



Mapping and spatial pattern analysis of the ecological sensitivity of mountain protected Areas (Case study: Oshtorankouh protected Area, Lorestan province)

Akram Nouri Kamari^{1✉} | Seyedeh Samira Soleimanipour²

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

2. Department of Forestry, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Lorestan University, Khorramabad, Iran. E-mail: soleymaniporsamira@yahoo.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 19 September 2025

Received in revised form 16
November 2025

Accepted 25 November 2025

Published online 21 November
2025

Keywords:

Delphi method,

Mountain ecosystems,

Protection,

Spatial autocorrelation,

Vulnerability.

ABSTRACT

Assessing the ecological sensitivity of protected areas provides a fundamental basis for identifying critical zones and designing adaptive management strategies under climate change conditions. This study aimed to model and analyze the spatial pattern of ecological sensitivity in the Oshtorankouh Protected Area, located in Lorestan Province, western Iran. A combination of the Delphi method and spatial analysis techniques in a GIS environment was employed. Nine ecological and physiographic indicators—including elevation, slope, aspect, climate, land use/land cover, surface runoff, spring discharge, soil erodibility, and geological formations—were selected for modeling. The Delphi-based weighting of indicators indicated that land use/land cover (0.198) and surface runoff (0.162) exerted the greatest influence on determining sensitivity levels. Spatial modeling results revealed that approximately 51% of the study area falls within the high and very high sensitivity classes, predominantly concentrated in the southern and central sectors. The global spatial autocorrelation analysis (Moran's $I = 0.773$, $P < 0.001$) confirmed a significant clustered pattern of sensitivity, while local spatial analysis (Local Moran's I) identified high-high (HH) hot spots mainly in the southern and western parts of the area. These zones are characterized by steep slopes, intense runoff, reduced vegetation density, and expansion of agricultural lands. Overall, the findings indicate that the ecological sensitivity of Oshtorankouh is governed by complex interactions between natural and anthropogenic factors. Focusing conservation planning, vegetation restoration, and watershed management efforts on the identified hot spots can effectively enhance resilience and reduce vulnerability across this valuable mountain ecosystem.

Cite this article: Nouri Kamari, A., & Soleimanipour, S.S. (2025). Mapping and spatial pattern analysis of the ecological sensitivity of mountain protected Areas (Case study: Oshtorankouh protected Area, Lorestan province). *Journal of Natural Environment*, 78 (3), 375-394. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.404616.2851>



نقشه‌سازی و تحلیل الگوی مکانی حساسیت بوم‌شناختی

مناطق حفاظت‌شده کوهستانی

(مطالعه منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه، استان لرستان)

اکرم نوری کمري^۱ | سیده سمیرا سلیمانی پور^۲۱. نویسنده مسئول، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. رایانامه: a.nourikamari@cfu.ac.ir۲. گروه جنگلداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران. رایانامه: soleymaniporsamira@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸	ارزیابی حساسیت بوم‌شناختی مناطق حفاظت‌شده ابزاری کلیدی برای شناسایی نواحی بحرانی و طراحی راهبردهای مدیریت سازگار با تغییر اقلیم است. این پژوهش با هدف نقشه‌سازی و تحلیل الگوی مکانی حساسیت منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه در استان لرستان، از ترکیب روش دلفی و تحلیل‌های مکانی در محیط GIS بهره گرفت. بدین‌منظور، ۹ شاخص بوم‌شناختی و فیزیوگرافیک شامل ارتفاع، شیب، جهت، اقلیم، کاربری/پوشش اراضی، رواناب سطحی، دبی چشمه‌ها، حساسیت خاک و سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش مورد استفاده قرار گرفتند. وزن‌دهی شاخص‌ها با روش دلفی و نظر متخصصان نشان داد که کاربری/پوشش اراضی (۰/۱۹۸) و رواناب سطحی (۰/۱۶۲) بیشترین تأثیر را در تعیین سطح حساسیت دارند. نتایج نقشه‌سازی و تحلیل الگوی مکانی نشان داد که حدود ۵۱ درصد از وسعت منطقه در طبقات حساسیت زیاد و بسیار زیاد قرار دارد و تمرکز این پهنه‌ها در بخش‌های جنوبی و مرکزی منطقه آشکار است. تحلیل خودهمبستگی مکانی ($Moran's I = 0.773; P < 0.001$) بیانگر وجود خوشه‌های معنی‌دار حساسیت است و نتایج تحلیل لکه‌های داغ (Local Moran's I) نیز نشان داد که لکه‌های حساسیت بالا (HH) عمدتاً در نواحی جنوبی و غربی منطقه متمرکزند. این بخش‌ها دارای شیب زیاد، رواناب بالا، کاهش تراکم پوشش گیاهی و توسعه اراضی کشاورزی‌اند. یافته‌ها نشان می‌دهد که حساسیت بوم‌شناختی اشترانکوه تابعی از تعاملات پیچیده میان عوامل طبیعی و انسانی است. تمرکز برنامه‌های حفاظتی و طرح‌های احیای پوشش گیاهی و آبخیزداری در لکه‌های داغ حساسیت می‌تواند نقش مؤثری در افزایش تاب‌آوری و کاهش آسیب‌پذیری این اکوسیستم کوهستانی ارزشمند داشته باشد.
کلیدواژه‌ها:	
آسیب‌پذیری،	
اکوسیستم‌های کوهستانی،	
حفاظت،	
خودهمبستگی مکانی،	
روش دلفی.	

استناد: نوری کمري، اکرم؛ و سلیمانی‌پور، سیده سمیرا (۱۴۰۴). نقشه‌سازی و تحلیل الگوی مکانی حساسیت بوم‌شناختی مناطق حفاظت‌شده کوهستانی (مطالعه منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه، استان لرستان). محیط زیست طبیعی، ۷۸ (۳)، ۳۹۴-۳۷۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2025.404616.2851>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

امروزه فعالیت‌های انسانی از طریق افزایش قابل توجه نرخ انقراض گونه‌ها و افت جمعیت حیات وحش در بخش‌های خشکی و آبی سبب ایجاد وضعیتی بحرانی برای تنوع زیستی در سطح جهان شده است (Ceballos et al., 2015). تنوع زیستی جهانی با سرعتی بیش از تمام تاریخ حضور انسان در کره زمین در حال کاهش است و سبب ایجاد نگرانی‌های جدی در مورد کالاها و خدمات مورد نیاز انسانی تأمین شده توسط اکوسیستم‌ها شده است (Di Marco et al., 2019; Dinerstein et al., 2019). پاسخ به این نگرانی‌ها، مناطق حفاظت شده (PAS) به عنوان یکی از راهبردهای مدیریتی جهانی در حفاظت از تنوع زیستی مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته‌اند (Margules and Pressey, 2000)؛ چنانکه امروزه شبکه جهانی مناطق حفاظت‌شده در حدود ۱۵/۸ درصد از خشکی‌ها و ۷/۷ درصد از گستره‌های آبی جهان را در بر می‌گیرد (UNEP-WCMC, 2022). موفقیت برنامه‌های توسعه مناطق حفاظت‌شده در سطح جهان وابسته به کارایی این مناطق در حفاظت از تنوع زیستی است (Ervin, 2017; Gill et al., 2003). علی‌رغم اهمیت حفظ این کارایی، مناطق حفاظت‌شده در معرض طیفی از مخاطرات محیطی طبیعی و انسان‌پدید همانند آتش‌سوزی، بهره‌برداری و جنگل‌زدایی و توسعه زمین‌های زراعی، گردشگری مدیریت نشده، اثرات مخرب ناشی از آلاینده‌ها و فاضلاب‌های انسانی، خشکسالی، افزایش دمای هوا و بیماری‌ها قرار دارند که سبب از بین رفتن اکوسیستم‌های منحصر به فرد موجود در این مناطق و افت کارایی مناطق حفاظت‌شده در حفاظت از تنوع زیستی شده است (Leberger et al., 2020; Petroni et al., 2022; Chowdhury et al., 2022). بنابراین، انجام برنامه‌ریزی و فراهم آوردن ابزار مناسب برای کاهش اثرات ناشی از وقوع مخاطرات محیطی بر این مناطق امری اجتناب‌ناپذیر است (Leberger et al., 2022; Petroni et al., 2020) و تحقق این هدف و فراهم‌سازی امکان اولویت‌بندی مؤثر منابع مالی و اقدامات مدیریتی برای کاهش پیامدهای مخرب مخاطرات چندانکه، مستلزم دسترسی به اطلاعات دقیق، جامع و به‌روز درباره میزان آسیب‌پذیری این مناطق است (Kanwar and Kuniyal, 2022). آسیب‌پذیری پدیده و مفهومی است توسعه‌ای، چندبعدی، میان‌مقیاسی و بین‌رشته‌ای و براساس زمینه تحقیقاتی مورد نظر، به صورت ویژه برای زیر سیستم اجتماعی، زیر سیستم بوم‌شناختی و یا برای سیستم زوجی اجتماعی-بوم‌شناختی (SES) مورد استفاده قرار گرفته است (Cutter and Finch, 2008; Kaplan et al., 2012; Menoni et al., 2009). با توجه به اینکه مجموعه‌ای از فاکتورهای بیوفیزیکی و اقتصادی-اجتماعی تعیین‌کننده میزان آسیب‌پذیری سیستم‌های زوجی اجتماعی-بوم‌شناختی است (O'Brien et al., 2004; Turner et al., 2003)، رویکردهای یکپارچه‌ای توسعه یافته است که فاکتورهای بیوفیزیکی محیط طبیعی و ویژگی‌های اقتصادی-اجتماعی جوامع انسانی را در فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری ادغام می‌کنند (Schröter et al., 2005; Wilhelmi and Morss, 2013) و هدف آنها ارائه تصویر دقیقی از تغییرات زمانی و مکانی آسیب‌پذیری سیستم‌های زوجی است (Yoon, 2012; Lee, 2014; Su et al., 2015). اجرای فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری با استفاده از رویکرد یکپارچه بر مبنای این اصل استوار است که آسیب‌پذیری تابعی از سه بعد در معرض قرار گرفتن (Exposure)، حساسیت (sensitivity) و توان سازگاری (adaptive capacity) است (Su et al., 2015; Reckien, 2018; Ford et al., 2018) که در ترکیب با یکدیگر به وجود آورنده آسیب‌پذیری هستند. براساس تعاریف موجود در معرض قرار گرفتن شامل درجه، طول مدت و یا محدوده‌ای است که یک سیستم در معرض یک تنش یا آشفتگی قرار می‌گیرد (فراوانی و بزرگی وقوع مخاطره). حساسیت به عنوان درجه‌ای که یک سیستم توسط آشفتگی درونی یا بیرونی و یا مجموعه‌ای از آشفتگی‌ها تحت تأثیر و یا تغییر قرار می‌گیرد، تعریف شده است و توان سازگاری شامل توانایی سیستم برای تعدیل و یا چیره شدن بر پیامدهای ناشی از تحولات رخ داده در سیستم است (Gallopin, 2006). در واقع سنجش آسیب‌پذیری سیستم‌های اجتماعی-اکولوژیک مناطق حفاظت‌شده، امکان پیش‌بینی اثرات و انتخاب گزینه‌های سازگار مناسب جهت جلوگیری/تعدیل پیامدهای مخرب وارد آمده بر این مناطق را برای سازمان‌ها و مدیران فراهم می‌کند (Pomoim et al., 2022; Kanwar and Kuniyal, 2022) و در این میان، سنجش و ارزیابی حساسیت بوم‌شناختی یکی از ابعاد اصلی فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق حفاظت‌شده است که از طریق تلفیق طیفی از متغیرهای بوم‌شناختی به دنبال دستیابی به اطلاعات حیاتی در جهت تدوین برنامه‌های مدیریت مؤثر برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری این مناطق است (Cumming and Allen, 2017; Delgado-Serrano et al., 2018; Mafi-Gholami et al., 2021; Meng et al., 2023). از این‌رو، تحلیل و مدل‌سازی

حساسیت اکوسیستم‌ها به یکی از محورهای اصلی پژوهش‌های بوم‌شناسی فضایی و مدیریت محیط‌زیست تبدیل شده است (Jalilvand و Dastan Doost, 2006; Pomoim et al., 2022; Kanwar and Kuniyal, 2022). برای تعیین کاربری اکوتوریسم و حفاظت در منطقه حفاظت‌شده باشگل، با هدف تعیین ظرفیت محیط‌زیستی و کاربری‌های مناسب، شاخص‌هایی از قبیل شیب، جهت جغرافیایی، نوع و تراکم پوشش گیاهی، قابلیت دسترسی، منابع آب و ارتفاع را در قالب یک مدل ترکیبی در محیط GIS تحلیل کردند. نتایج این پژوهش منجر به شناسایی نواحی با حساسیت اکولوژیک بالا و مناسب برای اکوتوریسم گردید و براساس آن، زون‌بندی حفاظتی و کاربری‌های پیشنهادی تدوین شد تا توسعه پایدار منطقه و حفاظت از منابع طبیعی آن تضمین شود. در پژوهشی دیگر، Danehkar و همکاران (۲۰۱۸) با هدف بهینه‌سازی شبکه حفاظتی کشور، مناطق چهارگانه تحت مدیریت سازمان حفاظت محیط‌زیست را براساس ترکیب شاخص‌های حساسیت، آسیب‌پذیری و توسعه‌پذیری زون‌بندی کردند. در این مطالعه، معیارهایی همچون نوع و وسعت زیستگاه، درجه طبیعی بودن، ترکیب پوشش گیاهی و حساسیت اکولوژیک به مداخلات انسانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که زون‌های دارای محدودیت شدید و مناطق با ارزش حفاظتی بالا از بیشترین حساسیت اکولوژیک برخوردارند و باید در اولویت اقدامات حفاظتی و مدیریتی قرار گیرند. Afshari و Mohseni (۲۰۲۰) در پژوهشی در زمینه شناسایی گروه‌های گیاهی اکولوژیک حساس در منطقه حفاظت‌شده ماله‌گاله، به مطالعه پوشش گیاهی جنگل‌های ماله‌گاله در وسعتی حدود ۳۰۰ هکتار پرداختند. آنها با استفاده از معیارهای توپوگرافی (شیب، ارتفاع)، نوع گیاهان غالب و ویژگی‌های خاک (رطوبت و بافت)، گروه‌های اکولوژیک منطقه را شناسایی کردند. نتایج نشان داد گروه‌های اکولوژیک حساس عمدتاً در شیب‌های زیاد و خاک‌های خاص گسترش دارند و نیازمند مدیریت حفاظتی ویژه هستند. Mohammadifar و Moradinia (۲۰۲۱) نیز در مطالعه‌ای با عنوان رابطه عوامل اکولوژیک با جوامع گیاهی در منطقه حفاظت‌شده کالمند بهادران به بررسی ارتباط بین جوامع گیاهی و عوامل محیطی از جمله هدایت الکتریکی خاک، اسیدیته، عمق خاک و رطوبت پرداختند. یافته‌ها نشان داد هر جامعه گیاهی دامنه بردباری خاصی نسبت به شرایط محیطی دارد و گونه‌های حساس معمولاً در پهنه‌هایی با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ویژه استقرار می‌یابند. این پژوهش بر اهمیت شناخت ویژگی‌های خاک و آب در برنامه‌ریزی حفاظتی تأکید دارد. Haddad و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با عنوان برآورد شدت آسیب‌پذیری اکولوژیک سواحل انزلی با مدل گامای فازی و AHP به شناسایی پهنه‌های حساس در نوار ساحلی انزلی پرداختند. در این پژوهش، معیارهایی نظیر کاربری اراضی، شیب، فاصله تا پهنه آبی، ارتفاع از سطح دریا، بافت خاک و پوشش گیاهی انتخاب و از طریق روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) وزن‌دهی شدند. سپس با تلفیق لایه‌ها در محیط GIS و به‌کارگیری مدل گامای فازی، نقشه شدت حساسیت اکولوژیک منطقه تهیه گردید. نتایج نشان داد که بیش از ۲۵ درصد از محدوده ساحلی در طبقات حساسیت یا آسیب‌پذیری زیاد قرار دارد و این نواحی باید در اولویت مدیریت و حفاظت هدفمند قرار گیرند. Azizi و Jalilian (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای با عنوان اولویت‌بندی حفاظتی منابع آب سطحی ایران براساس حساسیت اکولوژیک، منابع آب سطحی کشور از جمله رودخانه‌ها، تالاب‌ها و یخچال‌های طبیعی را با شاخص‌هایی مانند رژیم جریان، طبیعی بودن منبع، وسعت اکوسیستم، غنای گونه‌ای و میزان حفاظت بررسی کردند. نتایج نشان داد که تالاب‌های بختگان و شادگان در زمره نواحی با حساسیت اکولوژیک بسیار بالا قرار دارند و شبکه فعلی مناطق حفاظت‌شده کشور، پوشش مناسبی بر این منابع حساس ندارد. Niknefsan و Fattahi (۲۰۲۳) در پژوهشی با عنوان پهنه‌بندی و ارزیابی حساسیت اکولوژیک در سواحل رودسر به شناسایی و اولویت‌بندی مناطق حساس اکولوژیک سواحل جنوبی دریای خزر پرداختند. در این تحقیق، پژوهشگران با استفاده از ۱۷ معیار اصلی و ۲۹ معیار فرعی شامل پوشش گیاهی، شیب، تراز آبی، طبقات خاک و ویژگی‌های پایداری زیستگاه، زیست‌بوم‌های منطقه را طبقه‌بندی کردند. نتایج تحلیل مکانی در محیط GIS نشان داد که بیشترین حساسیت به پهنه‌های ماسه‌ای با پوشش گیاهی ویژه مربوط است و این نواحی نیازمند مدیریت حفاظتی اختصاصی هستند.

مرور پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه ارزیابی حساسیت اکولوژیک نشان می‌دهد که بخش عمده مطالعات گذشته با تمرکز بر ابعاد خاصی از مؤلفه‌های محیطی نظیر پوشش گیاهی، شیب، بافت خاک، منابع آب و ویژگی‌های زیستگاهی انجام گرفته‌اند. در این مطالعات، از مدل‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره و تحلیل‌های مکانی برای شناسایی نواحی حساس استفاده شده است،

اما اغلب این رویکردها فاقد پیوند نظام‌مند میان عوامل بوم‌شناختی و ساختار فضایی اکوسیستم‌ها بوده‌اند. به بیان دیگر، بیشتر تحقیقات صرفاً به پهنه‌بندی حساسیت در قالب نقشه‌های استاتیک پرداخته و تحلیل پویایی فضایی و ارتباط بین شاخص‌ها مورد توجه قرار نگرفته است.

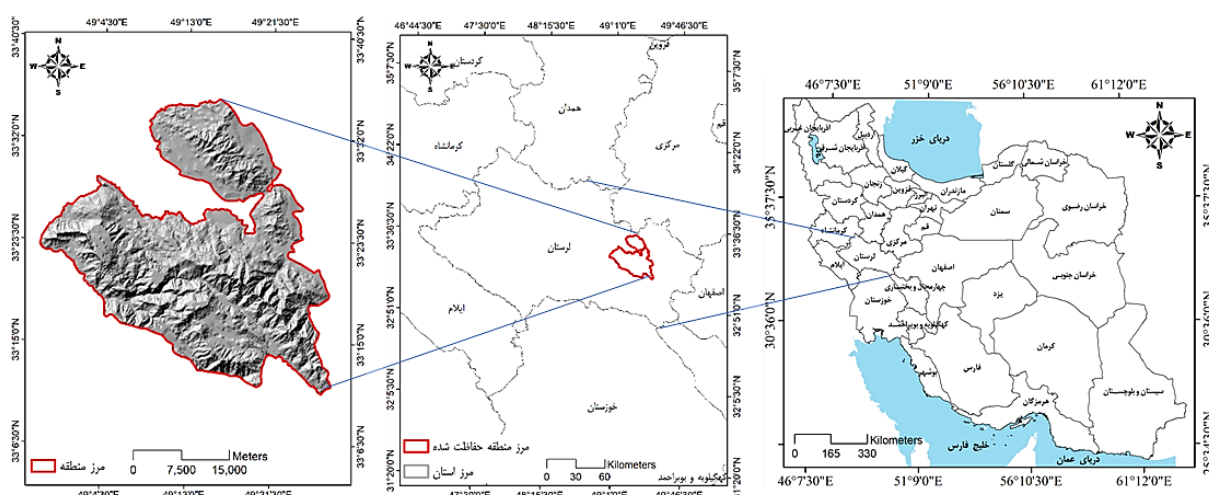
نتایج مرور منابع نشان می‌دهد که اگرچه رویکردهای تلفیقی همچون مدل‌های فازی، تحلیل سلسله‌مراتبی و مدل‌های وزن‌دهی معیارها توانسته‌اند در تعیین حساسیت نسبی نواحی مؤثر باشند، اما در اکثر موارد تحلیل الگوی مکانی حساسیت و خوشه‌بندی فضایی شاخص‌ها مورد توجه قرار نگرفته است. در نتیجه، درک جامع از توزیع فضایی حساسیت و ارتباط آن با ویژگی‌های اکولوژیک در مناطق حفاظت‌شده کشور همچنان ناقص باقی‌مانده است. شکاف اصلی در ادبیات موجود را می‌توان در نبود تلفیق رویکردهای کارشناسی (نظیر روش دلفی) با مدل‌های مکانی مبتنی بر تحلیل خودهمبستگی فضایی دانست؛ رویکردی که می‌تواند تصویر دقیق‌تری از تمرکز یا پراکندگی حساسیت در اکوسیستم‌ها ارائه دهد. همچنین، تاکنون مطالعه‌ای جامع که بتواند حساسیت بوم‌شناختی را در قالب مدلی چندشاخصه و با بهره‌گیری از قضاوت متخصصان در مقیاس منطقه‌ای تحلیل کند، به‌ویژه در اکوسیستم‌های کوهستانی پیچیده‌ای مانند منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه، صورت نگرفته است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ علمی، مدلی تلفیقی مبتنی بر روش دلفی و تحلیل‌های مکانی در محیط GIS ارائه می‌دهد تا ضمن وزن‌دهی تخصصی به شاخص‌های فیزیوگرافی و زیستی، الگوی مکانی حساسیت در سطح منطقه به‌صورت دقیق شناسایی شود. نوآوری اصلی این تحقیق در به‌کارگیری همزمان تحلیل خودهمبستگی مکانی (Moran's I) و لکه‌های داغ (Hot Spot Analysis) برای تعیین خوشه‌های حساسیت اکولوژیک و نمایش توزیع فضایی آنها است. افزون بر این، تمرکز بر منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه به‌عنوان یکی از زیست‌بوم‌های منحصربه‌فرد کوهستانی کشور، امکان تحلیل عمیق‌تری از تعامل میان عوامل طبیعی و الگوهای حساسیت بوم‌شناختی را فراهم ساخته است. در مجموع، این پژوهش با ارائه رویکردی نوین در مدل‌سازی و تحلیل فضایی حساسیت اکولوژیک، ضمن پر کردن شکاف مطالعات پیشین، مبنایی علمی برای توسعه مدل‌های جامع‌تر ارزیابی آسیب‌پذیری و تدوین برنامه‌های مدیریت پایدار در مناطق حفاظت‌شده کشور فراهم می‌آورد.

براساس آخرین آمار منتشر شده توسط دفتر زیستگاه‌ها و امور مناطق سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران، تعداد ۱۹۵ منطقه حفاظت‌شده با وسعتی در حدود ۱۱/۳۴ میلیون هکتار (حدود ۶/۸۸ درصد از سطح کشور) در سراسر کشور وجود دارد (DOE, 2024). علی‌رغم ضرورت حفاظت از ساختار و عملکرد مناطق حفاظت‌شده کشور، این گستره‌های ارزشمند در معرض طیفی از مخاطرات محیطی طبیعی و انسان‌پدید قرار دارند که از مهمترین آنها می‌توان به تغییر کاربری اراضی و زراعت زیر اشکوب جنگل، جاده‌کشی، احداث خطوط انتقال نفت و گاز، معدن‌کاری، تأمین سوخت و مصارف روستایی، چرای بی‌رویه دام، شکار غیر مجاز، ورود انواع آلاینده‌ها، گردشگری مدیریت نشده، کمبود بارندگی و وقوع خشکسالی، دماهای بیشینه، آتش‌سوزی، سیل، فرسایش، زمین لغزش و ورود گونه‌های غیر بومی اشاره نمود که سبب افت ساختاری و عملکرد اکوسیستم‌های موجود در این مناطق شده است (Kolahi et al., 2012; Alemohammad et al., 2022; Rahim and Dong, 2022). همانند سایر مناطق حفاظت‌شده کشور، منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه در استان لرستان علی‌رغم دارا بودن اهمیت بین‌المللی و تنوع بالای گیاهی و جانوری و ارائه کارکردها و خدمات اکوسیستمی منحصر به‌فرد در معرض طیفی از مخاطرات محیطی گوناگون قرار دارد که سبب تخریب زیستگاه‌ها و کاهش تنوع زیستی گیاهی و جانوری این منطقه شده است که بدون شک، افزایش حساسیت و آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های موجود در این منطقه حفاظت‌شده را در پی داشته است (Yarali et al., 2010; DOE, 2022). بر این اساس، نیاز است تا ضمن ارزیابی حساسیت و الگوی مکانی توزیع آن در سطح منطقه حفاظت‌شده، اطلاعات حیاتی برای اجرای فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و منابع مالی مورد نیاز برای ارتقاء سطح تاب‌آوری و کاهش آسیب‌پذیری این منطقه حفاظت‌شده فراهم شود. علی‌رغم اهمیت این موضوع، مطالعه‌ای در زمینه ارزیابی و تحلیل حساسیت در منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه موجود نیست. بر این اساس هدف این مطالعه نیز نقشه‌سازی و تحلیل الگوی مکانی حساسیت در سطح منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه با بهره‌گیری از طیفی از شاخص‌های فیزیوگرافیک، زمین‌شناختی، آب‌شناختی و اقلیمی است. براساس مطالب ذکر شده، این مطالعه به سوالات ضروری زیر پاسخ می‌دهد: ۱) الگوی مکانی حساسیت در سطح منطقه حفاظت

شده اشترانکوه چگونه است؟ ۲) کدام یک از بخش‌های منطقه حفاظت‌شده دارای بالاترین میزان حساسیت نسبت به وقوع مخاطرات محیطی چندگانه است؟

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه: منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه با وسعت ۱۰۴۰۹۶/۲۵ هکتار، در جنوب و جنوب شرقی شهرستان دورود و در بخش غربی شهرستان ازنا در محدوده جغرافیایی ۴۸ درجه و ۵۸ دقیقه و ۱۰ ثانیه تا ۴۹ درجه و ۲۷ دقیقه و ۳۳ ثانیه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۱۰ دقیقه و ۵۰ ثانیه تا ۳۳ درجه و ۳۵ دقیقه و ۱۷ ثانیه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه با حداقل ارتفاع حدود ۱۴۰۰ متر در ایستگاه چم‌چید و حداکثر ارتفاع ۴۰۹۰ در قله سن بران (اشترانکوه) ناحیه‌ای کاملاً کوهستانی و مرتفع، اراضی دارای شیب‌های تند به همراه بیرون‌زدگی‌های سنگی و در بسیاری از عرصه‌ها فاقد پوشش خاکی و یا دارای پوشش خاکی کم عمق می‌باشد. اقلیم در برگیرنده منطقه از نیمه مرطوب سرد تا ارتفاعات متغیر است؛ به‌طوری‌که بیش از ۵۵ درصد اقلیم منطقه از نوع اقلیم ارتفاعات است. مطالعات نشان می‌دهد که رژیم بارندگی این منطقه مدیترانه‌ای است؛ چنانچه ۷۲/۳ درصد بارندگی‌های منطقه در شش ماهه اول سال آبی رخ می‌دهد و مقدار متوسط کل بارندگی، ۷۴۴/۶ میلی‌متر برآورد شده است. مطابق با سیستم طبقه‌بندی صورت گرفته توسط IUCN، منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه در طبقه شش مناطق حفاظت‌شده قرار داده شده است و در آن فعالیت‌های مدیریتی جهت حفاظت از زیستگاه‌ها و گونه‌ها انجام می‌گیرد. پوشش گیاهی منطقه در عرصه‌های جنگلی و مرتعی تحت عنوان تپ‌های گیاهی، شامل ۳۴ تپ گیاهی شناسایی و طبقه‌بندی گردیده است. به‌لحاظ تنوع جانوری نیز گونه‌های متعددی از پستانداران (۴۱ گونه)، پرندگان (۱۹۵ گونه)، خزندگان (۳۰ گونه)، دوزیستان (۵ گونه) و ماهی‌ها (۳ گونه) در منطقه شناسایی شده است. منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه با حداقل ارتفاع حدود ۱۴۰۰ متر در ایستگاه چم‌چید و حداکثر ارتفاع ۴۰۹۰ در قله سن بران (اشترانکوه) ناحیه‌ای کاملاً کوهستانی است که دارای دو بخش کاملاً مجزای گرمسیری (تحت سیطره جنگل‌های بلوط) و ناحیه سردسیری اطراف دریاچه گهر و قله سن بران می‌باشد. در بخش جنگلی بلوط آن و تنها در اشکوب فوقانی آن درختان پراکنده بلوط مشاهده می‌شود و اشکوب تحتانی آن اغلب مورد چرای شدید واقع شده و زراعت و کاشت گندم دیم در آن رواج دارد و به‌عنوان مراتع قشلاقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بیشترین تنوع گونه‌ای در منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه مربوط به ارتفاعات دربرگیرنده دریاچه گهر می‌باشد که به‌عنوان منطقه «ورود دام ممنوع» تحت نظارت سازمان حفاظت محیط‌زیست است (YCE, 2015).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه در استان لرستان

انتخاب شاخص‌های حساسیت: با مرور تحقیقات انجام شده بر روی ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق گوناگون (Cinner and Barnes, 2019; Gong et al., 2022; Kanwar and Kuniyal, 2022; Rorato et al., 2022; De Marco et al., 2022; Yuliawan et al., 2022; Bauer et al., 2022; Zhang et al., 2022) و نیز بررسی اسناد و گزارشات مرتبط با مدیریت منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه، مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی، زمین‌شناسی، آب‌شناختی، خاک‌شناسی و فیزیوگرافیک برای محاسبه نمایه حساسیت در سطح منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه انتخاب شدند. چارچوب مشخصی و نظرات یکسانی برای انتخاب شاخص‌های مورد استفاده در ارزیابی آسیب‌پذیری وجود ندارد و فاکتورهایی همانند هدف انجام مطالعه، مقیاس و زمانی ارزیابی و نیز میزان دسترسی و دقت داده‌ها و اطلاعات سبب انتخاب شاخص‌ها در مطالعات گوناگون می‌شود (Cutter and Derakhshan, 2018; Cinco-Castro and Herrera-Silveira, 2020; Mafi-Gholami et al., 2021). محاسبه نمایه حساسیت منطقه حفاظت‌شده براساس شاخص‌هایی انجام می‌شود که بیانگر انعطاف یا سازش‌پذیری منطقه حفاظت‌شده نسبت به تغییرات شدت وقوع مخاطرات محیطی چندگانه هستند (متغیرهای اکولوژیک سرزمین همانند ویژگی‌های فیزیوگرافیک، اقلیمی، خاکی یا زمین‌شناختی) (Lv et al., 2019; Wei et al., 2020; Xia et al., 2021; Cao et al., 2022; Chisadza et al., 2023). در این مطالعه تعداد ۹ متغیر (شاخص) شامل ارتفاع، شیب، جهت، حساسیت خاک به فرسایش، حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش، رواناب سطحی، دبی چشمه‌ها، اقلیم و کاربری/پوشش اراضی برای محاسبه نمایه حساسیت در سطح منطقه حفاظت‌شده انتخاب شدند.

تعیین وزن نسبی شاخص‌های حساسیت: به‌طور کلی، در مطالعات انجام شده برای ارزیابی حساسیت و آسیب‌پذیری، دو شیوه مختلف برای تلفیق شاخص‌های منتخب وجود دارد که براساس وزن یکسان برای شاخص‌ها (Chen et al., 2013; Kunte et al., 2013; Joevivek et al., 2013) و در مقابل، تخصیص وزن متفاوت برای هر یک از آنها است (Mafi-Gholami et al., 2022; Jaafari et al., 2022, 2025). در شیوه دوم، با تجزیه و تحلیل نظرات متخصصان و نیز مرور پژوهش‌های پیشین، درجه اهمیت (وزن نسبی) هر یک از شاخص‌ها تعیین شده و در فرآیند محاسبه نمایه در مقدار مطلق شاخص ضرب می‌شود (Yin et al., 2012; Mahapatra et al., 2015; Mafi-Gholami et al., 2021, 2022; Jaafari et al., 2022, 2025). اما براساس ماهیت، هر یک از شاخص‌ها دارای درجه اهمیت و سهم متفاوتی در ایجاد حساسیت سیستم مورد مطالعه هستند و بر این اساس، باید با درجه اهمیت و وزن نسبی متفاوتی در فرآیند محاسبه نمایه حساسیت وارد شوند. در مطالعه حاضر نیز براساس ویژگی‌های گوناگون هر یک از شاخص‌ها در منطقه مورد مطالعه و نیز سهم و درجه اهمیت متفاوت هر یک از آنها در ایجاد حساسیت بوم‌شناختی، وزن‌های نسبی متفاوتی برای هر یک از شاخص‌ها در نظر گرفته شد. بدین‌منظور، براساس نظرات متخصصان و با استفاده از روش دلفی، وزن نسبی هر یک از شاخص‌ها محاسبه شد. در این مطالعه برای اجرای روش دلفی، از شیوه به‌کار رفته توسط Hasanzadeh و همکاران (۲۰۱۲) و Mafi-Gholami و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شد. به‌طور کلی، در روش دلفی طراحی پرسشنامه‌ها به‌صورت باز، نیمه‌بسته و بسته است. در شیوه پرسشنامه‌های باز، پس از تحلیل پاسخ پرسش‌شوندگان و تهیه مجموعه‌ای از گزاره‌ها، پرسشنامه‌ها برای رتبه‌بندی مجدد گزینه‌ها، چندین مرتبه برای پرسش‌شوندگان ارسال می‌شوند تا رتبه‌بندی‌های نهایی برای تأیید درجه اجماع میسر گردد (Thangaratinam and Redman, 2005). در شیوه پرسشنامه‌های بسته، طراحی پرسشنامه‌ها با مجموعه‌ای از گزینه‌های مشخص و ثابت همراه است و متخصصان نظر خود را تنها در مورد میزان اهمیت گزینه‌ها بیان می‌کنند. در شیوه پرسشنامه نیمه‌بسته، در کنار تعیین درجه اهمیت گزینه‌ها، به پرسش‌شوندگان امکان بیان نظر نیز داده می‌شود. در مطالعه حاضر، پرسشنامه‌ها به‌صورت بسته طراحی شدند که براساس آن، شاخص‌های منتخب در محاسبه نمایه حساسیت برای محاسبه وزن نسبی در اختیار متخصصان قرار گرفتند. این پرسشنامه‌ها فرصت اختصاص درجه اهمیت شاخص‌ها را با در نظر گرفتن طیف لیکرت با طیفی از درجه اهمیت خیلی کم، کم، با اهمیت، با اهمیت زیاد و دارای اهمیت خیلی زیاد را امکان‌پذیر نمود.

به‌طور کلی، چارچوب یکسانی در زمینه انتخاب و تعداد متخصصان در روش دلفی وجود ندارد و عواملی مانند کیفیت تصمیم، هدف تحقیق و توانایی تیم انجام پژوهش در مدیریت فرآیند انجام مطالعه، طول مدت جمع‌آوری داده‌ها و منابع و نیز پذیرش متخصصان در دادن پاسخ به پرسش‌ها، تعیین‌کننده تعداد اعضای گروه اجرای فرآیند دلفی است (Cornick, 2006). براساس

مطالعات موجود، تعداد افراد شرکت کننده در اجرای فرآیند دلفی از ۵ تا ۲۰ نفر متغیر است (Landeta, 2006) و در شرایط وجود گروه‌های همگن این تعداد به ۱۰ تا ۱۵ نفر نیز می‌رسد و با وجود شرایط آرمانی می‌توان این تعداد را به چهار نفره نیز کاهش داد (Windle, 2004). در نهایت، انتخاب تعداد متخصصان براساس روش‌های گوناگونی مانند شناخت و تصمیم مدیریت پروژه، مرور نویسندگان مقالات و موقعیت سازمانی افراد صورت می‌گیرد (Okoli and Pawlowski, 2004). در این مطالعه نیز با نظر تیم اجرای تحقیق، ۱۰ نفر از متخصصان برنامه‌ریزی و مدیریت مناطق حفاظت‌شده و کارشناسان اداره حفاظت محیط‌زیست شهرستان دورود انتخاب شدند و نظرات خود را در زمینه درجه اهمیت شاخص‌های معرفی شده بیان کردند.

یکی از موارد مهم و قابل تأمل در اجرای فرآیند دلفی، تعداد دفعات ارسال پرسشنامه برای متخصصان است. در این فرآیند، متخصصان طی دفعات در مورد سؤال مشابه اظهار نظر کرده و با دریافت اطلاعات از سایر پرسش‌شوندگان، امکان تجدید نظر در پاسخ‌های خود را به‌دست می‌آورند و این امر سبب جلوگیری از تأثیر منفی شرکت‌کنندگان در جواب سایر پاسخ‌دهندگان می‌شود (Landeta, 2006). اما چارچوب معینی در زمینه تعداد تکرار ارسال پرسشنامه برای متخصصان وجود ندارد و مواردی مانند میزان توافق نظر نهایی گروه ناظر در اجرای روش دلفی تعیین‌کننده تعداد تکرار ارسال پرسشنامه است (Bederman et al., 2010). بر این اساس، با انتخاب دقیق و آگاهانه متخصصان و صاحب‌نظران توسط تیم اجرای روش دلفی (براساس فعالیت پژوهشی و تعداد مقالات علمی منتشر شده) و عدم تغییر در سطح اتفاق نظر در مورد معیارهای بیان شده، تنها در یک مرحله می‌توان پرسشنامه‌ها را برای متخصصان ارسال نمود (Miller, 2001). در این مطالعه، مطابق با روش به‌کار رفته توسط Bederman و همکاران (۲۰۱۰)، مفهوم اجماع نظر به‌صورت شرط همگنی و یا سازگاری عقیده میان متخصصان تعریف شد. آلفای کرونباخ یکی از شاخص‌های آماری است که برای ارزیابی سازگاری توافق نظر میان متخصصان در روش دلفی مورد استفاده قرار گرفته است (Cronbach and Shavelson, 2004). محاسبه این شاخص به‌صورت رابطه ۱ است:

$$\alpha_x = k/k - 1(1 - \sum \sigma_{y_i}^2 / \sigma_x^2) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در این رابطه k : تعداد متخصصان؛ $\sigma_{y_i}^2$: واریانس مربوط به هر یک از پاسخ‌های هر یک از متخصصان و σ_x^2 : واریانس مجموع پاسخ‌های مربوط به هر یک از متخصصان است. مقدار آلفای کرونباخ بین مقادیر ۰ تا ۱ متغیر است. مقادیر نزدیک به صفر، بیان‌کننده عدم توافق نظر میان متخصصان در تخصیص رتبه مشابه به یک گزینه مشخص است در حالی که مقدار شاخص برابر با یک نشان‌دهنده توافق نظر کامل میان متخصصان در رتبه‌بندی است. در این مطالعه مقدار آلفای کرونباخ در دور نخست برابر با ۰/۹۳ به‌دست آمد که نشان‌دهنده اتفاق نظر زیاد میان متخصصان در رتبه‌بندی متغیرهای (شاخص‌های) مورد نظر بود. بنابراین، در این مطالعه، پرسشنامه‌ها تنها یک مرتبه برای رتبه‌بندی گزینه‌ها برای متخصصان ارسال شد.

برای تجزیه و تحلیل پرسشنامه‌ها، از آماره میانگین برای محاسبه امتیاز وزن‌دار هر شاخص حساسیت و در نهایت درصد و درجه اهمیت آن استفاده شد (خواننده برای جزئیات بیشتر به مطالعه انجام شده توسط Mafi-Gholami و همکاران (۲۰۱۵) رجوع کند). در نهایت برای هر یک از متغیرهای مورد بررسی در ارزیابی حساسیت، وزن نسبی هر متغیر (NIC)^۱ محاسبه شد. به این ترتیب که حاصلضرب درصد و درجه اهمیت هر متغیر (ضریب اهمیت) بر مقدار مجموع ضرایب اهمیت کلیه متغیرها تقسیم شده و مقدار ضریب اهمیت نرمال شده یا همان وزن نسبی به‌دست آمد (رابطه ۲).

$$\text{NIC} = \frac{P \times D}{\sum (P \times D)} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در این رابطه، NIC: Normalized Importance Coefficient؛ P: درصد اهمیت و D: درجه اهمیت هر متغیر است. نقشه‌سازی شاخص‌های حساسیت در سطح منطقه حفاظت‌شده: نقشه‌های رستری ارتفاع، جهت و شیب منطقه حفاظت‌شده اشرانکوه با استفاده از نقشه توپوگرافی با فاصله خطوط میزان ۲۰ متری در محیط در نرم‌افزار ArcGIS 10.7 تهیه شدند و در چهار طبقه کم (کد ۱)، متوسط (کد ۲)، زیاد (کد ۳) و خیلی زیاد (کد ۴) طبقه‌بندی شدند. با استفاده از نقشه محدوده منطقه حفاظت‌شده، نقشه‌های حساسیت خاک به فرسایش و نیز حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش از نقشه‌های مربوط در استان لرستان برش خوردند و پس از تبدیل شدن به فرمت رستر در نرم‌افزار ArcGIS 10.7، در چهار طبقه کم (کد

^۱Normalized Importance Coefficient

۱)، متوسط (کد ۲)، زیاد (کد ۳) و خیلی زیاد (کد ۴) طبقه‌بندی شدند. نوع و میزان پوشش گیاهی موجود در مناطق گوناگون نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان حساسیت سیستم بوم‌شناختی نسبت به مخاطرات محیطی چندگانه دارد (Nguyen and Liou, 2019). نقشه رستری کاربری/پوشش اراضی منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان لرستان اخذ شد و در ۵ کلاس جنگل (کد ۱)، مرتع (کد ۲)، اراضی زراعی (کد ۳)، مناطق مسکونی و اراضی لخت (کد ۴) با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.7 طبقه‌بندی شد. نقشه طبقه‌بندی شده اقلیم منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه از اداره کل هواشناسی استان لرستان اخذ شد و با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.7 و براساس انواع اقلیم شناسایی شده در منطقه در دو طبقه کم (۱) و متوسط (۲) طبقه‌بندی شد. به‌طور کلی، حفظ ساختار و عملکرد اکوسیستم‌ها وابسته به دسترسی به منابع آبی کافی است (Colangelo et al., 2018; Gittins et al., 2021; Mafi-Gholami et al., 2021; Gain et al., 2021). بر این اساس، در این مطالعه دو متغیر هیدرولوژیکی شامل رواناب سطحی و دبی چشمه‌ها به‌عنوان شاخص‌های حساسیت منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه در نظر گرفته شد. با استفاده از مقادیر حجم رواناب سطحی مربوط به ۹ زیر حوزه آبخیز منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه اخذ شده از اداره منابع طبیعی شهرستان دورود، نقشه رستری تغییرات مکانی حجم رواناب در سطح منطقه در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.7 در چهار طبقه کم (کد ۱)، متوسط (کد ۲)، زیاد (کد ۳) و خیلی زیاد (کد ۴) طبقه‌بندی شدند. براساس مقادیر داده‌های مقادیر دبی ثبت شده مربوط به تعداد ۱۶۵ چشمه موجود در منطقه حفاظت‌شده اخذ شده از اداره منابع طبیعی شهرستان دورود، نقشه رستری تغییرات مکانی حجم دبی چشمه‌ها در سطح منطقه با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.7 تهیه و در چهار طبقه کم (کد ۱)، متوسط (کد ۲)، زیاد (کد ۳) و خیلی زیاد (کد ۴) طبقه‌بندی شد.

محاسبه نمایه حساسیت و تحلیل الگوی مکانی آن در سطح منطقه حفاظت‌شده: در این مطالعه برای محاسبه نمایه حساسیت و تحلیل الگوی مکانی آن در سطح منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه و با در نظر گرفتن واحدهای مدیریتی ۱۰۰ هکتاری تعیین شده در برنامه‌ریزی راهبردی مناطق حفاظت‌شده کشور (DOE, 2022)، کل منطقه به تعداد ۱۱۸۲ سلول شبکه با ابعاد ۱۰۰۰ متر×۱۰۰۰ متر (۱۰۰ هکتار) تقسیم‌بندی شد. تحلیل الگوی مکانی حساسیت با استفاده از شبکه ضمن فراهم آوردن امکان تجزیه و تحلیل الگوهای مکانی حساسیت در سطح چشم‌انداز، امکان تخصیص دقیق منابع مالی و امکانات موجود برای کاهش اثرات مخاطرات محیطی چندگانه در سلول‌هایی که بالاترین سطح حساسیت نسبت به وقوع مخاطرات محیطی چندگانه هستند را فراهم می‌آورد (Jia et al., 2018; Zhang et al., 2020). نقشه رستری طبقه‌بندی شده (استاندارد شده) هر یک از مخاطرات در وزن نسبی محاسبه شده با استفاده از روش دلفی ضرب شد (Mafi-Gholami et al., 2020) و نقشه وزن‌دار هر شاخص تهیه شد (رابطه ۳).

رابطه ۳ وزن نسبی×نقشه طبقه‌بندی شده (استاندارد شده) شاخص=نقشه وزن‌دار شاخص

با استفاده از توابع موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.7، تمامی نقشه‌های رستری وزن‌دار شاخص‌ها از رستر به نقطه تبدیل شدند و متوسط مقادیر نقاط موجود در هر سلول شبکه به‌عنوان مقدار شاخص مورد نظر در آن سلول در نظر گرفته شد. با تجميع مقادیر شاخص‌ها در هر سلول شبکه مقدار نمایه حساسیت محاسبه گردید. برای بررسی تغییرات مکانی نمایه حساسیت در سلول‌های شبکه در سطح منطقه حفاظت‌شده، مقادیر این نمایه در سلول‌های شبکه با اجرای دستور Natural break در نرم‌افزار ArcGIS 10.7 و بر مبنای انحراف استاندارد در چهار طبقه کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند (Pirasteh et al., 2024). پس از محاسبه مقادیر نمایه حساسیت در هر یک از سلول‌های شبکه، الگوهای مکانی تغییرات حساسیت در سطح منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه با استفاده از دو روش تحلیل خودهمبستگی مکانی (Global Moran's I) و تجزیه و تحلیل خوشه‌های مکانی (Local Moran's I) در محیط ArcGIS 10.7 بررسی شد. این روش‌ها امکان شناسایی الگوهای مکانی حساسیت آن را در سطح منطقه حفاظت‌شده فراهم می‌کنند که به‌طور مستقیم قابل مشاهده نیستند (Pirasteh et al., 2024). در روش تحلیل خودهمبستگی مکانی، خودهمبستگی مکانی مقادیر نمایه حساسیت با استفاده از ضریب خودهمبستگی مکانی (I) تحلیل خواهد شد که نشان‌دهنده میزان خوشه‌بندی یا تصادفی بودن توزیع مقادیر حساسیت در سطح سلول‌های شبکه است. مقادیر این ضریب از -۱ تا +۱ متغیر است که بیان‌کننده وجود خودهمبستگی منفی قوی (توزیع خوشه‌ای با مقادیر متضاد) تا خودهمبستگی مثبت قوی (توزیع خوشه‌ای با مقادیر مشابه) خواهد بود و مقادیر نزدیک به صفر، بیان‌کننده تصادفی بودن توزیع است (Getis and

(Ord, 1992). به عبارت دیگر، این روش مشخص می‌کند که آیا مقادیر حساسیت در سطح منطقه به صورت خوشه‌ای (با مقادیر مشابه) توزیع شده‌اند یا به صورت تصادفی. در روش تجزیه و تحلیل خوشه‌های مکانی، طبقه‌بندی‌های تیپولوژیک حساسیت در سطح سلول‌های شبکه براساس الگوهای خوشه‌ای/مقادیر پرت در چهار طبقه شامل: High-High (HH) که نشان‌دهنده لکه‌های داغ حضور خوشه‌هایی با حساسیت زیاد، Low-Low (LL) که نشان‌دهنده لکه‌های سرد حضور خوشه‌هایی با حساسیت کم، High-Low (HL) که نشان‌دهنده مناطق پرت با مقادیر حساسیت زیاد و Low-High (LH) که نشان‌دهنده مناطق پرت با مقادیر حساسیت کم است، انجام می‌گیرد. این طبقه‌بندی به شناسایی مناطق با سطوح مختلف حساسیت و الگوهای مکانی آنها کمک کرده و در تعیین اولویت‌های مدیریتی و حفاظتی کارآمد خواهد بود (Mitchel, 2005).

یافته‌های پژوهش

نقشه‌سازی شاخص‌های حساسیت: مقدار ارتفاع منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه از ۱۳۰۰ تا ۴۰۰۰ متر متغیر است و طبقه‌بندی نقشه رستری تغییرات ارتفاع منطقه (جدول ۱) نشان داد که بخش‌های مرکزی، جنوبی و شرقی منطقه حفاظت‌شده دارای ارتفاع بیشتری نسبت به بخش‌های غربی و شمالی است حدود ۳۸ درصد از وسعت منطقه در طبقات ارتفاعی زیاد و بسیار زیاد بوده و باقی‌گستره منطقه (۶۲ درصد) نیز در طبقات کم و متوسط قرار دارد (شکل ۲). نقشه رستری تغییرات جهت در سطح منطقه حفاظت‌شده نشان داد که به دلیل تغییرات قابل توجه وضعیت توپوگرافی در سطح منطقه، تغییرات مکانی زیادی برای این متغیر در سطح منطقه وجود دارد؛ چنان‌که طبقه‌بندی نقشه رستری جهت (جدول ۱) نشان داد که به ترتیب ۱۹ درصد، ۴۶ درصد و ۳۵ درصد از وسعت منطقه حفاظت‌شده به ترتیب در طبقات بدون جهت، "جنوبی و غربی" و "شمالی و شرقی" قرار (شکل ۲). نقشه تغییرات شیب در سطح منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه نشان داد که گستره‌های پرشیب به طور عمده در بخش‌های مرکزی، جنوبی و شرقی منطقه حفاظت‌شده قرار دارند. براساس طبقه‌بندی انجام شده بر روی نقشه رستری تغییرات شیب منطقه (جدول ۱)، حدود ۳۲ درصد از وسعت منطقه حفاظت‌شده در طبقات با شیب زیاد و بسیار زیاد قرار دارند و ۶۸ درصد در طبقات کم و متوسط. بخش شمالی منطقه کم‌شیب‌ترین ناحیه در منطقه حفاظت‌شده است و بخش‌های پرشیب منطقه به طور عمده در بخش شرقی آن قرار دارد (شکل ۲). بخش قابل توجهی از منطقه حفاظت‌شده دارای حساسیت کم نسبت به وقوع فرسایش خاکی است؛ چنانچه طبقه‌بندی نقشه رستری تغییرات حساسیت خاک به فرسایش (جدول ۱) نیز نشان داد که حدود ۷۰ درصد از وسعت منطقه در طبقات با حساسیت خاک به فرسایش کم و متوسط قرار دارند و تنها ۳۰ درصد در دو طبقه زیاد و خیلی زیاد قرار دارد (شکل ۲). گستره‌های با حساسیت به فرسایش خاکی زیاد و بسیار زیاد به صورت لکه‌هایی در سراسر منطقه پراکنده هستند. تغییرات مکانی حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش در سطح منطقه حفاظت‌شده نشان داد که بخش قابل توجهی از منطقه حفاظت‌شده دارای سازندهای زمین‌شناسی با میزان حساسیت به فرسایش کمی است و گستره‌های با حساسیت زیاد به صورت لکه‌های در بخش‌های حاشیه‌ای منطقه قرار دارند. براساس طبقه‌بندی انجام شده بر روی نقشه رستری تغییرات حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش (جدول ۱)، حدود ۹۰ درصد از وسعت منطقه در طبقات با حساسیت کم و متوسط سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش قرار دارد و تنها ۱۰ درصد از وسعت منطقه (به طور عمده در بخش‌های حاشیه‌ای منطقه) در طبقات زیاد و بسیار زیاد قرار دارند (شکل ۲). نقشه اقلیم منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه نشان داد که طبقه اقلیمی سرد مرطوب در حدود ۲۴ درصد وسعت منطقه را در بخش‌های شمالی و غربی منطقه در بر گرفته و ارتفاع زیاد منطقه سبب ایجاد اقلیم نیمه‌قطبی در ۷۶ درصد وسعت منطقه شده که تمامی بخش‌های مرکزی، جنوبی و شرقی منطقه حفاظت‌شده را پوشش می‌دهد (شکل ۲). طبقه بندی نقشه کاربری/پوشش اراضی در سطح منطقه حفاظت‌شده نشان داد که به ترتیب ۷۹/۸ درصد، ۴/۳۲ درصد، ۷/۳۲ درصد و ۸/۵۵ درصد از وسعت منطقه براساس طبقات جنگل، مرتع، اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی و اراضی لخت در طبقات کم تا خیلی زیاد قرار داشتند (شکل ۲). تغییرات مقادیر رواناب سطحی در سطح زیرحوزه‌های منطقه حفاظت‌شده نشان داد که مقدار این متغیر از ۲۲/۵۱ میلیون متر مکعب تا ۱۴۰/۴ میلیون مترمکعب متغیر بود و طبقه‌بندی تغییرات مقادیر رواناب در سطح حوزه آبریز (جدول ۱) نشان داد که به ترتیب ۱۴/۳ درصد، ۱۸/۳ درصد، ۴۵/۷ درصد و ۲۱/۷ درصد وسعت منطقه به ترتیب در طبقات کم،

متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار داشتند (شکل ۲). نقشه‌سازی تغییرات مقادیر دبی چشمه‌ها در سطح منطقه حفاظت‌شده نشان داد که مقدار این متغیر از ۵ متر مکعب در ثانیه تا ۱۹۹/۹ متر مکعب در ثانیه متغیر بود و براساس طبقه‌بندی مقادیر این متغیر در سطح منطقه حفاظت‌شده (جدول ۱)، به‌ترتیب ۳۳/۹ درصد، ۲۶/۳ درصد، ۲۳/۵ درصد و ۱۶/۳ درصد وسعت منطقه در طبقات کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار داشتند (شکل ۲).

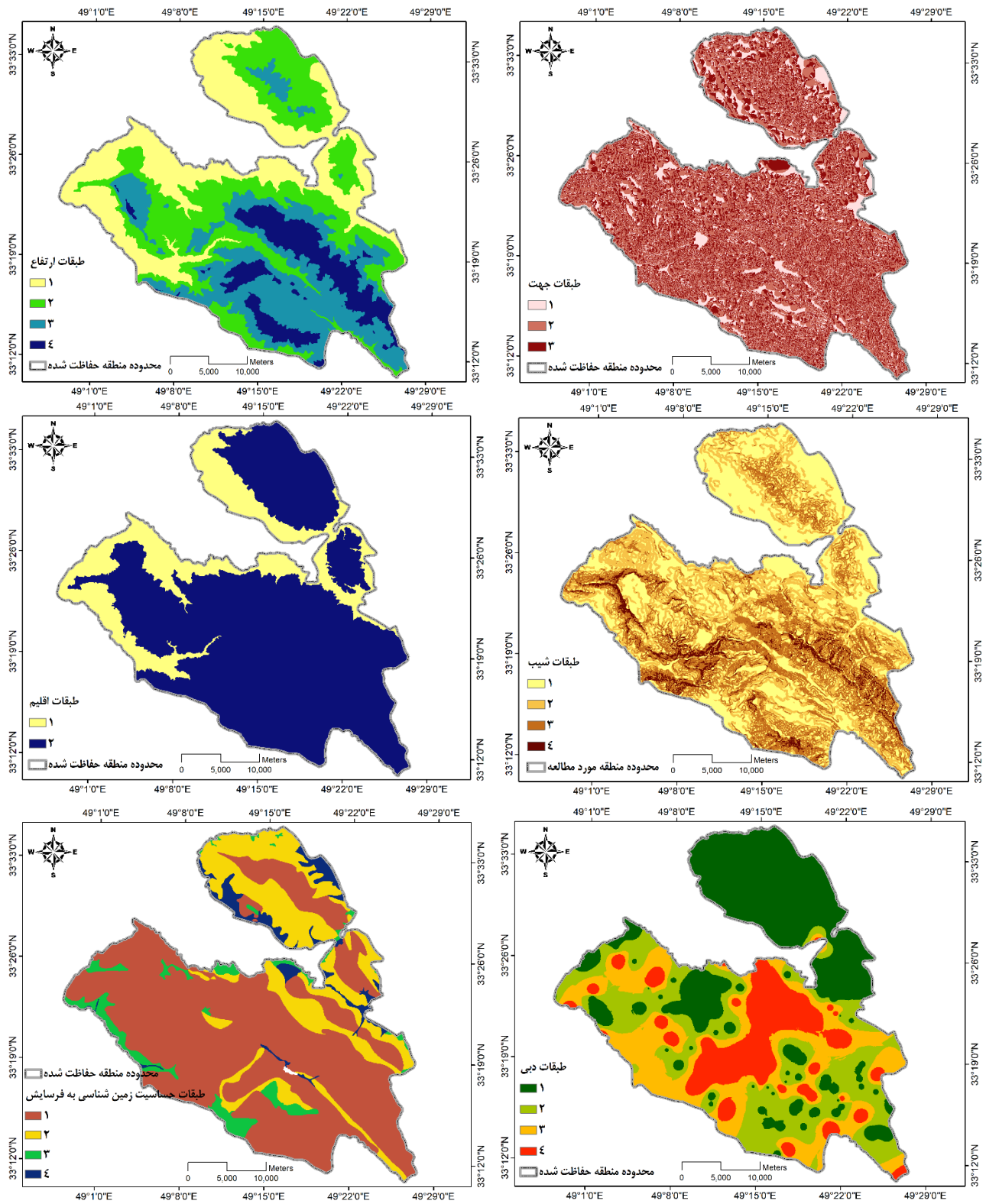
جدول ۱- طبقات شاخص‌های حساسیت در منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه

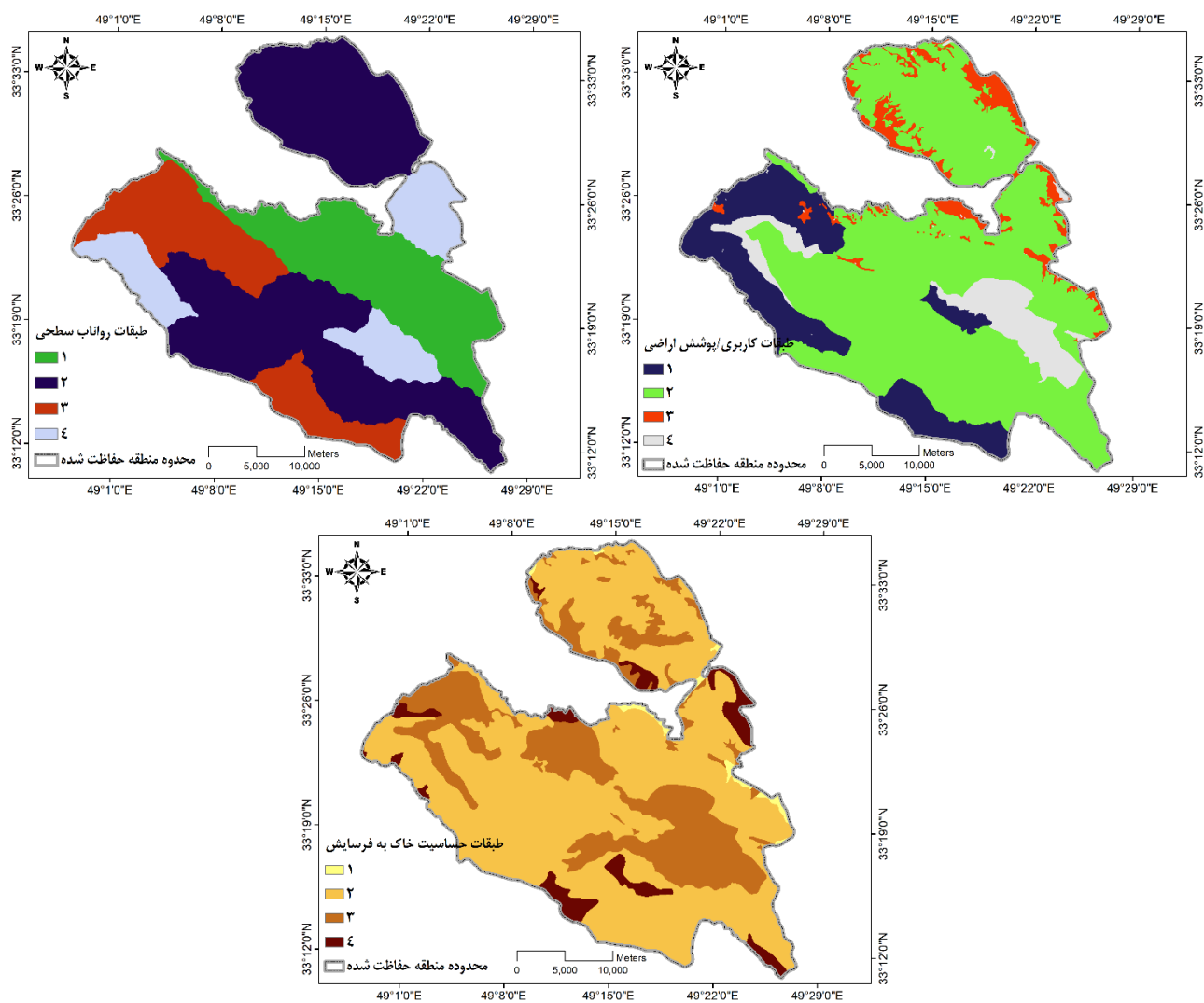
شاخص	طبقات			
	۱	۲	۳	۴
شیب (درصد)	۲۱/۲ >	۵۰/۳-۲۱/۲	۹۲/۹-۵۰/۳	۹۲/۹ >
جهت	بدون جهت	جنوب و غرب	شمال و شرق	-
ارتفاع (متر)	۲۰۳۸ >	۲۵۰۲-۲۰۳۸	۲۹۹۸-۲۵۰۲	۲۹۹۸ >
حساسیت خاک به فرسایش	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
اقلیم	سرد مرطوب	نیمه‌قطبی	-	-
کاربری/پوشش اراضی	جنگل	مرتع	اراضی کشاورزی	مناطق مسکونی و اراضی لخت
رواناب (میلیون مترمکعب)	۳۷/۴۸ >	۶۷/۷۲-۳۷/۴۸	۱۰۵/۲۸-۶۷/۷۲	۱۰۵/۲۸ >
دبی چشمه‌ها (لیتر بر ثانیه)	۵۵/۳۳ >	۱۰۶/۴۸-۵۵/۳۳	۱۷۱/۲۷-۱۰۶/۴۸	۱۷۱/۲۷ >

وزن نسبی شاخص‌های حساسیت: تعیین وزن نسبی شاخص‌های حساسیت با استفاده از روش دلفی نشان داد که دو شاخص کاربری/پوشش اراضی و رواناب سطحی دارای بیشترین وزن‌های نسبی (به‌ترتیب با وزن نسبی برابر با ۰/۱۹۸ و ۰/۱۶۲) و ارتفاع و حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش نیز دارای کمترین وزن نسبی (به ترتیب با وزن نسبی برابر با ۰/۰۷۹۶ و ۰/۰۷۰۱) در میان تمامی شاخص‌های حساسیت مورد بررسی بودند (شکل ۳).

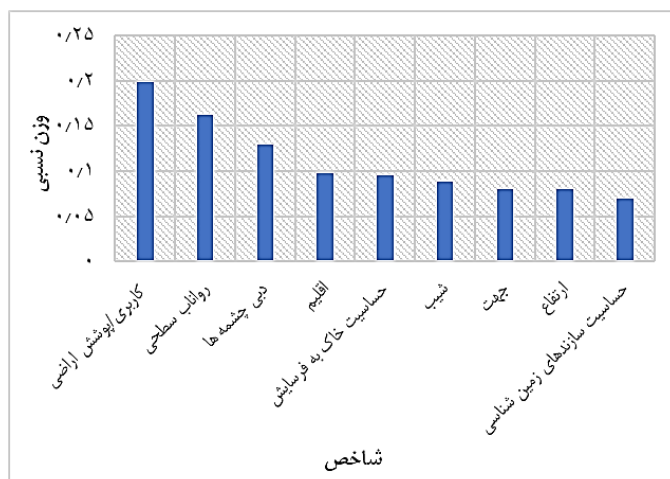
الگوی مکانی حساسیت در سطح منطقه حفاظت‌شده: نقشه تغییرات مقادیر نمایه حساسیت در سلول‌های شبکه با جمع مقادیر شاخص‌ها در سطح منطقه نشان داد که مقدار این متغیر از ۱/۱۱۹ تا ۳/۰۰۸ متغیر بود و مقدار متوسط آن نیز ۲/۰۶۴ بود (شکل ۴). طبقه‌بندی نقشه نمایه حساسیت در سطح منطقه حفاظت‌شده نشان داد که به‌ترتیب ۱۳ درصد، ۳۶ درصد، ۳۷ درصد و ۱۴ از وسعت منطقه حفاظت‌شده به‌ترتیب در طبقات با سطح حساسیت کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است. تغییرات مکانی حساسیت در سطح منطقه حفاظت‌شده نیز نشان داد که طبقات با حساسیت زیاد و بسیار زیاد به‌طور عمده در گستره‌های مرکزی و جنوبی و طبقات با حساسیت کم و متوسط در گستره‌های شمالی منطقه حفاظت‌شده قرار دارند (شکل ۴).

تحلیل خودهمبستگی مکانی مربوط به مقادیر نمایه حساسیت در سلول‌های شبکه نشان‌دهنده همبستگی مکانی مثبت و معنی‌دار ($P < 0.001$; $I > 0.773$; $z\text{-score} > 32/4$) در سطح منطقه بود که تشابه مقادیر نمایه حساسیت و وجود خوشه‌ها را در سلول‌های شبکه در سطح منطقه اثبات می‌کند. انجام آزمون خوشه‌های مکانی بر روی سلول‌های شبکه نشان‌دهنده خوشه سلول‌های با مقادیر بالای نمایه حساسیت (HH) با تعداد ۱۸۹ سلول شبکه و وسعت ۱۸۵۸۶/۸۱ هکتار (۱۷/۸ درصد از وسعت کل) در گستره‌های واقع در بخش‌های غربی و جنوبی منطقه حفاظت‌شده قرار گرفته بودند (شکل ۵). خوشه سلول‌های با مقادیر کم نمایه حساسیت (LL) با تعداد ۱۹۵ سلول شبکه با وسعت ۱۶۲۲۳/۳۳ هکتار (۱۵/۶ درصد از وسعت کل) در در گستره‌های واقع در بخش شمالی منطقه قرار گرفته بودند (شکل ۵).

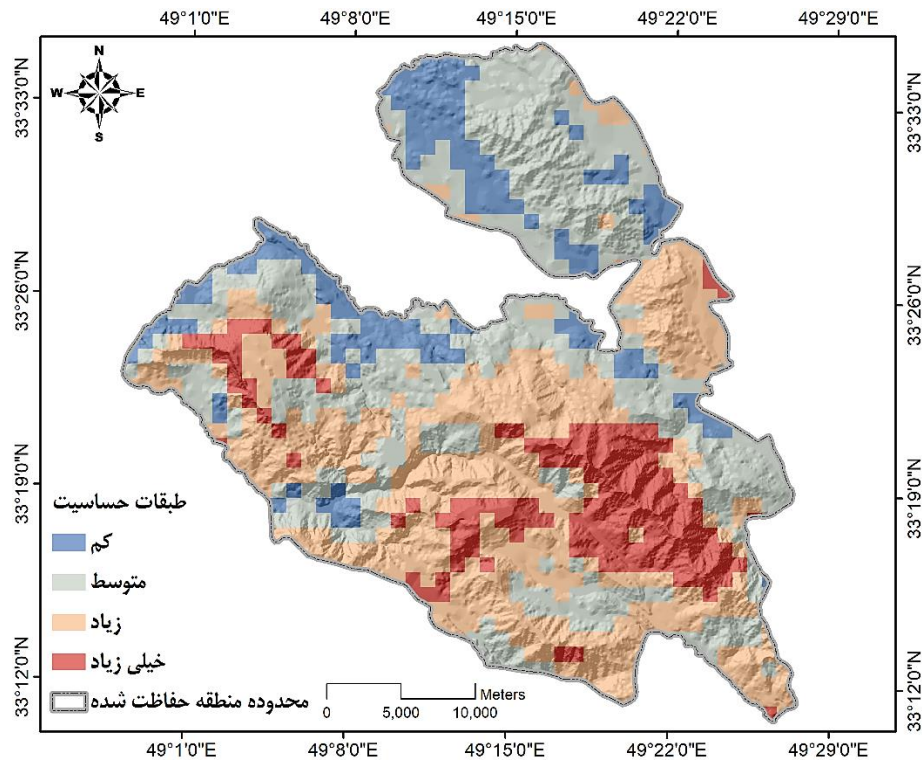




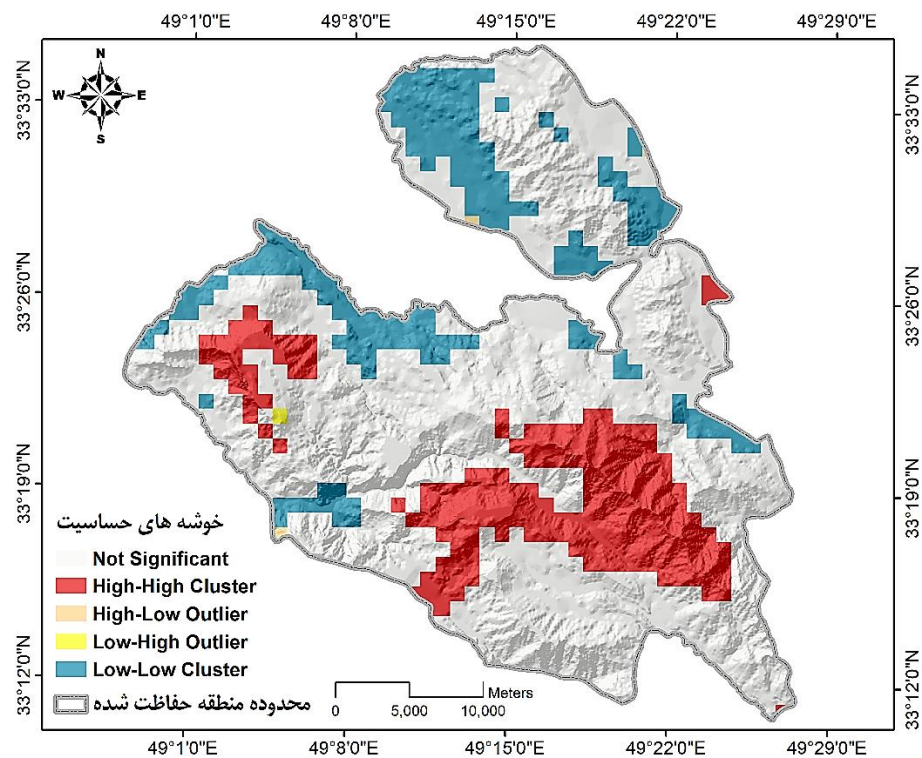
شکل ۲- طبقه‌بندی شاخص‌های حساسیت در سطح منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه



شکل ۳- وزن نسبی محاسبه شده برای شاخص‌های حساسیت منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه با استفاده از روش دلفی



شکل ۴- تغییرات سطح حساسیت در منطقه حفاظت شده اشتراکوه



شکل ۵- خوشه بندی مکانی سلول های شبکه با مقادیر مشابه و متفاوت حساسیت در سطح منطقه حفاظت شده اشتراکوه

بحث و نتیجه‌گیری

ارزیابی حساسیت اکولوژیک مناطق حفاظت‌شده به‌عنوان یکی از ارکان بنیادین مدیریت تطبیقی منابع طبیعی، ابزاری حیاتی برای شناسایی نواحی بحرانی و هدایت اقدامات حفاظتی به‌صورت مکانی و هدفمند است. در مطالعه حاضر، منطقه حفاظت‌شده اشترانکوه به‌عنوان یکی از شاخص‌ترین اکوسیستم‌های کوهستانی زاگرس مورد تحلیل قرار گرفت تا با بهره‌گیری از مدل‌سازی شاخص‌محور و تحلیل‌های مکانی در محیط GIS، الگوی حساسیت بوم‌شناختی آن تبیین گردد.

نتایج وزن‌دهی شاخص‌ها با استفاده از روش دلفی نشان داد که کاربری/پوشش اراضی (۰/۱۹۸) و رواناب سطحی (۰/۱۶۲) بیشترین نقش را در تعیین سطح حساسیت دارند. این یافته تأکید می‌کند که ساختار و پویایی اکولوژیک منطقه به‌شدت تحت تأثیر تحولات کاربری زمین، شدت بهره‌برداری انسانی و فرآیندهای هیدرولوژیکی سطحی قرار دارد. در واقع، نتایج نشان می‌دهد که تغییرات کاربری اراضی و افزایش رواناب نه‌تنها نشانه فشار انسانی بر سیستم است، بلکه خود به‌عنوان عوامل تسریع‌کننده فرسایش، زوال خاک و کاهش توان سازشی اکوسیستم عمل می‌کنند. این الگو بازتاب‌دهنده تعاملات پیچیده بین عوامل انسانی و طبیعی است که به شکل‌گیری الگوی فضایی ناپایداری اکولوژیک در جنوب و مرکز منطقه انجامیده است. این یافته‌ها با نتایج Mafi-Gholami و همکاران (۲۰۲۰)، Bai همکاران (۲۰۲۱) و Sarif و Gupta (۲۰۲۲) همخوانی دارد که نشان داده‌اند تغییر در کاربری زمین و افت پوشش گیاهی از مهم‌ترین محرک‌های افزایش حساسیت محیط‌زیستی در مناطق کوهستانی محسوب می‌شود.

از سوی دیگر، تحلیل مکانی نمایه حساسیت نشان داد که حدود ۵۱ درصد از کل وسعت منطقه در طبقات حساسیت زیاد و بسیار زیاد قرار دارد که این امر بیانگر شکنندگی بالای اکوسیستم اشترانکوه است. بخش‌های جنوبی و غربی منطقه بیشترین تمرکز حساسیت را دارند و از نظر ویژگی‌های فیزیوگرافیک دارای شیب‌های زیاد، ارتفاع بالا، رواناب بالا و سازندهای زمین‌شناسی حساس به فرسایش هستند. این الگو با نتایج Lv و همکاران (۲۰۱۹) و Wei و همکاران (۲۰۲۰) تطابق دارد که رابطه مستقیم بین توپوگرافی و میزان حساسیت بوم‌شناختی را تأیید کرده‌اند. در مقابل، نواحی شمالی و شمال‌شرقی که دارای اقلیم مرطوب‌تر، شیب ملایم و پوشش جنگلی متراکم‌ترند، کمترین میزان حساسیت را نشان می‌دهند.

تحلیل خودهمبستگی مکانی نیز نشان داد که حساسیت در منطقه از الگوی خوشه‌ای منظم تبعیت می‌کند، بدین‌معنا که سلول‌هایی با مقادیر مشابه حساسیت، به‌صورت فضایی هم‌مکان شده‌اند. نتایج تحلیل لکه‌های داغ (Local Moran's I) نیز بیانگر وجود خوشه‌های High-High در پهنه‌های جنوبی و غربی و خوشه‌های Low-Low در شمال و شمال شرق منطقه است. این الگو از منظر بوم‌شناختی به مفهوم ناپایداری ساختاری در جنوب منطقه و تمرکز فرآیندهای تخریب زیست‌بومی در همین بخش‌هاست. یافته‌های مشابه در مطالعات Niknefsan و Fattahi (۲۰۲۳) و Azizi Jalilian و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش شده‌اند، جایی که خوشه‌های حساسیت بالا با مناطق دارای کاربری انسانی گسترده و پوشش گیاهی تنک همپوشانی داشته‌اند.

مقایسه تطبیقی نتایج با سایر پژوهش‌ها نیز مؤید دقت مدل به‌کار رفته در این تحقیق است. برای نمونه، Afshari و Mohseni (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای بر روی منطقه حفاظت‌شده ماله‌گاله، حساسیت بالای شیب‌های زیاد و خاک‌های خاص را گزارش کردند، و Mohammadifar و Moradinia (۲۰۲۱) نیز رابطه مستقیم بین ویژگی‌های فیزیکی خاک و حساسیت گیاهان را تأیید کردند. همچنین Haddad و همکاران (۲۰۲۲) در ارزیابی حساسیت سواحل انزلی با مدل گامای فازی، بر نقش ترکیبی کاربری اراضی و ویژگی‌های زمین‌ریختی در افزایش حساسیت تأکید داشتند. نتایج مطالعه حاضر نیز با هم‌گرایی مفهومی و تحلیلی مشابه، جایگاه اشترانکوه را به‌عنوان یکی از اکوسیستم‌های کوهستانی در معرض تخریب تأیید می‌کند. از نظر مدیریتی، نتایج این پژوهش اهمیت رویکرد مکانی در مدیریت مناطق حفاظت‌شده را برجسته می‌سازد. تمرکز لکه‌های داغ حساسیت در پهنه‌های جنوبی و غربی منطقه، ضرورت جهت‌گیری اقدامات حفاظتی به‌سمت این نواحی را نشان می‌دهد. در این راستا، می‌توان راهبردهای زیر را برای افزایش تاب‌آوری و کاهش حساسیت منطقه پیشنهاد داد:

- احیای پوشش گیاهی طبیعی در نواحی با شیب زیاد و تخریب‌شده به‌منظور کاهش فرسایش و افزایش نفوذپذیری خاک؛
- اجرای پروژه‌های آبخیزداری و مدیریت رواناب سطحی در حوزه‌های بحرانی برای کنترل سیلاب‌های لحظه‌ای؛

- محدودسازی تغییر کاربری اراضی کشاورزی و کنترل بهره‌برداری جوامع محلی به‌ویژه در مناطق دارای خوشه‌های-High:High
 - پایش بلندمدت حساسیت اکولوژیک با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و مدل‌سازی پیش‌بینی‌گرانه برای تحلیل روند تغییرات و طراحی سناریوهای آینده؛
 - ادغام نتایج ارزیابی حساسیت در چارچوب‌های ملی مدیریت تنوع زیستی، طرح‌های توسعه پایدار و برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم.
- در نهایت، نتیجه‌گیری کلی این پژوهش نشان می‌دهد که حساسیت بوم‌شناختی منطقه حفاظت‌شده اشتراکوه، حاصل برهم‌کنش پیچیده بین فشارهای انسانی و فرآیندهای طبیعی است. تمرکز خوشه‌های حساسیت بالا در بخش‌های جنوبی و غربی منطقه، بیانگر وجود نواحی بحرانی از نظر پایداری اکوسیستم و عملکرد محیط‌زیستی است. استمرار روند کنونی بهره‌برداری، خطر تخریب جبران‌ناپذیر این اکوسیستم را افزایش خواهد داد؛ در حالی که اجرای اقدامات احیایی و مدیریتی پیشنهادی، می‌تواند منجر به بازسازی عملکردهای اکولوژیک، افزایش تاب‌آوری و حفاظت پایدار این منطقه ارزشمند شود. به‌طور خلاصه، این پژوهش با ارائه مدل ترکیبی مبتنی بر روش دلفی و تحلیل مکانی، تصویری جامع از الگوی حساسیت اشتراکوه ارائه داده و می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر مناطق حفاظت‌شده کشور در راستای مدیریت مبتنی بر شواهد و تصمیم‌گیری فضایی به‌کار گرفته شود.

References

- Afshari, M., Mohseni, M., 2020. Identification of ecological plant groups in the Malegaleh protected area. *Journal of Plant Ecology* 14(3), 215-229.
- Azizi Jalilian, M., Danekar, A., Salman Mahini, A., Shayesteh, K., Taheri Sertasnizi, F., 2022. Conservation prioritization of Iran's surface water resources based on ecological sensitivity. *Ecology and Evolution* 12(5), e8974.
- Bahta, Y. T., Jordaan, A., Phatudi-Mphahlele, B., 2019. Ecological vulnerability indicators to drought: Case of communal farmers in Eastern Cape, South Africa. *Jàmá: Journal of Disaster Risk Studies* 11(1), 1-11.
- Bai, J., Li, J., Bao, A., Chang, C., 2021. Spatial-temporal variations of ecological vulnerability in the Tarim River Basin, Northwest China. *Journal of Arid Land* 13, 814-834.
- Bauer, C., Zhang, K., Xiao, Q., Lu, J., Hong, Y.R., Suk, R., 2022. County-level social vulnerability and breast, cervical, and colorectal cancer screening rates in the US, 2018. *JAMA Network Open* 5(9), e2233429-e2233429.
- Bederman, S.S., McIsaac, W.J., Coyte, P.C., Kreder, H. J., Mahomed, N.N., Wright, J.G., 2010. Referral practices for spinal surgery are poorly predicted by clinical guidelines and opinions of primary care physicians. *Medical Care* 48(9), 852-858.
- Cao, J.S., Yang, Y.Q., Deng, Z.Y., Hu, Y.D., 2022. Spatial and temporal evolution of ecological vulnerability based on vulnerability scoring diagram model in Shennongjia, China. *Scientific Reports* 12(1), 5168.
- Ceballos, G., Ehrlich, P.R., Barnosky, A.D., García, A., Pringle, R.M., Palmer, T.M., 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances* 1(5), e1400253.
- Chen, W., Cutter, S.L., Emrich, C.T., Shi, P., 2013. Measuring social vulnerability to natural hazards in the Yangtze River Delta region, China. *International Journal of Disaster Risk Science* 4(4), 169-181.
- Chisadza, B., Ncube, F., Macherera, M., Bangira, T., Gwate, O., 2023. Spatio-temporal variations in the ecological vulnerability of the Upper Mzingwane sub-catchment of Zimbabwe. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 14(1), 2190857.
- Chou, J., Xian, T., Zhao, R., Xu, Y., Yang, F., Sun, M., 2019. Drought risk assessment and estimation in vulnerable eco-regions of China: under the background of climate change. *Sustainability* 11(16), 4463.

- Cinco-Castro, S., Herrera-Silveira, J., 2020. Vulnerability of mangrove ecosystems to climate change effects: The case of the Yucatan Peninsula. *Ocean & Coastal Management* 192, 105196.
- Cinner, J.E., Barnes, M.L., 2019. Social dimensions of resilience in social-ecological systems. *One Earth* 1(1), 51-56.
- Colangelo, M., Camarero, J.J., Borghetti, M., Gentilesca, T., Oliva, J., Redondo, M.A., Ripullone, F., 2018. Drought and Phytophthora are associated with the decline of oak species in southern Italy. *Frontiers in Plant Science* 1595.
- Cornick, P., 2006. Nitric oxide education survey—Use of a Delphi survey to produce guidelines for training neonatal nurses to work with inhaled nitric oxide. *Journal of Neonatal Nursing* 12(2), 62-68.
- Cronbach, L.J., Shavelson, R.J., 2004. My current thoughts on coefficient alpha and successor procedures. *Educational and Psychological Measurement* 64(3), 391-418.
- Cumming, G.S., Allen, C.R., 2017. Protected areas as socialecological systems: perspectives from resilience and social-ecological systems theory. *Ecological Applications* 27(6), 1709-1717.
- Cutter, S. L., Derakhshan, S., 2019. Implementing disaster policy: Exploring scale and measurement schemes for disaster resilience. *Journal of Homeland Security and Emergency Management* 16(3), 20180029.
- Cutter, S.L., Finch, C., 2008. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105(7), 2301-2306.
- Danekar, A., Sharifi, N., Robati, M., 2018. Zoning analysis of Iran's protected areas: Sensitivity and development suitability evaluation. *Iranian Journal of Nature Conservation* 19(3), 87-104.
- Dastan Doost, A., Jalilvand, R., 2015. Ecological capability assessment of Bashgol protected area for ecotourism and conservation using GIS. *Environmental Research* 36(4), 71-86.
- De Marco, A., Sicard, P., Feng, Z., Agathokleous, E., Alonso, R., Araminiene, V., Paoletti, E., 2022. Strategic roadmap to assess forest vulnerability under air pollution and climate change. *Global Change Biology* 28(17), 5062-5085.
- Delgado-Serrano, M.D.M., Oteros-Rozas, E., Ruiz-Mallén, I., Calvo-Boyero, D., Ortiz-Guerrero, C. E., Escalante-Semerena, R.I., Corbera, E., 2018. Influence of community-based natural resource management strategies in the resilience of social-ecological systems. *Regional Environmental Change* 18, 581-592.
- Department of Environment of Iran (DOE)., 2020. Protected areas of the country. DOE publications 326 p.
- Di Marco, M., Ferrier, S., Harwood, T.D., Hoskins, A.J., Watson, J. E., 2019. Wilderness areas halve the extinction risk of terrestrial biodiversity. *Nature* 573(7775), 582-585.
- Dinerstein, E., Vynne, C., Sala, E., Joshi, A.R., Fernando, S., Lovejoy, T.E., Wikramanayake, E., 2019. A global deal for nature: guiding principles, milestones, and targets. *Science Advances* 5(4), eaaw2869.
- Ervin, J., 2003. Rapid assessment of protected area management effectiveness in four countries. *BioScience* 53(9), 833-841.
- Ford, J. D., Pearce, T., McDowell, G., Berrang-Ford, L., Sayles, J. S., Belfer, E., 2018. Vulnerability and its discontents: the past, present, and future of climate change vulnerability research. *Climatic Change* 151, 189-203.
- Gain, A.K., Hossain, S., Benson, D., Di Baldassarre, G., Giupponi, C., Huq, N., 2021. Social-ecological system approaches for water resources management. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 28(2), 109-124.
- Gallopín, G.C., 2006. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change* 16(3), 293-303.
- Getis, A., Ord, J.K., 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24(3), 189-206.
- Gill, D. A., Mascia, M. B., Ahmadi, G.N., Glew, L., Lester, S.E., Barnes, M., Fox, H.E., 2017. Capacity shortfalls hinder the performance of marine protected areas globally. *Nature* 543(7647), 665-669.
- Gittins, J.R., Hemingway, J.R., Dajka, J.C., 2021. How a water-resources crisis highlights social-ecological disconnects. *Water Research* 194, 116937.

- Gong, J., Jin, T., Cao, E., Wang, S., Yan, L., 2022. Is ecological vulnerability assessment based on the VSD model and AHP-Entropy method useful for loessial forest landscape protection and adaptative management? A case study of Ziwoiling Mountain Region, China. *Ecological Indicators* 143, 109379.
- Haddad, M., Mousavi, S.F., Ghorbanian, K., Aghamohammadi, A., 2022. Estimation of ecological vulnerability intensity of Anzali coasts using fuzzy gamma and AHP model. *Journal of Environmental Assessment* 28(1), 45-60.
- Hasanzadeh, M., Daneshkar, A., Pak, A., 2012. Application of Delphi method for criteria selection in site survey of oil jetties in Iran. *Environment and Natural Resources* 2(1), 119-128.
- Jaafari, A., Mafi-Gholami, D., Choubin, B., 2025. Spatiotemporal dynamics of social vulnerability to natural hazards: Trends and projections from 2002 to 2030 in northwestern Iran. *Sustainable Cities and Society* 120, 106172.
- Jaafari, A., Rahmati, O., Zenner, E.K., Mafi-Gholami, D., 2022. Anthropogenic activities amplify wildfire occurrence in the Zagros eco-region of western Iran. *Natural Hazards* 114(1), 457-473.
- Jia, C., Xinjun, Y., Sha, Y., Kongsan, W., Mengqi, D., Xin, W., 2018. The vulnerability evolution and simulation of social-ecological systems in a semi-arid area: a case study of Yulin city, China. *Journal of Geographical Sciences* 28(2), 152-174.
- Joevivek, V., Saravanan, S., Chandrasekar, N., 2013. Coastal vulnerability and shoreline changes for southern tip of India-remote sensing and GIS approach. *Journal of Earth Science and Climatic Change* 4(144), 2.
- Kanwar, N., Kuniyal, J.C., 2022. Vulnerability assessment of forest ecosystems focusing on climate change, hazards and anthropogenic pressures in the cold desert of Kinnaur district, northwestern Indian Himalaya. *Journal of Earth System Science* 131(1), 51.
- Kaplan, M., Renaud, F.G., Lüchters, G., 2009. Vulnerability assessment and protective effects of coastal vegetation during the 2004 Tsunami in Sri Lanka. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(4), 1479-1494.
- Kunte, P.D., Jauhari, N., Mehrotra, U., Kotha, M., Hursthouse, A.S., Gagnon, A.S., 2014. Multi-hazards coastal vulnerability assessment of Goa, India, using geospatial techniques. *Ocean & Coastal Management* 95, 264-281.
- Landeta, J., 2006. Current validity of the Delphi method in social sciences. *Technological Forecasting and Social Change* 73(5), 467-482.
- Leberger, R., Rosa, I. M., Guerra, C.A., Wolf, F., Pereira, H.M., 2020. Global patterns of forest loss across IUCN categories of protected areas. *Biological Conservation* 241, 108299.
- Lee, Y.J., 2014. Social vulnerability indicators as a sustainable planning tool. *Environmental Impact Assessment Review* 44, 31-42.
- Lv, X., Xiao, W., Zhao, Y., Zhang, W., Li, S., Sun, H., 2019. Drivers of spatio-temporal ecological vulnerability in an arid, coal mining region in Western China. *Ecological Indicators* 106, 105475.
- Mafi-Gholami, D., Fegghi, J., Daneshkar, A., Yarali, N., 2015. Classification and Prioritization of Negative Factors Affecting on Mangrove Forests Using Delphi Method (a Case Study: Mangrove Forests of Hormozgan Province, Iran). *Advances in Bioresearch* 6(3), 11-23.
- Mafi-Gholami, D., Jaafari, A., Zenner, E.K., Kamari, A.N., Bui, D.T., 2020. Spatial modeling of exposure of mangrove ecosystems to multiple environmental hazards. *Science of the Total Environment* 740, 140167.
- Mafi-Gholami, D., Pirasteh, S., Ellison, J.C., Jaafari, A., 2021. Fuzzy-based vulnerability assessment of coupled social-ecological systems to multiple environmental hazards and climate change. *Journal of Environmental Management* 299, 113573.
- Mahapatra, M., Ramakrishnan, R., Rajawat, A. S., 2015. Coastal vulnerability assessment of Gujarat coast to sea level rise using GIS techniques: a preliminary study. *Journal of Coastal Conservation* 19(2), 241-256.
- Mahmoudi, B., Zenner, E., Mafi-Gholami, D., Eshaghi, F., 2023. Livelihood Analysis and a New Inferential Model for Development of Forest-Dependent Rural Communities. *Sustainability* 15(11), 9008.
- Margules, C.R., Pressey, R.L., 2000. Systematic conservation planning. *Nature* 405(6783), 243-253.

- Meng, J., Li, Y., Feng, Y., Hua, F., Shen, X., Li, S., Wang, Z., 2023. Anthropogenic vulnerability assessment of global terrestrial protected areas with a new framework. *Biological Conservation* 283, 110064.
- Menoni, S., Molinari, D., Parker, D., Ballio, F., Tapsell, S., 2012. Assessing multifaceted vulnerability and resilience in order to design risk-mitigation strategies. *Natural Hazards* 64, 2057-2082.
- Miller, G., 2001. The development of indicators for sustainable tourism: Results of a Delphi survey of tourism researchers. *Tourism Management* 22(4), 351-362.
- Mitchel, A., 2005. The ESRI Guide to GIS analysis. In: *Spatial Measurements and Statistics*, ume 2. ESRI Press.
- Mohammadi Far, B., Moradi Nia, S., 2021. Relationship between ecological factors and plant communities in Kalmend Bahadran protected area. *Journal of Environmental Biology* 42(2), 517-527.
- Nguyen, K. A., Liou, Y.A., 2019. Global mapping of eco-environmental vulnerability from human and nature disturbances. *Science of the Total Environment* 664, 995-1004.
- Niknefsan, M., Fattahi, R., 2023. Zoning and assessment of ecological sensitivity in the Rudsar coastal area. *Iranian Journal of Environmental Science* 20(2), 185-200.
- O'Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., West, J., 2004. Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. *Global Environmental Change* 14(4), 303-313.
- Okoli, C., Pawlowski, S.D., 2004. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications. *Information & Management* 42(1), 15-29.
- Petroni, M.L., Siqueira-Gay, J., Gallardo, A.L.C.F., 2022. Understanding land use change impacts on ecosystem services within urban protected areas. *Landscape and Urban Planning* 223, 104404.
- Pirasteh, S., Fang, Y., Mafi-Gholami, D., Abulibdeh, A., Nouri-Kamari, A., Khonsari, N., 2024. Enhancing vulnerability assessment through spatially explicit modeling of mountain social-ecological systems exposed to multiple environmental hazards. *Science of The Total Environment* 930, 172744.
- Pirasteh, S., Zenner, E.K., Mafi-Gholami, D., Jaafari, A., Kamari, A.N., Liu, G., Li, J., 2021. Modeling mangrove responses to multi-decadal climate change and anthropogenic impacts using a long-term time series of satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 102, 102390.
- Pomoim, N., Hughes, A.C., Trisurat, Y., Corlett, R.T., 2022. Vulnerability to climate change of species in protected areas in Thailand. *Scientific Reports* 12(1), 5705.
- Reckien, D., 2018. What is in an index? Construction method, data metric, and weighting scheme determine the outcome of composite social vulnerability indices in New York City. *Regional Environmental Change* 18, 1439-1451.
- Rorato, A.C., Escada, M.I.S., Camara, G., Picoli, M.C., Verstegen, J.A., 2022. Environmental vulnerability assessment of Brazilian Amazon indigenous lands. *Environmental Science & Policy* 129, 19-36.
- Sarif, M.O., Gupta, R.D., 2022. Evaluation of seasonal ecological vulnerability using LULC and thermal state dynamics using Landsat and MODIS data: a case study of Prayagraj City, India (1987–2018). *Environmental Science and Pollution Research* 29(51), 77502-77535.
- Schröter, D., Polsky, C., Patt, A.G., 2005. Assessing vulnerabilities to the effects of global change: an eight step approach. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 10, 573-595.
- Su, S., Pi, J., Wan, C., Li, H., Xiao, R., Li, B., 2015. Categorizing social vulnerability patterns in Chinese coastal cities. *Ocean & Coastal Management* 116, 1-8.
- Thangaratnam, S., Redman, C.W., 2005. The Delphi technique. *The Obstetrician & Gynecologist* 7(2), 120-125.
- Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Schiller, A., 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100(14), 8074-8079.
- UNEP-WCMC., 2022. World Database on Protected Areas (WDPA). <https://www.protectedplanet.net/>.
- Wei, W., Shi, S., Zhang, X., Zhou, L., Xie, B., Zhou, J., Li, C., 2020. Regional-scale assessment of environmental vulnerability in an arid inland basin. *Ecological Indicators* 109, 105792.

- Wilhelmi, O.V., Morss, R.E., 2013. Integrated analysis of societal vulnerability in an extreme precipitation event: A Fort Collins case study. *Environmental Science & Policy* 26, 49-62.
- Windle, P.E., 2004. Delphi technique: assessing component needs. *Journal of Paraneesthesia Nursing* 19(1), 46-47.
- Xia, M., Jia, K., Zhao, W., Liu, S., Wei, X., Wang, B., 2021. Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators* 123, 107274.
- Yarali, N., Mafi Gholami, D., Jafari, A., Soltani, A., Mahmoudi, M., 2010. Environmental impact assessment (EIA) of Oshtorankooh protected area using degradation model. *Environmental Researches* 1(1), 13-22.
- Yekom Consulting Engineers (YCE)., 2015. Oshtorankooh protected area management plan. 389 p.
- Yin, J., Yin, Z., Wang, J., Xu, S., 2012. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast. *Journal of Coastal Conservation* 16(1), 123-133.
- Yoon, D.K. 2012. Assessment of social vulnerability to natural disasters: a comparative study. *Natural Hazards* 63, 823-843.
- Yuliawan, D., Hakim, D., Juanda, B., Fauzi, A., 2022. Classification and prediction of rural socio-economic vulnerability (IRSV) integrated with social-ecological system (SES). *Decision Science Letters* 11(3), 223-234.
- Zhang, X., Liu, K., Wang, S., Wu, T., Li, X., Wang, J., Ji, Y., 2022. Spatiotemporal evolution of ecological vulnerability in the Yellow River Basin under ecological restoration initiatives. *Ecological Indicators* 135, 108586.
- Zhang, Y., Zhou, D., Li, Z., Qi, L., 2020. Spatial and temporal dynamics of social-ecological resilience in Nepal from 2000 to 2015. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 120, 102894.