

Evaluating the Spatiotemporal Dynamics and Recovery of Ecological Environmental Quality Post-Flood in Lorestan Province Using Remote Sensing

Ali Mehrabi¹

1. Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
E-mail: Mehrabi@uk.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 05 Jun 2026

Received in revised form:
21 Jul 2026

Accepted: 17 Aug 2026

Available online: 23 Sep 2026

Keywords:

Flood hazard,
Ecological environment,
Remote sensing,
Moran's I,
Lorestan Province.

ABSTRACT

Natural disasters typically cause environmental degradation. A scientific and quantitative assessment of ecological environmental quality and its post-disaster recovery trajectory can provide valuable insights for mitigating future hazards. In this study, the April 2019 flood event in Lorestan Province, Iran, was selected as a case study to investigate the spatiotemporal variations and driving factors of ecological environmental quality prior to and following the flood. Initially, MODIS data were employed to construct the Remote Sensing Ecological Index (RSEI). Subsequently, the spatiotemporal dynamics of ecological environmental quality across Lorestan Province were evaluated from 2015 to 2024, alongside an analysis of spatial autocorrelation relationships. Finally, the Geographical Detector (GeoDetector) model was implemented to identify the key factors influencing post-flood environmental recovery. The results demonstrated that the flood event caused a notable decline in the RSEI from 0.7658 to 0.6081, which subsequently recovered to 0.6514, reflecting the significant impact of the flood phenomenon on the province's environmental quality. Spatially, areas with higher ecological quality were predominantly concentrated in the central and eastern regions of the province, whereas the northwestern and southeastern areas exhibited lower quality. Moran's I index exceeded 0.75, indicating a strong positive spatial autocorrelation and clustering pattern of ecological environmental quality. Based on the GeoDetector analysis, elevation and population density played the most prominent roles in driving the post-flood ecological quality dynamics. Among the interactive factors, the interaction between elevation and slope exhibited the strongest explanatory power regarding the ecological recovery process.

Cite this article: Mehrabi, A. (2026). Evaluating the Spatiotemporal Dynamics and Recovery of Ecological Environmental Quality Post-Flood in Lorestan Province Using Remote Sensing. *Geography and Environmental Sustainability*, 16(3), 131-156. <https://doi.org/10.22126/ges.2026.13792.2975>



© The Author (s).
DOI: <https://doi.org/10.22126/ges.2026.13792.2975>

Publisher: Razi University

Introduction

In recent years, natural disasters such as floods, earthquakes, land subsidence, and landslides have frequently occurred in Iran. Floods, as one of the most severe natural hazards, not only cause extensive human casualties and financial losses but also severely degrade the ecological structure of the environment. Ecosystems serve as the material foundation for human life and development, playing a vital role in climate regulation, environmental purification, pest control, and biodiversity conservation. In April 2019, Lorestan Province experienced a catastrophic flood event that caused severe financial damage to the province's infrastructure, claimed 15 lives, destroyed numerous homes, and left profound psychological impacts on survivors. However, the environmental impact of this flood and its subsequent recovery trajectory required rigorous scientific investigation, which constitutes the primary objective of this study. Despite numerous studies on the Lorestan flood (focusing on landslides, psychological trauma, and social responses), post-disaster ecological recovery monitoring remained unaddressed in this region. Most previous studies focused solely on vegetation cover or land-use changes (Mehrabi, 2021; Moradi et al., 2024), whereas the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) provides a more comprehensive assessment of environmental health by integrating multiple core indicators, including greenness, wetness, heat, and dryness. Therefore, this study combines the RSEI and the Geographical Detector (GeoDetector) model to evaluate ecological quality variations and recovery following the flood event. This research aims to support improved environmental management planning and post-disaster sustainable development, thereby contributing to the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly in building resilient and sustainable cities and human settlements.

Materials and Methods

This study utilized MODIS satellite data spanning from 2015 to 2024. Two primary datasets were employed: MOD09A1 for surface reflectance across various spectral bands and MOD11A2 for Land Surface Temperature (LST). The key advantages of MODIS data include broad spatial coverage, high temporal resolution (8-day composites), and suitability for time-series analyses, making it ideal for long-term ecological monitoring. The primary software used included the MODIS Reprojection Tool (MRT), ENVI, and ArcGIS. First, the MODIS data for the study area were batch-processed using MRT, which involved image mosaicking, spatial reprojection to a common coordinate system, and format conversion. To address cloud contamination, cloud-affected pixels were identified and masked, and composite clean images were generated to cover the entire study area. Subsequently, using ENVI 5.3, four primary indicators—Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) representing greenness, Wetness index from tasseled cap transformation, Land Surface Temperature (LST) representing heat, and Normalized Difference Built-up and Soil Index (NDBSI) representing dryness—were extracted and integrated via Principal Component Analysis (PCA) to construct the composite RSEI.

Results and Discussion

In the first Principal Component (PC1), with the exception of the year 2020, the loadings for NDVI and WET—both positively correlated with favorable ecological conditions—consistently exhibited positive signs. The percentage contribution of eigenvalues for PC1 across the six temporal stages were 71.35%, 63.86%, 67.09%, 62.49%, 52.88%, and 63.29%, respectively, all of which were significantly higher than those of the other components. This indicates that PC1 captured the vast majority of critical information from the four selected indicators. Consequently, the RSEI was constructed based on PC1 to

analyze the pre- and post-flood EEQ dynamics. Higher RSEI values denote ecological improvement, whereas lower values indicate EEQ degradation. As presented in Table 2, the mean RSEI value prior to the flood (2015–2019) remained relatively stable above 0.65, reflecting favorable environmental quality across the province. The highest and lowest RSEI values were recorded in 2017 and 2020 at 0.7658 and 0.6081, respectively. This decline of 0.1577 units is directly attributable to the impacts of the flood event, which caused widespread vegetation loss, soil erosion, and surface degradation. Following 2020, RSEI values exhibited a steady increase, indicating substantial environmental recovery and a return toward pre-disaster conditions. Overall, the spatiotemporal variations in EEQ from 2015 to 2024 can be categorized into three distinct phases: the pre-flood period (2015–2019) with favorable ecological conditions; the flood occurrence period (2019–2020) characterized by a marked reduction in mean RSEI due to ecosystem damage; and the post-flood recovery period (2020–2024) marked by a rising mean RSEI and progressive environmental restoration.

Conclusion

The main findings of this study are summarized as follows:

- The temporal RSEI values were recorded at 0.6741, 0.7658, 0.6658, 0.6081, 0.6236, and 0.6514, respectively. The overall trajectory from 2015 to 2024 exhibited a clear "Stability – Decline – Recovery" pattern, which closely corresponds to the EEQ dynamics. These results indicate that while the flood degraded the province's ecological quality, gradual environmental recovery ensued, ultimately restoring overall ecological quality to near pre-crisis levels.
- Area-based statistics comparing pre- and post-flood RSEI revealed that areas experiencing an RSEI increase accounted for only 33% of the total area, whereas areas exhibiting a decrease covered 44% of the study region, indicating that recovery has been uneven across the province.
- Spatial autocorrelation analysis revealed that Moran's I values from 2015 to 2024 were consistently positive, indicating that the spatial distribution of EEQ is significantly clustered rather than randomly distributed. Furthermore, the GeoDetector analysis identified elevation and population density as the dominant drivers of RSEI spatial variation. In terms of factor interactions, the interactive effect of elevation and slope exerted the strongest explanatory power on ecological recovery, consistently explaining over 40% of the variance throughout the study period.

ارزیابی پویایی مکانی-زمانی کیفیت محیط اکولوژیکی استان لرستان پس از سیلاب با رویکرد سنجش از دور

علی مهرابی^۱

۱. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: Mehrabi@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷ دسترسی آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: ناامنی غذایی، کالری استاندارد روزانه، شاخص FGT، هوش مصنوعی مکانی (GeoAI)، نواحی روستایی ایران.	بلاای طبیعی معمولاً باعث تخریب محیط زیست می‌شوند. ارزیابی علمی و کمی از کیفیت محیط زیست اکولوژیکی و روند بهبودی آن پس از وقوع بلایا، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای کاهش خطرات آینده فراهم کند. در این پژوهش، سیلاب فروردین ماه سال ۱۳۹۸ استان لرستان به عنوان نمونه‌ای برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی و همچنین عوامل مؤثر بر کیفیت محیط اکولوژیکی قبل و بعد از سیلاب انتخاب شد. ابتدا از داده‌های مودیس برای ساخت شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش از دور استفاده شد. سپس تغییرات زمانی و مکانی کیفیت محیط اکولوژیکی استان لرستان از سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ بررسی شد و روابط خودهمبستگی فضایی نیز تحلیل گردید. در نهایت، مدل GeoDetector برای شناسایی عوامل مؤثر در ارزیابی محیط زیست پس از سیلاب به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که در نتیجه سیلاب شاخص RSEI از عدد ۰/۷۶۵۸ به ۰/۶۰۸۱ کاهش یافته و دوباره به عدد ۰/۶۵۱۴ رسیده است. این تغییرات نشان از تأثیر پدیده سیلاب در کیفیت محیط زیست استان دارد. از نظر مکانی، مناطق با کیفیت بالاتر بیشتر در بخش‌های مرکزی و شرقی استان قرار دارند، در حالی که بخش‌های شمال غربی و جنوب شرقی کیفیت پایین‌تری دارند. شاخص موران بالاتر از ۰/۷۵ بود که نشان‌دهنده همبستگی و خوشه‌بندی مکانی قوی کیفیت محیط زیست است. بر اساس مدل GeoDetector، دو عامل ارتفاع و تراکم جمعیت، مهم‌ترین نقش را در تغییرات کیفیت محیط اکولوژیکی پس از رخداد سیلاب داشتند. در میان عوامل ترکیبی، تعامل بین ارتفاع و شیب، قوی‌ترین اثر را در روند بهبودی اکولوژیکی نشان داد.

استناد: مهرابی، علی (۱۴۰۵). ارزیابی پویایی مکانی-زمانی کیفیت محیط اکولوژیکی استان لرستان پس از سیلاب با رویکرد سنجش از دور. *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۶ (۳)، ۱۳۱-۱۵۶. <https://doi.org/10.22126/ges.2026.13792.2975>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

DOI: <https://doi.org/10.22126/ges.2026.13792.2975>



مقدمه

در سال‌های اخیر، بلایای طبیعی مانند سیل، زلزله، فرونشست و زمین‌لغزش به‌طور مکرر در ایران رخ داده‌اند. سیلاب‌ها، به‌عنوان یکی از شدیدترین بلایای طبیعی، نه‌تنها باعث تلفات انسانی و خسارت‌های مالی گسترده می‌شوند، بلکه ساختار اکولوژیکی محیط را نیز به‌شدت تخریب می‌کنند. اکوسیستم‌ها اساس مادی زندگی و توسعه انسان هستند و در تنظیم آب‌وهوا، تصفیه محیط، کنترل گونه‌های مضر و حفظ تنوع زیستی نقش حیاتی دارند (جلیلیان و امان‌اللهی، ۱۴۰۲). با پیشرفت جوامع انسانی و افزایش فعالیت‌های انسان، آسیب‌پذیری محیط در برابر بلایای طبیعی نیز بیشتر شده است؛ بنابراین، پایش و ارزیابی اثرات بلایا بر محیط‌زیست اکولوژیکی برای کاهش خطرات و حفاظت از جان و دارایی انسان‌ها اهمیت زیادی دارد (قاسمی و همکاران، ۱۴۰۰). در فروردین‌ماه سال ۱۳۹۸ استان لرستان دچار فاجعه سیل شد، این سیل ضمن ایجاد خسارت‌های مالی زیاد به زیرساخت‌های استان لرستان باعث شد تا ۱۵ نفر جان خود را از دست دادند و خانه‌های زیادی ویران شد و خسارت روانی زیادی برای بازماندگان به همراه داشت. اثر این سیلاب بر محیط‌زیست و روند بهبود آن هنوز نیاز به بررسی علمی داشت و این پژوهش دقیقاً با همین هدف انجام شد.

به‌تازگی روش‌های گوناگونی برای پایش و ارزیابی محیط‌زیست اکولوژیکی استفاده شده‌اند. در میان آن‌ها، فناوری‌های سنجش‌ازدور به دلیل قابلیت پایش سریع، گسترده و هم‌زمان، جایگاه ویژه‌ای دارند. پژوهشگران بسیاری از شاخص‌های مختلف مانند شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۱، شاخص پوشش گیاهی^۲، دمای سطح زمین^۳ یا شاخص ساخته‌شده شهری^۴ برای سنجش کیفیت محیط استفاده کرده‌اند (Liao and Jiang, 2020; Huang et al., 2021; Gong et al., 2023; Xu et al., 2025)؛ اما مشکل این شاخص‌های تکی این است که هرکدام تنها بخشی از وضعیت اکولوژیکی را نشان می‌دهند و نمی‌توانند تصویر کاملی از سلامت محیط ارائه دهند. برای رفع این مشکل، شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش‌ازدور^۵ معرفی شده (Xu, 2013) که بر پایه چهار مؤلفه سبزی‌نگی، رطوبت، گرما و خشکی است و با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۶ محاسبه می‌شود. این شاخص دقت بالا، جامعیت و عینیت خوبی دارد. در سال‌های اخیر، شاخص RSEI در پژوهش‌های متعددی برای ارزیابی کیفیت اکولوژیکی مناطق شهری، حوضه‌های آبریز و نواحی جنگلی به کار رفته است. افزون بر این، برای شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات محیط‌زیست از مدل GeoDetector استفاده می‌شود (Guo et al., 2024) که ابزاری آماری برای کشف عوامل مکانی و بررسی تعامل میان آن‌ها است. از مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد.

قاسمی و همکاران (۱۴۰۰) شاخص‌های اکولوژیکی را مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که اثر متقابل نوع مدیریت و عملیات اصلاحی بر مقدار شاخص‌های اکولوژیکی، اختلاف معنی‌داری را نشان می‌دهد. ناصری و همکاران (۱۴۰۲) کیفیت فضای سبز شهرستان کرج را با استفاده از شاخص RSEI پایش کرده است. نتایج نشان می‌دهد شاخص مذکور می‌تواند به‌طور مناسبی تغییرات مکانی کیفیت محیط‌زیست را از ابعاد مختلف منعکس نماید و یک روش مؤثر برای ارزیابی جامع کیفیت محیط‌زیست و شرایط اکولوژیکی در محیط‌های شهری است. ساعدپناه و امان‌اللهی (۱۴۰۳) در پژوهشی، بر اساس شاخص‌های کیفی اکولوژیکی، تغییرات مکانی-زمانی کاربری اراضی حوضه دریاچه زریبار را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. نتایج نشان داد مقادیر میانگین RSEI حاکی از کاهش کیفیت محیط‌زیست در حوضه دریاچه زریبار است. نتایج نمودارهای پراکندگی شاخص جهانی موران حاکی از کاهش همگنی در دوره مورد مطالعه بوده است.

مشیری و همکاران (۱۴۰۴) شاخص زیست‌پذیری اکولوژی کلان‌شهر تبریز را مورد بررسی قرار دادند، ایشان در این راستا از مجموعه تصاویر لندست و مادیس، استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که شاخص زیست‌پذیری روزبه‌روز بهبود

1. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
2. Enhanced Vegetation Index (EVI)
3. Land Surface Temperature (LST)
4. Normalized Difference Built-up Index (NDBI)
5. Remote Sensing Ecological Index (RSEI)
6. Principal Component Analysis (PCA)

یافته است. چن و همکاران در مطالعه‌ای به ارزیابی کیفیت محیط‌زیست شهری بر اساس شاخص RSEI پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که فشار انسانی و تغییرات کاربری اراضی بیشترین اثر منفی را بر کیفیت محیط‌زیست شهری دارند و روش RSEI می‌تواند الگوهای دقیق‌تر و قابل اعتمادتر پایش اکولوژیکی ارائه دهد (Chen et al., 2022).

لانگ و همکاران برای ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی و عوامل مؤثر بر کیفیت محیط‌زیست در منطقه شمالی چین از شاخص RSEI استفاده کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که میانگین رطوبت نسبی، بارش انباشته و نوع کاربری زمین، عوامل غالب در توزیع مکانی کیفیت زیست‌محیطی در منطقه شمالی بودند و تعامل دوعاملی نیز تأثیر بیشتری بر کیفیت زیست‌محیطی نسبت به عوامل منفرد داشته است. قدرت توضیحی عوامل هواشناسی بر توزیع مکانی کیفیت زیست‌محیطی قوی‌تر از عوامل توپوگرافی بوده و تأثیر عوامل انسانی (مانند تراکم جمعیت و نوع کاربری زمین) بر کیفیت زیست‌محیطی به تدریج در طول زمان افزایش یافته است (Long et al., 2023).

ونگ و همکاران در پژوهشی کیفیت اکولوژیکی و عوامل مؤثر بر آن را در حوزه آبخیز بایانگ دیان مورد تحلیل قرار دادند. این پژوهش نشان می‌دهد که عوامل انسانی و طبیعی، هر دو، قدرت توضیحی بالایی برای کیفیت اکولوژیکی حوزه آبخیز بایانگ دیان دارند و نوع کاربری زمین به‌طور خاص، عامل اصلی تغییرات در شاخص RSEI است. قدرت توضیحی این عوامل به‌طور قابل توجهی با تعامل بین آن‌ها، به‌ویژه تعامل بین نوع کاربری زمین و سایر عوامل، افزایش یافته است (Wang et al., 2025).

ژنگ و همکاران از یادگیری عمیق و داده‌های چند منبع ماهواره‌ای استفاده کرده و RSEI را برای نقشه‌برداری کیفیت اکولوژیکی به کار برده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ادغام داده‌های چند منبع با مدل‌های یادگیری عمیق دقت و جزئیات مکانی شاخص RSEI را افزایش می‌دهد و پایش تغییرات اکولوژیکی را در مقیاس‌های شهری و منطقه‌ای بهبود می‌بخشد (Zhang et al., 2025).

با وجود مطالعات متعدد درباره سیلاب لرستان (مانند زمین‌لغزش‌ها، آسیب‌های روانی و واکنش‌های اجتماعی)، هنوز پایش بهبودی اکولوژیکی پس از فاجعه در این منطقه انجام نشده بود. بیشتر مطالعات قبلی تنها بر پوشش گیاهی یا تغییرات کاربری زمین تمرکز داشتند (Mehrabi, 2021; Moradi et al., 2024)؛ در حالی که RSEI با دربرگرفتن چند شاخص اصلی، تصویری جامع‌تر از سلامت محیط ارائه می‌دهد؛ بنابراین، این پژوهش ترکیب RSEI و GeoDetector را برای ارزیابی تغییرات و بهبود کیفیت اکولوژیکی پس از رخداد سیلاب به کار برده است.

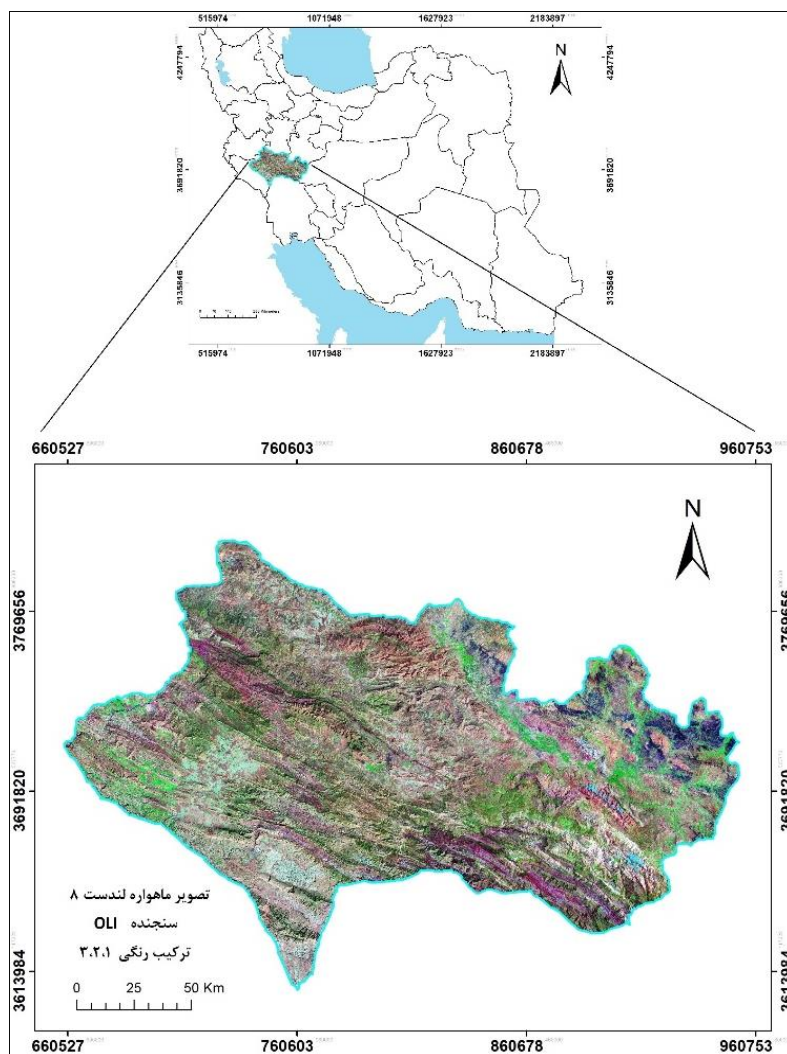
نوآوری اصلی و متمایزکننده پژوهش حاضر در ابعاد کاربردی و تحلیل رفتار اکوسیستم پس از بحران نهفته است که در محورهای چون تبیین مکانیسم خود-بازیابی اکوسیستم‌های کوهستانی و آشکارسازی نقش ساختارهای هیدروتوپوگرافی به‌عنوان پناهگاه اکولوژیکی خلاصه می‌شود. در این مطالعه، ابتدا داده‌های MODIS برای ساخت RSEI استفاده شد تا وضعیت قبل و بعد از سیلاب بررسی گردد. سپس با استفاده از شاخص موران، الگوی خوشه‌بندی فضایی کیفیت محیط تحلیل شد و درنهایت، مدل GeoDetector برای شناسایی عوامل مؤثر بر بازیابی محیط‌زیست به کار رفت. این تحقیق با هدف کمک به برنامه‌ریزی بهتر مدیریت محیط‌زیست و توسعه پایدار پس از بلایای طبیعی انجام شده و می‌تواند به تحقق اهداف توسعه پایدار یعنی ساخت شهرها و سکونت‌گاه‌های پایدار و مقاوم کمک کند.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

استان لرستان در غرب ایران و در میانه رشته‌کوه زاگرس واقع شده است (شکل ۱). این استان با مساحتی حدود ۲۸ هزار کیلومتر مربع، از نظر توپوگرافی عمدتاً کوهستانی بوده و دارای ناهمواری‌های شدید و تنوع ارتفاعی قابل توجه است. اقلیم استان عمدتاً معتدل کوهستانی است و تحت تأثیر ارتفاع و جهت‌گیری رشته‌کوه‌های زاگرس قرار دارد. میانگین بارندگی سالانه حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر بوده که لرستان را در زمره مناطق نسبتاً پرباران کشور قرار می‌دهد. این شرایط اقلیمی نقش مهمی در شکل‌گیری منابع آب سطحی و پوشش گیاهی استان ایفا کرده است. رودخانه‌های متعددی از جمله کشکان،

سزار و دز در این استان جریان دارند که عمدتاً به حوضه آبریز کرخه تعلق دارند. پوشش گیاهی غالب شامل جنگل‌های زاگرسی با گونه غالب بلوط ایرانی و مراتع کوهستانی است که نقش اساسی در پایداری اکولوژیک و کنترل فرسایش خاک دارند. به دلیل شرایط توپوگرافی، اقلیمی و پوشش گیاهی متنوع، استان لرستان یکی از مناطق حساس از نظر فرایندهای ژئومورفولوژیک، فرسایش خاک و مدیریت منابع طبیعی به شمار می‌رود و از این رو، بستر مناسبی برای مطالعات جغرافیایی و محیط‌زیستی فراهم می‌کند.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه

سیل فروردین‌ماه استان لرستان یکی از شدیدترین رخدادهای هیدرولوژیک دهه‌های اخیر در منطقه به شمار می‌رود که در پی بارش‌های سنگین و متمرکز اوایل بهار رخ داد. شدت بالای بارندگی در مدت‌زمان کوتاه، همراه با توپوگرافی کوهستانی، شیب‌های تند و اشباع پیشین خاک، موجب افزایش سریع رواناب و طغیان رودخانه‌های اصلی از جمله کشکان و سزار شد. این رخداد خسارات قابل توجهی به سکونت‌گاه‌های انسانی، زیرساخت‌ها و اراضی کشاورزی وارد کرد و نقش عوامل طبیعی و انسانی نظیر تغییر کاربری اراضی و کاهش پوشش گیاهی را در تشدید مخاطره سیلاب برجسته ساخت (شکل ۲). این سیل خسارت ۱۰ هزار میلیارد تومانی را به زیرساخت استان لرستان وارد کرد، ۱۵ نفر جان خود را از دست دادند و زیرساخت‌های هزاران روستا و چند شهر به‌ویژه پلدختر و معمولان تخریب شد. شبکه آب بیش از ۷۰۰ روستا قطع شد و خسارت وارده به تأسیسات آبفای روستایی این استان ۱۵۲ میلیارد تومان اعلام شده است. ۸۷۰ راه روستایی دچار انسداد شدند و همچنین حدود ۶۰۰ کیلومتر از راه‌های استان نیز تخریب شدند (<https://www.yjc.ir/fa/news/6989499>).



شکل ۲. تصاویری میدانی از خسارت‌های سیل در منطقه مورد مطالعه

روش مطالعه

داده‌های مورد نیاز

در این پژوهش از داده‌های ماهواره MODIS بین سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ استفاده شده است. دو مجموعه داده اصلی به کار رفته‌اند شامل MOD09A1 برای بازتاب سطحی در باندهای طیفی مختلف و MOD11A2 برای دمای سطح زمین (LST) است. ویژگی داده‌های MODIS شامل پوشش گسترده، وضوح زمانی بالا (هر ۸ روز) و فرمت مناسب برای پردازش‌های زمانی است. از آنجاکه استان لرستان در ارتفاع بالا قرار دارد و در زمستان و بهار اغلب پوشیده از برف است، تصاویر زمستانی می‌توانند تحت تأثیر پوشش برف قرار گیرند؛ بنابراین، پژوهشگر تصاویر مربوط به ماه‌های اردیبهشت، خرداد و تیر (فصل رشد گیاهان) را انتخاب کرد تا نتایج دقیق‌تر و قابل مقایسه‌تری به دست آید. همچنین از داده‌های کمکی نظیر مدل ارتفاعی (DEM) با دقت ۳۰ متر و داده‌های اجتماعی-اقتصادی مانند جمعیت و تولید ناخالص داخلی (GDP) از سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ مورد استفاده قرار گرفت. در مجموع، داده‌های انتخاب‌شده ترکیبی از منابع طبیعی و انسانی هستند و می‌توانند تغییرات کیفیت محیط‌زیست پیش و پس از سیل را به‌خوبی نشان دهند.

انتخاب تصاویر ماهواره‌ای در محدوده زمانی اواسط بهار تا اوایل تابستان (اردیبهشت تا تیرماه) برای سال‌های قبل و بعد از سیلاب، مبتنی بر دو ضرورت هیدرولوژیکی و اکولوژیکی است.

- حذف اثرات نویزهای هیدرولوژیکی کوتاه‌مدت: در زمان وقوع سیلاب (فروردین‌ماه)، وجود لایه‌های ضخیم ابر در منطقه و غرقابی بودن موقت پهنه‌ها، مانع از ارزیابی دقیق ساختار خاک و پوشش گیاهی می‌شود. با ورود به ماه‌های اردیبهشت و خرداد و فروکش کردن آب‌های سطحی، اثرات پایدار و ژئومورفولوژیک سیلاب (نظیر لایه‌های رسوبی برجا مانده، اراضی تخریب‌شده و پهنه‌های فرسایش یافته) آشکار شده و ردیابی آثار سیل بر کیفیت محیط اکولوژیکی تسهیل می‌گردد.

- انطباق با اوج فنولوژی گیاهی منطقه زاگرس: بازه اردیبهشت تا تیرماه، دوره بیشینه رشد بیولوژیکی پوشش‌های جنگلی و مرتعی در استان لرستان است. در این دوره، شاخص سبزی‌نگی به بالاترین حد خود می‌رسد. در نتیجه، هرگونه کاهش در میزان کیفیت اکولوژیکی محیط در این ماه‌ها، مستقیماً نشان‌دهنده تخریب واقعی ناشی از سیلاب است و با زردی فصلی یا عدم رشد اولیه گیاهان هم‌پوشانی ندارد. این انتخاب تضمین می‌کند که فرایند بازیابی اکولوژیکی پایش شده در سال‌های بعد، یک روند واقعی و عاری از نوسانات فصلی کاذب باشد.

به‌منظور تحلیل عوامل محرک تغییرات کیفیت محیط اکولوژیکی پس از سیلاب، متغیرهای محیطی و انسانی با رعایت معیارهای پایداری فضایی، عدم هم خطی و تناسب مقیاسی انتخاب شدند. اگرچه متغیرهایی مانند میزان بارندگی سالانه، کاربری اراضی و شدت سیلاب از عوامل مؤثر بر پویایی‌های محیطی هستند، اما در این پژوهش به دلایل زیر از ورود مستقیم آن‌ها خودداری شد و متغیرهای توپوگرافی و اقتصادی-اجتماعی جایگزین گردیدند:

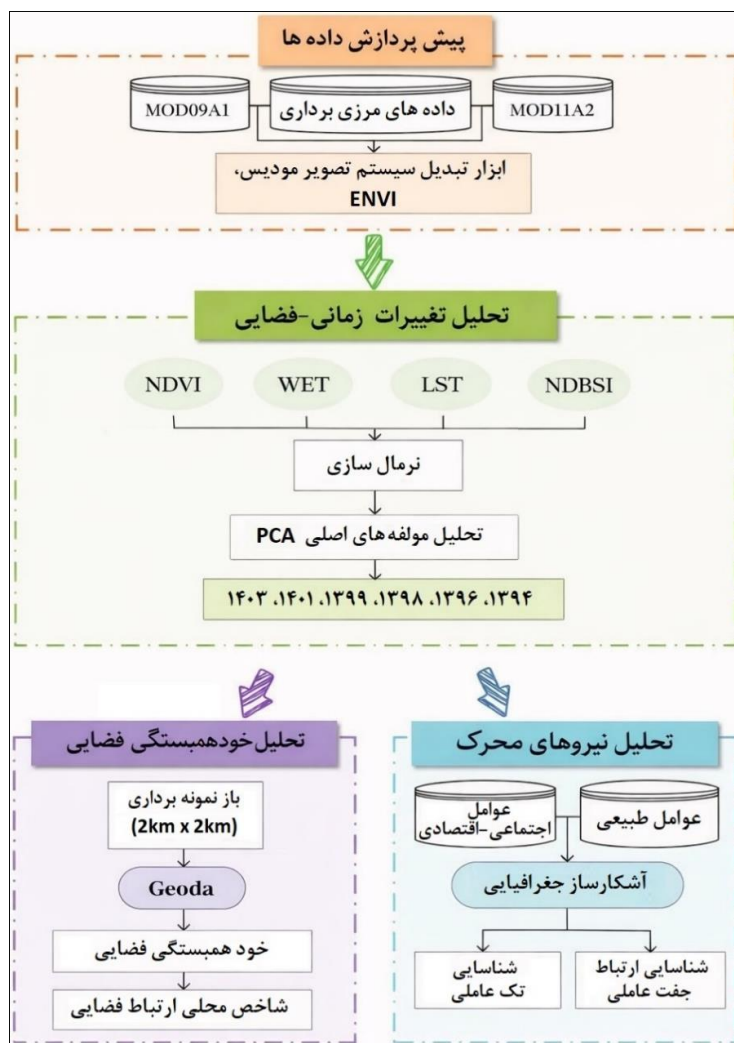
- موازی بودن داده‌های بارش و ارتفاع: در جغرافیای کوهستانی استان لرستان، توزیع مکانی بارش تابع مستقیمی از تغییرات ارتفاعی است. از آنجاکه پیکسلی کردن داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی به روش‌های درونیابی توأم با خطای تعمیم است، عامل ارتفاع به دلیل داشتن تفکیک مکانی دقیق‌تر (۳۰ متر)، به‌عنوان ساختار اصلی هدایت‌کننده فرایندهای اقلیمی (بارش و دما) وارد مدل شد.

- انعکاس کاربری اراضی و شدت سیلاب در شاخص RSEI: از آنجاکه متغیر وابسته پژوهش خود از طریق ترکیب شاخص‌های سنجش‌ازدوری رطوبت، سبزی‌نگی، خشکی و دما حاصل می‌شود، هرگونه تغییر در کاربری اراضی یا اثرات تخریبی ناشی از شدت سیلاب، پیشاپیش به‌طور ذاتی در تغییرات ساختاری اعمال و ثبت شده است. ورود مجدد لایه کاربری اراضی یا نقشه پهنه‌بندی سیلاب به‌عنوان متغیر مستقل، پدیده بیش برآزش و تکرار اطلاعاتی را در مدل GeoDetector به همراه داشت.

- عامل فاصله از رودخانه: این عامل به‌طور غیرمستقیم در ماتریس تعاملی شیب و ارتفاع پدیدار می‌شود، زیرا شیب‌های ملایم در ارتفاعات پایین‌تر، موقعیت‌های ژئومورفولوژیکی دشت‌های سیلابی و حاشیه رودخانه‌ها را بازنمایی می‌کنند.

نمودار جریان پژوهش

روند کلی پژوهش در یک نمودار جریان در مقاله نمایش داده شده است (شکل ۳). نرم‌افزارهای اصلی شامل MODIS Reprojection Tool (MRT)، ENVI و ArcGIS بوده‌اند. ابتدا داده‌های مودیس مربوط به منطقه با استفاده از MRT به‌صورت دسته‌ای پردازش شدند. این مرحله شامل اتصال تصاویر، تبدیل تصویر به سیستم تصویر مشترک و تبدیل فرمت فایل‌ها بود. از آنجاکه داده‌های مودیس تحت تأثیر ابر قرار دارند، بخش‌های ابری تصاویر شناسایی و حذف شدند و سپس تصاویر تمیز ترکیب شدند تا تصویری کامل از منطقه مورد مطالعه به دست آید. سپس با استفاده از نرم‌افزار ENVI، چهار شاخص اصلی از تصاویر استخراج شد و با روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای ساخت شاخص RSEI ترکیب گردید. درنهایت، داده‌ها در ArcGIS برای ترسیم نقشه‌ها و تحلیل خودهمبستگی فضایی مورد استفاده قرار گرفتند. پنج عامل اصلی طبیعی و انسانی به‌عنوان عوامل مؤثر بر تغییرات محیط‌زیست انتخاب شدند که شامل ارتفاع، شیب، جهت دامنه، تراکم جمعیت و تولید ناخالص داخلی می‌شوند. برای تحلیل تأثیر این عوامل، از مدل GeoDetector استفاده شد. این مدل هم قدرت توضیح‌دهندگی یک عامل و هم تعامل بین دو عامل را محاسبه می‌کند. به این ترتیب، پژوهش توانست نشان دهد کدام متغیرها بیشترین نقش را در تغییر کیفیت اکولوژیکی پس از سیل داشته‌اند.



شکل ۳. نمودار جریان از روش پژوهش

شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش ازدور (RSEI)

با اتکا بر فناوری سنجش ازدور و از طریق تلفیق چندین عامل اکولوژیکی، شاخص RSEI قادر است کیفیت محیط زیست اکولوژیکی^۱ را به صورت سریع، عینی و قابل اعتماد ارزیابی نماید (Xu, 2013; Hong et al., 2020). این شاخص با بهره گیری از روش تحلیل مؤلفه های اصلی، چهار مؤلفه کلیدی شامل شاخص پوشش گیاهی، مؤلفه رطوبت، شاخص ساخت و ساز و دمای سطح زمین را که ارتباط تنگاتنگی با فعالیت ها و زیست انسان دارند، در قالب یک شاخص جامع ادغام می کند. به طور کلی، شاخص RSEI را می توان به صورت تابعی از این چهار مؤلفه اکولوژیکی به شکل زیر بیان کرد (Wang et al., 2022):

$$RSEI = f(\text{Greenness, Wetness, Heat, Dryness})$$

رابطه ۱

بر این اساس، در پژوهش حاضر، شاخص NDVI به عنوان مناسب ترین شاخص برای ارزیابی و پایش وضعیت و رشد پوشش گیاهی انتخاب گردید و به منظور نمایندگی مؤلفه سبزیزگی در محاسبه شاخص RSEI مورد استفاده قرار گرفت (Yan et al. 2017). میانگین شاخص خاک^۲ و شاخص ساخت و ساز مبتنی بر شاخص^۳ به عنوان شاخص نرمال شده ساخت و ساز و خاک لخت^۴ مورد استفاده قرار گرفت (Xu et al. 2018). مؤلفه گرما با استفاده از دمای سطح زمین که غالباً به عنوان

1. Ecological Environmental Quality (EEQ)

2. Soil Index (SI)

3. Index-Based built-up Index (IBI)

4. The Normalized Difference Built-up and Soil Index (NDBSI)

دمای پوسته سطحی شناخته می‌شود، نمایش داده شد. در این پژوهش، مؤلفه گرما بر اساس داده‌های محصول دمای سطح زمین MODIS LST محاسبه گردید (Weng et al., 2014). فرمول‌های محاسبه شاخص‌های NDVI، WET، IBI، SI و NDBSI در ادامه ارائه شده‌اند.

$$\text{NDVI} = (B2 - B1) / (B2 + B1) \quad \text{رابطه ۲}$$

$$\text{Wet} = 0.1147B1 + 0.2489B2 + 0.2408B3 + 0.3132B4 - 0.3122B5 - 0.6416B6 - 0.5087B7 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\text{IBI} = \frac{2B6 / (B6 + B2) - [B2 / (B2 + B1) + B4 / (B4 + B6)]}{2B6 / (B6 + B2) + [B2 / (B2 + B1) + B4 / (B4 + B6)]} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\text{SI} = \frac{[(B6 + B1) - (B2 + B3)]}{[(B6 + B1) + (B2 + B3)]} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\text{NDBSI} = \frac{(\text{IBI} + \text{SI})}{2} \quad \text{رابطه ۶}$$

در این روابط، B1 تا B7 به ترتیب بیانگر باندهای ۱ تا ۷ تصویر MODIS شامل باندهای قرمز، مادون قرمز نزدیک ۱، آبی، سبز، مادون قرمز نزدیک ۲، مادون قرمز موج کوتاه ۱ و مادون قرمز موج کوتاه ۲ هستند. با توجه به تفاوت ابعاد و دامنه مقادیر چهار شاخص مذکور، به منظور ایجاد قابلیت مقایسه، لازم بود این شاخص‌ها با استفاده از رابطه ۷ به بازه صفر تا یک نرمال‌سازی شوند (Xiong et al., 2022) و در مرحله بعد، تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام شد و مؤلفه اصلی اول (PC1) به عنوان نماینده اطلاعات غالب استخراج و برای محاسبه شاخص RSEI مورد استفاده قرار گرفت.

در مواردی که مقادیر پایین RSEI نشان‌دهنده وضعیت اکولوژیکی مطلوب باشند، به منظور هم‌راستا شدن تفسیر شاخص با انتظار معمول (بزرگ‌تر بودن مقدار شاخص بیانگر شرایط اکولوژیکی بهتر)، رابطه ۸ اعمال گردید تا جهت شاخص اصلاح شود. در نهایت، برای تسهیل مقایسه‌های زمانی و مکانی، مقدار نهایی RSEI مجدداً با استفاده از رابطه ۷ نرمال‌سازی شد.

$$\text{NL}_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad \text{رابطه ۷}$$

$$\text{RSEI} = 1 - \text{PC1} [f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{NDBSI}, \text{LST})] \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن NL_i نتیجه استانداردسازی تصویر است؛ I_i مقدار عددی پیکسل تصویر است؛ و $I_{\max}$ و $I_{\min}$ به ترتیب بیشینه و کمینه مقادیر پیکسل‌های تصویر هستند.

تحلیل خودهمبستگی فضایی

خودهمبستگی فضایی می‌تواند میزان همبستگی یک پدیده در یک ناحیه مشخص با همان پدیده در واحدهای هم‌جوار آن ناحیه را مورد آزمون قرار دهد (Li et al., 2021). در این مطالعه، شاخص موران جهانی و شاخص محلی خودهمبستگی فضایی^۱ برای تحلیل همبستگی فضایی EEQ در استان لرستان به کار گرفته شد. بیان ریاضی آن به صورت زیر است:

$$\text{Global Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (D_i - D)(D_j - D)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \times \sum_{i=1}^n (D_i - D)^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\text{Local Moran's } I = \frac{n(D_i - D) \sum_{j=1}^n W_{ij} (D_j - D)}{\sum_{i=1}^n (D_i - D)^2} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن n تعداد نمونه‌ها است؛ D_i و D_j مقادیر RSEI در موقعیت‌های i و j را نشان می‌دهند؛ D میانگین یک ویژگی D_i است؛ و W_{ij} ماتریس وزن فضایی می‌باشد.

مدل آشکارساز جغرافیایی (GeoDetector)

GeoDetector یک روش آماری است که برای شناسایی ناهمگنی فضایی و آشکارسازی عوامل محرک آن از طریق بررسی تمایزات فضایی به کار می‌رود (Wang et al., 2016). در این مطالعه، تمرکز بر شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات محیط‌زیست اکولوژیک و تعاملات آن‌ها با استفاده از GeoDetector است. مراحل اصلی روش به شرح زیر است (Zhang et al., 2023).

۱- واکاوی و تشخیص عامل: این شامل تشخیص عدم تشابه فضایی Y و همچنین برآورد مقداری است برای عامل X که عدم تشابه فضایی ویژگی Y را توضیح می‌دهد و می‌تواند برحسب مقادیر q اندازه‌گیری شود.

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad \text{رابطه ۱۱}$$

به‌طوری که q توان تأثیر یک عامل معین است، L نشان‌دهنده طبقه‌بندی متغیر (Y) یا عامل (X) و N_h و N به‌ترتیب تعداد سلول‌های لایه h و کل منطقه را نشان می‌دهند، σ_h^2 و σ^2 به‌ترتیب واریانس‌های لایه h و کل منطقه هستند. مقدار q بین $[0, 1]$ متغیر است، مقدار بزرگ‌تر نشان می‌دهد که عامل (X) مؤثرتر از متغیر (Y) است و $q = 0$ نشان‌دهنده عدم رابطه است.

۲- تشخیص چگونگی تعاملات: این مرحله شامل شناسایی تعاملات بین عوامل مختلف X_i است. این بخش قادر است تأثیر متقابل هر دو عامل محرک بر RSEI را شناسایی کند. به‌طور خاص، اینکه آیا حضور هم‌زمان عوامل X_1 و X_2 ظرفیت پیش‌بینی متغیر وابسته Y را افزایش یا کاهش می‌دهد را مورد ارزیابی قرار می‌دهد. این فرایند ارزیابی با تعیین مقادیر q ویژه برای هر متغیر انجام می‌گیرد. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، پنج نوع تعامل بین دو متغیر مستقل و متغیر وابسته وجود دارد.

جدول ۱. مبنای قضاوت برای تشخیص رابطه تعاملی (Song et al., 2020)

انواع تعامل بین متغیرها	الگو
تضعیف غیر خطی	$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$
تضعیف غیر خطی تک عاملی	$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$
بهبود دو عاملی	$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$
مستقل	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
افزایش غیر خطی	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

از آنجاکه مدل آشکارساز جغرافیایی نیازمند ورودی‌های گسسته (کیفی یا طبقه‌بندی‌شده) است، متغیرهای مستقل پیوسته پژوهش باید به داده‌های طبقه‌ای تبدیل می‌شدند. در این پژوهش، فرایند گسسته‌سازی با استفاده از الگوریتم شکست‌های طبیعی جنکس^۱ در محیط نرم‌افزار ArcGIS در ۵ طبقه انجام شد. این روش با مکان‌مندی متغیرهای هیدرو توپوگرافیک سازگاری بالایی داشته و مرز طبقات را بر اساس شکست‌های طبیعی موجود در داده‌ها تعیین می‌کند.

مکانیسم استانداردسازی داده‌ها و تحلیل مؤلفه اصلی (PCA)

از آنجاکه شاخص‌های چهارگانه محیطی شامل سبزی‌نگی، رطوبت، ساخت و ساز و دمای سطح زمین دارای دامنه‌ها، واحدها و

مقیاس‌های متفاوتی هستند، امکان ترکیب مستقیم آن‌ها وجود ندارد. ورود داده‌ها با مقیاس‌های متفاوت به مدل محاسباتی، موجب پدید آمدن سوگیری و وزن دهی نامتوازن به متغیرهای دارای دامنه بزرگ‌تر می‌شود. از این رو، فرایند ادغام داده‌ها در دو گام اساسی صورت گرفت. گام اول استانداردسازی خطی، بدین منظور برای بی‌بعدسازی و هم مقیاس کردن لایه‌ها از رابطه ۷ استفاده شد. در گام دوم پس از هم مقیاس شدن متغیرها، لایه‌های استاندارد شده به‌عنوان ورودی وارد چرخه تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) شدند.

مزیت کلیدی استفاده از PCA در استخراج شاخص RSEI، عدم نیاز به وزن دهی دستی و سلیقه‌ای به متغیرهاست؛ زیرا وزن هر متغیر به‌صورت کاملاً خودکار و بر اساس سهم و بارگذاری ریاضی آن در ماتریس کوواریانس داده‌ها تعیین می‌شود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۲، مؤلفه اصلی اول (PC1) به‌عنوان شاخص نهایی انتخاب شد؛ زیرا اولاً، این مؤلفه توانسته است بیش از ۶۰٪ از کل واریانس و اطلاعات موجود در هر چهار لایه را به‌تنهایی فشرده و بازنمایی کند. ثانیاً، جهت بارگذاری‌های عاملی^۱ در PC1 کاملاً با واقعیت‌های بیوفیزیکی محیط سازگار است؛ به‌طوری که شاخص‌های کیفیت افزا (سبزینگی و رطوبت) دارای علامت مثبت و شاخص‌های کیفیت کاه (ساخت و ساز و دمای سطح زمین) دارای علامت منفی در این مؤلفه هستند. درنهایت، برای سهولت در تفسیر، خود لایه PC1 نیز مجدداً بین ۰ و ۱ نرمال‌سازی شد تا شاخص نهایی RSEI حاصل شود.

نتایج

تحلیل تغییرات مکانی-زمانی EEQ قبل و بعد از سیلاب

ویژگی‌های تغییرات زمانی EEQ

جدول ۲ نتایج تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) داده‌های سنجش‌ازدور در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در مؤلفه اصلی اول (PC1)، به‌جز سال ۱۳۹۹، مقادیر بارگذاری NDVI و WET که هر دو با شرایط اکولوژیکی مثبت همبسته هستند، به‌طور مداوم علامت مثبت دارند. درصد سهم مقادیر ویژه PC1 برای شش مرحله داده‌های سنجش‌ازدور به‌ترتیب برابر با ۷۱/۳۵، ۶۳/۸۶، ۶۷/۰۹، ۶۲/۴۹، ۵۲/۸۸ و ۶۳/۲۹ بودند که همگی از سهم سایر مؤلفه‌ها بیشتر هستند. این امر نشان می‌دهد که PC1 بیشترین اطلاعات مهم مربوط به چهار شاخص انتخاب‌شده را دربر می‌گیرد؛ بنابراین، RSEI بر اساس نتایج PC1 ساخته شد تا کیفیت EEQ قبل و بعد از سیلاب مورد تحلیل قرار گیرد. افزایش مقادیر RSEI نشان‌دهنده بهبود EEQ و کاهش آن بیانگر افت آن است.

جدول ۲. نتایج تحلیل مؤلفه اصلی و میانگین شاخص اکولوژیکی مبتنی بر سنجش‌ازدور (RSEI) از سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳

سال	RSEI	شاخص‌ها	PC1	PC2	PC3	PC4
۱۳۹۴	۰/۶۷۴۱	NDVI	۰/۹۱۲۱	۰/۴۰۶۸	۰/۰۶۸۱	۰/۰۸۲۹
		WET	۰/۴۱۵۹	-۰/۹۰۲۳	۰/۰۲۹۱	-۰/۰۰۴۷
		NDBSI	-۰/۰۸۱۱	۰/۰۰۵۸	-۰/۹۷۴۸	۰/۱۴۶۹
		LST	-۰/۰۷۷۰	-۰/۰۳۴۹	۰/۱۵۴۸	۰/۸۹۷۹
		Eigenvalue	۰/۰۴۱۲	۰/۰۱۱۸	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۱۲
		Percent Eigenvalue	٪۷۱/۳۵	٪۲۰/۱۲	٪۷/۹۲	٪۰/۶۸
۱۳۹۶	۰/۷۶۵۸	NDVI	۰/۸۶۲۴	۰/۳۲۲۵	-۰/۳۲۰۵	-۰/۲۸۹۵
		WET	۰/۳۸۱۵	-۰/۹۲۸۱	۰/۱۲۵۹	-۰/۰۳۹۸
		NDBSI	-۰/۰۳۷۸	۰/۱۵۶۷	-۰/۸۹۰۷	-۰/۶۵۸۷
		LST	-۰/۳۵۸۲	-۰/۱۷۳۶	-۰/۴۰۶۹	-۰/۷۶۴۴
		Eigenvalue	۰/۰۲۶۸	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۰۹
		Percent Eigenvalue	٪۶۳/۸۶	٪۲۲/۵۸	٪۱۰/۴۹	٪۲/۹۹

ادامه جدول ۲.

سال	RSEI	شاخص‌ها	PC1	PC2	PC3	PC4
۱۳۹۸	۰/۶۶۵۸	NDVI	۰/۸۹۵۷	۰/۴۰۶۵	۰/۱۴۷۹	-۰/۱۰۰۶
		WET	۰/۴۵۹۷	-۰/۹۰۶۴	-۰/۰۶۹۸	-۰/۰۰۱۹
		NDBSI	-۰/۰۴۹۱	۰/۲۹۱۵	-۰/۹۵۸۴	۰/۵۲۴۸
		LST	-۰/۲۹۱۵	-۰/۱۱۳۶	۰/۵۲۰۹	-۰/۶۹۷۰
		Eigenvalue	۰/۰۲۸۸	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۰۷
		Percent Eigenvalue	٪۶۷/۰۹	٪۲۴/۲۵	٪۸/۴۹	٪۰/۵۴
۱۳۹۹	۰/۶۰۸۱	NDVI	-۰/۷۲۶۸	۰/۰۲۹۰	۰/۵۴۱۲	-۰/۴۰۸۴
		WET	-۰/۱۱۲۴	-۰/۹۸۷۴	-۰/۱۸۴۹	۰/۰۲۰۳
		NDBSI	۰/۱۵۴۷	۰/۱۳۲۸	-۰/۷۲۵۱	-۰/۶۵۵۸
		LST	۰/۶۴۸۹	-۰/۱۴۸۰	۰/۴۰۹۹	-۰/۶۱۰۳
		Eigenvalue	۰/۰۳۷۹	۰/۰۱۴۹	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۱۸
		Percent Eigenvalue	٪۶۲/۴۹	٪۲۳/۲۵	٪۱۰/۴۱	٪۳۰/۴۴
۱۴۰۱	۰/۶۲۳۶	NDVI	۰/۶۲۱۳	۰/۱۱۴۵	۰/۴۴۵۸	-۰/۳۹۱۵
		WET	۰/۲۱۴۷	-۰/۷۸۱۰	-۰/۱۲۹۸	۰/۰۱۰۴
		NDBSI	۰/۰۱۴۸	۰/۱۰۶۶	-۰/۶۵۹۱	-۰/۵۸۹۷
		LST	۰/۴۴۱۱	-۰/۱۱۳۵	۰/۲۹۸۸	-۰/۵۵۰۸
		Eigenvalue	۰/۰۲۸۹	۰/۰۱۳۹	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۱۵
		Percent Eigenvalue	٪۵۲/۸۸	٪۲۹/۵۵	٪۱۱/۴۵	٪۳/۷۷
۱۴۰۳	۰/۶۵۱۴	NDVI	۰/۹۰۱۲	-۰/۲۵۶۹	۰/۲۳۵۵	-۰/۲۴۱۵
		WET	۰/۳۰۴۵	۰/۹۳۸۷	-۰/۰۸۵۶	-۰/۰۰۴۴
		NDBSI	-۰/۱۵۲۵	-۰/۱۳۹۹	-۰/۸۴۸۴	-۰/۲۳۴۷
		LST	-۰/۲۶۸۳	۰/۰۸۵۰	۰/۱۸۷۴	-۰/۹۴۲۱
		Eigenvalue	۰/۰۲۷۰	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۰۴
		Percent Eigenvalue	٪۶۳/۲۹	٪۲۳/۹۸	٪۱۰/۸۵	٪۰/۸۷

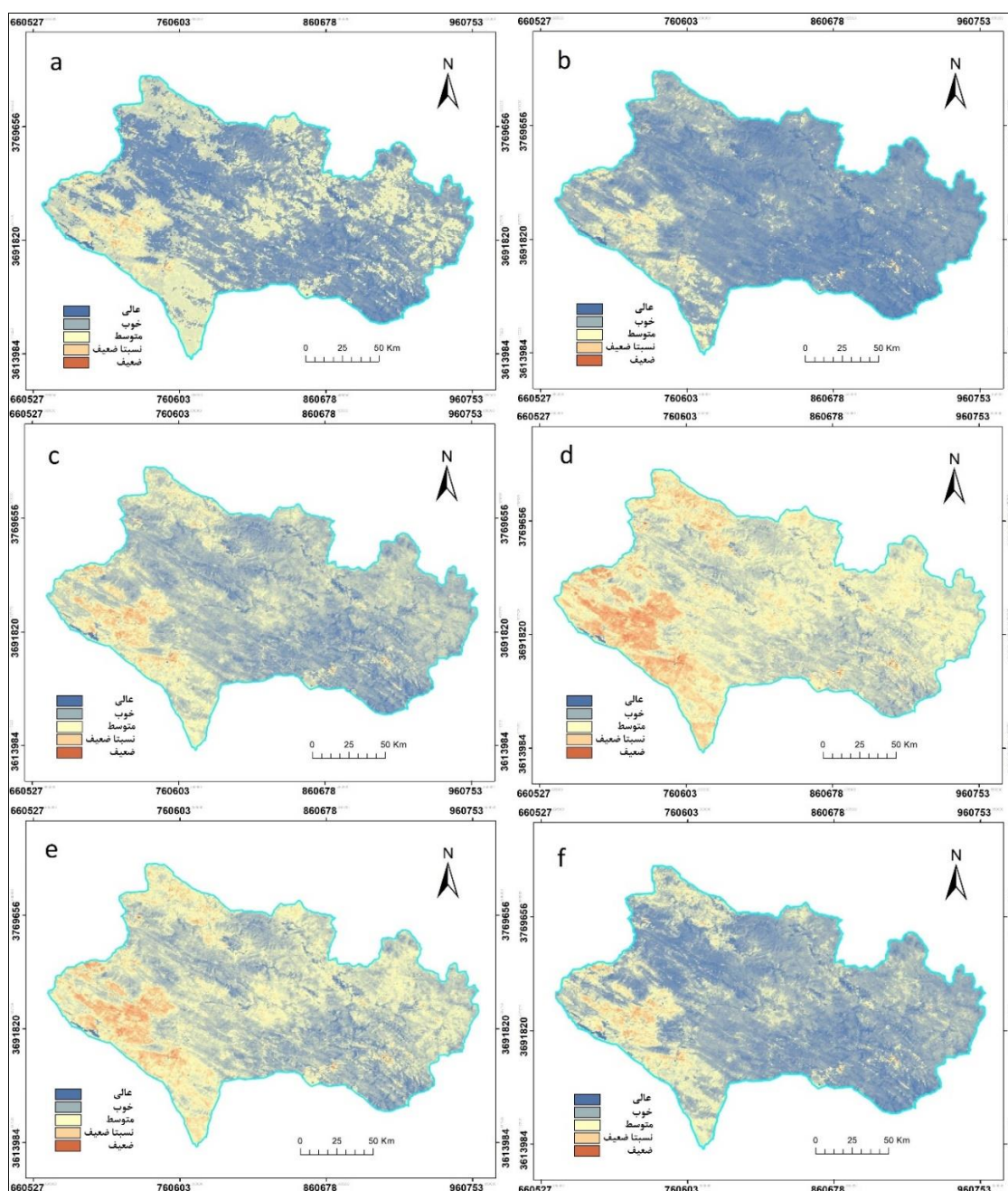
همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، میانگین شاخص RSEI قبل از سیل (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸) نسبتاً پایدار و بالای ۰/۶۵ ماند که نشان‌دهنده کیفیت مناسب محیط‌زیست در استان بود. بیشترین و کمترین مقادیر RSEI در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۹ ثبت شد، به‌طوری که مقدار این شاخص در این سال‌ها به‌ترتیب برابر با ۰/۷۶۵۸ و ۰/۶۰۸۱ بود. این کاهش ۰/۱۵۷۷ واحدی را می‌توان ناشی از اثرات سیل دانست. پس از سال ۹۹، مقادیر RSEI مجدداً افزایش یافت که بیانگر بهبود قابل توجه کیفیت محیط‌زیست و بازگشت شرایط به وضعیت پیش از حادثه بود. به‌طور کلی، تغییرات زمانی EEQ در بازه ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ را می‌توان در سه مرحله خلاصه کرد، قبل از حادثه سیل (۱۳۹۴-۱۳۹۸) که کیفیت محیط‌زیست در وضعیت خوبی بود، هنگام وقوع حادثه سیل (۱۳۹۸-۱۳۹۹) که کاهش قابل توجه میانگین RSEI نشان‌دهنده آسیب به اکوسیستم و محیط‌زیست بود و دوره بازسازی پس از رخداد سیل (۱۳۹۹-۱۴۰۳) که با افزایش میانگین RSEI همراه بود و حاکی از بهبود کیفیت محیط‌زیست بود.

ویژگی‌های تغییرات مکانی EEQ

برای مقایسه و تحلیل تغییرات کیفیت اکولوژیکی محیط قبل و بعد از حادثه سیل و همچنین بررسی روند بازسازی پس از آن، مقادیر محاسبه‌شده RSEI به پنج طبقه با فاصله ۰/۲ تقسیم‌بندی شدند (Yang et al., 2021). شکل ۴، توزیع مکانی EEQ در استان را نشان می‌دهد. سطوح اکولوژیکی ضعیف، نسبتاً ضعیف، متوسط، خوب و عالی به‌ترتیب با رنگ‌های قرمز، نارنجی، زرد، آبی روشن و آبی تیره نمایش داده شده‌اند. منطقه قرمز عمدتاً در مناطق غربی و جنوب غربی استان قرار دارد و نشان‌دهنده شرایط ضعیف محیط‌زیست است. در بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳، وضعیت اکولوژیکی در بخش‌های شرقی و

مرکزی استان عموماً خوب بود. با مقایسه و مشاهده شکل‌های ۴ (c,d) مشخص می‌شود که نواحی آبی تیره به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و مناطق قرمز افزایش یافته‌اند که نشان‌دهنده افت EEQ در این نواحی است.

جدول ۳ آمار مربوط به مساحت طبقات مختلف از سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ را نشان می‌دهد. در طول دوره مطالعه، بیشترین وسعت مربوط به مناطق با مقادیر RSEI بین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ بود که بیش از ۴۰٪ سطح استان را پوشش می‌داد. مقایسه با وضعیت قبل از سیل نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۹، نسبت نواحی با سطح اکولوژیکی ضعیف و نسبتاً ضعیف افزایش یافته، در حالی که نسبت نواحی با سطح خوب و عالی کاهش یافته است. در سال ۱۴۰۳، نسبت نواحی با کیفیت عالی به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. بر اساس تحلیل تغییرات RSEI در استان می‌توان نتیجه گرفت که پس از سیل، کیفیت محیط‌زیست در استان به‌طور کلی روند نزولی داشته و با اجرای سیاست‌های بازسازی پس از بحران، سطح اکولوژیکی در سال ۱۴۰۳ بهبود یافته است.

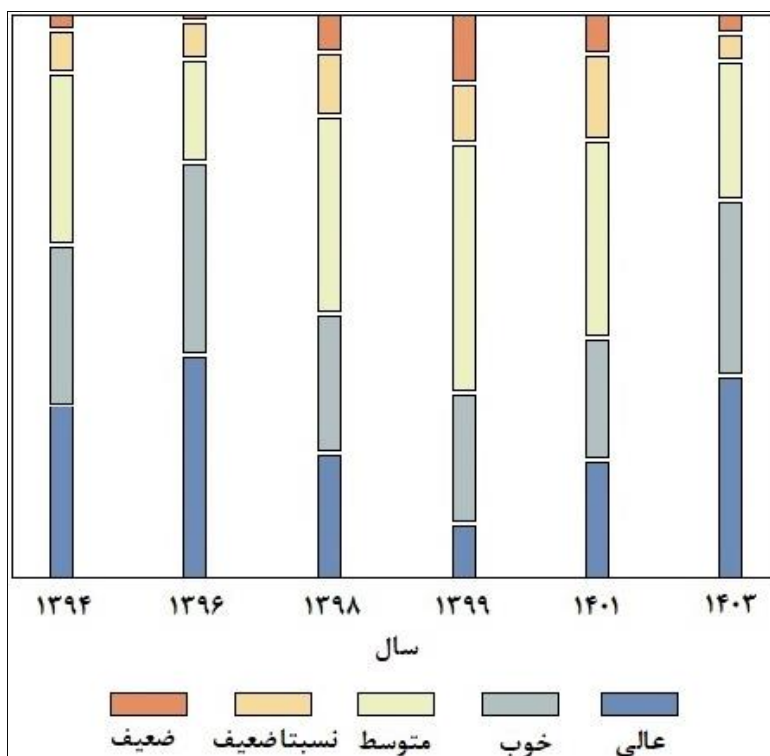


شکل ۴. توزیع فضایی طبقات مختلف EEQ از سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳

برای تحلیل جامع و بصری تغییرات بین طبقات EEQ قبل و بعد از رخداد سیل، از تحلیل ماتریس انتقال استفاده شد. ماتریس انتقال بینش ارزشمندی درباره جهت و شدت جابجایی‌ها بین طبقات مختلف اکولوژیکی ارائه می‌دهد. شکل ۵ تغییرات مکرر بین طبقات EEQ قبل و بعد از سیل را نشان می‌دهد، به‌طوری که اصلی‌ترین تغییرات بین سطوح عالی، خوب و متوسط رخ داده است. همچنین مشاهده شد که مناطق با سطح خوب و عالی تا قبل از سال ۱۳۹۸ به‌طور مستمر گسترش یافته‌اند، اما پس از رخداد سیل کاهش قابل توجهی داشته‌اند. در مقابل، مناطق با سطح ضعیف و نسبتاً ضعیف الگوی معکوس و افزایش را نشان می‌دهند. این نتایج نشان می‌دهد که سطح اکولوژیکی استان تحت تأثیر سیل از سطوح بالا به پایین منتقل شده است. با اجرای سیاست‌های بازسازی پس از حادثه، انتقال از سطح خوب به عالی به تدریج پس از سال ۱۳۹۹ رخ داده است که بیانگر بهبود آهسته اما پیوسته کیفیت محیط‌زیست در استان است.

جدول ۳. آمار مربوط به مساحت طبقات EEQ از سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳

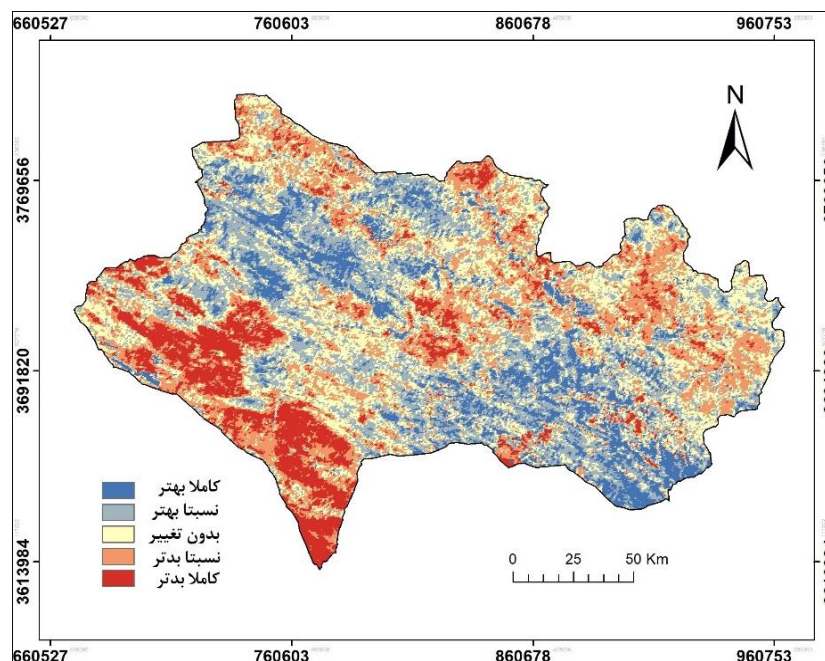
ضعیف	نسبتاً ضعیف	متوسط	خوب	عالی	
۱۱۲۵/۴	۲۶۲۵/۴	۱۳۱۲۵/۲	۹۳۷۵/۶	۱۱۲۴۸/۴	۱۳۹۴
۳۷۵/۶	۲۲۴۸/۳	۷۱۲۵/۳	۱۳۵۰۰/۱	۱۴۲۵۰/۹	۱۳۹۶
۲۸۱۲/۵	۳۷۴۸	۱۲۹۳۷/۵	۸۴۳۷/۵	۹۵۶۲/۵	۱۳۹۸
۵۶۲۲/۴	۴۵۰۰/۴	۱۵۷۴۹/۸	۸۶۲۵/۵	۳۰۰۱/۹	۱۳۹۹
۲۴۳۷/۵	۶۰۰۲/۲	۱۳۳۱۰/۳	۸۲۴۵/۴	۷۵۰۳/۶	۱۴۰۱
۱۵۰۱/۵	۱۸۷۴/۶	۹۷۵۰/۷	۱۰۸۷۵/۶	۱۳۴۹۷/۶	۱۴۰۳



شکل ۵. نواحی با سطوح مختلف کیفیت RSEI از سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳

تحلیل تفاوت RSEI

در این مطالعه برای درک ملموس‌تر و دقیق‌تر تغییرات محیط اکولوژیکی منطقه پس از سیل، از پردازش اختلاف بین نقشه‌های RSEI استان در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ استفاده شد و نقشه توزیع تغییرات RSEI تهیه گردید (شکل ۶). در این نقشه، نواحی آبی‌رنگ نشان‌دهنده بهبود کیفیت محیط‌زیست در درجات مختلف، رنگ زرد بیانگر عدم تغییر قابل توجه و درجات رنگ قرمز نشان‌دهنده وخامت قابل توجه محیط‌زیست است.



شکل ۶. تغییرات محیط اکولوژیکی در بازه زمانی ۱۳۹۸ تا ۱۳۹۹

مشاهده شد که نسبت نواحی با بهبود محیط‌زیست کم و پراکنده است، در حالی که نواحی با کاهش کیفیت محیط‌زیست نسبتاً گسترده هستند. جدول ۴ نتایج آماری تغییرات RSEI قبل و بعد از سیلاب را نشان می‌دهد. بر اساس این آمار، نسبت نواحی بدون تغییر قابل توجه در RSEI پس از سیلاب تنها ۲۲٪ از کل منطقه بود؛ نواحی با بهبود محیط‌زیست ۱۲۳۷۶ کیلومتر مربع را شامل می‌شود که معادل ۳۳٪ کل منطقه بود؛ و نواحی با افت کیفیت محیط‌زیست ۱۶۸۷۵/۸ کیلومتر مربع، معادل ۴۵٪ سطح منطقه مورد مطالعه را دربر گرفته است. این آمار نشان می‌دهد که سیلاب به‌طور قابل توجهی باعث آسیب به محیط اکولوژیکی استان شده و مساحت کمی از مناطق تغییر قابل توجهی را تجربه نکردند.

جدول ۴. تغییرات EEQ منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳

طبقه	سطح	مساحت (km ²)	مساحت کل (km ²)	درصد
بدتر	کاملاً بدتر	۹۷۵۰/۶	۱۶۸۷۵/۸	۴۵
	نسبتاً بدتر	۷۱۲۵/۲		
بدون تغییر	بدون تغییر	۸۲۵۰/۴	۸۲۵۰/۴	۲۲
	نسبتاً بهتر	۵۶۲۵/۴		
بهتر	کاملاً بهتر	۶۷۵۰/۶	۱۲۳۷۶	۳۳
	نسبتاً بهتر	۵۶۲۵/۴		

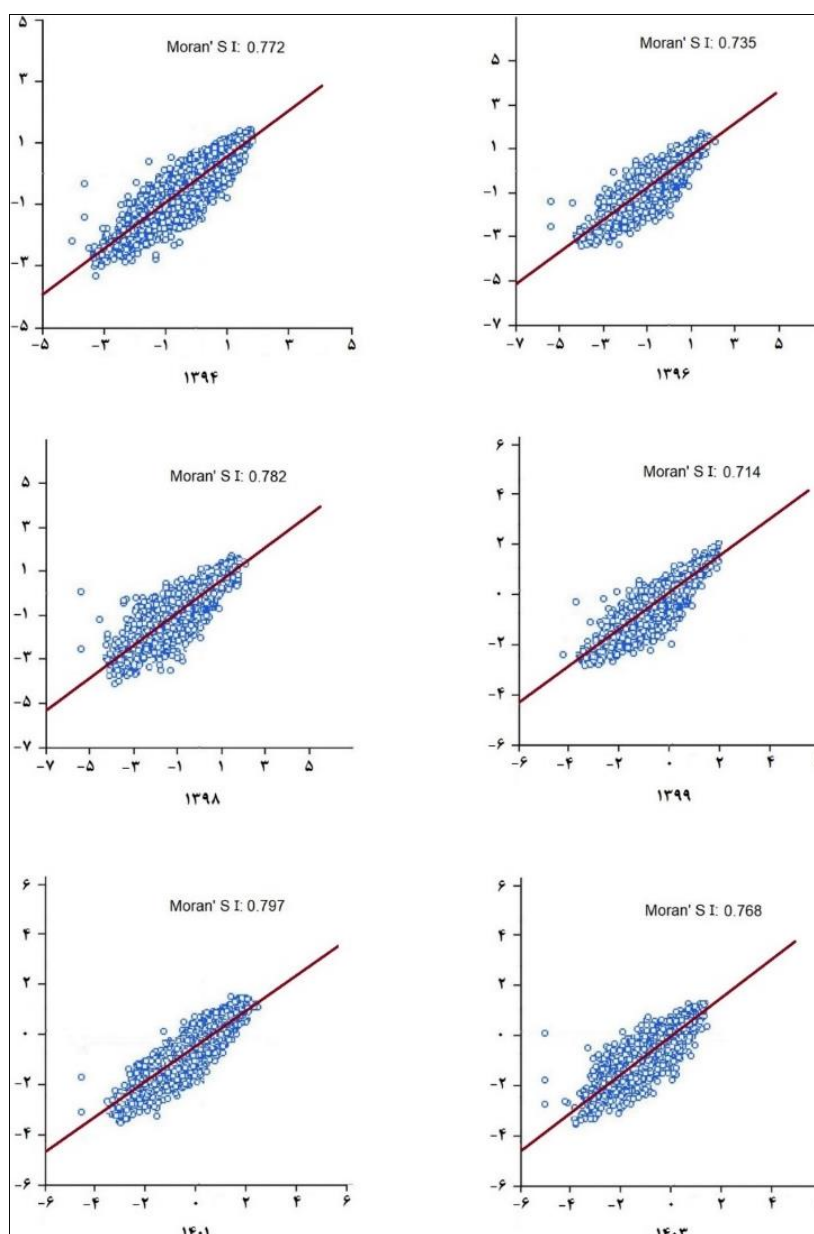
تحلیل خودهمبستگی فضایی کیفیت محیط‌زیست (EEQ)

شاخص موران جهانی با استفاده از مقادیر RSEI محاسبه شد و نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۷ ارائه شده است. مقدار شاخص موران جهانی بین ۱+ و ۱- قرار دارد؛ به‌طوری که مقادیر بزرگ‌تر از صفر نشان‌دهنده خودهمبستگی فضایی مثبت، مقادیر برابر با صفر بیانگر نبود خودهمبستگی فضایی و مقادیر کمتر از صفر نشان‌دهنده خودهمبستگی فضایی منفی هستند. مقدار شاخص موران در سطح استان لرستان طی سال‌های مورد بررسی همواره مثبت و بزرگ‌تر از ۰/۷ بوده است. همچنین مقدار p کمتر از ۰/۰۱ و مقدار Z بزرگ‌تر از ۲/۵۸ به دست آمده که بیانگر معناداری نتایج در سطح اطمینان ۹۹٪ (سطح ۰/۱) است. شکل ۷ نمودارهای پراکنش شاخص موران برای RSEI در سال‌های ۱۳۹۴، ۱۳۹۶، ۱۳۹۸، ۱۳۹۹، ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳ را نشان می‌دهد که عمدتاً در ربع‌های اول و سوم توزیع شده‌اند. این نتایج بیانگر وجود همبستگی فضایی مثبت و قوی بین EEQ و موقعیت جغرافیایی است و نشان می‌دهد که الگوی فضایی آن بیشتر به‌صورت خوشه‌ای و متراکم بوده و از حالت تصادفی فاصله دارد.

نمودار خوشه‌بندی LISA می‌تواند درک بهتری از الگوی خوشه‌بندی فضایی و نحوه توزیع EEQ ارائه دهد. نقشه خوشه‌ای LISA شامل سه نوع تجمع فضایی محلی است که عبارت‌اند از: بالا-بالا، پایین-پایین و بدون معناداری. از دیدگاه مکانی، ویژگی‌های خوشه‌بندی RSEI نسبتاً پایدار بوده و از همگنی و تداوم فضایی برخوردار است. بخش‌های مرکزی و جنوب شرقی استان، الگوی تمرکز با مقادیر بالا را نشان می‌دهند که بیانگر کیفیت نسبتاً بالای محیط‌زیست در این مناطق و همچنین بالا بودن کیفیت محیط‌زیست در نواحی پیرامونی آن‌هاست؛ بنابراین این مناطق به‌عنوان نواحی تمرکز مقادیر بالا شناخته می‌شوند. در مقابل، بخش‌های غربی و جنوب شرقی استان، به‌عنوان نواحی تجمع مقادیر پایین شناسایی شده‌اند (شکل ۸).

جدول ۵. ضرایب شاخص موران جهانی مربوط به منطقه مورد مطالعه

۱۴۰۳	۱۴۰۱	۱۳۹۹	۱۳۹۸	۱۳۹۶	۱۳۹۴	
۰/۷۴۶۰	۰/۷۷۲۴	۰/۷۲۷۹	۰/۷۶۸۱	۰/۷۳۵۱	۰/۷۶۲۰	I
۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	P
۶۲/۵۵۷۴	۶۸/۰۴۵۲	۶۴/۹۶۲۱	۶۵/۲۵۴۱	۷۳/۱۵۰۴	۷۰/۲۲۴۱	Z

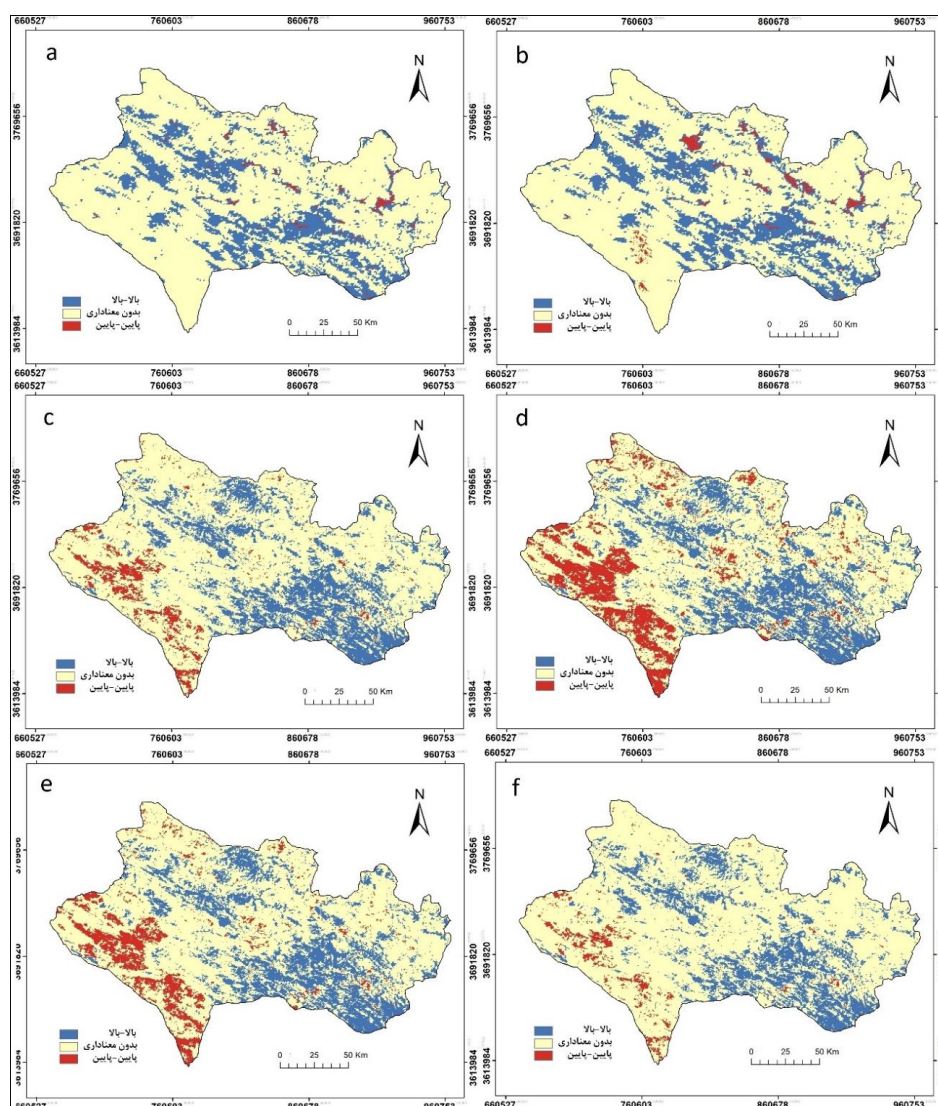


شکل ۷. نمودارهای پراکندگی مقادیر RSEI

عوامل محرک تغییرات مکانی-زمانی EEQ

تحلیل تشخیص تک‌عاملی

بین سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳، مقادیر RSEI در سطح استان با درجات مختلفی تغییر کرد. با توجه به شرایط واقعی منطقه مورد مطالعه و در دسترس بودن داده‌ها، پنج عامل تأثیرگذار از میان سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی و طبیعی انتخاب شدند. ویژگی‌های تغییرات RSEI پس از سیلاب برای شناسایی عوامل محرک و تعاملات میان این عوامل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحلیل تشخیص عامل، میزان توان توضیحی هر عامل را نسبت به تغییرات RSEI در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. مقادیر به‌دست‌آمده برای هر سال در جدول ۶ ارائه شده است. مقادیر q بیانگر قدرت توضیحی هر عامل برای نتایج RSEI هستند؛ هرچه مقدار q بیشتر باشد، عامل، قدرت بیشتری در توضیح تغییرات RSEI دارد. نتایج نشان داد که در طول دوره مورد مطالعه، مقادیر q ارتفاع (X1) به‌تدریج افزایش یافته و این عامل با بیشترین توان توضیحی، بیش از ۳۵٪ از تغییرات RSEI را تبیین کرده است. در مقایسه، مقادیر q شیب، تراکم جمعیت و تولید ناخالص داخلی (GDP) نسبتاً پایین و کمتر از ۱۰٪ بود. به‌طور کلی، ارتفاع و جمعیت، عوامل اصلی محرک تغییرات RSEI هستند. مقادیر p مربوط به عامل جهت شیب در سال‌های مورد بررسی ۰/۱۴۹، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۱۱ بود که نشان می‌دهد جهت زمین در توضیح تغییرات RSEI نقش قابل اعتماد و قابل توجهی ندارد.



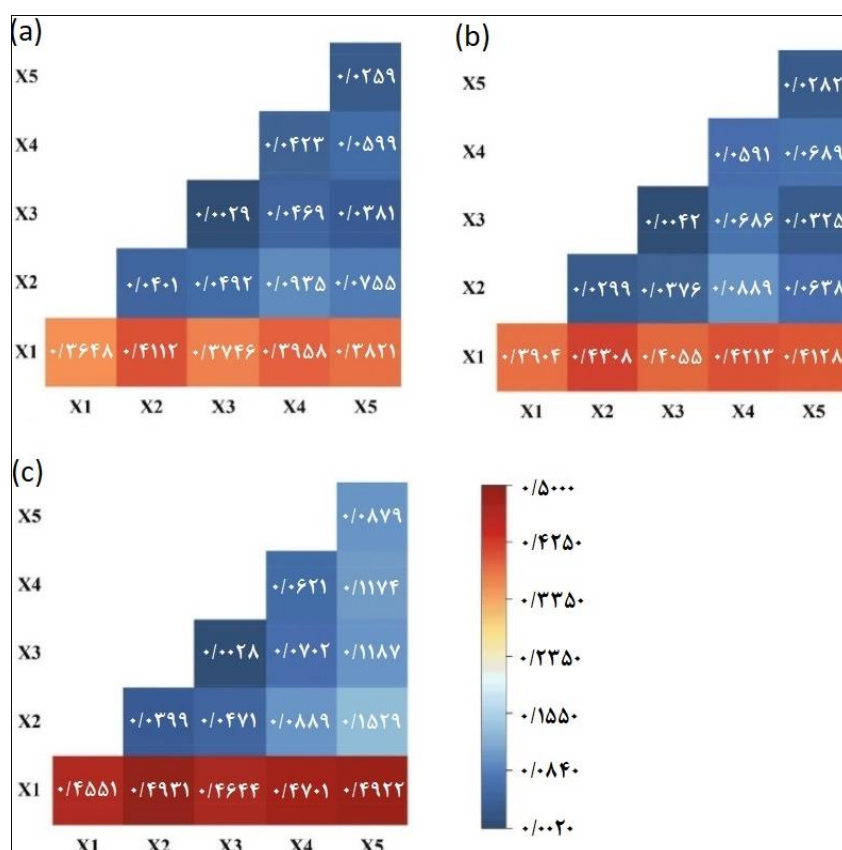
شکل ۸. تحلیل LISA از مقادیر RSEI

جدول ۶. نتایج تشخیص تأثیر عوامل مختلف بر کیفیت اکولوژیکی محیط (EEQ)

سال	X1 (ارتفاع)	X2 (شیب)	X3 (جهت شیب)	X4 (تراکم جمعیت)	X5 (تولید ناخالص داخلی)
۱۳۹۴	q	۰/۳۶۰	۰/۰۴۲	۰/۰۰۳	۰/۰۲۸
	p	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۱۳۹۹	q	۰/۳۶۹	۰/۰۳۶	۰/۰۰۴	۰/۰۵۹
	p	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۱۴۰۱	q	۰/۴۶۱	۰/۰۳۶	۰/۰۰۵	۰/۰۹۸
	p	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۱۱	۰/۰۰۰

اثرات تعاملی میان عوامل

در تحلیل تشخیص تعامل که با استفاده از GeoDetector انجام شد، تعامل دو عامل مؤثر بر مقادیر RSEI مشخص گردید و نتایج آن در شکل ۹ نشان داده شده است. مقادیر Q مربوط به تعامل هر جفت عامل در توضیح تغییرات RSEI، از مقادیر q مربوط به هر عامل به تنهایی بالاتر است. این تعامل‌ها نشان‌دهنده تقویت دوعاملی یا تقویت غیرخطی هستند و بنابراین تأیید می‌کنند که فرایند تغییرات RSEI تحت تأثیر تعامل چندعاملی قرار دارد. در روند تغییرات RSEI در دوره‌های مختلف، مقادیر q تعامل بین ارتفاع و سایر عوامل بالاتر از تعامل سایر عوامل بود که نشان می‌دهد ارتفاع عامل غالب در تأثیرگذاری بر تغییرات RSEI است. در میان نتایج، بیشترین مقادیر Q مربوط به تعامل ارتفاع و شیب بود که به ترتیب برابر با ۰/۴۱۱۲ و ۰/۴۳۰۸ و ۰/۴۹۳۱ در دوره‌های مختلف بود و پس از آن تعامل ارتفاع و جمعیت با مقادیر q برابر ۰/۳۹۵۸، ۰/۴۲۱۳ و ۰/۴۷۰۱ قرار داشت.



شکل ۹. نتایج تحلیل تشخیص تعامل عوامل. (a) سال ۱۳۹۴، (b) سال ۱۳۹۹ و (c) سال ۱۴۰۱

بحث

در این پژوهش از شاخص RSEI برای ارزیابی ویژگی‌های EEQ قبل و بعد از سیلاب در سال ۱۳۹۸ استفاده شد. همچنین از

شاخص Moran's I و مدل GeoDetector برای بررسی خوشه‌بندی فضایی EEQ و شناسایی عوامل محرک بازسازی پس از بحران استفاده گردید. شاخص RSEI با استفاده از روش PCA چهار شاخص مرتبط با زندگی انسانی شامل سبزی‌نگی، رطوبت، خشکی و دما را یکپارچه می‌کند. این شاخص دارای موضوعیت و اعتبار بالا است و می‌تواند به‌طور مؤثر کیفیت محیط‌زیست منطقه مورد مطالعه را بازتاب دهد (Quan et al., 2022; Zhou & Liu, 2022).

نتایج PCA نشان داد که علامت مقادیر ویژه چهار شاخص، به‌ویژه در مؤلفه اول (PC1) هر سال، الگوی ثابتی دارد. این الگو با نتایج سایر پژوهشگران همخوانی دارد، به‌طوری که NDVI و WET مقادیر ویژه مثبت و NBDISI و LST مقادیر منفی دارند (Gong et al., 2023; Jiang et al., 2023). این سازگاری، اعتماد به استفاده از PC1 در بازه ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ برای ساخت RSEI و تحلیل ویژگی‌های مکانی-زمانی EEQ در سطح استان لرستان و بررسی تأثیر سیلاب را تقویت می‌کند. به‌طور کلی، تغییرات EEQ طی دوره مورد بررسی از الگوی ثبات - کاهش - بهبود پیروی می‌کند. برای بررسی اثر سیلاب بر EEQ، روند تغییرات EEQ از ۱۳۹۴ تا ۱۳۹۸ (قبل از سیلاب) رصد شد تا مرجع دقیق‌تری برای مقایسه EEQ قبل و بعد از سیلاب فراهم شود. این تحلیل تأیید کرد که کاهش میانگین مقدار RSEI در سال ۱۳۹۹ درواقع ناشی از سیلاب بوده است. میانگین مقادیر RSEI در سه سال پس از سیلاب به‌ترتیب ۰/۶۰۸۱، ۰/۶۲۳۶ و ۰/۶۵۱۴ بود که نشان‌دهنده بازسازی مستمر EEQ در سطح استان از طریق ترکیبی از بازسازی طبیعی و مدیریت انسانی است. نرخ رشد میانگین RSEI در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۳ به‌ترتیب ۲/۵۴٪ و ۴/۴۶٪ بود که بیانگر شتاب گرفتن روند بهبود کیفیت محیط‌زیست پس از سیلاب است.

یک چالش اساسی در ارزیابی کیفیت محیط اکولوژیکی، تفکیک اثر مخاطرات آبی مانند سیلاب از فرایندهای تدریجی نظیر تغییرات اقلیمی، نوسانات بارندگی و تغییرات کاربری اراضی است. در این پژوهش، انتساب کاهش شاخص RSEI به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ بر اساس سه استدلال علمی صورت گرفته است:

- مقیاس زمانی و شتاب تغییرات: فرایندهایی مانند تغییر کاربری اراضی (مثلاً تبدیل جنگل به کشاورزی) یا تغییرات اقلیمی، الگوهای زمانی و تدریجی دارند که پویایی آن‌ها در طول یک الگو یا روند بلندمدت نمایان می‌شود. در مقابل، افت شدید، ناگهانی و همه‌جانبه ارزش‌های RSEI در سال ۱۳۹۸، نشان‌دهنده وقوع یک شوک محیطی آبی و مخرب است که پویایی‌های بلندمدت سیستم را تحت‌الشعاع قرار داده است.

- تحلیل رفتاری مؤلفه‌های فرعی شاخص: بررسی رفتاری مؤلفه‌های درونی RSEI نشان داد که افت کیفیت محیطی عمدتاً ناشی از کاهش شدید سبزی‌نگی به همراه افزایش بی‌سابقه شاخص برهنگی خاک و رطوبت سطحی در بستر و حاشیه حوضه‌ها بوده است. این ناپایداری ساختاری هم‌زمان، امضای هیدرولوژیکی بارز سیلاب‌های مخرب (شستشوی پوشش گیاهی و برجا ماندن لایه‌های رسوبی گلی) است و با پدیده خشک‌سالی یا نوسانات فصلی بارش که رفتاری متضاد در مؤلفه رطوبت دارند، سازگار نیست.

- رعایت احتیاط در تعمیم نتایج: با وجود شواهد فوق، اذعان می‌دارد که متغیرهای اقلیمی و انسانی به‌عنوان نوبزهای محیطی همواره بر سیستم حاکم هستند. از این رو، وقوع سیلاب به‌عنوان عامل محرک اصلی و پیش‌ران ناگهانی در افت شاخص کیفیت اکولوژیکی قلمداد می‌شود که در سال‌های بعد، فرایند بازیابی آن تحت کنترل عوامل توپوگرافی و نوسانات بارندگی بعدی قرار گرفته است.

مدل GeoDetector به‌عنوان یک ابزار کمی برای شناسایی عوامل محرک تغییرات پس از بحران در RSEI به کار گرفته شد و تصویر دقیق‌تری از تأثیر این عوامل بر بازسازی اکوسیستم پس از بحران ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج GeoDetector، ارتفاع و تراکم جمعیت به‌عنوان مهم‌ترین عوامل تک‌عاملی در تسهیل بازسازی پایدار EEQ در سطح استان پس از سیلاب شناسایی شدند. ارتفاع به‌عنوان شاخصی مهم از شرایط توپوگرافی، بر عواملی مانند ترکیب خاک، پراکندگی پوشش گیاهی و تنوع زیستی تأثیر می‌گذارد و بنابراین نقش کلیدی در شکل‌گیری روند بازسازی و بهبود محیط‌زیست پس از سیلاب ایفا می‌کند. به همین دلیل، بازسازی و مدیریت محیط اکولوژیکی پس از سیلاب نیازمند توجه ویژه به تأثیر ارتفاع و اتخاذ اقدامات مرتبط برای تسریع بهبود و ارتقای محیط‌زیست است. البته این یافته‌ها با مطالعات مشابه در زاگرس (مرادی و

همکاران، ۲۰۲۴) مقایسه و تأیید شد.

تراکم جمعیت که توزیع جمعیتی منطقه را بازتاب می‌دهد، به‌طور غیرمستقیم الگوهای استفاده از منابع و حفاظت محیط‌زیست را نشان می‌دهد. پس از سیلاب، تأثیر تراکم جمعیت بر محیط اکولوژیکی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. این نوسان ناشی از اختلال در شرایط تولید و زندگی مردم پس از سیلاب است که بر توزیع جمعیت و الگوی استفاده از منابع تأثیر می‌گذارد. با بهبود تدریجی شرایط و بازسازی زندگی، تأثیر تراکم جمعیت بر محیط اکولوژیکی کاهش می‌یابد. در مجموع، این مطالعه نه تنها تغییرات بازسازی اکولوژیکی را از دیدگاه عوامل تک عاملی توصیف می‌کند، بلکه مکانیسم‌های بازسازی محیط‌زیست پس از بحران را با در نظر گرفتن تعامل عوامل بررسی می‌کند. این رویکرد از اهمیت عملی بالایی برای درک جامع فرایند بازسازی اکولوژیکی برخوردار است.

بر اساس خروجی مدل GeoDetector، عامل ارتفاع به‌تنهایی بالاترین توان توضیحی (بیش از ۳۵ تا ۴۶٪ در سال‌های مختلف) را در تبیین تغییرات شاخص RSEI به دست آورده است. دلایل علمی این نقش غالب را می‌توان به موارد زیر نسبت داد:

- کنترل بر الگوهای اقلیمی و هیدرولوژیکی: در منطقه کوهستانی زاگرس و استان لرستان، ارتفاع مستقیماً میزان بارندگی، درجه حرارت و رطوبت محیطی را کنترل می‌کند. مناطق مرتفع‌تر به دلیل دریافت بارندگی بیشتر و دمای خنک‌تر (کاهش تبخیر و تعرق)، شرایط بهتری را برای حفظ رطوبت خاک و رشد و ترمیم سریع‌تر پوشش گیاهی فراهم می‌کنند.

- پناهگاه اکولوژیکی و مصنوعیت نسبی از غرقابی مستقیم: در جریان سیلاب سهمگین سال ۱۳۹۸، بیشترین تخریب و جابجایی خاک در اراضی پست، حاشیه رودخانه‌ها و دشت‌های سیلابی رخ داده است. اراضی مرتفع عموماً از غرقابی طولانی‌مدت و رسوب‌گذاری‌های ضخیم ناشی از طغیان رودخانه‌ها مصون مانده‌اند؛ در نتیجه، بانک بذر خاک و ساختار ریشه‌های گیاهان در ارتفاعات حفظ شده و بستر مناسبی برای بازیابی طبیعی پدید آورده است.

- دوری از فشارهای انسانی و توسعه شهری: توزیع جمعیت و فعالیت‌های اقتصادی و تراکم جمعیت بیشتر در دشت‌ها و نواحی کم‌ارتفاع تمرکز دارد. مناطق مرتفع به دلیل عدم دسترسی آسان، کمتر تحت تأثیر نرخ بالای تخریب‌های ثانویه انسانی و چرای مفرط پس از بحران قرار گرفته‌اند که این امر شتاب بازیابی اکولوژیکی را در ارتفاعات بالا افزایش داده است.

نتایج سنجش جفت عاملی در مدل آشکارساز جغرافیایی نشان داد که تعامل بین دو متغیر ارتفاع و شیب، قوی‌ترین اثر را در روند بهبودی اکولوژیکی داشته است. این امر نشان‌دهنده یک رابطه متقابل و تقویت‌کننده است که به دلایل زیر رخ می‌دهد:

- تعدیل فرایندهای ژئومورفولوژیک و پایداری خاک: ارتفاع به‌تنهایی پتانسیل اقلیمی بازسازی را تعیین می‌کند، اما شیب به‌عنوان عامل رواناب و فرسایش، پایداری مکانیکی این بازسازی را دیکته می‌کند. در ارتفاعات بالا اگر شیب ملایم یا متوسط باشد، فرصت نفوذ آب به درون خاک بیشتر شده، فرسایش شستشویی کاهش می‌یابد و روند بازیابی گیاهی شتاب می‌گیرد. در مقابل، تعامل ارتفاع بالا با شیب‌های بسیار تند، ریسک زمین‌لغزش‌های ثانویه پس از سیل را بالا برده و مانع تثبیت کیفیت محیط می‌شود؛ بنابراین، ترکیب این دو مؤلفه هیدروتوپوگرافی، میکرو کلیمای منحصربه‌فردی برای احیا ایجاد می‌کند.

- توزیع فضایی منابع آب و مواد مغذی: تعامل شیب و ارتفاع، جهت حرکت و تمرکز رطوبت سطحی و املاح مغذی خاک را در حوضه‌های آبریز استان (نظیر کشکان و سزار) مشخص می‌سازد. تلاقی ارتفاعات و شیب‌های ریخت‌شناختی به‌عنوان خطوط هدایت‌کننده جریان عمل کرده و بخش‌هایی از سیمای سرزمین که در زوایای تعادلی شیب و ارتفاع بهینه قرار دارند، به‌سرعت به لکه‌های پیشران بازسازی اکولوژیکی تبدیل می‌شوند.

نتیجه‌گیری

ارزیابی ویژگی‌های تغییرات EEQ قبل و بعد از بلایا و پایش روند بازسازی پس از بحران، اهمیت زیادی در تدوین راهبردهای حفاظت محیط‌زیست برای نهادهای مرتبط دارد. این پژوهش با استفاده از سیلاب رخ داده در استان لرستان در سال ۱۳۹۸ به‌عنوان مطالعه موردی، تغییرات مکانی-زمانی و بازسازی پس از بحران EEQ را بر اساس فناوری سنجش‌زدور بررسی کرد.

افزون بر این، از مدل GeoDetector و شاخص موران برای شناسایی عوامل محرک پس از بحران و تحلیل خوشه‌بندی فضایی استفاده شد. ابتدا، داده‌های MODIS مربوط به دوره‌های مشابه بین سال‌های ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ انتخاب و با استفاده از PCA شاخص RSEI ساخته شد. بر اساس این شاخص، توزیع مکانی-زمانی RSEI تولید شد تا سیلاب بر EEQ منطقه به‌صورت کمی و کیفی تحلیل شود. سپس با استفاده از تحلیل خودهمبستگی، خوشه‌بندی فضایی EEQ استان بررسی گردید و در نهایت مدل GeoDetector برای کمی سازی اثر عوامل محرک بازسازی محیط اکولوژیکی پس از بحران از دو جنبه: تشخیص تک عاملی و تشخیص تعامل عوامل، به کار گرفته شد نتایج اصلی مطالعه به شرح زیر است:

- مقادیر RSEI به‌ترتیب برابر با ۰/۶۷۴۱، ۰/۷۶۵۸، ۰/۶۶۵۸، ۰/۶۰۸۱، ۰/۶۲۳۶ و ۰/۶۵۱۴ بودند. روند تغییرات RSEI از سال ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ نشان‌دهنده الگوی «ثبات - کاهش - افزایش» است و وضعیت EEQ با این الگو مطابقت دارد. این نتایج نشان می‌دهند که کیفیت اکولوژیکی استان در اثر سیلاب کاهش یافته، بازسازی محیط‌زیست به‌صورت تدریجی انجام شده و کیفیت کلی محیط‌زیست منطقه به سطح نسبتاً مطلوب قبل از بحران بازگشته است.

- بر اساس آمارهای مساحتی تفاوت RSEI قبل و بعد از سیل، مناطق با افزایش RSEI تنها ۳۳٪ از کل مساحت را شامل می‌شوند، در حالی که مناطق با کاهش RSEI به ۴۴٪ از مساحت مطالعه رسیده‌اند.

- مقادیر شاخص موران در بازه ۱۳۹۴ تا ۱۴۰۳ نشان داد که توزیع مکانی EEQ دارای همبستگی مثبت و خوشه‌بندی است و به‌صورت تصادفی پراکنده نشده است. با استفاده از مدل GeoDetector مشخص شد که ارتفاع و جمعیت مهم‌ترین عوامل محرک تغییرات RSEI هستند. در تحلیل تعامل عوامل، بیشترین تأثیر مربوط به تعامل ارتفاع و شیب است که در طول دوره مورد مطالعه همواره بیش از ۴۰٪ بوده است.

در این مطالعه، سیلاب استان لرستان در سال ۱۳۹۸ به‌عنوان نمونه‌ای برای پایش تغییرات کیفیت محیط اکولوژیکی (EEQ) قبل و بعد از بحران و همچنین ارزیابی روند بازسازی پس از آن از دیدگاه سنجش‌ازدور به کار گرفته شد. نتایج نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه این حادثه بر محیط‌زیست اکولوژیکی بود؛ بنابراین، در مواجهه با چنین بلایایی، تقویت پایش محیط‌زیست و اجرای برنامه‌های بازسازی پس از بحران به‌منظور حفظ تعادل اکولوژیکی محلی، یک ضرورت فوری است.

منابع

- جلیلیان، زهرا؛ امان‌اللهی، جمیل (۱۴۰۲). ارزیابی پتانسیل تخریب اکولوژیکی منطقه حفاظت‌شده کوسالان با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۲(۱)، ۴۱-۶۱. doi: 10.22067/geoh.2022.75467.1184
- ساعدیناه، مهین؛ امان‌اللهی، جمیل (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی کاربری اراضی بر اساس شاخص‌های کیفی اکولوژیکی (مطالعه موردی: حوضه دریاچه زریبار). *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۳(۴)، ۲۶۹-۲۹۰. doi: 10.22067/geoh.2024.86012. 1446
- قاسمی آریان، یاسر؛ آذرینوند، حسین؛ طویلی، علی (۱۴۰۰). ارزیابی و مقایسه شاخص‌های اکولوژیکی مراتع مناطق خشک، تحت دو نوع رویکرد مدیریتی اکولوژیک‌محور و اجتماعی-اکولوژیک‌محور (منطقه مورد مطالعه: شهرستان سربیشه خراسان جنوبی). *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۸(۱)، ۸۲-۹۲. doi: 10.22092/ijdr.2021.123857
- مشیری، سجاد؛ نیکدل منور، احمد؛ جبرئیلی، محمدرضا؛ تیموری، ایرج؛ ولیزاده کامران، خلیل؛ فیضی‌زاده، بختیار (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی شاخص زیست‌پذیری اکولوژیکی (منطقه مطالعه‌شده: کلان‌شهر تبریز). *برنامه‌ریزی فضایی*، ۱۵(۱)، ۸۷-۱۰۸. doi: 10.22108/sppl.2025.141477.1787
- ناصری، نازنین؛ حسین‌زاده نیری، میلاد؛ مصطفی‌زاده، رفوف (۱۴۰۲). تحلیل کیفیت فضای سبز شهرستان کرج با استفاده از شاخص اکولوژیکی سنجش‌ازدور (RSEI). *جغرافیا و مطالعات محیطی*، ۴(۵۳)، ۴۰-۵۵. doi: 10.71740/ges.2025.979140

References

- Chen, N., Cheng, G., Yang, J., Ding, H., & He, S. (2023). Evaluation of Urban Ecological Environment Quality Based on Improved RSEI and Driving Factors Analysis. *Sustainability*, 15 (11), 8464. doi: 10.3390/su15118464
- Ghasemi Aryan, Y., Azarnivand, H., & Tavili, A. (2021). Assessment and comparison of ecological

- indexes of arid land rangelands under two types of management approaches Ecological-oriented and social-ecological-oriented (Study area: Sarbisheh city in South Khorasan Province). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28 (1), 82-92. doi: 10.22092/ijrdr.2021.123857. (In Persian).
- Gong, C., Lyu, F., & Wang, Y. (2023). Spatiotemporal change and drivers of ecosystem quality in the Loess Plateau based on RSEI: a case study of Shanxi, China. *Ecol Indic.*, 155, 111060. doi: 10.1016/j.ecolind.2023.111060.
- Guo, Y., Cheng, L., Ding, A., Yuan, Y., Li, Z. H., Hou, Y., Ren, L., & Zhang, S. H. (2024). Geodetector model-based quantitative analysis of vegetation change characteristics and driving forces: A case study in the Yongding River basin in China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 132, 104027, doi: 10.1016/j.jag.2024.104027.
- Hong, J. H., Su, Z. L., & Lu, E. H. (2020). Spatial Perspectives toward the Recommendation of Remote Sensing Images Using the INDEX Indicator, Based on Principal Component Analysis. *Remote Sens.*, 2020, 12, 1277. doi: 10.1080/15481603.2020.1760434
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J for Res.*, 32 (1), 1–6. doi: 10.1007/s11676-020-01155-1.
- Jalilian, Z., & Amanollahi, J. (2023). Evaluating Ecological Degradation of Kosalan Protected Area using Remote Sensing and GIS. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12 (1), 41-61. doi: 10.22067/geoh.2022.75467.1184. (In Persian).
- Jiang, X., Guo, X., Wu, Y., Xu, D., Liu, Y., Yang, Y., & Lan, G. (2023). Ecological vulnerability assessment based on remote sensing ecological index (RSEI): a case of Zhongxian County, Chongqing. *Front Environ Sci.*, 10, 1074376. doi: 10.3389/fenvs.2022.1074376.
- Li, X., Zhang, H., Yu, J., Gong, Y., Guan, X., & Li, S. (2021). Spatial-temporal analysis of urban ecological comfort index derived from remote sensing data: a case study of Hefei, China. *J Appl Rem Sens.*, 15 (04), 042403–042403. doi: 10.1117/1.JRS.15.042403.
- Liao, W., & Jiang, W. (2020). Evaluation of the spatiotemporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index. *Remote Sensing*, 12 (15), 2462. doi: 10.3390/rs12152462.
- Long, Y., Jiang, F., & Deng, M. (2023). Spatial-temporal changes and driving factors of eco-environmental quality in the Three-North region of China. *J. Arid Land*, 15, 231–252. doi: 10.1007/s40333-023-0053-0
- Mehrabi, A. (2021). Monitoring the Iran Pol-e-Dokhtar flood extent and detecting its induced ground displacement using sentinel 1 imagery techniques. *Natural Hazards*, 105, 2603–2617. doi: 10.1007/s11069-020-04414-w
- Moradi, S., Moradi, H., Dolatshah, J., & Rezvani, A. (2024). Assessing Short-term Flood Impact on Land Use Dynamics in Iran's Central Zagros: A Case Study of Sefid Kuh Protected Area. *Landscape Online*, 99, 1130. doi: 10.3097/LO.2024.1130
- Moshiri, S., Nikdel Monavvar, A., Jebraily, M., Teimouri, I., Valizadeh Kamran, K. H., & feizizadeh, B. (2025). Assessing Spatio-Temporal Changes in the Ecological Livability Index (Case Study: Tabriz Metropolis). *Spatial Planning*, 15 (1), 87-108. doi: 10.22108/sppl.2025.141477.1787. (In Persian).
- Naseri, N., Hosseinzadeh Niri, M., & Mostafazadeh, R. (2025). Analysing the Quality Karaj City Green Spaces using Remote Sensing Ecological Index (RSEI). *Journal of Geography and Environmental Studies*, 14 (53), 40-55. doi: 10.71740/ges.2025.979140. (In Persian).
- Quan, W. T., Zhang, S. Y., Liu, Y., & Wang, W. D. (2022). Monitoring and Evaluation of Ecological Environment Changes in Dongzhuang Reservoir Basin in Shaanxi Province Based on Remote Sensing Ecological Index. *Bull. Soil Water Conserv.*, 42, 96–104.
- Sedpanah, M., & Amanollahi, J. (2024). Evaluation of Spatial-Temporal Land Use Changes Based on Qualitative Ecological Indicators (Case Study: Zaribar Lake Basin). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13 (4), 269-290. doi: 10.22067/geoh.2024.86012.1446. (In Persian).

- Song, Y., Wang, J., Ge, Y., & Xu, C. (2020). An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data. *GISci. Remote Sensing*, 57 (12), 593–610.
- Wang, H., Li, C., Li, M., Zhan, Y., Liu, K., & Li, J. (2025). The Analysis of Spatial and Temporal Changes in Ecological Quality and Its Drivers in the Baiyangdian Watershed. *Remote Sensing*, 17(17), 3017. doi: 10.3390/rs17173017
- Wang, J. F., Zhang, T. L., & Fu, B. J. (2016). A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecol Indic.*, 67, 250–256. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.02.052.
- Wang, L.X., Zhao, R., Liu, Z., Zhang, S.C., Kong, J., & Yang, Y. (2022). Monitoring and Prediction of Ecological Environmental Quality in the Yanhe River Basin Based on the Remote Sensing Ecological Index. *Arid Zone Res.*, 39, 943–954.
- Weng, Q., Fu, P., & Gao, F. (2014). Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 145, 55–67. doi: 10.1016/j.rse.2014.02.003.
- Xiong, Y., Xu, W., Huang, S., Wu, C., Dai, F., Wang, L., Lu, N., & Kou, W. (2022). Ecological environment quality assessment of Xishuangbanna rubber plantations expansion (1995–2018) based on Multi-temporal Landsat imagery and RSEI. *Geocarto Intern.*, 37(12), 3441–3468. doi: 10.1080/10106049.2020.1861663.
- Xu, E., Zhang, G., Wang, H., Yang, M., Tian, H., Zhao, M., Dong, N., Li, C., Hu, Y., Tian, G., Lei, Y., Chen, Q., & Wei, D. (2025). Monitoring and Assessing Ecological Environmental Quality in Qianping Reservoir, Central China: A Remote Sensing Ecological Index (RSEI) Approach. *Forests*, 16 (5), 831. doi: 10.3390/f16050831
- Xu, H., Shi, T., Wang, M., Fang, C., & Lin, Z. (2018). Predicting effect of forthcoming population growth-induced impervious surface increase on regional thermal environment: xiong'an New Area, North China. *Building and Environment*, 136, 98–106. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.03.035.
- Xu, HQ. (2013). A remote sensing urban ecological index and its application. *Acta Ecologica Sinica*, 33 (24), 7853–7862.
- Yan, L., He, R., Kasanin-Grubin, M., Luo, G., Peng, H., & Qiu, J. (2017). The dynamic change of vegetation cover and associated driving forces in Nanxiong Basin, China. *Sustainability*, 9(3), 443. doi: 10.3390/su9030443.
- Yang, H., Zhong, X., Deng, S., & Xu, H. (2021). Assessment of the impact of LUCC on NPP and its influencing factors in the Yangtze River basin, China. *Catena*, 206, 105542. doi: 10.1016/j.catena.2021.105542.
- Zhang, H., Liu, Y., Li, X., Feng, R., Gong, Y., Jiang, Y., Guan, X., & Li, S. (2023). Combining remote sensing information entropy and machine learning for ecological environment assessment of Hefei- Nanjing-Hangzhou region, China. *J Environ Manage*, 325, 116533. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116533.
- Zhang, L., Li, X., Liu, X., Lian, Z., Zhang, G., Liu, Z., An, S., Ren, Y., Li, Y., & Liu, S. (2025). Dynamic monitoring and drivers of ecological environmental quality in the Three-North region, China: Insights based on remote sensing ecological index. *Ecological Informatics*, 85, 102936, 1574-9541.
- Zhou, J., & Liu, W. (2022). Monitoring and Evaluation of Eco-Environment Quality Based on Remote Sensing-Based Ecological Index (RSEI) in Taihu Lake Basin, China. *Sustainability*, 14, 5642.