgupta et al. (2015) آسیب‌پذیری جنگل‌های منطقه هیمالیای غربی نسبت به تغییرات اقلیمی را بررسی کردند. در این بررسی با پیروی از روش پژوهش ارائه‌شده توسط Sharma et al. (2015) شاخص‌های تاج پوشش، شیب عرصه و وابستگی جوامع محلی به جنگل به‌عنوان معیارهای حساسیت این جنگل‌ها نسبت به تغییرات اقلیمی در نظر گرفته شد. Mildrexler et al. (2016) به محاسبه شاخص آسیب‌پذیری جنگل بر اساس دو عامل اقلیمی خشکسالی و دمای بالا پرداختند. در این پژوهش یک شاخص آسیب‌پذیری جنگل، بر اساس تنش جنگلی تعریف شده است.

در پژوهش انجام‌شده توسط Jennerjahn et al. (2017) ارزیابی آسیب‌پذیری جنگل‌های مانگرو نسبت به مخاطرات ناشی از تغییر اقلیم همانند بالا آمدن سطح دریا، طوفان‌ها، دما و خشکی بررسی شده است و فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری بدون در نظر گرفتن بعد حساسیت این جنگل‌ها انجام شد. در پژوهش انجام‌شده توسط Sharma et al. (2017) ارزیابی آسیب‌پذیری جنگل‌های هند در مقیاس ملی با اجرای فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری با تمرکز بر بعد حساسیت این جنگل‌ها و در نظر معیارهای مانند غنای بیولوژیکی، نمایه آشفتنگی، تاج پوشش و شیب عرصه انجام شد. Mafi-Gholami et al. (2021a) برای

ارزیابی آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی، تغییرات ساختاری رخ داده در این زیست‌بوم‌ها در طی دهه‌های گذشته برای شناسایی مقدار حساسیت آنها نسبت به مخاطرات محیطی را مورد بررسی قرار داد.

تشدید وقوع مخاطرات محیطی و انسانی سبب افزایش تخریب و افت کیفیت جنگل‌ها شده است و آنها را به بوم‌سازگانی حساس و نیازمند به حفاظت تبدیل کرده است. به همین منظور فراهم کردن ابزارهای مناسب و توسعه خط‌مشی‌های مدیریتی کارآمد برای حفاظت مؤثر از این جنگل‌ها، ضروری و انکارناپذیر خواهد بود. یکی از عوامل دستیابی به هدف فوق، وابسته به تعیین مقدار حساسیت این زیست‌بوم‌ها است. بر این اساس، بررسی حساسیت جنگل‌ها از طریق تعیین درجه حساسیت این رویشگاه‌ها نسبت به وقوع مخاطرات محیطی می‌تواند اطلاعات حیاتی در زمینه درجه حساسیت و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر برای به حداقل رساندن آثار نامطلوب ناشی از تنش‌های گوناگون و نیز دستیابی به هدف حفاظت از این زیست‌بوم‌ها را فراهم کنند.

به‌همین منظور در این پژوهش تلاش شد به بررسی و طبقه‌بندی حساسیت در جنگل‌های شهرستان لردگان براساس ویژگی‌های ساختاری در رویشگاه‌های جنگلی و بیوفیزیکی (ویژگی‌های زمین ریخت‌شناسی و آب‌شناختی) پرداخته شود و ضمن تشخیص و نمایان کردن مقدار حساسیت، راهکارهای مدیریتی مؤثر برای کاهش حساسیت این جنگل‌ها، حفاظت و نگهداری از آنها ارائه خواهد شد.

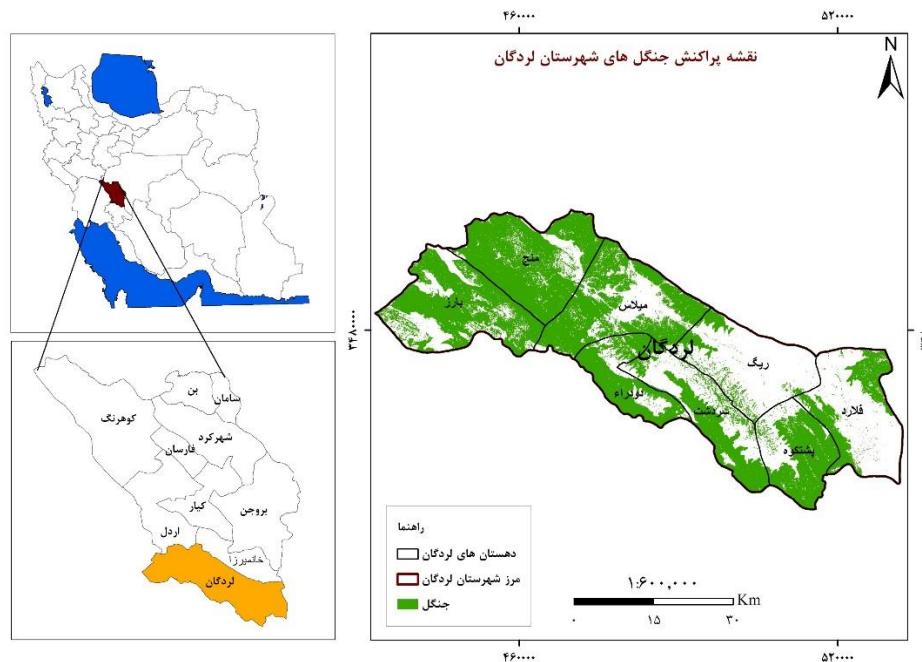
مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

منطقه مورد پژوهش شامل رویشگاه‌های جنگلی استان چهارمحال و بختیاری در شهرستان لردگان است.

شهرستان لردگان را پوشش می‌دهد (شکل ۱). پوشش عمده جنگلی را در این مناطق گونه بلوط ایرانی تشکیل می‌دهد و از دیگر گونه‌های جنگلی استان می‌توان به زبان گنجشک، پسته وحشی یا بنه، زالزالک، کیکم و بادام کوهی اشاره کرد (Yaghmaei et al., 2009).

شهرستان لردگان با وسعتی به پهنای ۲۳۵۹ کیلومتر مربع، بین ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۴۴ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد (Statistical Yearbook, 2019). وسعت جنگل‌های لردگان تقریباً ۱۳۰۰۰۰ هکتار است که ۴۶ درصد از وسعت این



شکل ۱- نقشه منطقه مورد پژوهش

Figure 1. Map of the study area

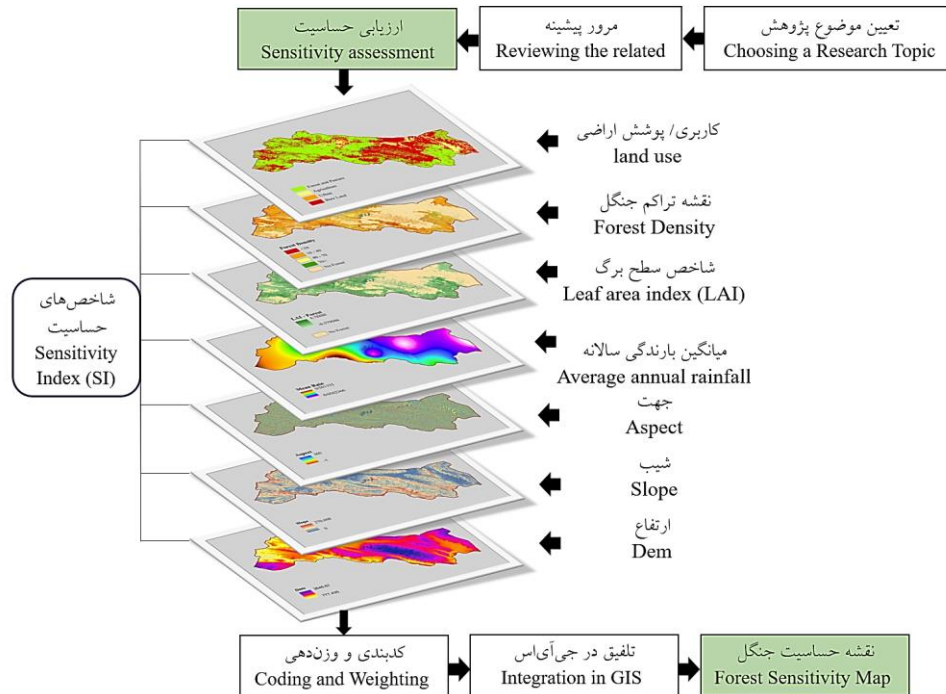
محیطی است (Mafi-Gholami et al., 2019; Mafi-Gholami et al., 2021a,b). در این پژوهش به علت شرایط خاص جنگل‌های زاگرس، برای نقشه‌سازی آن، مقدار حساسیت رویشگاه‌ها مورد پژوهش از نقشه تغییرات شاخص سطح برگ (LAI) و نقشه تراکم رویشگاه‌های جنگلی در شهرستان تهیه و استفاده شد. در واقع آنچه که تضمین‌کننده پایداری و استمرار خدمات و کارکردهای زیست‌بوم جنگلی در طول زمان است، وجود سلامت ساختاری این زیست‌بوم‌ها است که خود تابعی از گسترش مکانی آنها است (Li et al., 2013). همچنین از نقشه ارتفاع، نقشه شیب، نقشه

مراحل انجام پژوهش

به‌طور کلی آنچه که در تعیین حساسیت زیست‌بوم‌های جنگلی اندازه‌گیری می‌شود شامل مشخصه‌های ساختاری (همانند تغییرات وسعت، تراکم، درصد تاج‌پوشش و شاخص سطح برگ) یا توان تولیدی در طول زمان است (Pellegrini et al., 2009; Ellison, 2015; Mafi-Gholami et al., 2021b). بر این اساس که افزایشی‌بودن روند تغییرات این مشخصه‌های ساختاری یا توان تولیدی در طول زمان نشان‌دهنده افزایش تاب‌آوری، کاهش آسیب‌پذیری (کاهش حساسیت) زیست‌بوم نسبت به تنش‌ها و آشفتگی‌های

جنگلی در شهرستان تهیه و استفاده شد. در شکل ۲ روند کلی پژوهش آورده شده است.

جهت، نقشه میانگین بارندگی سالانه و نقشه کاربری/پوشش اراضی نیز به عنوان عوامل زمین ریخت‌شناسی و هواشناسی محیط در رویشگاه‌های



شکل ۲- نمای شماتیک از روند کلی پژوهش

Figure 2. Schematic view of the overall research process

پردازش داده‌ها در سامانه‌های معمولی بسیار زمان‌بر است؛ بنابراین با استفاده از پلتفرم محاسبات ابری سامانه گوگل ارث انجین، تصاویر پردازش شده است. این سامانه کل بایگانی لندست را در اختیار دارد (Mohammadi and Khodabandehlou, 2020) و فراخوانی انواع تصاویر لندست (۱ تا ۹) با هر نوع سطح پردازشی در سامانه گوگل ارث انجین امکان‌پذیر است. در نتیجه استفاده از این سامانه برای بررسی جنگل به عنوان روشی نوین و سریع قابل استفاده است.

در این پژوهش ابتدا محدوده جنگل در شهرستان لردگان مشخص شد. برای تهیه محدوده جنگل در منطقه مورد پژوهش ابتدا از سری تصاویر ماهواره لندست ۵، ۷، ۸ و ۹، سنجنده‌های TM و OLI-ETM⁺ (جدول ۱) در بازه زمانی ۳۰ ساله با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین (GEE) استفاده شد. این تصاویر در سامانه گوگل ارث انجین به پیش‌پردازش‌ها و تصحیحات اولیه (هندسی، رادیومتریکی و غیره) نیازی ندارند و به صورت آماده برای پردازش عرضه شده‌اند.

جدول ۱- مشخصات ماهواره‌های لندست مورد استفاده

Table 1. Specifications of used Landsat satellites

ردیف/گذر	زمان	مشخصات ماهواره
Row /Pass	Date	Satellite specifications
164/38	1984- 2013	Landsat 5 (TM)
164/38	1999- Yet	Landsat 7 (ETM ⁺)
164/38	2013- Yet	Landsat 8 (OLI)
164/38	2021- Yet	Landsat 9 (OLI-2)

برای مشخص شدن محدوده جنگل در منطقه مورد پژوهش از تصاویر تصحیح شده کالکشن دو لندست (Landsat Collection 2) استفاده و با استفاده از کدهای برنامه نویسی جاوا اسکریپت، یکپارچه سازی تصاویر لندست ۵، ۷، ۸ و ۹ با عملیات همسان سازی کردن تصاویر لندست ۵، ۷ و ۸ نسبت به لندست ۹ انجام شد. سپس تصاویر سری بلندمدت به صورت تصحیح شده تجزیه و تحلیل و برای مرحله پردازش آماده شدند (Gorelick et al., 2017). به همین منظور برای مشخص شدن محدوده جنگلی، ابتدا میانگین سری زمانی تصاویر لندست مربوط به فصل تابستان (به دلیل نبود پوشش ابر و نمایش بهتر برای تفکیک پوشش جنگلی) فراخوانی و طبقه بندی نظارت شده با روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) انجام شد (Scholkopf and Smola, 2000; Jensen, 2005). از ویژگی های مهم روش ماشین بردار پشتیبان این است که با نمونه های تعلیمی کوچک نیز می تواند تصویر طبقه بندی شده با دقت خوبی ارائه دهد و سبب کاهش هزینه ها و افزایش سرعت شود (Gualtieri and Crompt, 1998). از نکات مهم هر نوع طبقه بندی تصاویر، آگاهی از مقدار صحت آنها است. در این پژوهش برای انتخاب تعداد ۲۰۴ قطعه نمونه برای ارزیابی صحت نقشه های تولید شده از روش تئوری احتمال دوجمله ای استفاده شد که برای نقشه های کاربری با دو طبقه مناسب است (McCoy, 2005).

قطعات نمونه منتخب برای بررسی صحت با استفاده از برداشت های زمینی با استفاده از GPS و استفاده از گوگل ارث برای تصاویر مربوط به سال های قبل و تفسیر چشمی مشخص شدند (McCoy, 2005; Khoi and Murayama, 2011; Delpasand et al., 2022). پس از دستیابی به صحت لازم، محدوده جنگلی در منطقه مورد پژوهش مشخص شد و شاخص های مربوط به حساسیت جنگل روی این محدوده در نظر گرفته و اعمال شدند که در ادامه به توضیح هر یک از شاخص ها پرداخته می شود.

شاخص ۱: تغییرات شاخص سطح برگ (LAI)

شاخص سطح برگ به عنوان یکی از شاخص های سلامت همواره در مباحث جنگل مورد استفاده قرار گرفته است (Pellegrini et al., 2009; Li et al., 2013; Ellison, 2015). به طوری که افزایشی بودن روند تغییرات این دست مشخصه ها در طول زمان نشان دهنده کاهش آسیب پذیری و حساسیت زیست بوم نسبت به مخاطرات است (Mafi-Gholami et al., 2019; Mafi-Gholami et al., 2021a,b). به این منظور در محدوده جنگلی که در مرحله قبل به دست آمد، از سری تصاویر تصحیح شده کالکشن ۲ ماهواره لندست ۵، ۷، ۸ و ۹، سنجنده های TM و ETM⁺/OLI-2/OLI (Gorelick et al., 2017)، در بازه زمانی ۳۰ ساله با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین، مقدار شاخص سطح برگ به عنوان یکی از شاخص های مهم

سلامت جنگل (Matsushita et al., 2007)، در تمامی سال‌های این دوره که تصاویر فصل تابستان آنها موجود و قابل قبول است محاسبه شد و در نهایت، نقشه میانگین تغییرات شاخص سطح برگ بر اساس انحراف معیار در چهار طبقه کم (کد ۱)، متوسط (کد ۲)، زیاد (کد ۳) و خیلی زیاد (کد ۴) طبقه‌بندی شد (Dintwa et al., 2019).

شاخص ۲: نقشه تراکم

برای تهیه نقشه تراکم جنگل نیاز به بررسی شاخص‌های گیاهی است و از زمانی که مقادیر بسیار زیادی از داده‌ها درباره سطح ماهیت زمین، با استفاده از ماهواره‌های سنجش از دور با قدرت تفکیک‌های مختلف مکانی، زمانی و طیفی و استفاده از تکنیک‌های ترکیبات باندی مناسب استخراج شدند، این داده‌ها به عنوان منابع اصلی برای استخراج عوامل مهمی همچون پوشش گیاهی مطرح شدند و استفاده از شاخص‌های گیاهی برای انجام این کار به عنوان پرفرودارترین روش‌ها مطرح بوده است (Gartner et al., 2014; Hansen et al., 2008; Hilker et al., 2015; Jamali et al., 2014; Kumagai, 2011; Michishita et al., 2012; O'Connell et al., 2014; Spiekermann et al., 2015; Marston et al., 2017). کسب اطلاعات درباره وضعیت پوشش گیاهی مانند مقدار و پراکنش آنها، از اهمیت زیادی برخوردار است (Rahmani et al., 2011). شاخص‌های گیاهی برای ارزیابی و بررسی سلامت گیاهان در مشاهدات ماهواره‌ای طراحی شده‌اند (Boyd et al., 1996). اساس کار این شاخص‌ها بر روی اختلاف باندها است (Rezaei and Fatemi, 2022). براساس قواعد تعریف‌شده، تمامی شاخص‌های مهم (NDVI شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (رابطه ۱) (Rouse et al., 1973; Binh et al., 2005; Koh et al., 2006) شاخص سطح برگ (رابطه ۲)، EVI شاخص بهبودیافته پوشش گیاهی

(رابطه ۳)، SAVI شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌کننده اثر خاک (رابطه ۴) (Huete, 1988)، MSAVI شاخص پوشش گیاهی تعدیل‌کننده اثر خاک اصلاح‌شده (رابطه ۵) (Qi et al., 1994)، AVI شاخص پوشش گیاهی پیشرفته (رابطه ۶)، BSI شاخص خاک لخت (رابطه ۷)، SI شاخص سایه (رابطه ۸) و TI شاخص حرارتی (رابطه ۹) (Rikimaru, 1996; Ray et al., 2013) مربوط به آشکارسازی بهتر پوشش (Pettorelli et al., 2005; Matsushita et al., 2007)، به صورت کد در سامانه گوگل ارث انجین بر روی محدوده جنگلی که در مراحل قبل به دست آمده وارد شده و بر روی تصویر ماهواره‌ای مناسب اعمال شد و نقشه تراکم جنگل با کمک ماسک و ترکیب کردن شاخص‌ها بر روی تصویر به دست آمد و در چهار طبقه کم (کد ۱)، متوسط (کد ۲)، زیاد (کد ۳) و خیلی زیاد (کد ۴) طبقه‌بندی شد. همچنین آنالیزهای ارزیابی دقت آنها از طریق محاسبه دقت کلی و ضریب کاپا انجام شد. ضرورت استفاده از شاخص‌های ذکرشده در این بررسی به دلیل این است که در این شاخص‌ها از باندهایی استفاده شده که وضعیت پوشش گیاهی جهت بررسی جنگل را بهتر نشان می‌دهند (Matsushita et al., 2007).

$$NDVI = \frac{P_{nir} - P_{red}}{P_{nir} + P_{red}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

P_{nir} ، باند طیفی مادون قرمز نزدیک و P_{red} ، باند طیفی قرمز است.

رابطه (۲)

$$LAI = \left(\frac{2.5(P_{nir} - P_{red})}{P_{nir} + C_1 P_{red} - C_2 P_{blue} + L_C} \right) \times 3.618 - 0.118$$

P_{blue} باند طیفی آبی است. L_C برابر یک و C_1 و C_2 ضرایب مقاومت آئروسول هستند که از باند آبی برای تصحیح اثر آئروسول‌ها در باند قرمز استفاده می‌کنند. C_1 برابر با عدد شش و C_2 برابر با عدد ۷/۵ است.

$$EVI = \frac{2.5(P_{nir} - P_{red})}{P_{nir} + C_1 P_{red} - C_2 P_{blue} + L_C} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$SAVI = \frac{P_{nir} - P_{red}(L + 1)}{P_{nir} + P_{red} + L} \quad \text{رابطه (۴)}$$

L، ضریب برای پوشش است.

رابطه (۵)

$$MSAVI = \frac{(2P_{nir} + 1 - \sqrt{(2P_{nir} + 1)^2 - 8(P_{nir} - P_{red})})}{2}$$

رابطه (۶)

$$VI = ((P_{nir} + 1) \times (65536 - P_{red}) \times (P_{nir} - P_{red}))^{1/3}$$

رابطه (۷)

$$BSI = \frac{(P_{SWIR} + P_{red}) - (P_{nir} + P_{blue})}{(P_{SWIR} + P_{red}) + (P_{nir} + P_{blue})} \times 100 + 100$$

P_{SWIR} باند طیفی مادون قرمز طول‌موج کوتاه

است.

رابطه (۸)

$$SI = ((65536 - P_{blue}) \times (65536 - P_{green}) \times (65536 - P_{red}))^{1/3}$$

P_{green} باند طیفی سبز است.

رابطه (۹)

$$L = L_{min} + \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{65536} \right) \times Q$$

$$T = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L} + 1\right)}$$

L، مقدار رادیانس برگشتی در باند مادون قرمز

حرارتی، Q، مقدار عددی پیکسل در باند حرارتی، k_1

و k_2 ، ثابت‌های کالیبراسیون سیستم سنجنده و T، دمای

زمینی بر حسب کلوین است (Rikimaru, 1996).

شاخص ۳، ۴ و ۵: شیب، جهت و ارتفاع

با استفاده از نقشه توپوگرافی با فاصله خطوط مقدار

۲۰ متری استان و ضمن استفاده از توابع موجود در

نرم‌افزار ArcGIS 10.7، نقشه‌های رستری ارتفاع،

جهت و شیب منطقه مورد پژوهش تهیه شد و سپس

در چهار طبقه کم (کد ۱)، متوسط (کد ۲)، زیاد (کد

۳) و خیلی زیاد (کد ۴) طبقه‌بندی شد. تلفیق

شاخص‌های فیزیوگرافی، بر این اصل استوار است که

در صورت افزایش مقادیر این شاخص‌ها به سمت حد

آستانه، مقدار حساسیت و آسیب‌پذیری را افزایش

می‌دهد (Shirmohammadi et al., 2016;)

(Makhdoum, 2002).

شاخص ۶: کاربری/ پوشش اراضی

کاربری/ پوشش اراضی در نتیجه فعل و انفعال میان

عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی شکل می‌گیرد و

به‌عنوان یکی از عوامل مهم در ارزیابی حساسیت در

سامانه‌های بوم‌شناسی عنوان می‌شود (Shao et al.,)

(2020; Nguyen et al., 2019; Jin et al., 2019).

تخریب و از بین رفتن پوشش گیاهی سبب افزایش

حساسیت سامانه بوم‌شناسی می‌شود (Nguyen and)

(Liou, 2019). همچنین مناطق مسکونی و سطوح

نفوذناپذیر نسبت به پوشش گیاهی دارای حساسیت

بالا تری هستند (Nguyen and Liou, 2019) در این

پژوهش نیز نقشه کاربری/ پوشش اراضی در محدوده

مورد پژوهش با استفاده از طبقه‌بندی نظارت شده با

روش ماشین‌بردار پشتیبان (SVM) در چهار طبقه

جنگل و مرتع (کد ۱)، کشاورزی (کد ۲)، مناطق

مسکونی (کد ۳) و اراضی لخت (کد ۴) طبقه‌بندی شد

و بررسی دقت نقشه تهیه‌شده با استفاده از نمونه‌های

زمینی و گوگل ارث انجام شد.

شاخص ۷: متوسط بارندگی سالانه

برای نقشه‌سازی متوسط بارندگی سالانه در سطح

منطقه مورد پژوهش از سری زمانی ۳۰ ساله (۱۴۰۱ -

۱۳۷۲) مقادیر بارندگی ماهانه مربوط به ایستگاه‌های

سینوپتیک و باران‌سنجی واقع و نزدیک به منطقه مورد

پژوهش استفاده شد (جدول ۲) و مقادیر متوسط

بارندگی سالانه برای هر ایستگاه محاسبه شد و پس از

توسعه رابطه رگرسیونی میان مقادیر متوسط بارندگی

سالانه و طول دوره، نرخ تغییرات سالانه این متغیر در

هر ایستگاه به‌دست آمد. با استفاده از توابع موجود در

نرم‌افزار ArcGIS 10.7 نقشه رستری نرخ تغییرات

بارندگی سالانه در سطح شهرستان لردگان تهیه و در

چهار طبقه کم (کد ۱)، متوسط (کد ۲)، زیاد (کد ۳) و

خیلی زیاد (کد ۴) طبقه‌بندی شد. با توجه به اینکه

افزایش مقادیر بارندگی و حجم آب شیرین ورودی به

بوم‌سازگان‌ها سبب کاهش حساسیت آنها نسبت به

انواع مخاطرات می‌شود (Eslami-Andargoli et al.,)

2009; Pokhriyal et al., 2020; Wossenyeleh et al., 2021). بر این اساس رابطه معکوس میان مقادیر بارندگی سالانه و حساسیت جنگل‌ها وجود خواهد داشت.

جدول ۲- نام ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی مورد استفاده

Table 2. The name of the used synoptic and rain gauge stations

ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی		
Synoptic and rain gauge station		
لردگان	سردشت	قلعه رئیسی
Lordegan	Sardasht	Ghale raesi
مال‌خلیفه (فلارد)	دوراهی سادات محمودی	دشت (کهگیلویه)
Mal khalifeh (Felard)	Dorahi sadat mahmoodi	Dasht (Kohgiloh)
سرخون (میانکوه)	امام‌زاده عبدالله	پوله زیلابی
Sarkhon (Miyankoh)	Emamzade abdolah	Pole zilaai
آلونی (خانمیرزا)	بردربر	ماشمی سفلی
Aloni (Khanmirza)	Barbor	Mashme soffli
ارمند علیا	میمند	دیشموک
Armand olia	Maymand	Dishmok
منج بر آفتاب	سینه نمک	صیدون
Monj bar aftab	Sine namak	Saidoon
دهنو گرگ‌اله	کت سیاه	شیوند
Dehno gorgolah	Kate siyah	Shivand

وزن‌دهی به شاخص‌های مربوط به بعد حساسیت

با توجه به اینکه هر یک از شاخص‌های به‌کار رفته در بعد حساسیت اثر متفاوتی در مقدار حساسیت در سامانه‌های بوم‌شناسی دارند (Mafi-Gholami et al., 2015a, 2020a,b)، وزن نسبی هر یک از شاخص‌های مربوط به بعد حساسیت با استفاده از روش دلفی و تجزیه و تحلیل نظرات پنج نفر از متخصصان امر حفاظت و حمایت از رویشگاه‌های جنگلی استان چهارمحال و بختیاری محاسبه شد (خواننده برای دریافت جزئیات بیشتر در مورد فرآیند اجرای روش دلفی به پژوهش انجام‌شده توسط Mafi-Gholami et al. (2015b) رجوع کند).

تهیه نقشه حساسیت رویشگاه

در این پژوهش برای ارزیابی دقیق مکانی، حساسیت رویشگاه مورد پژوهش به سلول‌های شبکه ۳۰ در ۳۰

متر تقسیم‌بندی شد. استفاده از شبکه امکان تجزیه و تحلیل و توصیف رابطه میان شاخص‌های حساسیت را امکان‌پذیر می‌سازد (Carranza-Ortiz et al., 2018; Kumar et al., 2021). به‌همین منظور پس از محاسبه وزن نسبی برای شاخص‌های بعد حساسیت، نقشه رستری طبقه‌بندی شده (استاندارد شده) هر یک از شاخص‌ها در وزن نسبی محاسبه شده ضرب شد.

سپس با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.7، تمامی نقشه‌های رستری وزن‌دار شاخص‌ها از رستر به پوینت تبدیل شد و متوسط مقادیر پوینت‌های موجود در هر سلول شبکه به‌عنوان مقدار شاخص در آن سلول در نظر گرفته شد. سپس از میانگین مقادیر میانگین شاخص‌های حساسیت در هر سلول شبکه (رابطه ۱۰)، مقدار نمایه حساسیت به‌دست آمد (Ellison, 2015; Mafi-Gholami et al., 2021b):

$$\text{رابطه (۱۰)} \quad SI = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

که در این رابطه؛ SI: نمایه حساسیت و x_1 تا x_n : مربوط به هر یک از شاخص‌های اندازه‌گیری شده حساسیت (شاخص سطح برگ، نقشه تراکم، شیب، جهت، ارتفاع، نقشه کاربری/ پوشش اراضی و میانگین بارندگی سالانه) است.

نقشه مقدار حساسیت رویشگاه جنگلی منطقه مورد پژوهش تهیه شده امکان تجزیه و تحلیل و توصیف رابطه میان شاخص‌های حساسیت را امکان‌پذیر می‌سازد. در نهایت، رابطه (درجه تأثیر) میان نمایه حساسیت و هر یک از شاخص‌ها (متغیرها) با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون (r) بررسی شد.

نتایج

مرز محدوده جنگل از غیرجنگل با روش طبقه‌بندی نظارت‌شده ماشین‌بردار پشتیبان در منطقه مورد پژوهش با استفاده از میانگین سری تصاویر ماهواره لندست ۵، ۷، ۸ و ۹، سنجنده‌های TM و OLI- ETM+ لندست ۲/ OLI/ تهیه شد (شکل ۱). براساس تئوری احتمال دوجمله‌ای برای رسیدن به صحت مورد انتظار ۸۵ درصد با خطای قابل قبول پنج درصد و همچنین سطح احتمال ۹۵ درصد (Z تقریباً برابر با دو)، حداقل ۲۰۴ نقطه زمینی برای بررسی صحت مورد نیاز است. که بسیاری از پژوهش‌های سنجش از دور اشاره داشتند که مقدار صحت ۸۵ درصد برای نقشه‌های موضوعی حاصل از روش‌های طبقه‌بندی مطلوب است. نتایج صحت‌سنجی تعیین مرز محدوده جنگل، تراکم جنگل و کاربری/ پوشش اراضی در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳- صحت‌سنجی

Table 3. Checking accuracy

ضریب کاپا Kappa	دقت کلی Overall Accuracy	الگوریتم طبقه‌بندی کننده Classifier algorithm
0.887	91.1	محدوده جنگل Forest area
0.905	93.4	تراکم جنگل Forest density
0.918	96.2	کاربری/ پوشش اراضی Land use/land cover

نتایج بررسی کیفیت داده‌های بارندگی

در بررسی انجام‌شده تعداد سه ایستگاه باران‌سنجی (مُنچ بَر آفتاب- دهنو گرگ اله- سردشت) و یک ایستگاه سینوپتیک (لردگان) در منطقه مورد پژوهش وجود داشت. از این‌رو، به‌علت کم‌بودن تعداد ایستگاه‌های مورد بررسی، جهت پایش بهتر و دقیق‌تر از ایستگاه‌های باران‌سنجی مجاور منطقه مورد نیز پژوهش استفاده شد و تعداد ۲۱ ایستگاه یافت و مورد

بررسی قرار گرفت. سپس بر روی ایستگاه‌هایی که دارای نقص آماری بودند با استفاده از ایستگاه‌های مجاور، ابتدا بررسی همبستگی انجام شد و با توجه به اینکه تمامی ایستگاه‌های مجاور با ایستگاه‌های دارای نقص، در تمامی ماه‌ها، دارای همبستگی مثبت و بالای ۰/۶ (بین ۰/۸ تا ۰/۹۹) بودند، عملیات بازسازی داده در نرم‌افزار SPSS انجام و نقص آنها برطرف شد. همچنین با اجرای روش نمودار جعبه‌ای در نرم‌افزار

SPSS و نیز بررسی گزارش‌های هواشناسی، داده‌های پرت موجود در سری زمانی مقادیر بارندگی کلیه ایستگاه‌های منتخب شناسایی و حذف شدند. نتایج بررسی مقدار نرمال بودن توزیع مقادیر بارندگی نشان داد که سطح معناداری در آزمون کولموگروف-اسمیرنف بیشتر از ۰/۰۵ می‌باشد که نشان از نرمال بودن توزیع مقادیر داده‌های بارندگی است (جدول ۴).

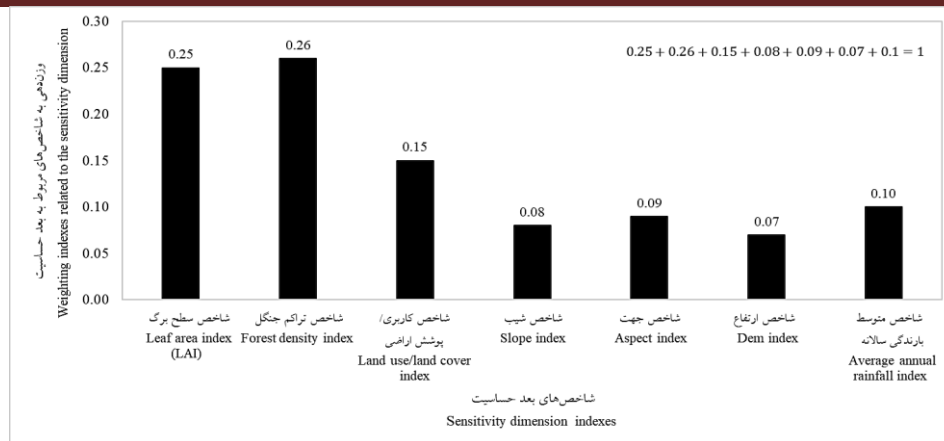
نتایج بررسی مقدار چولگی و کشیدگی داده‌ها نشان داد که مقادیر این دو ضریب برای سری داده‌های بارندگی مورد بررسی در کلیه ایستگاه‌های منتخب بین دو بازه ۲- تا ۲ قرار دارند که نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع مقادیر بارندگی بودند و سپس برای نقشه‌سازی متوسط بارندگی سالانه مورد استفاده قرار گرفتند.

جدول ۴- مقایسه مقادیر مختلف آماره $\bar{D}$ در ایستگاه‌های منتخبTable 4. Comparison of different values of $\bar{D}$ statistic in selected stations

Sig.	ایستگاه Station	Sig.	ایستگاه Station	Sig.	ایستگاه Station
0.411	قلعه رئیسی Ghale raeksi	0.233	سردشت Sardasht	0.657	لردگان Lordegan
0.489	دشت (کهگیلویه) Dasht (Kohgiloh)	0.445	دوراهی سادات محمودی Dorahi sadat mahmoodi	0.568	مال‌خلیفه (فلارد) Mal khalifeh (Felard)
0.312	پوله زیلائی Pole zilaiei	0.549	امام‌زاده عبدالله Emamzade abdolah	0.752	سرخون (میانکوه) Sarkhon (Miyankoh)
0.389	ماشمی سفلی Mashme sofli	0.501	بردبر Barbor	0.825	آلونی (خانمیرزا) Aloni (Khanmirza)
0.689	دیشموک Dishmok	0.674	میمند Maymand	0.784	ارمند علیا Armand olia
0.544	صیدون Saidoon	0.215	سینه نمک Sine namak	0.589	منج بر آفتاب Monj bar aftab
0.447	شیوند Shivand	0.267	کت سیاه Kate siyah	0.668	دهنو گرگ‌اله Dehno gorgolah

برگ، تراکم جنگل، کاربری/ پوشش اراضی، شیب، جهت، ارتفاع و متوسط بارندگی سالانه در شکل‌های (۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰) آورده شده است.

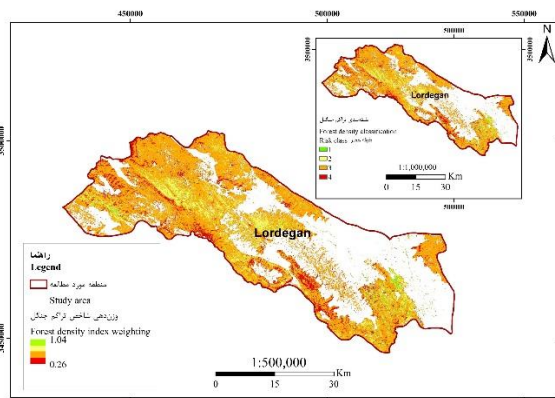
نتایج نقشه‌سازی و وزندهی شاخص‌های مورد پژوهش نتیجه وزندهی مربوط به شاخص‌ها، توسط کارشناسان و مختصصان در شکل ۳ و نتیجه حاصل از نقشه وزندهی شده شاخص‌های تغییرات شاخص سطح



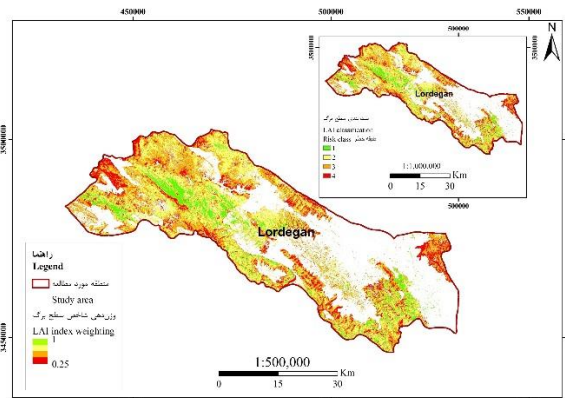
شکل ۳- نقشه وزن‌دهی به شاخص‌های مربوط به بعد حساسیت
Figure 3. Weighting indexes related to the sensitivity dimension map

توجه به اهمیت آنها داده‌اند و مجموع وزن تمامی شاخص‌ها برابر با یک می‌باشد.

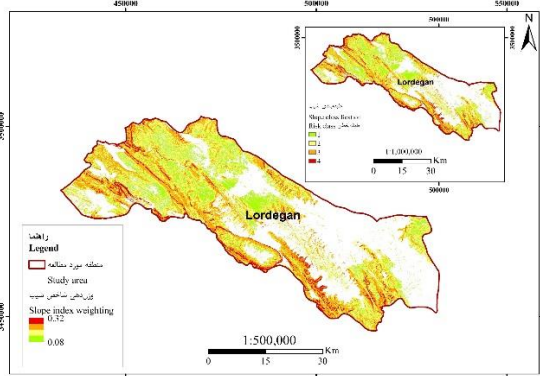
کارشناسان و متخصصین این حوزه با استفاده از روش دلفی، به هر یک از شاخص‌ها، وزن مربوطه را با



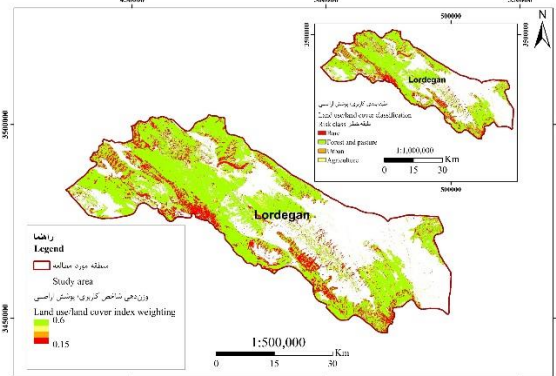
شکل ۵- نقشه وزن‌دهی شاخص تراکم جنگل
Figure 5. Forest density index weighting map



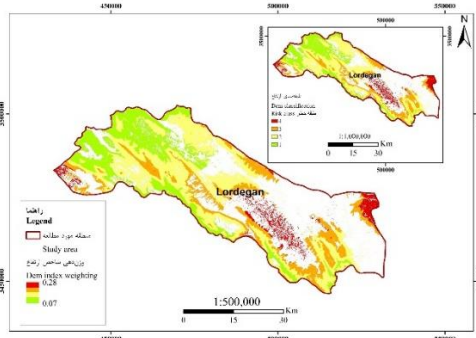
شکل ۴- نقشه وزن‌دهی شاخص سطح برگ (LAI)
Figure 4. Leaf area index (LAI) weighting map



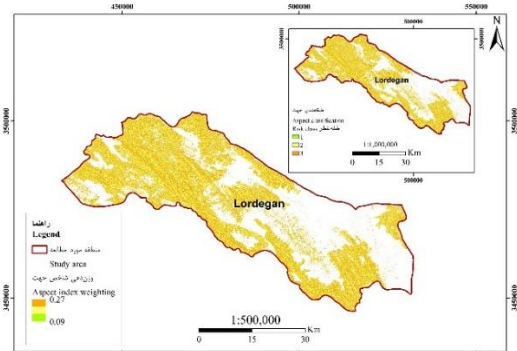
شکل ۷- نقشه وزن‌دهی شاخص شیب
Figure 7. Slope index weighting map



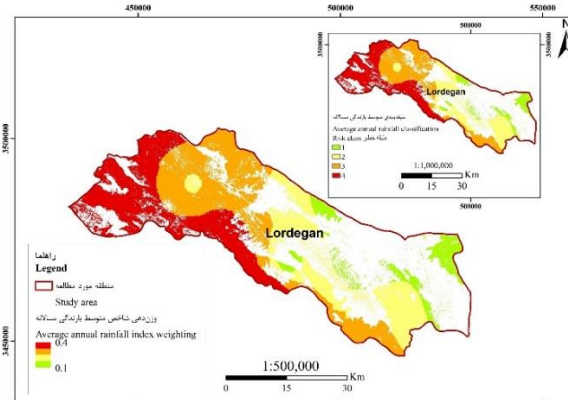
شکل ۶- نقشه وزن‌دهی شاخص کاربری / پوشش اراضی
Figure 6. Land use/cover index weighting map



شکل ۹- نقشه وزن دهی شاخص ارتفاع
Figure 9. Dem index weighting map



شکل ۸- نقشه وزن دهی شاخص جهت
Figure 8. Aspect index weighting map



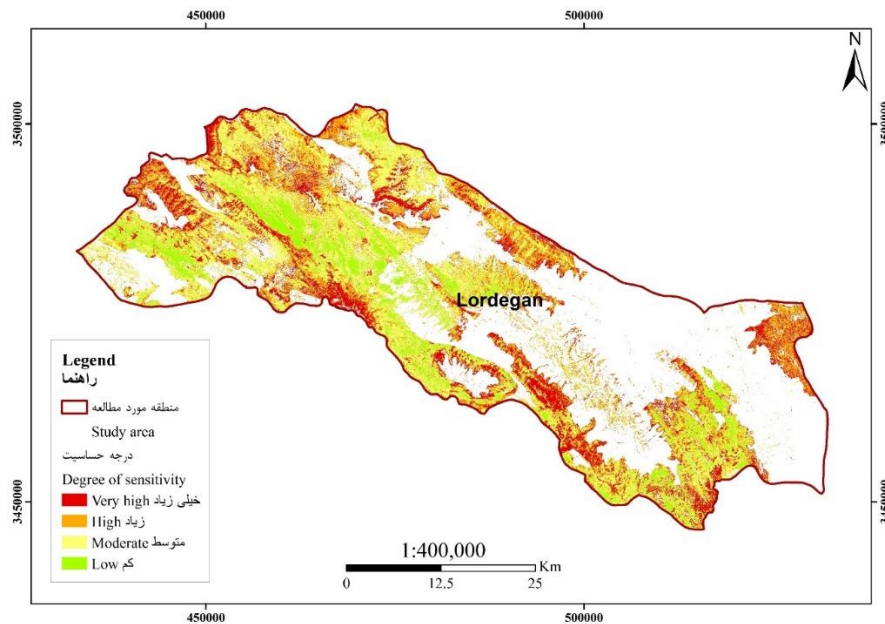
شکل ۱۰- نقشه وزن دهی شاخص متوسط بارندگی سالانه
Figure 10. Average annual rainfall index weighting map

نسبت به دیگر مناطق دارند. به عبارتی مناطقی که شاخص سطح برگ بالاتر و درصد تراکم جنگلی متوسط تا خیلی زیاد را داشتند از آسیب پذیری و حساسیت کمتری برخوردارند.

همچنین تلفیق شاخص های فیزیوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع)، نشان داد که در صورت افزایش مقادیر این شاخص ها به سمت حد آستانه، مقدار حساسیت و آسیب پذیری نیز افزایش می یابد و کاهش مقدار متوسط بارندگی سالانه در منطقه مورد پژوهش سبب افزایش حساسیت رویشگاه می شود بر این اساس رابطه معکوس میان مقادیر بارندگی سالانه و حساسیت جنگل ها وجود دارد.

نقشه حساسیت رویشگاه

نتیجه میانگین مقادیر شاخص های حساسیت در هر سلول شبکه در قالب نمایه حساسیت در شکل ۱۱ آورده شده است. طبقه بندی نقشه درجه حساسیت رویشگاه های جنگلی مورد پژوهش نشان داد که ۱۸۳۸۶/۳۴ هکتار (۱۴/۴۴ درصد)، ۴۸۳۳۳/۵۸ هکتار (۳۷/۹۶ درصد)، ۳۸۱۷۹/۱۸ هکتار (۳۰ درصد) و ۲۲۴۰۵/۹۰ هکتار (۱۷/۶۰ درصد) از کل وسعت کل رویشگاه به ترتیب در طبقات با سطح حساسیت کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد قرار داشتند. نتایج طبقه بندی درجه حساسیت در رویشگاه های شهرستان لردگان نشان داد، مناطقی که از مقدار پوشش گیاهی کمتری برخوردارند درجه آسیب پذیری و حساسیت بالاتری



شکل ۱۱- نقشه درجه‌بندی حساسیت
Figure 11. Sensitivity grading map

شاخص تراکم جنگل و سطح برگ و جهت به ترتیب دارای بیشترین و کمترین همبستگی (درجه تأثیر) با نمایه حساسیت در میان تمامی شاخص‌های منتخب بودند (جدول ۵).

تجزیه و تحلیل رابطه آماری (درجه تأثیر) میان شاخص‌ها (متغیرها) و نمایه حساسیت نشان داد که همبستگی معناداری میان تمامی شاخص‌ها و نمایه حساسیت در سطح رویشگاه‌های جنگلی مورد پژوهش وجود دارد ($p < 0.001$ و $r > 0.45$). نتایج نشان داد که دو

جدول ۵- همبستگی (درجه تأثیر) شاخص‌ها و نمایه حساسیت در سطح رویشگاه‌های جنگلی شهرستان لردگان
Table 5. Correlation (degree of influence) of indicators and sensitivity profiles in the forest habitats of Lordegan city

شاخص	نمایه حساسیت	شاخص	نمایه حساسیت
Index	Sensitivity index	Index	Sensitivity index
سطح برگ	*0.85	جهت	*0.45
LAI		Aspect	
تراکم جنگل	*0.92	ارتفاع	*0.54
Forest density		Dem	
کاربری/ پوشش اراضی	*0.75	متوسط بارندگی سالانه	*-0.70
Land use/land cover		Average annual rainfall	
شیب	*0.63		
Slope			

* همبستگی آماری در سطح ۵ درصد ($p < 0.001$)

Statistical correlation at the 5% significance level ($p < 0.001$)

بحث

با مقدار این نمایه در سطح رویشگاه‌های جنگلی مورد پژوهش نیز نشان دهنده همبستگی بالا (درجه تأثیر) میان شاخص سطح برگ و نمایه حساسیت بود. نتایج طبقه‌بندی کاربری/ پوشش اراضی که در نتیجه فعل و انفعال میان عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی شکل می‌گیرد (Shao et al., 2020; Nguyen et al., 2019; Jin et al., 2019)، بیان‌گر این مسئله بود که مناطقی که دارای پوشش گیاهی به صورت جنگل و مرتع بودند در درجه‌بندی حساسیت از حساسیت کم‌تری نسبت به سطوح نفوذناپذیر برخوردار بودند که با نتایج Nguyen and Liou (2019) همسو است. در تبیین این یافته می‌توان بیان کرد که از بین رفتن پوشش گیاهی، گسترش کشاورزی، افزایش مناطق مسکونی سبب افزایش حساسیت مناطق جنگلی می‌شود و آنها را به زیست‌بومی حساس و نیازمند به حفاظت تبدیل می‌کند (Nguyen and Liou, 2019). نتایج طبقه‌بندی متوسط بارندگی سالانه نیز بیان‌گر رابطه‌ی عکس میان مقادیر بارندگی سالانه و حساسیت جنگل‌ها بود (Eslami-Andargoli et al., 2009; Pokhriyal et al., 2020; Wossenyeleh et al., 2021)، بر این اساس نیز پژوهش‌های پیشین، حاکی از آن هستند که با کاهش بارندگی، وقوع خشکسالی افزایش می‌یابد و سبب تغییرات ساختاری همانند کاهش پوشش جنگلی و تراکم درختان می‌شود، که این امر سبب افزایش حساسیت و آسیب‌پذیری می‌شود (Ellison, 2015; Gilman et al., 2008). تحلیل رابطه آماری (درجه تأثیر) میان بارندگی و نمایه حساسیت در سطح رویشگاه‌های جنگلی مورد پژوهش نیز تأییدکننده رابطه معکوس (ضریب همبستگی منفی) میان آنها بود. همچنین شاخص‌های فیزیوگرافی (شیب، جهت و ارتفاع)، نشان دادند که در صورت افزایش بودن مقادیر این شاخص‌ها و قرارگیری آنها در دسته طبقه خطر زیاد

بررسی درجه حساسیت رویشگاه‌های جنگلی یکی از بخش‌های اصلی ارزیابی آسیب‌پذیری محسوب می‌شود (Pellegrini et al., 2009; Ellison, 2015; Mafi-Gholami et al., 2021a,b; Mafi-Gholami and Jaafari, 2021). برای همین، در این پژوهش طبقه‌بندی درجه حساسیت رویشگاه‌های جنگلی شهرستان لردگان در استان چهارمحال و بختیاری در یک دوره ۳۰ ساله با استفاده از ویژگی‌های ساختاری در رویشگاه‌های جنگلی (تراکم جنگل، شاخص سطح برگ، کاربری/ پوشش اراضی) و بیوفیزیکی (ویژگی‌های زمین ریخت‌شناسی، و آب‌شناختی: شیب، جهت، ارتفاع، متوسط بارندگی سالانه) انجام شد. نتایج طبقه‌بندی درجه حساسیت رویشگاه‌های شهرستان لردگان نشان داد، مناطقی که شاخص سطح برگ و درصد تراکم جنگل بالاتری دارند و در طبقه‌بندی چهارگانه شاخص سطح برگ و تراکم جنگل در دسته طبقه خطر کم (کد ۱)، متوسط (کد ۲) قرار می‌گیرند نسبت به مناطقی که در دسته طبقه خطر زیاد (کد ۳) و خیلی زیاد (کد ۴) قرار می‌گیرند در نقشه درجه حساسیت نهایی از حساسیت و آسیب‌پذیری کم‌تری برخوردارند. در تبیین این یافته می‌توان بیان کرد که با افزایش مقدار پوشش جنگلی، مقدار حساسیت و آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد (Mafi-Gholami et al., 2019; Mafi-Gholami et al., 2021b)؛ چراکه شاخص مهم تراکم جنگل (Beygi et al., 2023) و سطح برگ از شاخص‌های سلامت می‌باشند (Pellegrini et al., 2009; Li et al., 2013; Ellison, 2015). و افزایشی بودن آن در برخی مناطق نسبت به مناطق دیگر نشان از آسیب‌پذیری و حساسیت کم‌تر آن مناطق است (Mafi-Gholami et al., 2019; Mafi-Gholami et al., 2021b). نتایج تحلیل همبستگی (درجه تأثیر) شاخص‌های حساسیت

(کد ۳) و خیلی زیاد (کد ۴)، مقدار حساسیت و آسیب‌پذیری، روندی به صورت صعودی خواهد داشت (Shirmohammadi et al., 2016; Makhdoum, 2002).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که ارزیابی دقیق مکانی شاخص‌های مربوط به حساسیت در رویشگاه‌های جنگلی لردگان با سلول‌های شبکه ۳۰ در ۳۰ متر که امکان تجزیه و تحلیل و توصیف رابطه میان شاخص‌های حساسیت را امکان‌پذیر می‌سازد، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، اطلاعات هواشناسی و فیزیوگرافی می‌تواند به عنوان ابزاری مفید و موثر برای درجه‌بندی حساسیت این زیست‌بوم‌ها مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین این پژوهش می‌تواند به عنوان یکی از ابعاد مهم آسیب‌پذیری مورد استفاده در دیگر ابعاد آسیب‌پذیری قرار بگیرد. نتایج این بررسی با جمع‌آوری اطلاعات موثر در رابطه با درجه حساسیت رویشگاه‌های

جنگلی لردگان می‌تواند به عنوان راهنما برای برنامه‌ریزی جهت طرح‌های مربوط به سازگاری نسبت به تغییرات اقلیمی و مخاطرات مورد استفاده سازمان‌های مربوطه قرار بگیرد. روند افزایشی این تغییرات و در ادامه تأثیر آنها بر افزایش مقدار حساسیت و آسیب‌پذیری رویشگاه‌های جنگلی در بازه بلندمدت نشان می‌دهد که در سال‌های آینده در صورت عدم نظارت و مدیریت، این جنگل‌ها بیش از پیش تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، مخاطرات طبیعی و انسانی قرار خواهند گرفت و در ادامه افت کیفیت و تخریب این جنگل‌ها را به همراه خواهد داشت. پژوهش‌های آینده می‌تواند با بررسی دو بعد اساسی دیگر آسیب‌پذیری (در معرض قرارگرفتن و ظرفیت سازش‌پذیری) در کنار بعد آسیب‌پذیری و توجه به نقش جوامع انسانی با توجه به رویکرد سامانه زوجی اجتماعی-بوم‌شناسی انجام شود و تصویر دقیق‌تری از مقدار آسیب‌پذیری مناطق جنگلی ارائه دهد.

References

- Adger, W.N., Vulnerability. *Global Environmental Change* **2006** 16 (3), 268- 281.
- Amiri, T.; Banj Shafiei, A.; Erfanian, M.; Hosseinzadeh, O.; Beygi Heidarlou, H., Determining of effective criteria in locating firefighting station in forest. *Forest Research and Development* **2017** 2 (4), 379-393. (In Persian)
- Beygi Heidarlou, H.; Karamat Mirshekarlou, A.; Sasanifar, S.; Khezryan, B., Forest cover density mapping of Zagros forests using Landsat-9 imagery and hemispherical photographs. *Forest Research and Development* **2023** 9 (1), 47-65. (In Persian)
- Binh, T.N.K.D.; Vromant, N.; Hung, N.T.; Hens, L.; Boon, E.K., Land Cover Changes Between 1968 and 2003 In Cai Nuoc, Ca Mau Peninsula, Vietnam. *Environ Dev Sustain* **2005** 7, 519- 536.
- Boyd, D.S.; Foody, G.M.; Curran, P.J.; Lucas, R.M.; Honzak, M., An assessment of radiance in Landsat TM middle and thermal infrared wavebands for the detection of tropical forest regeneration. *International Journal of Remote Sensing* **1996** 17, 249-261.
- Carranza-Ortiz, G.; Gómez-Mendoza, L.; Caetano, E.; Infante Mata, D., Vulnerability of human communities in Mexican mangrove ecosystems: An ecosystem-based adaptation approach. *Investigaciones Geográficas* **2018** (95), 1-18.
- Delpasand, S.; Maleknia, R.; Naghavi, H., Modelling of forest cover change to identify suitable areas for REDD+ projects (case study: Lordegan county). *Forest Research and Development* **2022** 7 (4), 577- 594. (In Persian)
- Dintwa, K.F.; Letamo, G.; Navaneetham, K., Measuring social vulnerability to natural hazards at the district level in Botswana. *Journal of Disaster Risk Studies* **2019** 11 (1), 1- 11.
- Ebi, K.L.; Kovats, R.S.; Menne, B., An approach for assessing human health vulnerability and public health interventionsto adapt to climate change. *Environ Health Perspect* **2006** 114, 1930- 1934.

- Ellison, J.C., Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts. *Wetlands Ecology and Management* **2015** 23 (2), 115- 137.
- Eslami-Andargoli, L.; Dale, P.; Sipe, N.; Chaseling, J., Mangrove expansion and rainfall patterns in Moreton Bay. *Southeast Queensland, Australia* **2009** 2 (85), 292- 298.
- Fatahi, S.; Khoshdeli, f.; Taghizadegan, M.; Kanavati, N.; Darudi, M., Strategic problem analysis of the development of Chaharmahal and Bakhtiari province. *Center for Strategic Studies* **2016** 1- 44. (In Persian)
- Gartner, P.; Forster, M.; Kurban, A.; Kleinschmit, B., Object based change detection of Central Asian Tugai vegetation with very high spatial resolution satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **2014** 31, 110- 121.
- Gilman, E.L.; Ellison, J.; Duke, N.C.; Field, C., Threats to mangroves from climate change and adaptation options: a review. *Aquatic botany* **2008** 89 (2), 237- 250. پ.ب
- Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R., Google Earth Engine (GEE): Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Journal of Remote Sensing of Environment* **2017** 202, 18- 27.
- Gualtieri, J.A.; Crompton, R.F., Support vector machines for hyperspectral remote sensing classification. In: Proceedings of the 27th AIPR Workshop: Advances in Computer Assisted Recognition, Washington, DC, 27 October. SPIE. *Washington* **1998**, 221- 232.
- Hansen, M.C.; Roy, D.P.; Lindquist, E., Adusei, B.; Justice, C.O.; Altstatt, A., A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin. *Remote Sensing of Environment* **2008** 112, 2495- 2513.
- Hilker, T.; Lyapustin, A.I.; Hall, F.G.; Myneni, R.; Knyazikhin, Y.; Wang, Y.; Tucker, C.J.; Sellers, P.J., On the measurability of change in Amazon vegetation from MODIS. *Remote Sensing of Environment* **2015** 166, 233- 242.
- Huete, A.R., A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* **25** **1988**, 295- 309.
- Iranmanesh, Y.; Jahanbazi Gojani, H., Comparison of wild almond plantation on north and south aspects of degraded forest in Zagros region of Iran. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* **2007** 15, 19-31. (In Persian)
- Jaafari, A.; Najafi, A.; Mafi-Gholami, D., Analytic network process (ANP) an approach to sustainable forest management in the zagros. *Natural ecosystems of Iran* **2011** 2 (2), 1- 10. (In Persian)
- Jamali, S.; Seaquist, J.; Eklundh, L.J., Automated mapping of vegetation trends with polynomials using NDVI imagery over the Sahel. *Remote Sensing of Environment* **2014** 141, 79- 89.
- Jazirehi, H.M.; Ebrahimi Rastaghi, M., Silviculture of Zagros forests. Tehran university **2004**, 560p. (In Persian)
- Jennerjahn, T.C.; Gilman, E.; Krauss, K.W.; Lacerda, L.D.; Nordhaus, I.; Wolanski, E., Mangrove ecosystems under climate change. In Mangrove Ecosystems: A Global Biogeographic Perspective. *Springer Cham* **2017**, 211- 244.
- Jensen, J., Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (3rd ed.), Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall **2005**, 526p.
- Jin, X.; Jin, Y.; Mao, X., Ecological risk assessment of cities on the Tibetan Plateau based on land use/land cover changes Case study of Delingha City. *Ecological Indicators* **2019** 101, 185- 191.
- Kelly, P.M.; Adger, W.N., Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation. *Clim Change* **2000** 47, 325- 352.
- Khoi, D.D.; Murayama, Y., Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region. Vietnam. *Remote Sensing* **2011** 2 (5), 1249-1272.
- Koh, C.N.; Lee, P.F.; Lin, R.S., Bird species richness patterns of northern Taiwan: primary productivity, human population density, and habitat heterogeneity. *Divers Distr* **2006** 12, 546- 554.
- Kumagai, K., Verification of the analysis method for extracting the spatial continuity of the vegetation distribution on a regional scale, Computers. *Environment and Urban Systems* **2011** 35, 399- 407.
- Kumar, N.; Poonia, V.; Gupta, B.; Kumar-Goyal, M., A novel framework for risk assessment and resilience of critical infrastructure towards climate change. *Technological Forecasting and Social Change* **2021** 165, 120532.

- Lambin, E.F.; Meyfroidt, P., Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proc Natl Acad Sci* **2011** *108* (9), 3465- 3472.
- Li, M.S.; Mao, L.J.; Shen, W.J.; Liu, S.Q.; Wei, A.S., Change and fragmentation trends of Zhanjiang mangrove forests in southern China using multi-temporal Landsat imagery (1977- 2010). *Estuarine. Coastal and Shelf Science* **2013** *130*, 111- 120.
- Lindner, M.; Maroschek, M.; Netherer, S.; Kremer, A.; Barbati, A.; Gonzalo, J.G.; Seidl, R.; Delzon, S.; Corona, P.; Kolstrom, M.; Lexer, M.J.; Marchetti, M., Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* **2010** *259*, 698- 709.
- Mafi-Gholami, D.; Feghhi, J.; Danehkar, A.; Yarali, N., Prioritizing stresses and disturbances affecting mangrove forests using Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP). Case study: mangrove forests of Hormozgan Province, Iran. *Advances in Environmental Sciences* **2015a** *7* (3), 442- 459.
- Mafi-Gholami, D.; Feghhi, J.; Danehkar, A.; Yarali, N., 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* **2015b** *6* (3).
- Mafi-Gholami, D.; Zenner, E.K.; Jaafari, A.; Bakhtiari, H.R.; Bui, D.T., Multi-hazards vulnerability assessment of southern coasts of Iran. *Environmental Management* **2019** *252*, 109628.
- Mafi-Gholami, D.; Jaafari, A.; Zenner, E.K.; Kamari, A.N.; Bui, D.T., Spatial modeling of exposure of mangrove ecosystems to multiple environmental hazards, *Sci. Total Environ* **2020a** *740*, 140167.
- Mafi-Gholami, D.; Jaafari, A.; Zenner, E.K.; Kamari, A.N.; Bui, D.T., Vulnerability of coastal communities to climate change: thirty-year trend analysis and prospective prediction for the coastal regions of the Persian Gulf and the Gulf of Oman, *Sci. Total Environ* **2020b** *741*, 140305.
- Mafi-Gholami, D.; Jaafari, A., Mapping the sensitivity of mangroves of the Hormozgan Province to environmental hazards based on the canopy cover percentage. *Forest Research and Development* **2021a** *7* (1), 27- 43. (In Persian)
- Mafi-Gholami, D.; Pirasteh, S.; Ellison, J.C.; Jaafari, A., Fuzzy-based vulnerability assessment of coupled social- ecological systems to multiple environmental hazards and climate change. *Environmental Management* **2021b** *299*, 113573.
- Makhdoum, M.F., Degradation Model: A Quantitative EIA Instrument, Acting as a Decision Support System (DSS) for Environmental Management. *Environ. Manage* **2002** *30* (1), 151- 156.
- Marston, C.G.; Aplin, P.; Wilkinson, D.M.; Field, R.; O'Regan, H.J., Scrubbing Up: Multi-Scale Investigation of Woody Encroachment in a Southern African Savannah. *Remote Sensing* **2017** *9*, 419.
- Matsushita, B.; Wei, Y.; Jin, C.; Yuyichi, O.; Guoyn, Q., Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density Cypress forest. *Sensors*. 2007
- McCoy, R.M., Field methods in remote sensing. Guilford Press. 2005
- Michishita, R.; Jiang, Z.; Gong, P.; Xu, B., Bi-scale analysis of multitemporal land cover fractions for wetland vegetation mapping, ISPRS. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **2012** *72*, 1- 15.
- Mildrexler, D.; Yang, Z.; Cohen, W.B.; Bell, D.M., A forest vulnerability index based on drought and high temperatures. *Remote Sensing of Environment* **2016**, *173*, 25- 314.
- Mohammad nejad Kiasari, Sh.; Sagheb-Talebi, Kh.; Rahmani, R.; Adeli, E.; Jafari, B.; Jafarzadeh, H., Quantitative and qualitative evaluation of plantations and natural forest at Darabkola, east of Mazandaran. *Forest and Poplar Research* **2010** *18* (3), 337-351. (In Persian)
- Mohammadi, A.; Khodabandehlou, B., Classification and assessment of land-use changes in Zanzan city using object-oriented analysis and Google Earth Engine (GEE) system. *Geography and Environmental Planning* **2020** *31* (2), 25- 42. (In Persian)
- Nguyen, K.A.; Liou, Y.A., Mapping global eco-environment vulnerability due to human and nature disturbances. **2019** *6*, 862- 875.
- Nguyen, K.A.; Liou, Y.A.; Terry, J.P., Vulnerability of Vietnam to typhoons: A spatial assessment based on hazards, exposure and adaptive capacity. *Science of*

- The Total Environment* **2019** 10 (682), 31-46.
- O'Connell, J.; Connolly, J.; Holden, N.M., A monitoring protocol for vegetation change on Irish peatland and heath. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2014** 31, 130- 142.
- Paul, A.; Deka, J.; Gujre, N.; Rangan, L.; Mitra, S., Does nature of livelihood regulate the urban community's vulnerability to climate change? Guwahati city, a case study from North East India. *Environmental Management* **2020**, 251.
- Pellegrini, J.A.C.; Soares, M.L.G.; Chaves, F.O.; Estrada, G.C.D.; Cavalcanti, V.F., A method for the classification of mangrove forests and sensitivity/vulnerability analysis. *Journal of Coastal Research* **2009**, 443- 447.
- Pettorelli, N.; Vik, J.O.; Mysterud, A.; Gaillard, J.M.; Tucker, C.J.; Stenseth, N.C., Using the satellite derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution* **2005** 9 (20), 200- 216.
- Pokhriyal, P.; Rehman, S.; Areendran, G.; Raj, K.; Pandey, R.; Kumar, M.; Sahana, M.; Sajjad, H., Assessing forest cover vulnerability in Uttarakhand, India using analytical hierarchy process. *Modeling Earth Systems and Environment* **2020** 6, 821- 831.
- Polsky, C.; Neff, R.; Yarnal, B., Building comparable global change vulnerability assessments: the vulnerability scoping diagram. *Global Environ Change* **2007** 17, 472- 485.
- Qi, J.; Chehbouni, A.; Huete, A.R.; Kerr, Y.H.; Sorooshian, S., A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* **1994** 48, 119- 126.
- Rahmani, N.; Shahedi, K.; Mir yagoub Zadeh, M., The evaluation vegetation index used in remote sensing (Case Study Hrysk basin). Geomatics, Tehran, National Cartographic Center. 2011 (In Persian)
- Ray, R.; Paul, A.K.; Basu, B., Application of supervised enhancement technique in monitoring the mangrove forest cover dynamics-a study on Ajmalhari reserve forest, Sundarban, West Bengal. *International Journal of Geoscience and Remote Sensing* **2013** 2 (1), 16- 21.
- Rezaei, Y.; Fatemi, S.B. *Basics of remote sensing. Free publications* **2022**, 350p. (In Persian)
- Rikimaru, A., LAMDSAT TM data processing guide for forest canopy density mapping and monitoring model, In ITTO workshop on Utilization of Remote Sensing in Site Assessment and Planning for Rehabilitation of Logged-over Forest **1996**, 1- 8.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W., Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite), Third ERTS (Earth Resources Technology Satellite) Symposium, Greenbelt **1973**, 309- 317.
- Scholkopf, B.; Smola, A.J., Statistical learning and kernel methods. *Cambridge* **2000**, 29p.
- Shao, Y.; Jiang, Q.O.; Wang, Ch.; Wang, M.; Xiao, L.; Qi, Y., Analysis of critical land degradation and development processes and their driving mechanism in the Heihe River Basin. *Science of The Total Environment* **2020** 10 (716), 1- 11.
- Sharma, J.; Uggupta, S.; Kumar, R., Assessment of inherent vulnerability of forests at landscape level: a case study from Western Ghats in India. *Mitig Adapt Strat Global Change* **2015**
- Sharma, J.; Uggupta, S.; Jayaraman, M.; Chaturvedi, R.K.; Bala, G.; Ravindranath, N.H., Vulnerability of forests in India: a national scale assessment. *Environmental management* **2017** 60 (3), 544- 553.
- Shirmohammadi, I.; Jahani, A.; Etemad, V.; Zargham, N.A.; Makhdum, M., Development Environmental Impact Assessment (EIA) on Karkas Protected Area by Using Destruction. *Environmental Researches* **2016** 7 (14), 91- 102. (In Persian)
- Smit, B.; Pilifosova, O., Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. In: McCarthy, J.J.; Canziani, O.; Leary, N.A.; Dokken, D.J.; White K.S., Climate Change 2003: Impacts, Adaptation and Vulnerability. IPCC Working Group II. *Cambridge University Press Cambridge* **2003**, 877- 912.
- Spiekermann, R.; Brandt, M.; Samimi, C., Woody vegetation and land cover changes in the Sahel of Mali (1967- 2011). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* **2015** 34, 113- 121.
- Statistical yearbook of the country, Iran Statistics Center **2019**, 930p. (In Persian)
- Turner, B.L.; Kasperson, R.E.; Matson, P.A.; McCarthy, J.J.; Corell, R.W.; Christensen, L.; Eckley, N.; Kasperson, J.X.; Luers, A.; Martello, M.L.; Polsky, C.; Pulsipher, A.; Schiller, A., A framework for vulnerability

- analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences US* **2003a** 100, 8074- 8079.
- Turner, B.L.; Matson, P.A.; McCarthy, J.J.; Corell, R.W.; Christensen, L.; Eckley, N.; Hove-Isrud-Broda, G.K.; Kasperson, J.X.; Kasperson, R.E.; Luers, A.; Martello, M.L.; Mathiesen, S.; Naylor, R.; Polsky, C.; Pulsipher, A.; Schiller, A.; Selin, H.; Tyler, N., Illustrating the coupled humanenvironment system for vulnerability analysis: three case studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences US* **2003b** 100, 8080-8085.
- Uppgupta, S.; Sharma, J.; Jayaraman, M.; Kumar, V.; Ravindranath, N.H., Climate change impact and vulnerability assessment of forests in the Indian Western Himalayan region: A case study of Himachal Pradesh, India. *Climate Risk Management* **2015** 10, 63- 76.
- Wossenyeleh, B.K.; Worku, K.A.; Verbeiren, B.; Huysmans, M., Drought propagation and its impact on groundwater hydrology of wetlands: a case study on the Doode Bemde nature reserve (Belgium). *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2021** 1 (21), 39-51.
- Yaghmaei, L.; Khodagholi, M.; Soltani, S.; Saboohi, R., Effect of climatic factors on distribution of forest types using multivariate statistical methods. *Forest* **2009** 1 (3), 239-251. (In Persian)