



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=fa>

Geography and Environmental Planning

E-ISSN: 2252- 0910

Document Type: Research Paper

Vol. 37, Issue 1, No.101, 2026, pp. 137- 156

Received: 28/04/2026 Accepted: 18/08/2026

## **Analysis of Ecotourism Vulnerability to Global Warming (Case Study: Sorkheh-Hesar Protected Area)**

**Saeideh Fakhari**  \*

Assistant professor, Department of Geography, Faculty of Tourism, Kharazmi University, Tehran, Iran  
s.fakhari@khu.ac.ir

**Mehri Akbari**

Associate professor, Department of Geography, Faculty of Climatology, Kharazmi University, Tehran, Iran  
mehryakbary@khu.ac.ir

**Niloofer Ehsani**

Master's of Tourism, Kharazmi University, Tehran, Iran  
nilooehsani91@gmail.com

### **Abstract**

Ecotourism as one of the key branches of sustainable tourism plays a significant role in environmental conservation and livelihoods of local communities. However, climate change and global warming have posed serious challenges to its long-term sustainability. The present study aimed to spatially assess the vulnerability of ecotourism in Sorkheh-Hesar Protected Area located in eastern Tehran under future climate change conditions. The main innovation of this research lay in proposing an integrated framework that combines statistical climate modeling with fuzzy logic-based spatial analysis, enabling the production of operational vulnerability maps for management planning. This study was applied-developmental in nature and followed a quantitative approach. Future climate changes were projected by using the Statistical DownScaling Model (SDSM) under the intermediate SSP2-4.5 scenario of the CMIP6 project based on meteorological data from the Doshan-Tappeh station for the historical period of 1995-2024. Subsequently, ecotourism vulnerability was zoned by using fuzzy logic through the integration of spatial layers including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), distance from surface water resources, slope, and land use. Climate modeling results indicated an increase of 1.8°C in mean annual temperature and a decline of 10-15% in annual precipitation over the coming decades. Spatial vulnerability analysis showed that parts of the eastern and southeastern sections of the study area fell within the "high vulnerability" category, mainly due to the sensitivity of vegetation cover and dependence on limited water resources under conditions of decreasing precipitation and rising temperature. These areas

---

\*Corresponding Author

Fakhari, S. , Akbary, M. and Ehsani, N. (2026). Vulnerability Analysis of Ecotourism to Global Warming (Case Study: Sorkheh-Hesar Protected Area). *Geography and Environmental Planning*, 37 (1), 137 - 156 .



2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/gep.2026.148731.1782

characterized by the concentration of agricultural lands and rangelands with fragile vegetation cover were expected to experience the greatest impacts of climate change. Overall, the study highlighted the necessity of prioritizing climate adaptation measures, including water resource management, vegetation restoration, and empowerment of local communities, particularly in the eastern and southeastern parts of the region. The integrated approach developed in this research can serve as a practical model for similar studies in other protected areas of the country.

**Keywords:** Climate Change, Statistical Downscaling (SDSM), Ecotourism, Vulnerability, Sorkheh-Hesar Protected Area.

### Introduction

Ecotourism is widely recognized as one of the most significant branches of sustainable tourism because it promotes responsible travel to natural areas, biodiversity conservation, environmental awareness, and livelihood support for local communities. However, the sustainability of ecotourism is highly dependent on ecosystem integrity, climatic suitability, landscape quality, and resilience of natural resources. In recent decades, climate change and global warming have emerged as major threats to tourism destinations worldwide, particularly nature-based destinations. Rising temperatures, declining precipitation, increasing drought frequency, ecosystem degradation, biodiversity loss, and growing water stress can directly undermine the attractiveness and carrying capacity of ecotourism areas. These impacts are expected to be more severe in arid and semi-arid environments. Iran, due to its predominantly dry climate and increasing environmental stress, is among the countries highly vulnerable to climate change. Within this context, the protected area of Sorkheh-Hesar located in eastern Tehran represents one of the most valuable peri-urban natural landscapes in Iran and requires scientific assessment of its ecotourism vulnerability under future climate conditions.

The main objective of this study was to assess the vulnerability of ecotourism in Sorkheh-Hesar Protected Area to future climate change and develop an operational framework for adaptive planning and sustainable destination management. The originality of the study lay in integrating statistical climate downscaling, fuzzy logic modeling, and GIS-based spatial analysis in a unified framework capable of addressing both climatic uncertainty and spatial heterogeneity. The study followed an applied-developmental design with a quantitative approach. In the first stage, future climate conditions were simulated using the Statistical DownScaling Model (SDSM). The observed climatic data, including daily minimum temperature, maximum temperature, and precipitation from the Doshan-Tappeh meteorological station for the baseline period of 1995-2024, were combined with large-scale atmospheric predictors derived from CMIP6 General Circulation Models (GCMs). After calibration and validation of the model, the SSP2-4.5 intermediate emissions scenario was selected for the projection period of 2025-2055. Model evaluation results indicated high performance for temperature simulation and acceptable performance for precipitation, confirming the applicability of SDSM for local climate assessment in the study area.

### Research Findings

Climate projections revealed that the mean annual temperature of the area was expected to increase by approximately 1.8°C by 2055 relative to the baseline period. Summer warming was projected to be more pronounced, leading to stronger heat stress, higher evapotranspiration rates, and reduced thermal comfort for visitors. At the same time, annual precipitation was projected to decline by around 10-15% with more uneven seasonal distribution. Rainfall concentration was expected to increase during colder months, while dry-season precipitation declined further. This dual pattern might intensify both prolonged drought conditions and sudden winter runoff or flash floods. Such climatic changes might significantly affect habitat quality, vegetation cover, water availability, biodiversity stability, and visitor satisfaction.

In the second stage, ecotourism vulnerability was assessed by using fuzzy logic modeling. A set of environmental and spatial indicators, including elevation, slope, aspect, geology, soil type, land use, temperature, and precipitation, was selected. Each variable was transformed into fuzzy membership functions according to its characteristics and contribution to vulnerability. The fuzzy layers were then integrated using the fuzzy gamma

operator within a GIS environment. The final output was a vulnerability zoning map with 3 categories: low, medium, and high vulnerability. This approach enabled the modeling of nonlinear interactions, uncertainty, and complex relationships among environmental variables.

The spatial results showed that nearly 28% of the protected area fell into the category of high to very high vulnerability. These zones were mainly concentrated in the southern, southeastern, and some eastern parts of Sorkheh-Hesar, where lower elevation, higher temperature, gentle slopes, weaker vegetation cover, higher anthropogenic pressure, and dependence on limited water resources were evident. Agricultural lands, barren surfaces, and urban fringe areas were more common in these sectors, making them more sensitive to drought, soil erosion, vegetation decline, and reduced tourism attractiveness. In contrast, approximately 27% of the area mainly located in the northern and northeastern uplands exhibited low vulnerability. These sectors benefited from higher elevation, lower temperature, denser vegetation cover, and relatively stable ecological conditions, resulting in greater natural resilience. The remaining areas were classified as medium vulnerability.

### **Discussion of Results & Conclusion**

The findings demonstrated that global warming was not merely a climatic issue, but a multidimensional threat to ecotourism through cascading impacts, such as water scarcity, ecosystem stress, increased wildfire risk, accelerated soil erosion, and deterioration of visitor experience. Moreover, the proximity of Sorkheh-Hesar to the metropolitan area of Tehran intensified vulnerability through urban heat island effects, pollution, infrastructure pressure, and high visitor flows. Therefore, future management of the protected area requires a place-based and adaptation-oriented strategy.

Based on the results, the main management recommendations included vegetation restoration in critical zones, integrated water resource management, control of incompatible land uses and anthropogenic pressure, development of low-impact tourism routes, establishment of long-term climatic and ecological monitoring systems, visitor and community awareness programs, and incorporation of vulnerability maps into regional planning. Overall, the integrated framework developed in this study can serve as a practical model for other protected areas in Iran and arid regions of the Middle East. It contributes to the advancement of climate-resilient ecotourism planning and supports evidence-based management under increasing environmental uncertainty.



## مقاله پژوهشی

# تحلیل آسیب‌پذیری اکوتوریسم در برابر گرمایش جهانی (مطالعه موردی: منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار)

سعیده فخاری\* ، استادیار گروه گردشگری، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

s.fakhari@khu.ac.ir

مهری اکبری، دانشیار گروه آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

mehryakbary@khu.ac.ir

نیلوفر احسانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه گردشگری دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

nilooehsani91@gmail.com

## چکیده

اکوتوریسم به‌عنوان یکی از شاخه‌های کلیدی گردشگری پایدار، نقش مهمی در حفاظت از محیط‌زیست و معیشت جوامع محلی ایفا می‌کند؛ بااین‌حال، تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی پایداری آن را با چالش جدی مواجه ساخته‌اند. هدف: پژوهش حاضر با هدف ارزیابی فضایی آسیب‌پذیری اکوتوریسم در منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار (واقع در شرق تهران) در مواجهه با تغییرات اقلیمی آینده انجام شده است. نوآوری اصلی این تحقیق در ارائه چارچوبی ترکیبی از مدل‌سازی اقلیمی آماری و تحلیل فضایی مبتنی بر منطق فازی است که امکان تولید نقشه‌های آسیب‌پذیری عملیاتی را برای برنامه‌ریزی مدیریتی فراهم می‌سازد. روش: پژوهش از نوع کاربردی-توسعه‌ای با رویکرد کمی بوده است. برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM تحت سناریوی میانی SSP2-4.5 پروژه CMIP6 و داده‌های ایستگاه هواشناسی دوشان‌تپه در بازه تاریخی ۱۹۹۵-۲۰۲۴ استفاده شد. سپس آسیب‌پذیری اکوتوریسم با به‌کارگیری منطق فازی و تلفیق لایه‌های اطلاعاتی شامل شاخص پوشش گیاهی (NDVI)، فاصله از منابع آب سطحی، شیب و کاربری اراضی، پهنه‌بندی شد. یافته‌ها و تحلیل: یافته‌های مدل‌سازی اقلیمی حاکی از افزایش میانگین دمای سالانه به میزان ۸/۱ درجه سلسیوس و کاهش بارش سالانه بین ۱۰ تا ۱۵ درصد در دهه‌های آینده است. نتایج تحلیل فضایی آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که بخش‌هایی از محدوده شرقی و جنوب‌شرقی منطقه در طبقه «آسیب‌پذیری زیاد» قرار می‌گیرند که عمدتاً به دلیل حساسیت پوشش گیاهی و وابستگی به منابع آبی محدود در برابر کاهش بارش و افزایش دماست. این نواحی به دلیل تمرکز کاربری‌های کشاورزی و مراتع با پوشش گیاهی شکننده، بیشترین تأثیرپذیری را از تغییرات اقلیمی خواهند داشت. نتیجه‌گیری: در مجموع، پژوهش حاضر بر ضرورت تمرکز اقدامات سازگاری با اقلیم از جمله مدیریت منابع آب، احیای پوشش گیاهی و توانمندسازی جوامع محلی در نواحی شرقی و جنوب‌شرقی منطقه تأکید دارد. رویکرد ترکیبی ارائه‌شده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان الگویی برای مطالعات مشابه در سایر مناطق حفاظت‌شده کشور استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM)، اکوتوریسم، آسیب‌پذیری، منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار

\*نویسنده مسئول

فخاری، سعیده، اکبری، مهری و احسانی، نیلوفر. (۱۴۰۵). تحلیل آسیب‌پذیری اکوتوریسم در برابر گرمایش جهانی (مطالعه موردی: منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار)،

جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۳۷ (۱)، ۱۵۶-۱۳۷.



## مقدمه و بیان مسئله

در سال‌های اخیر، تأثیر تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی بر بخش گردشگری، به‌ویژه اکوتوریسم، توجه گسترده‌ای در ادبیات علمی به خود جلب کرده است (Pörtner et al., 2022). بخش گردشگری در سال ۲۰۲۰ وضعیت اضطراری اقلیمی اعلام کرد (Scott & Gössling, 2022) و بدین ترتیب آسیب‌پذیری خود را به دلیل وابستگی شدید به منابع اقلیمی به رسمیت شناخت (Willibald et al., 2021). اقلیم یکی از عوامل کلیدی در انتخاب مقصد گردشگری است و این موضوع پیوند نزدیک میان گردشگری و اقلیم را برجسته می‌سازد (Rodriguez-Rullt et al., 2026). از آنجا که بسیاری از اشکال گردشگری به‌طور مستقیم به شرایط آب‌وهوایی و اقلیمی وابسته هستند، تغییرات اقلیمی کنونی و آتی ظرفیت بالایی برای تأثیرگذاری قابل توجه بر این بخش دارند (Mitrică et al., 2025; Saarinen & Tervo, 2006). الگوهای ناپایدار و حدی آب‌وهوا که از شاخص‌های تغییرات اقلیمی محسوب می‌شوند، هم‌اکنون در حال تغییر فعالیت‌های گردشگری هستند (Dogru et al., 2019). مطالعه‌ای که اثرات ۱۰ نوع مختلف از تغییرات اقلیمی را بر ۸۹ مؤلفه شامل سلامت انسان، غذا، آب، زیرساخت‌ها، اقتصاد و امنیت بررسی کرده است، نشان می‌دهد که گردشگری یکی از تنها پنج بخشی است که تحت تأثیر هر ۱۰ نوع پیامد اقلیمی قرار می‌گیرد (Mora et al., 2018). در نتیجه، توسعه گردشگری پایدار ممکن است در مناطقی که در معرض ریسک بالاتر تغییرات اقلیمی قرار دارند یا به بازارهای گردشگری وابسته به اقلیم اتکا می‌کنند، با چالش‌های جدی مواجه شود (Weaver, 2011; Scott et al., 2020). این تغییرات، به‌طور مستقیم و غیرمستقیم، جذابیت‌های طبیعی را که موتور محرک اکوتوریسم هستند، تهدید می‌کنند. از کاهش پوشش گیاهی و تنوع زیستی گرفته تا کمبود منابع آب، همگی می‌توانند کیفیت تجربه اکوتوریستی و پایداری اقتصادی آن را به خطر اندازند (Scott et al., 2012).

با افزایش نگرانی‌های جهانی نسبت به تغییرات اقلیمی، اکوتوریسم به‌عنوان صنعتی حساس و آسیب‌پذیر در برابر این تغییرات مطرح می‌شود (UNWTO, 2023). اکوتوریسم که هدف آن حفظ محیط‌زیست و ارتقای آگاهی‌های محیطی است، به شدت تحت تأثیر تغییرات آب‌وهوایی قرار دارد. عواملی همچون تغییر در الگوهای بارش، افزایش دما و کاهش تنوع زیستی می‌توانند سلامت اکوسیستم‌ها و تجربه بازدیدکنندگان را تهدید کنند و این موضوع می‌تواند به کاهش جذابیت مقاصد اکوتوریسمی منجر شود (Fennell, 2022). تأثیر تغییرات اقلیمی بر اکوتوریسم و همچنین ظرفیت این بخش به‌عنوان منبعی نوین برای درآمد، نباید به‌صورت منفرد بررسی شود؛ بلکه باید به‌عنوان فرایندی پویا درک شود که نه‌تنها اکوتوریسم و کسب‌وکارها، جوامع محلی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kaján & Saarinen, 2013).

ارزیابی آسیب‌پذیری رویکردی یکپارچه برای تحلیل نحوه تأثیرگذاری تغییرات اقلیمی فعلی و آینده بر یک سیستم است (Higuera Roa et al., 2025)؛ بنابراین، درک و ارزیابی آسیب‌پذیری کاری چالش‌برانگیز است و به دانش تخصصی نیاز دارد، زیرا آسیب‌پذیری تحت تأثیر ترکیبی از عوامل اجتماعی - اقتصادی و زیست‌فیزیکی قرار دارد (Mun et al., 2020; Malone & Engle, 2011). آسیب‌پذیری مفهومی پیچیده و پویاست که در گذر زمان و در فضا تغییر می‌کند و اغلب به جمعیت‌هایی اشاره دارد که ظرفیت محدودی برای پاسخ‌گویی، مقابله و بازیابی پس از مخاطرات طبیعی یا انسان‌ساخت دارند (Armaş & Albuлесcu, 2025). این مفهوم به وضعیت مستعد آسیب بودن

اشاره دارد که ناشی از مواجهه با تنش‌ها، تغییرات محیطی و اجتماعی و ناتوانی در سازگاری است. طبق تعریف سازمان ملل (UNDRO, 1991)، آسیب‌پذیری عبارت است از درجه زیان یک عنصر معین یا دسته‌ای از عناصر در معرض ریسک، در نتیجه وقوع یک پدیده طبیعی با بزرگی معین که روی مقیاسی از صفر (بدون آسیب‌پذیری) تا یک (آسیب‌پذیری کامل) بیان می‌شود. شناسایی کشورها یا مناطقی که به‌ویژه آسیب‌پذیر هستند می‌تواند به‌عنوان گام نخست در درک و رسیدگی به عواملی عمل کند که به ایجاد و تشدید آسیب‌پذیری منجر می‌شوند (Herrera et al., 2023). آسیب‌پذیری عموماً به‌عنوان برهم‌کنش سه مؤلفه اصلی درک می‌شود: مواجهه، حساسیت و ظرفیت سازگاری (Qian et al., 2022; Turner et al., 2003; Perch-Nielsen, 2010)؛ البته تغییرات در آسیب‌پذیری تا حد زیادی تحت تأثیر عوامل غیراقلیمی نیز قرار دارد؛ عواملی نظیر شرایط اقتصادی، روندهای جمعیتی، پویایی‌های سیستم‌ها، پیچیدگی اقتصادی، وابستگی به منابع طبیعی، رفتار انسانی، فرهنگ، تاریخ و ظرفیت نهادی (Reimann et al., 2024; Esteves et al., 2016; Handmer et al., 1999; Kaján & Saarinen, 2013).

تحقیقات اخیر بر نیاز به مدل‌سازی تجزیه و تحلیل ریسک و طراحی شاخص‌های آسیب‌پذیری برای درک بهتر اثرات گرمایش جهانی تأکید دارند. چنین بررسی‌هایی نه تنها ساختارهای اکوسیستمی، سلامت، ایمنی و تجربه گردشگران را نیز در بر می‌گیرند (Grizane, 2025). در این میان، گرمایش جهانی مسئول ذوب‌شدن یخچال‌های کوهستانی، کاهش تنوع گیاهی و جانوری، افزایش سطح دریا، سفیدشدن مرجان‌ها و افزایش شدت طوفان‌های حاره‌ای است (Dube, 2023) و به تهدیدی بزرگ برای اکوتوریسم در مناطق حفاظت‌شده تبدیل شده است (Jamaliah & Powell, 2017). کشورها و مناطق مختلف از نظر میزان آسیب‌پذیری تحت تأثیر گرمایش جهانی متفاوت هستند (Mitrică et al., 2025). این یافته‌ها بر اهمیت اندازه‌گیری کمی آسیب‌پذیری گردشگری در برابر گرمایش جهانی و تعامل میان قرار گرفتن در معرض خطر، حساسیت و ظرفیت سازگاری تأکید می‌کنند (Scott et al., 2019).

در مطالعات تجربی نیز شواهدی از تأثیر تغییرات اقلیمی بر اکوتوریسم در مقیاس مقصد مشاهده شده است؛ برای مثال، پژوهشی در مقصد اکوتوریستی *Pueblos Mancomunados* در مکزیک نشان داد که سناریوهای تغییر اقلیم، ادراک گردشگران نسبت به جذابیت مقصد را تحت تأثیر قرار می‌دهند و ممکن است تصمیم به بازدید از سایت‌های مبتنی بر طبیعت را تغییر دهند. این یافته‌ها ضرورت برنامه‌ریزی سازگار با تغییرات اقلیمی در کسب‌وکارها و جوامع محلی فعال در اکوتوریسم را برجسته می‌کند (Deason et al., 2023). تحقیقات دیگر نیز به توسعه ارزیابی‌های چندمعیاره برای سنجش آسیب‌پذیری گردشگری پرداخته‌اند؛ برای نمونه، مطالعه‌ای در رومانی با استفاده از ۲۵ شاخص مرتبط با تغییرات اقلیمی، آسیب‌پذیری مقاصد گردشگری را از نظر قرار گرفتن در معرض خطر، حساسیت و ظرفیت انطباقی تحلیل کرده و الگوهای مکانی آسیب‌پذیری را در سطح پایین‌ترین تقسیمات اداری منطقه‌ای شناسایی کرده است. این نوع تحلیل فضایی کاربردی نشان می‌دهد که تمرکز بر داده‌های مکانی - اقلیمی و انتخاب شاخص‌های مناسب، برای سیاست‌گذاری سازگاری و مدیریت ریسک در مناطق گردشگری ضروری است (Mitrică et al., 2025). همچنین در تحقیق دیگر، امواج گرمایی در استان خوزستان منجر به کاهش تنوع زیستی و کاهش طول فصل گردشگری شده است (اکبری و فخاری، ۱۴۰۴)؛ بنابراین، ایجاد چارچوب‌های یکپارچه و قابل مقایسه برای ارزیابی

آسیب‌پذیری در مقاصد گردشگری لازم است (Gasalla-López et al., 2025)؛ بنابراین، برای ارزیابی آسیب‌پذیری گردشگری در برابر گرمایش جهانی، باید هم عوامل خطر اقلیمی (هشدارها و رخدادها) و هم مؤلفه‌های آسیب‌پذیری (قرار گرفتن در معرض خطر، حساسیت و ظرفیت سازگاری) را به‌طور همزمان مدنظر قرار داد (Mitrică et al., 2025) و از همکاری میان‌رشته‌ای میان متخصصین گردشگری، مطالعات اقلیمی و برنامه‌ریزی محیط‌زیست بهره برد.

سازمان جهانی گردشگری (UNWTO, 2023) نیز بر پتانسیل اکوتوریسم به‌عنوان ابزاری برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار، به‌ویژه در مناطق طبیعی و حساس، تأکید می‌کند؛ با این حال، پایداری بلندمدت این رویکرد به سلامت و تاب‌آوری اکوسیستم‌هایی وابسته است که بنیان آن را تشکیل می‌دهند. افزایش فراوانی و شدت موج‌های گرما ناشی از گرمایش جهانی، با ایجاد تلفات در حیات‌وحش و اختلال در عملکرد اکوسیستم‌ها، پایداری و جذابیت مقاصد اکوتوریستی را تهدید می‌کند (Abunyewah et al., 2025)؛ از این‌رو، استرس گرمایی به‌عنوان یکی از پیامدهای مهم تغییرات اقلیمی، نه‌تنها یک چالش حفاظتی، عاملی مؤثر بر سلامت، ایمنی و کیفیت تجربه گردشگران و فعالان اکوتوریسم محسوب می‌شود (Sibitane et al., 2022).

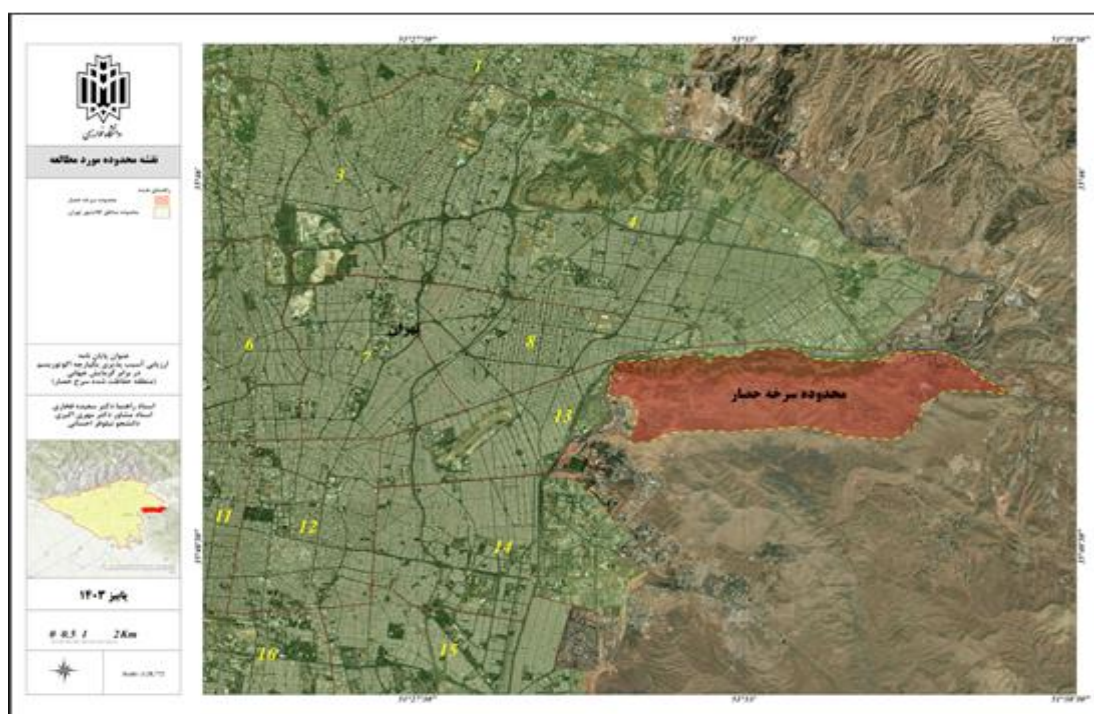
در این راستا، ایران به‌عنوان کشوری با اقلیمی عمدتاً خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در برابر اثرات تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر است. مناطق حفاظت‌شده، همچون پناهگاه‌های حیات‌وحش، نقش حیاتی در حفظ تنوع زیستی کشور دارند. منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار، به دلیل نزدیکی به پایتخت و قرارگرفتن در اکوسیستم نیمه‌بیابانی-کوهستانی، از اهمیت اکولوژیکی و تفریحی بالایی برخوردار است. با وجود این، تحقیقات متمرکز و یکپارچه‌ای که با رویکردی کمی و فضایی، آسیب‌پذیری اکوتوریسم این منطقه را در برابر پروژه‌های اقلیمی آینده ارزیابی کند، محدود است؛ به‌ویژه، پژوهش‌های متمرکز بر مقاصد حساس به اقلیم، مانند مناطق حفاظت‌شده و دیگر مناطق طبیعی در خاورمیانه، تقریباً وجود ندارد (Becken & Wilson, 2013; De Urioste-Stone et al., 2016; Kaján & Saarinen, 2013). این خلأ تحقیقاتی به معنای آن است که سیاست‌گذاری‌ها و اقدامات مدیریتی ممکن است برآوردی واقع‌بینانه از ریسک‌های پیش رو نداشته باشند و در نتیجه، منابع طبیعی و سرمایه‌گذاری‌های انجام‌شده در حوزه اکوتوریسم در معرض تهدید جدی قرار گیرند.

بر این اساس، مسئله اصلی پژوهش حاضر، نبود یک چارچوب ارزیابی یکپارچه و مکانی‌مند برای سنجش آسیب‌پذیری اکوتوریسم منطقه سرخه‌حصار در برابر تغییرات اقلیمی آینده است. این تحقیق درصدد است تا با ترکیب مدل‌سازی اقلیمی و تحلیل‌های فضایی، این خلأ را پر کرده و نقشه‌ای از مناطق پرخطر ارائه دهد تا مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی انطباقی و مدیریت پایدار اکوتوریسم در این منطقه حیاتی فراهم آورد.

### منطقه مورد مطالعه

محدوده حفاظت‌شده و پارک سرخه‌حصار با حدود ۹۳۱ هکتار در قسمت شرقی کلانشهر تهران گسترده شده است و با محدوده طرح تفصیلی کلانشهر تهران مجاورت دارد. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود پارک سرخه‌حصار از شمال با منطقه ۴ کلانشهر تهران و از سمت غربی و شمال غربی با منطقه ۸ و از سمت غربی و جنوب غربی با منطقه ۱۳ کلانشهر تهران مجاورت دارد. مهم‌ترین کاربری‌های محدوده بلافاصله پارک سرخه‌حصار از شمال جاده

تهران - فیروزکوه و خیابان دماوند، از شرق به ترمینال مسافر بری، از جنوب به تپه درمن دشی و کوه تاختالیک و از غرب به بزرگراه اسبدوانی منتهی می‌شود. محدوده سرخه حصار، براساس سیستم دوماترن، دارای اقلیم نیمه خشک سرد است. میانگین بارندگی سالانه در منطقه مورد مطالعه ۶۲۱ میلیمتر در سال است. منطقه حفاظت‌شده سرخه حصار از نظر پوشش جانوری و تنوع زیستی اهمیت بالایی دارد. این منطقه زیستگاه گونه‌های متنوعی از پستانداران، پرندگان، خزندگان و دوزیستان است. از مهم‌ترین پستانداران می‌توان به قوچ و میش، آهو، گراز، روباه، شغال، گربه وحشی و پلنگ ایرانی اشاره کرد. همچنین حدود ۱۰۰ تا ۱۱۵ گونه پرنده بومی و مهاجر در این منطقه شناسایی شده‌اند. این تنوع گونه‌ای، نقش مهمی در پایداری اکوسیستم و ارزش حفاظتی سرخه حصار ایفا می‌کند. پوشش گیاهی نیز در محدوده سرخه حصار به ۳ دسته تقسیم می‌شود پوشش گیاهی مرتعی، پوشش کف جنگل و پوشش گیاهی جنگلی.



شکل ۱: منطقه مورد مطالعه

Fig. 1: The area studied

### داده‌ها و روش شناسی پژوهش

این پژوهش با هدف ارزیابی واقع‌بینانه‌تر آسیب‌پذیری اکوتوریسم و محیط‌زیست منطقه حفاظت‌شده سرخه حصار در برابر تغییرات اقلیمی، از رویکردی تلفیقی بهره گرفته است. این رویکرد ترکیبی از مدل‌سازی آماری ریزمقیاس‌نمایی<sup>۱</sup> (SDSM)، منطق‌فازی و تحلیل فضایی در محیط GIS است که با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی ArcGIS، و MATLAB/R پیاده‌سازی شده است.

<sup>1</sup> Statistical Downscaling Model

## ۱. مدل‌سازی تغییرات اقلیمی با استفاده از SDSM

در گام نخست، به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی آینده در منطقه، از مدل آماری ریزمقیاس‌نمایی SDSM استفاده شد. استخراج داده‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس: داده‌های بزرگ‌مقیاس جوی شامل ارتفاع ژئوپتانسیل، دمای ترازهای جوی، فشار سطح دریا و رطوبت نسبی، از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) تحت پروژه CMIP6 (پروژه مقایسه‌ای مدل‌های اقلیمی) که آخرین مجموعه داده‌های مورد تأیید IPCC (هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم) هستند، استخراج شد. این داده‌ها به‌عنوان متغیرهای پیش‌بین در مدل SDSM به کار گرفته شدند. گردآوری و واسنجی داده‌های مشاهداتی: همزمان، داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی دوشان‌تپه شامل دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش روزانه برای دوره آماری ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۴ گردآوری شد. این داده‌ها پس از واسنجی در مدل SDSM، مبنای استخراج روابط آماری میان متغیرهای بزرگ‌مقیاس و محلی از طریق رگرسیون چندمتغیره قرار گرفتند. ارزیابی و اعتبارسنجی مدل: عملکرد مدل SDSM با استفاده از شاخص‌های آماری  $R^2$  (ضریب تعیین)، RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا)، MAE (میانگین قدر مطلق خطا) و بایاس (Bias) ارزیابی شد. سپس، دقت مدل با استفاده از داده‌های مستقل دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ اعتبارسنجی شد. شبیه‌سازی سناریوهای اقلیمی: پس از تأیید دقت مدل، سناریوی اقلیمی بدبینانه (SSP5-8.5) و با توجه به واقعیت موجود؛ سناریوی واقع‌بینانه؛ برای دوره زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۵۵ شبیه‌سازی شد تا تغییرات احتمالی اقلیمی در منطقه بررسی شود.

## ۲. مدل‌سازی آسیب‌پذیری با استفاده از منطق فازی

در گام دوم، خروجی‌های مدل SDSM به‌عنوان ورودی مدل فازی استفاده شدند تا عدم قطعیت‌های ذاتی در داده‌های اقلیمی و پاسخ‌های محیطی به شیوه‌ای واقع‌بینانه‌تر مدل‌سازی شوند. انتخاب و فازی‌سازی شاخص‌های مؤثر بر آسیب‌پذیری: پنج شاخص اصلی شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب زمین، فاصله از منابع آبی، تراکم پوشش گیاهی و فاصله از مراکز شهری و صنعتی به‌عنوان عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری انتخاب شدند. هر یک از این شاخص‌ها به‌صورت مستقل فازی‌سازی شدند. ارتفاع از سطح دریا: تأثیر ارتفاع بر خطر سیلاب و خشکسالی در نظر گرفته شد؛ به‌طوری که ارتفاعات پایین‌تر آسیب‌پذیری بیشتری در برابر سیلاب و ارتفاعات بالاتر حساسیت بیشتری نسبت به کم‌آبی نشان دادند. شیب زمین: نقش شیب در فرسایش خاک، رواناب و آب‌گرفتگی فازی‌سازی شد؛ شیب‌های تند مستعد فرسایش و شیب‌های کم مستعد تجمع آب شناخته شدند. فاصله از منابع آبی: برای سنجش میزان دسترسی به آب در شرایط خشکسالی به کار رفت و مناطقی که از منابع آبی فاصله بیشتری داشتند، آسیب‌پذیرتر ارزیابی شدند. تراکم پوشش گیاهی: به‌عنوان عاملی مهم در کنترل فرسایش، حفظ رطوبت خاک و تعدیل دما لحاظ شد؛ نواحی با پوشش گیاهی ضعیف، درجه آسیب‌پذیری بالاتری دریافت کردند. فاصله از مراکز شهری و صنعتی: به‌منظور سنجش فشارهای انسانی و آلودگی‌های زیست‌محیطی، نزدیکی به این مراکز به‌عنوان عامل افزایش آسیب‌پذیری در نظر گرفته شد. تعریف توابع عضویت فازی: برای هر شاخص، توابع عضویت فازی تعریف شد تا میزان تأثیر آن بر آسیب‌پذیری به‌صورت پیوسته محاسبه شود. اجرای منطق فازی: منطق فازی با استفاده از نرم‌افزار R اجرا شد تا عدم قطعیت‌های موجود در داده‌ها و روابط بین شاخص‌ها به‌خوبی لحاظ شود.

## ۳. تحلیل فضایی و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری با استفاده از GIS

در گام نهایی، با تلفیق نتایج مدل اقلیمی و مدل فازی، و با استفاده از قابلیت‌های تحلیل فضایی در محیط GIS، نقشه‌های نهایی آسیب‌پذیری منطقه تهیه شد. سازمان‌دهی داده‌های مکانی: داده‌های مکانی شامل نقشه‌های توپوگرافی، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، منابع آبی، مسیرهای دسترسی و زیرساخت‌های گردشگری در محیط GIS به صورت لایه‌های اطلاعاتی سازمان‌دهی شدند. تلفیق نتایج و اجرای تحلیل فضایی: نتایج شبیه‌سازی مدل اقلیمی (SDSM) و مدل فازی، همراه با لایه‌های مکانی در محیط GIS تلفیق شد. پارامترهای مدل‌های فازی در این مرحله تنظیم و منطق فازی در نرم‌افزار R اجرا شد. تدوین نقشه‌های آسیب‌پذیری: تحلیل فضایی منجر به شناسایی و تهیه نقشه‌های نهایی آسیب‌پذیری پهنه‌های مختلف منطقه در مواجهه با تغییرات اقلیمی شد. این نقشه‌ها، نواحی حساس به افزایش دما، کاهش بارش، خشکسالی و سیلاب را در سه سطح کم، متوسط و زیاد مشخص می‌سازند. مبانی اقدامات مدیریتی: نقشه‌های نهایی آسیب‌پذیری، مبنایی برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی، حفاظتی و برنامه‌ریزی اکوتوریسم پایدار در منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار فراهم می‌آورند. این رویکرد جامع، امکان درک عمیق‌تر و ارزیابی دقیق‌تر آسیب‌پذیری‌های زیست‌محیطی و اکوتوریسم منطقه را در پرتو تغییرات اقلیمی فراهم می‌سازد و راهنمایی عملی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی ارائه می‌دهد.

## تحلیل یافته‌ها

در این پژوهش، به منظور بررسی تغییرات اقلیمی آینده و ارزیابی آسیب‌پذیری اکوتوریسم در منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار، از مدل آماری ریزمقیاس‌نمایی SDSM استفاده شد. این مدل با بهره‌گیری از روابط رگرسیونی بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس جوی استخراج‌شده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) و داده‌های ایستگاهی (دما و بارش)، امکان شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی را در مقیاس محلی فراهم می‌سازد. داده‌های مورد استفاده شامل مقادیر روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش از ایستگاه هواشناسی دوشان‌تپه (واقع در شمال‌شرق تهران) در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ و همچنین داده‌های بزرگ‌مقیاس جوی از پروژه CMIP6 تحت سناریوی بدینانه SSP2-5-8.5 برای دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۵) بوده است. واسنجی مدل در دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۸ و اعتبارسنجی آن در دوره ۲۰۱۸-۲۰۲۴ با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) انجام شد که عملکرد رضایت‌بخشی را برای هر دو متغیر نشان داد (جدول ۱).

جدول ۱: شاخص‌های آماری ارزیابی مدل SDSM برای دما و بارش در دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۲۴)

Table 1: Statistical parameters of the SDSM model for temperature and precipitation in the base period (1995-2024)

| متغیر | BIAS  | MAE  | RMSE | R    |
|-------|-------|------|------|------|
| دما   | ۰/۲۱  | ۱/۴۲ | ۱/۷۵ | ۰/۹۲ |
| بارش  | -۰/۳۵ | ۲/۹۵ | ۳/۸۶ | ۰/۸۱ |

نتایج واسنجی نشان داد که مدل SDSM توانسته است متغیر دما را با دقت بالاتری نسبت به بارش شبیه‌سازی کند. ضریب همبستگی ۰٫۹۲ برای دما بیانگر همبستگی قوی بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده است؛ درحالی‌که برای بارش این ضریب ۰٫۸۱ به‌دست آمد که با توجه به ماهیت ناپیوسته و پراکنده بارش در اقلیم نیمه‌خشک منطقه، عملکردی پذیرفتنی محسوب می‌شود. مقادیر پایین RMSE و MAE برای هر دو متغیر و نیز بایاس نزدیک به صفر برای دما، حاکی از عدم وجود سوگیری سیستماتیک قابل توجه در مدل است. همچنین بررسی تطابق سری‌های زمانی و الگوهای فصلی نشان داد که مدل به‌ویژه در مقیاس ماهانه و فصلی از دقت مناسبی برخوردار است.

### شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۵)

پس از تأیید اعتبار مدل، از آن برای تولید داده‌های اقلیمی آینده تحت سناریوی میانی SSP2-4.5 استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی برای متغیرهای دما و بارش در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. میانگین سالانه دما در این دوره ۱۶٫۹۹ درجه سلسیوس برآورد شده که نسبت به دوره پایه افزایشی حدود ۱٫۸ درجه را نشان می‌دهد. بیشترین میانگین فصلی دما مربوط به تابستان (۲۸٫۹۶ درجه) و کمترین مربوط به زمستان (۴٫۸۴ درجه) است. ضریب خودهمبستگی (ACF) در فصل پاییز (۰٫۷۹۹) و بهار (۰٫۶۱۲) بیشترین مقدار را دارد که بیانگر تداوم زمانی بیشتر گرمایش در این فصول است. الگوی افزایش دما در ماه‌های گرم سال (ژوئن تا آگوست) با بیش از ۲٫۵ درجه افزایش نسبت به دوره پایه، می‌تواند منجر به تشدید تبخیر و تعرق، افزایش نیاز آبی و بروز تنش‌های گرمایی در اکوسیستم منطقه شود.

جدول ۲: خلاصه آماری ماهانه و فصلی دمای شبیه‌سازی‌شده تحت سناریوی SSP5-8.5 (۲۰۲۵-۲۰۵۵)

Table 2: Monthly and seasonal statistics of the simulated temperature under scenario 8.5 ( 2025 - 2055 )

| دوره زمانی | میانگین (°C) | بیشینه (°C) | کمینه (°C) | واریانس | ACF   |
|------------|--------------|-------------|------------|---------|-------|
| زمستان     | ۳/۸۴         | ۱۵/۱۱       | -۷/۶۸      | ۱۱/۱۳   | ۰/۰۶۶ |
| بهار       | ۱۵/۹۳        | ۳۰/۹۹       | -۰/۸۲      | ۳۲/۶۹   | ۰/۶۱۲ |
| تابستان    | ۲۸/۹۶        | ۳۷/۰۲       | ۱۹/۰۵      | ۶/۴۴    | ۰/۲۲۶ |
| پاییز      | ۱۸/۰۲        | ۳۴/۹۴       | -۰/۱۸      | ۴۵/۶۳   | ۰/۷۹۹ |
| سالانه     | ۱۶/۹۹        | ۳۷/۰۲       | -۷/۶۸      | ۹۷/۰۸   | ۰/۹۰۴ |

درخصوص بارش، نتایج نشان می‌دهد که الگوی بارش در آینده همچنان متمرکز بر ماه‌های سرد سال (ژانویه تا مارس) با میانگین بارش روزانه ۱۷۹ تا ۲۰۸ میلی‌متر است؛ درحالی‌که ماه‌های تابستان (ژوئن تا آگوست) با میانگین کمتر از ۰٫۲ میلی‌متر در روز، خشک باقی می‌مانند. مجموع بارش سالانه ۴۰۷٫۳ میلی‌متر برآورد شده که با توجه به واریانس بالای بارش در ماه‌های زمستانی بیش از ۲۶ (mm) و وجود روزهای با بارش شدید (حداکثر ۶۳ میلی‌متر در روز)، احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی در فصول سرد افزایش می‌یابد. تحلیل فصلی نشان می‌دهد که ۷۶ درصد از بارش سالانه در فصل‌های زمستان و بهار رخ می‌دهد و تابستان تنها ۳٫۶ درصد از بارش سالانه را به خود اختصاص می‌دهد. این توزیع نابرابر، همراه با افزایش دمای تابستان، فشار مضاعفی بر منابع آبی منطقه وارد خواهد کرد.

جدول ۳: خلاصه آماری ماهانه و فصلی بارش شبیه‌سازی شده تحت سناریوی SSP5-8.5 (۲۰۲۵-۲۰۵۵)

Table 3: Monthly and seasonal statistics of the simulated precipitation under scenario 8.5 (2025-2055)

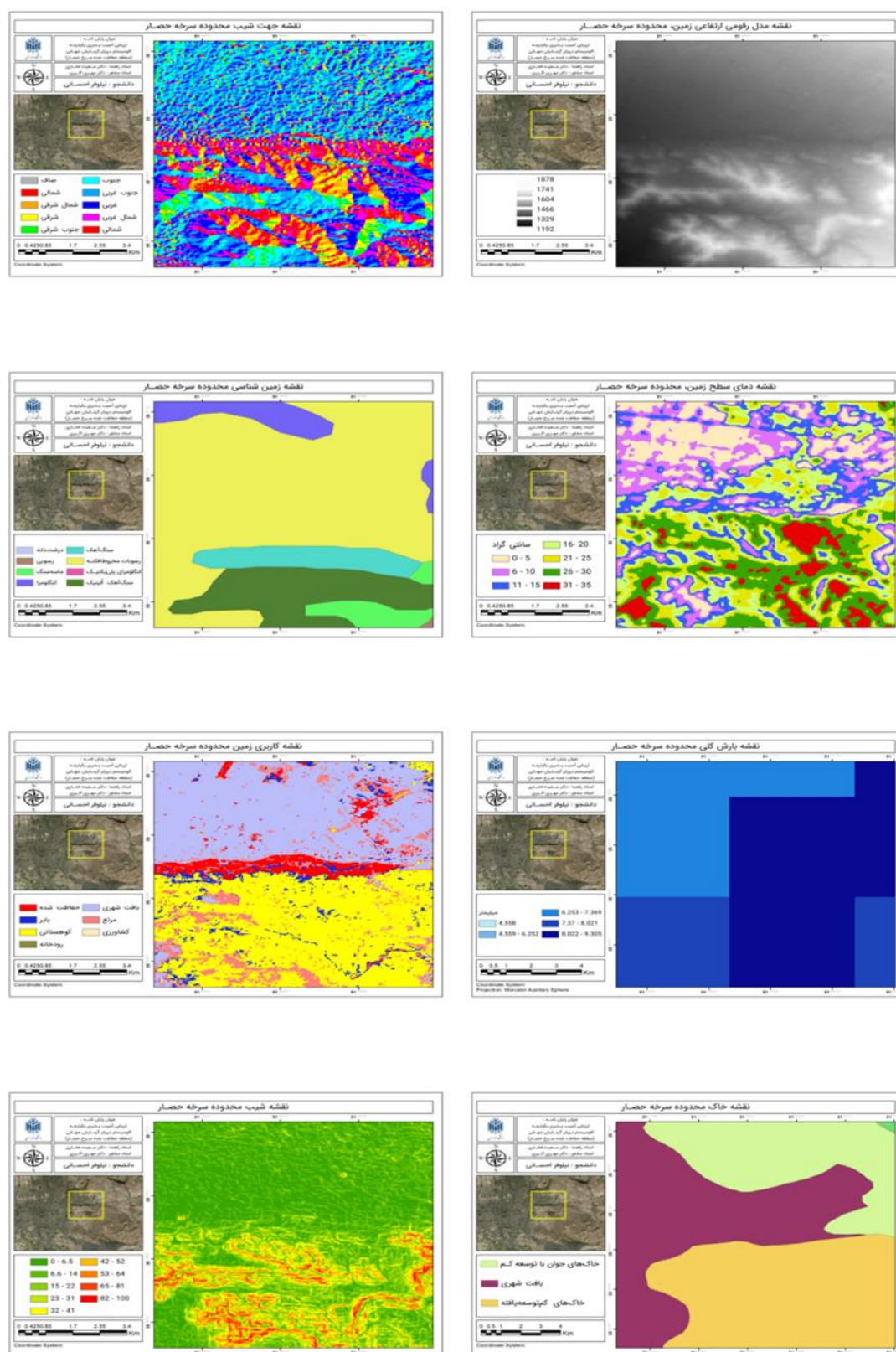
| دوره زمانی | بیشینه (mm) | کمینه (mm) | واریانس (mm <sup>2</sup> ) | مجموع (mm) |
|------------|-------------|------------|----------------------------|------------|
| زمستان     | ۶۳          | ۰          | ۲۷/۳۶                      | ۱۶۷        |
| بهار       | ۵۰          | ۰          | ۲۰/۷۹                      | ۱۴۴/۵      |
| تابستان    | ۳۹          | ۰          | ۱/۷۳                       | ۱۴/۵       |
| پاییز      | ۵۰          | ۰          | ۱۰/۵۳                      | ۷۴/۱       |
| سالانه     | ۶۳          | ۰          | ۱۵/۵۲                      | ۴۰۷/۳      |

### روند تغییرات اقلیمی و آزمون من-کندال

برای بررسی معناداری آماری روندهای مشاهده شده در دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۲۴)، از آزمون ناپارامتریک من-کندال استفاده شد. نتایج نشان داد که روند دما در بیشتر سال‌ها افزایشی بوده است؛ اما تنها در برخی سال‌ها (مانند ۱۹۹۹، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۳) این افزایش از نظر آماری معنادار بوده که با توجه به موقعیت کوهستانی منطقه در شرق تهران، توجیه‌پذیر است ( $P\text{-Value} < 0.05$ ). برای بارش نیز روند کاهشی در بسیاری از سال‌ها مشاهده شد؛ اما معناداری آماری تنها در سال‌های محدودی (مانند ۱۹۹۷، ۲۰۰۰ و ۲۰۱۲) تأیید شد که نتیجه‌ی تحقیقات مشابه در ایران (دیرمجانی و اکبری، ۱۴۰۴) را تأیید می‌کند و ناشی از رژیم بسیار متغیر بارش در ایران است. این یافته‌ها حاکی از آن است که تغییرات دمایی و بارشی در منطقه سرخه‌حصار بیشتر به‌صورت نوسانات کوتاه‌مدت و با شدت متغیر ظاهر شده‌اند و روندهای بلندمدت پایدار هنوز به‌طور قطعی قابل تأیید نیستند؛ با این حال، نزدیک‌شدن مقادیر  $P\text{-Value}$  به سطوح معنادار در سال‌های پایانی دوره (۲۰۱۸-۲۰۲۴) می‌تواند نشانه‌ای از تغییرات ساختاری در اقلیم منطقه باشد که نیازمند پایش مستمر و مدل‌سازی‌های پیشرفته‌تر است.

### تحلیل آسیب‌پذیری با استفاده از منطق فازی

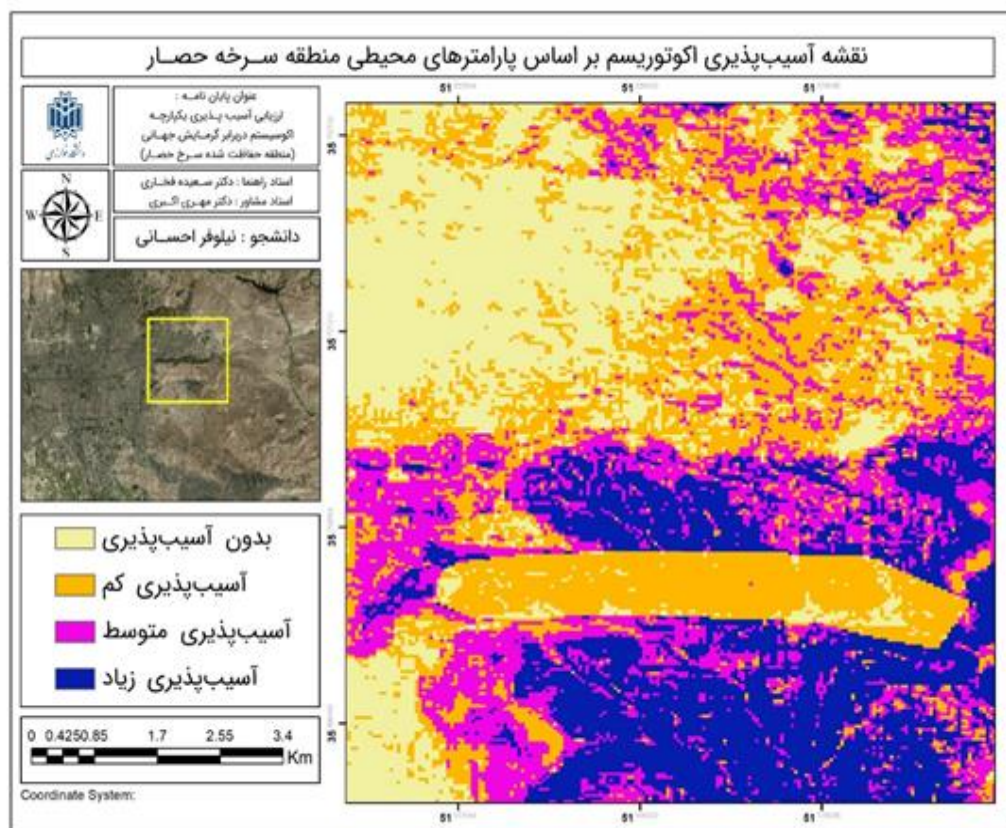
به‌منظور ارزیابی یکپارچه آسیب‌پذیری منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار در برابر تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن بر اکوتوریسم، از مدل منطق فازی استفاده شد. برای این منظور، هشت شاخص کلیدی شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، زمین‌شناسی، کاربری اراضی، بارش، دما و خاک انتخاب شدند. فرایند فازی‌سازی با توجه به ماهیت هر شاخص انجام شد: برای شاخص‌های پیوسته مانند ارتفاع، شیب، دما و بارش از توابع عضویت خطی و سیگموئیدی، برای شاخص جهت شیب از تابع عضویت دایره‌ای و برای شاخص‌های طبقه‌ای مانند زمین‌شناسی، کاربری اراضی و خاک از توابع عضویت گاوسی استفاده شد. این لایه‌ها در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، فازی‌سازی و سپس با عملگر گاما با مقدار ۰.۹ ترکیب شدند تا نقشه نهایی آسیب‌پذیری تولید شد (شکل ۲).



شکل ۲: پارامترهای مورد استفاده برای پیاده‌سازی منطق فازی

Fig. 2: Parameters used to implement fuzzy logic

نتایج حاصل از تحلیل فازی نشان داد که حدود ۲۸ درصد از مساحت منطقه (عمدتاً در بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی که شامل کاربری‌های کشاورزی، بایر و مناطق شهری حاشیه‌ای است) دارای آسیب‌پذیری زیاد تا بسیار زیاد هستند. این مناطق با شیب‌های کم تا متوسط، ارتفاع پایین (زیر ۱۳۰۰ متر)، دمای بالا (بیش از ۳۵ درجه در تابستان) و بارش سالانه کمتر از ۵ میلی‌متر مشخص می‌شوند. واحدهای زمین‌شناسی آواری (کنگلومرا و ماسه‌سنگ) و خاک‌های کم‌توسعه‌یافته (اینسپتی‌سول) در این نواحی، حساسیت بیشتری به فرسایش و خشکسالی نشان می‌دهند. مناطق با آسیب‌پذیری متوسط (حدود ۴۵ درصد از مساحت) بیشتر در بخش‌های مرکزی و شرقی منطقه پراکنده‌اند که عمدتاً شامل مراتع با پوشش گیاهی نسبتاً متراکم، دامنه‌های شمالی با شیب‌های تند و واحدهای کربناته مقاوم‌تر (سنگ‌آهک و دولومیت) هستند. این نواحی اگرچه از نظر دمایی خنک‌تر و از نظر رطوبت خاک در وضعیت بهتری قرار دارند، به دلیل شیب بالا و نفوذپذیری کم در برخی نقاط، در معرض خطر فرسایش و رواناب‌های سطحی ناشی از بارش‌های شدید زمستانه هستند. کمترین میزان آسیب‌پذیری (حدود ۲۷ درصد از مساحت) مربوط به بخش‌های شمالی و شمال‌شرقی منطقه است که شامل ارتفاعات بالای ۱۶۰۰ متر، پوشش گیاهی متراکم، دمای پایین‌تر و خاک‌های با توسعه یافتگی بیشتر می‌شود. این نواحی که عمدتاً در محدوده حفاظت‌شده اصلی قرار دارند، از مقاومت طبیعی بیشتری در برابر تغییرات اقلیمی برخوردارند (شکل ۳).



شکل ۳: نقشه آسیب‌پذیری اکوتوریسم بر اساس پارامترهای محیطی

Fig. 3: Map of vulnerability of ecotourism based on environmental parameters

نقشه نهایی آسیب‌پذیری نشان می‌دهد که مناطق با آسیب‌پذیری بالا بیشتر با عواملی چون نزدیکی به سکونتگاه‌های انسانی، کاربری‌های کشاورزی آبی و دیم، شیب‌های ملایم و ارتفاع پایین همبستگی دارند. در مقابل، مناطق با آسیب‌پذیری کم در ارتفاعات بالا، دامنه‌های شمالی و واحدهای زمین‌شناسی مقاوم‌تر واقع شده‌اند. این یافته‌ها اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی را ممکن می‌سازد؛ به گونه‌ای که در نواحی با آسیب‌پذیری زیاد، تمرکز بر کاهش فشارهای انسانی، احیای پوشش گیاهی، مدیریت رواناب و سازگاری با کم‌آبی ضروری است؛ درحالی‌که در نواحی با آسیب‌پذیری کم، اقدامات حفاظتی با تأکید بر پیشگیری از تخریب و پایش مستمر توصیه می‌شود.

به‌طور کلی، یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار تحت سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 با افزایش قابل توجه دما (حدود ۱۰/۸ درجه سلسیوس در میانگین سالانه) و کاهش بارش مؤثر (حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد) همراه با تشدید نوسانات فصلی مواجه خواهد بود. توزیع نابرابر مکانی آسیب‌پذیری که با استفاده از منطق فازی و هشت شاخص ترکیبی پهنه‌بندی شد، نشان می‌دهد که نواحی شرقی و جنوب‌شرقی منطقه به دلیل تمرکز کاربری‌های حساس کشاورزی و بایر، منابع آبی محدود، ارتفاع پایین و دمای بالاتر، بیشترین اولویت مدیریتی را دارند. در مقابل، بخش‌های شمالی و مرتفع با پوشش گیاهی متراکم و شرایط توپوگرافی مساعد، از تاب‌آوری طبیعی بیشتری برخوردارند. این یافته‌ها ضرورت اتخاذ راهبردهای سازگاری مکان‌محور و اولویت‌بندی‌شده را برای مدیریت پایدار اکوتوریسم در منطقه سرخه‌حصار آشکار می‌سازد.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آسیب‌پذیری اکوتوریسم منطقه حفاظت‌شده سرخه‌حصار در برابر گرمایش جهانی، با استفاده از تلفیق مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM، تحلیل‌های مکانی در محیط GIS و منطق فازی انجام شد. یافته‌ها نشان داد که تحت سناریوی اقلیمی SSP5-8.5 (بدبینانه‌ترین مسیر انتشار) میانگین دمای سالانه منطقه تا افق ۲۰۵۵ نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۲۴) بین ۲۰/۵ تا ۳۰/۷ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. این افزایش در ماه‌های گرم سال (ژوئن تا آگوست) به بیش از ۴/۵ درجه نیز می‌رسد. در مقابل، بارش سالانه حدود ۱۲ درصد کاهش یافته است و توزیع زمانی آن با تمرکز بیشتر در ماه‌های سرد و افزایش شدت نوسانات بین‌سالی همراه خواهد بود. تحلیل آسیب‌پذیری با منطق فازی نشان داد که حدود ۲۸ درصد از مساحت منطقه (عمدتاً نواحی جنوبی و مرکزی) دارای آسیب‌پذیری زیاد تا بسیار زیاد هستند. این نواحی که در مجاورت کلان‌شهر تهران قرار دارند، با ترکیبی از فشارهای اقلیمی و انسانی (جزیره گرمایی شهری، تردد بالا) مواجه‌اند. پیامدهای زنجیره‌ای این تغییرات شامل کاهش ۱۵ درصدی پوشش گیاهی در ارتفاعات، افزایش ۲۵ درصدی فرسایش خاک در مسیرهای پرتردد، خشک‌شدن چشمه‌های فصلی و افزایش ۳۰ درصدی خطر آتش‌سوزی بوده است. این عوامل در کنار کاهش ۲۰ درصدی درآمد جوامع محلی وابسته به اکوتوریسم، یکپارچگی این فعالیت را با تهدید جدی مواجه ساخته است.

نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق مدل‌سازی آماری ریزمقیاس‌نمایی (SDSM) با منطق فازی در بستر GIS است که امکان تحلیل آسیب‌پذیری را با در نظر گرفتن هم‌زمان عدم قطعیت‌های اقلیمی و عوامل مکانی-محیطی فراهم

ساخته است. همچنین، تمرکز بر منطقه‌ای با ویژگی‌های خاص نیمه‌خشک و مجاورت با کلان‌شهر تهران، امکان شناسایی اثرات جزیره گرمایی شهری را به‌عنوان عامل تشدیدکننده آسیب‌پذیری فراهم کرد که در بسیاری از مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از سوی دیگر، استفاده از شاخص‌های ترکیبی شامل متغیرهای توپوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و اقلیم در قالب مدل فازی، منجر به تولید نقشه‌های آسیب‌پذیری با دقت مکانی بالا شد که می‌تواند مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های موضعی قرار گیرد.

### پیشنهادهای مدیریتی و سیاستی

براساس یافته‌ها، راهبردهای زیر برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری اکوتوریسم در منطقه سرخه‌حصار پیشنهاد می‌شود:

- ۱- احداث سازه‌های ذخیره‌سازی آب باران و بهره‌گیری از سیستم‌های بازچرخانی آب در مراکز خدماتی به منظور کاهش وابستگی به منابع آبی فصلی.
- ۲- طراحی مسیرهای سایه‌دار، استفاده از مصالح مقاوم در برابر گرما و فرسایش، و استقرار سامانه‌های هشدار سریع آتش‌سوزی.
- ۳- کاشت گونه‌های مقاوم به خشکی و گرمای بالا در نواحی با آسیب‌پذیری زیاد، همراه با مدیریت چرای دام برای جلوگیری از تخریب بیشتر.
- ۴ - برگزاری دوره‌های آموزشی در زمینه مدیریت پایدار منابع، کاهش زباله و رفتار مسئولانه در طبیعت، و ایجاد مشوق‌های اقتصادی برای تنوع‌بخشی به معیشت.
- ۵- تغییر زمانبندی فعالیت‌های پرتردد به فصول خنک‌تر (اوایل بهار و پاییز) و مدیریت ظرفیت پذیرش در ماه‌های گرم.

### محدودیت‌ها و پژوهش‌های آتی

از جمله محدودیت‌های پژوهش می‌توان به اتکا به داده‌های یک ایستگاه هواشناسی (دوشان‌تپه) و تمرکز بر افق زمانی تا ۲۰۵۵ اشاره کرد. برای پژوهش‌های آتی، استفاده از مجموعه‌ای از مدل‌های اقلیمی به منظور کاهش عدم قطعیت، بررسی اثرات ترکیبی تغییرات اقلیمی و رشد شهری با رویکرد پویایی سیستم، و ارزیابی اقتصادی هزینه‌های انطباق در مقایسه با هزینه‌های ناشی از عدم اقدام توصیه می‌شود. همچنین مطالعات کیفی با هدف درک عمیق‌تر از رفتار گردشگران و جوامع محلی می‌تواند به تکمیل یافته‌های حاضر کمک کند.

### منابع

- اکبری، مهری، و فخاری، سعیده (۱۴۰۴). تحلیل امواج گرمایی و اثرات آن بر جاذبه‌های اکوتوریسمی در استان خوزستان. *فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی گردشگری*، ۱(۱)، ۱-۱۸. <http://gtp.khu.ac.ir/article-1-21-en.html>
- دیرمجائی، آیدا، و اکبری، مهری (۱۴۰۴). مروری بر مطالعات شبیه‌سازی تغییر آب‌وهوا در ایران. *پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی*، ۶(۲۱)، ۴۸-۲۳. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.461465.1225>

## References

- Abunyewah, M., Gajendran, T., Erdiaw-Kwasie, M. O., Baah, C., Okyere, S. A., & Kankanamge, A. K. S. U. (2025). The multidimensional impacts of heatwaves on human ecosystems: A systematic literature review and future research direction. *Environmental Science & Policy*, 165, 104024. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2025.104024>
- Akbary, M., & Fakhari, S. (2025). Analysis of heat waves and their effects on ecotourism attractions in Khuzestan province. *Geography and Tourism Planning Quarterly*, 1(1), 1–18. <http://gtp.khu.ac.ir/article-1-21-en.html> [In Pershin]
- Armaş, I., & Albulescu, A. C. (2025). From static to dynamic: Conceptual and operational developments of vulnerability. *iScience*, 28(3), 112070. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.112070>
- Becken, S., & Wilson, J. (2013). The impacts of weather on tourist travel. *Tourism Geographies*, 15(4), 620–639. <https://doi.org/10.1080/14616688.2012.762541>
- Deason, G., Seekamp, E., Terando, A., & Rojas, C. (2023). Tourist perceptions of climate change impacts on mountain ecotourism in southern Mexico. *Tourism and Hospitality*, 4(3), 451–466. <https://doi.org/10.3390/tourhosp4030028>
- De Urioste-Stone, S. M., Le, L., Scaccia, M. D., & Wilkins, E. (2016). Nature-based tourism and climate change risk: Visitors' perceptions in mount desert island, Maine. *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 13, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.jort.2016.01.003>
- Deyrmajaei, A., & Akbary, M. (2025). Review of climate change simulation studies in Iran. *Climate Change Research*, 6(21), 23–48. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.461465.1225> [In Pershin]
- Dogru, T., Marchio, E. A., Bulut, U., & Suess, C. (2019). Climate change: vulnerability and resilience of tourism and the entire economy. *Tourism Management*, 72, 292–305. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.12.010>
- Dube, K. (2023). Tourism and climate change vulnerabilities: a focus on African destinations. In *Handbook on tourism and climate change* (pp. 86–100). Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781839106071.00013>
- Esteves, T., Ravindranath, D., Beddamatta, S., Raju, K. V., Sharma, J., Bala, G., & Murthy, I. K. (2016). Multi-scale vulnerability assessment for adaptation planning. *Current Science*, 110(7), 1225–1239. <http://oar.icrisat.org/id/eprint/9428>
- Fennell, D. A. (2020). *Ecotourism* (6<sup>th</sup> ed.). Routledge.
- Gasalla-López, B., Arcila-Garrido, M., & Chica-Ruiz, J. A. (2025). Assessment of climate vulnerability indices for coastal tourism destinations. *Atmosphere*, 16(10), 1171. <https://doi.org/10.3390/atmos16101171>
- Grizane, T. (2025). Sustainable tourism and climate change: A bibliometric analysis of environmental impacts (2014–2024). In *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference* (Vol. 1, pp. 213–220). <https://doi.org/10.17770/etr2025vol1.8699>
- Handmer, J. W., Dovers, S., & Downing, T. E. (1999). Societal vulnerability to climate change and variability. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4(3), 267–281. <https://doi.org/10.1023/A:1009611621048>
- Herrera, J., Muskin, P. R., & Stewart, C. (2023). The CAPE (Compassion, Assertive Action, Pragmatism, and Evidence) vulnerability index – Second Edition: Putting mental health into foreign policy to address globalization, conflict, climate change, and natural disasters. *Industrial Psychiatry Journal*, 32(1), S15–S31. [https://doi.org/10.4103/ipj.ipj\\_202\\_23](https://doi.org/10.4103/ipj.ipj_202_23)
- Higuera Roa, O., Bachmann, M., Mechler, R., Šakić Trogrlić, R., Reimann, L., Mazzoleni, M., ..., & Mysiak, J. (2025). Challenges and opportunities in climate risk assessment: Future directions for assessing complex climate risks. *Environmental Research Letters*, 20(5), 053003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/adc756>
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., ... & Okem, A. (2022). Summary for policymakers. *IPCC 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and*

- Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 3-33) Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
- Jamaliah, M. M., & Powell, R. B. (2018). Ecotourism resilience to climate change in Dana Biosphere Reserve, Jordan. *Journal of Sustainable Tourism*, 26(4), 519–536.  
<https://doi.org/10.1080/09669582.2017.1360893>
- Kaján, E., & Saarinen, J. (2013). Tourism, climate change and adaptation: A review. *Current Issues in Tourism*, 16(2), 167–195. <https://doi.org/10.1080/13683500.2013.774323>
- Malone, E. L., & Engle, N. L. (2011). Evaluating regional vulnerability to climate change: purposes and methods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(3), 462–474.  
<https://doi.org/10.1002/wcc.116>
- Mitrică, B., Șerban, P.-R., Roznoviețchi, I., Micu, D., Persu, M. R., Grigorescu, I., ..., & Damian, N. (2025). The tourism sector's vulnerability to climate change-related phenomena: Case study Romania. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 118, 105248.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105248>
- Mora, C., Spirandelli, D., Franklin, E. C., Lynham, J., Kantar, M. B., Miles, W., ..., & Hunter, C. L. (2018). Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change*, 8(12), 1062–1071. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0315-6>
- Mun, Y.-S., Nam, W.-H., Jeon, M.-G., Bang, N.-K., & Kim, T. (2020). Assessment of vulnerability to drought disaster in agricultural reservoirs in South Korea. *Atmosphere*, 11(11), 1244.  
<https://doi.org/10.3390/atmos11111244>
- Perch-Nielsen, S. (2010). The vulnerability of beach tourism to climate change—an index approach. *Climatic Change*, 100(3), 579–606. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9692-1>
- Qian, D., Du, Y., Li, Q., Guo, X., Fan, B., & Cao, G. (2022). Impacts of alpine shrub-meadow degradation on its ecosystem services and spatial patterns in Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 135, 1–10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X22000127>
- Reimann, L., Koks, E., de Moel, H., Ton, M. J., & Aerts, J. C. J. H. (2024). An empirical social vulnerability map for flood risk assessment at global scale (“GlobE-SoVT”). *Earth's Future*, 12(3), e2023EF003895. <https://doi.org/10.1029/2023EF003895>
- Rodriguez-Rull, J., Expósito González, F. J., Diaz, J. P., Carrillo, J., Pérez Darias, J. C., & Henriques, D. (2026). High-resolution regional climate projections and tourism impacts in the Macaronesian archipelagos. *Scientific Reports*, 16, 8696. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-43092-9>
- Saarinen, J., & Tervo, K. (2006). Perceptions and adaptation strategies of the tourism industry to climate change: The case of Finnish nature-based tourism entrepreneurs. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, 1(3), 214–228.  
<https://doi.org/10.1504/IJISD.2006.012423>
- Scott, D., & Gössling, S. (2022). A review of research into tourism and climate change – Launching the Annals of Tourism Research curated collection on tourism and climate change. *Annals of Tourism Research*, 95, 103409. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2022.103409>
- Scott, D., Hall, C. M., & Gössling, S. (2012). *Tourism and climate change: Impacts, adaptation and mitigation*. Routledge.
- Scott, D., Hall, C. M., & Gössling, S. (2019). Global tourism vulnerability to climate change. *Annals of Tourism Research*, 77, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2019.05.007>
- Scott, D., Steiger, R., Rutt, M., Pons, M., & Johnson, P. (2020). Climate change and ski tourism sustainability: an integrated model of the adaptive dynamics between ski area operations and skier demand. *Sustainability*, 12(2), 10617. <https://doi.org/10.3390/su122410617>
- Sibitane, Z. E., Dube, K., & Lekaota, L. (2022). Global warming and its implications on nature tourism at Phinda Private Game Reserve, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5487. <https://doi.org/10.3390/ijerph19095487>

- Turner, B. L., II Kaspersen, 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, 8074–8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- UNDRO. (1991). *Mt. Pinatubo volcanic eruption, Philippines: Report of UNDRO relief assistance mission*. 20 June-1 July 1991 (UNDRO/91/22). United Nations. <https://digitallibrary.un.org/record/229694>
- UNWTO. (2023). *Global guidelines for the promotion of sustainable rural tourism*. World Tourism Organization.
- Weaver, D. (2011). Can sustainable tourism survive climate change?. *Journal of Sustainable Tourism*, 19(1), 5–15. <https://doi.org/10.1080/09669582.2010.536242>
- Willibald, F., Kotlarski, S., Ebner, P. P., Bavay, M., Marty, C., Trentini, F., ..., & Grêt-Regamey, A. (2021). Vulnerability of ski tourism towards internal climate variability and climate change in the Swiss Alps. *Science of the Total Environment*, 784, 147054. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147054>