



Spatial analysis of habitat quality under the influence of anthropogenic features

Sayedeh Alemohammad^{1✉} | Ardavan Zarandian² | Jalil Badamfirooz³

1. Corresponding Author, Department of Innovation and Sustainability, Faculty of Governance, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: sh.alemohammad@ut.ac.ir

2. Department of Environmental Assessment and Risks, Research Center of Environment and Sustainable Development, Tehran, Iran. E-mail: zarandian@rcesd.ac.ir

3. Department of Environmental Assessment and Risks, Research Center of Environment and Sustainable Development, Tehran, Iran. E-mail: badam@rcesd.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 02 January 2026

Received in revised form 21

February 2026

Accepted 11 March 2026

Keywords:

Conservation prioritization,

InVEST,

Policy recommendations,

Protected Areas,

Zanjan Province.

ABSTRACT

Protected areas are increasingly subjected to anthropogenic threats. Zanjan Province is a clear example of this conflict. This study aimed to spatially and quantitatively assess the simultaneous impact of anthropogenic threats on habitat quality across the province and to establish a conservation prioritization framework. The methodology was based on the Relative Habitat Quality model in InVEST software, calculating the cumulative effect of threats (including urban settlements, industrial land use, railways, main roads, secondary roads, rural roads, and agricultural lands) by considering distance, weight of each threat, inherent sensitivity of land cover types, and the moderating role of protected areas. Outputs included continuous maps of cumulative degradation and relative habitat quality. Average habitat quality in the province is 0.42, and average degradation degree is 0.18, exhibiting a clear inverse spatial relationship. High-quality cores were predominantly concentrated in dense northeastern forests and dense northwestern rangelands, while high-degradation hotspots coincided with urban and industrial areas and the intersections of major communication routes. A quantitative assessment of the four protected areas formed the basis for developing an innovative four-tiered framework for prioritizing management actions. Identifying areas of exceptional habitat quality outside existing protected areas revealed a clear gap. Zanjan's protected areas, despite their considerable coverage, are vulnerable to external pressures. These results do not negate the current values of these protected areas, but rather provide policy recommendations for optimal allocation of resources and conservation actions, while highlighting the need for further complementary studies.

Cite this article: Alemohammad, S., Zarandian, A., & Badamfirooz, J. (2026). Spatial analysis of habitat quality under the influence of anthropogenic features. *Journal of Natural Environment*, 79 (2), 355-372. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.411946.2897>



Introduction

Protected areas worldwide are increasingly subjected to anthropogenic pressures despite their critical role in biodiversity conservation. Zanjan Province in northwestern Iran exemplifies this conflict, hosting 64% of mammals and 71% of birds of the region, while 23% of its territory is designated as protected areas as illustrated in Figure 1. However, field evidence indicates these areas face growing pressure from human activities including infrastructure development, agricultural expansion, and urbanization. Simply establishing protected areas without precise assessment of habitat quality and vulnerability to external threats cannot guarantee biodiversity persistence. Therefore, identifying gaps in the existing protected area network and prioritizing areas based on ecological status and threat level has become an undeniable necessity. This study aims to spatially and quantitatively assess the simultaneous impact of seven anthropogenic threats on habitat quality across Zanjan Province and establish a conservation prioritization framework. The innovation manifests in four aspects: simultaneous quantification of cumulative threat effects; providing a four-tier management prioritization framework based on "ecological status versus threat level"; gap analysis between existing protected areas and exceptional habitat quality hotspots; and extracting concrete policy recommendations for revising land allocation to conservation use.

Material and Methods

Zanjan Province, with an area of approximately 21,773 km², is located in northwestern Iran with predominantly mountainous topography and diverse ecosystems including forests, rangelands, steppes, and wetlands. The methodology was based on the Relative Habitat Quality model within InVEST software version 3.12. The core logic calculates the cumulative effect of seven threats—urban settlements, industrial land use, railways, main roads, secondary roads, rural roads, and agricultural lands—by considering distance, weight of each threat, inherent sensitivity of land cover types, and the moderating role of protected areas. A land cover/land use raster map with 30-meter resolution for 2022 was prepared from Landsat 9 images using supervised classification with overall accuracy of 92% and Cohen's Kappa coefficient of 0.89. Sensitivity scoring and threat parameters presented in Tables 1 and 2 were determined through previous studies, ecological characteristics of the region, and expert consensus using the Delphi method. Binary raster layers were prepared for all threats, and an accessibility coefficient was assigned based on protection status. The model generates cumulative degradation and relative habitat quality maps with values ranging from 0 to 1, with the spatial distribution of land cover and threat layers illustrated in Figure 2. Management prioritization involved comparative analysis of four protected areas using descriptive statistics, followed by spatial gap analysis identifying superior habitat quality areas (top 20%) compared with existing protected area boundaries as shown in Figure 4.

Results

The spatial distribution of cumulative degradation ranged from 0 to 0.63, while relative habitat quality ranged from 0 to 1. The average habitat quality was 0.42, and average degradation was 0.18, demonstrating a clear inverse spatial relationship as shown in Figure 3. High-quality cores concentrated in dense northeastern forests and dense northwestern rangelands, while high-degradation hotspots coincided with urban and industrial areas and major communication route intersections. Comparative analysis of the four protected areas revealed: Anguran Wildlife Refuge showed critical conditions with mean quality of 0.499 but highest degradation of 0.160, requiring immediate crisis management; Anguran Protected Area exhibited the highest quality of 0.526 with degradation of 0.118, needing buffer zone establishment; Fil-e-Khaseh Protected Area had the lowest quality of 0.367 but lowest degradation of 0.076, suggesting restoration potential; and Sorkhabad Protected Area demonstrated the most effective management with degradation of 0.097 and quality of 0.451. Spatial gap analysis revealed that only 25% of superior habitat quality areas fell within existing protected area boundaries, while 75% remained outside formal protection as illustrated in Figure 4.

Discussion

The findings support two key propositions. First, the legal extent of protected areas is not sufficient to guarantee habitat quality protection. The average quality of 0.42 and degradation of 0.18 demonstrate that even protected areas remain vulnerable to external pressures. The spatial pattern reflects the cumulative effect of seven anthropogenic threats. Second, protecting only remote areas without managing conflicts in tension hotspots is insufficient and may transfer pressure to other valuable habitats. Anguran Wildlife Refuge requires immediate crisis management due to high ecological value combined with significant degradation, while Sorkhabad Protected Area exemplifies relative conservation effectiveness. The gap analysis revealing only 25% of superior habitats within protected boundaries underscores the urgent need for establishing new protected areas. Three policy recommendations emerge: re-engineering the conservation framework to prioritize areas based on the combination of inherent habitat quality and threat level, moving beyond the current extent-based approach; developing the protected area network based on ecological values rather than administrative constraints, with immediate feasibility studies for exceptional habitat quality areas outside existing boundaries; and enhancing resilience through integrating a conflict assessment layer into development planning to guide development toward low-conflict zones. These results do not negate current values of existing protected areas but provide policy recommendations for optimal resource allocation while highlighting the need for further feasibility studies incorporating socio-economic considerations.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

CRediT authorship contribution statement

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous reviewers for their valuable suggestions in manuscript revision.

تحلیل فضایی از کیفیت زیستگاه‌های تحت تأثیر عوارض انسان ساخت

سیده آل محمد^۱ | اردوان زرنیدیان^۲ | جلیل بادام فیروز^۳۱. نویسنده مسئول، گروه نوآوری و پایداری، دانشکده حکمرانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: sh.alemohammad@ut.ac.ir۲. گروه ارزیابی و مخاطرات محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، تهران، ایران. رایانامه: zarandian@rcesd.ac.ir۳. گروه اقتصاد محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، تهران، ایران. رایانامه: badam@rcesd.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱۳	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۰	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۳۰	
کلیدواژه‌ها:	
استان زنجان،	مناطق تحت حفاظت به شدت در معرض تهدیدهای انسان ساخت هستند. استان زنجان نمونه‌ای بارز از این تقابل است. این پژوهش با هدف ارزیابی فضایی-کمی تأثیر همزمان تهدیدهای انسان ساخت بر کیفیت زیستگاه‌های این استان و اولویت بندی حفاظتی، انجام شد. روش شناسی این مطالعه مبتنی بر مدل کیفیت نسبی زیستگاه در نرم افزار InVEST بود. منطق این مدل بر پایه محاسبه اثر تجمعی تهدیدها (شامل سکونتگاه‌های شهری، کاربری صنعتی، راه آهن، جاده‌های اصلی، فرعی، روستایی و اراضی کشاورزی) با در نظر گرفتن فاصله، وزن هر تهدید، حساسیت ذاتی انواع پوشش/کاربری زمین و نقش تعدیل کننده مناطق تحت حفاظت استوار است. خروجی‌ها شامل نقشه‌های پیوسته تخریب تجمعی و کیفیت نسبی زیستگاه بودند. میانگین کیفیت زیستگاه در سطح استان ۰/۴۲ و میانگین درجه تخریب ۰/۱۸ است. پراکنش مکانی این دو شاخص رابطه معکوس آشکاری داشته است. هسته‌های با کیفیت بالا عمدتاً در جنگل‌های انبوه شمال شرق و مراتع متراکم شمال غرب متمرکز بوده‌اند، در حالی که کانون‌های با شدت تخریب بالا، منطبق بر مناطق شهری، صنعتی و تقاطع شریان‌های ارتباطی اصلی بوده‌اند. ارزیابی کمی چهار منطقه تحت حفاظت استان، مبنای تدوین یک چارچوب چهار سطحی نوآورانه برای اولویت بندی اقدامات مدیریتی قرار گرفت. شناسایی عرصه‌هایی با کیفیت زیستگاهی استثنایی در خارج مناطق حفاظتی موجود، شکاف آشکاری را نشان داد. مناطق تحت حفاظت استان زنجان علی‌رغم سطح قابل توجه، در برابر فشارهای بیرونی آسیب پذیر هستند. این نتایج، به معنای نفی ارزش‌های کنونی این مناطق حفاظت شده نیست، بلکه برای تخصیص بهینه منابع و اقدامات حفاظتی، پیشنهادهای سیاستی در اختیار مدیران می‌گذارد و ضرورت مطالعات تکمیلی را نشان می‌دهد.

استناد: آل محمد، سیده؛ زرنیدیان، اردوان؛ و بادام فیروز، جلیل (۱۴۰۵). تحلیل فضایی از کیفیت زیستگاه‌های تحت تأثیر عوارض انسان ساخت. محیط زیست طبیعی، ۷۹ (۲)، ۳۵۵-۳۷۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.411946.2897>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

تنوع زیستی به‌عنوان زیربنای حیات بر روی کره زمین، نقشی بی‌بدیل در تأمین خدمات اکوسیستمی، پایداری محیط‌زیست و رفاه انسانی ایفا می‌کند. با این حال، شواهد فزاینده از کاهش نگران‌کننده تنوع زیستی در جهان، نه تنها موجودیت گونه‌ها و زیستگاه‌ها را در معرض خطر قرار داده، بلکه به دلیل پیوند ناگسستنی تنوع زیستی با خدمات اکوسیستمی، بنیان رفاه و امنیت انسانی را نیز متزلزل ساخته است (Almond *et al.*, 2022; Díaz *et al.*, 2019). در مواجهه با این چالش جهانی، اگرچه درک الگوهای فضایی توزیع و غنای اجزای تنوع زیستی (اعم از گونه، جامعه و زیستگاه)، به‌عنوان زیربنایی علمی برای هر اقدام حفاظت و یا توسعه، امری ضروری تلقی می‌شود (Kukkala and Moilanen, 2020)، اما برای مدیران و تصمیم‌گیران، شناخت پراکنش زیستگاه‌ها کافی نیست، زیرا ارزیابی درجه اثرات فعالیت‌های انسانی و شیوه‌های مدیریت زمین بر پایداری زیستگاه‌ها، شرط لازم برای تدوین راهبردهای حفاظتی به‌منظور حداکثرسازی حفظ تنوع زیستی در سرزمین است. مسئله اصلی آن است که علی‌رغم گسترش روزافزون مناطق تحت حفاظت در سطح جهانی و ملی، این مناطق به‌طور فزاینده‌ای تحت فشار فعالیت‌های انسان‌ساخت قرار گرفته‌اند و کارایی آنها با تردیدهای جدی مواجه شده است. به عبارت روشن‌تر، صرفاً ایجاد مناطق حفاظت‌شده بدون ارزیابی دقیق از کیفیت زیستگاه‌ها و میزان تأثیرپذیری آنها از تهدیدهای بیرونی، نمی‌تواند تضمین‌کننده بقای تنوع زیستی باشد. از این‌رو، شناخت شکاف‌های موجود در شبکه حفاظتی و اولویت‌بندی مناطق براساس وضعیت اکولوژیک و سطح تهدید، به یک ضرورت انکارناپذیر در مدیریت سرزمین تبدیل شده است. مناطق تحت حفاظت با تعارضات فراسازمانی بر اثر توسعه زیرساخت‌ها (فرودگاه، گسترش شبکه راه‌ها، بهره‌برداری معدنی، چرای بی‌رویه و آلودگی صنعتی) مواجه هستند (Ibisch *et al.*, 2022; Rahimi and Dong, 2020). اکوسیستم‌های تحت محاصره این تهدیدها، به تدریج، تاب‌آوری ذاتی مدیریتی خود را از دست می‌دهند. در نتیجه کارایی فضایی شبکه حفاظتی موجود، با تردید مواجه می‌شود (Jones *et al.*, 2018; Allan *et al.*, 2022). بنابراین، پرسش اساسی این است که چگونه می‌توان شبکه موجود مناطق تحت حفاظت را از نظر کیفیت زیستگاه و میزان تهدیدپذیری ارزیابی کرد و اولویت‌های مدیریتی را بر مبنای شواهد کمی و مکانی تعیین نمود؟ در این راستا، علاقه فزاینده سازمان‌های حفاظت محیط‌زیست به درک نحوه پیوند فضایی تنوع زیستی با خدمات اکوسیستمی و چگونگی تأثیرگذاری اقدامات مدیریتی بر هر دو (Kareiva *et al.*, 2007; Chaplin-Kramer *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2021)، یک پرسش کلیدی را پررنگ‌تر می‌سازد: چگونه می‌توان در عین پاسخگویی به نیازهای توسعه‌ای، کیفیت نسبی زیستگاه‌های با ارزش را حفظ کرد؟ پاسخ به این پرسش مستلزم به‌کارگیری ابزارهایی است که توانایی شناسایی همپوشانی‌ها و تعارضات فضایی بین اهداف حفاظت و توسعه را داشته و نواحی زیستگاهی مناسب برای اجرای کاربری حفاظت را آشکار سازند.

کیفیت نسبی زیستگاه به توان محیط‌زیست در فراهم‌آوری شرایط مناسب برای ماندگاری افراد و جمعیت‌ها اشاره دارد که بر مبنای دسترسی به منابع برای بقا، زادآوری و ماندگاری جمعیت تعیین می‌گردد. یک زیستگاه با کیفیت نسبی بالا، نسبتاً دست‌نخورده بوده است و ساختار و کارکردی در محدوده تغییرپذیری تاریخی خود دارد (Terrado *et al.*, 2020; Sharp *et al.*, 2020). کیفیت نسبی زیستگاه به‌شدت تحت تأثیر هم‌جواری با عوامل محیطی انسان‌ساخت و شدت چنین کاربری‌هایی است. به‌طور کلی، با افزایش شدت کاربری‌های انسانی موجود در پیرامون، کیفیت نسبی زیستگاه کاهش می‌یابد (Haddad *et al.*, 2021; Gong *et al.*, 2023). برخی مطالعات مهم بین‌المللی، به مدل‌سازی کیفیت نسبی زیستگاه در پشتیبانی تنوع زیستی به‌عنوان یک خدمت اکوسیستمی در نرم‌افزار InVEST پرداخته‌اند. این مدل برای به‌حداکثر رساندن گونه‌های تحت پوشش شبکه مناطق تحت حفاظت، با تلفیق داده‌های پوشش/کاربری زمین و لایه‌های تهدید، می‌تواند نقشه‌ای از کیفیت نسبی زیستگاه تولید کند و امکان پایش تغییرات در طول زمان را فراهم سازد. این مدل قدرتمند، حساسیت زیستگاه‌ها را در برابر تهدیدها (توسعه شهری، جاده‌سازی یا کشاورزی) مشخص ساخته و اثر تخریبی هر تهدید را با توجه به فاصله از منبع تهدید و شدت آن، کمی می‌کند. پس نه تنها کیفیت زیستگاه‌ها، بلکه نقاط بحرانی تعامل انسان با طبیعت را نشان می‌دهد. در ادامه به معرفی پیشینه پژوهش پرداخته شده است:

Gharagozlou و همکاران (۲۰۲۵) کیفیت زیستگاه را در رابطه با توسعه شهر قمصر با مدل InVEST سنجیده‌اند. Morovati و Abdollahi (۲۰۲۵) با بهره‌گیری از مدل ارزیابی ریسک InVEST، جاده‌ها را مهم‌ترین تهدید زیستگاه پلنگ

ایرانی در پارک ملی گلستان معرفی کردند. Naseri و همکاران (۲۰۲۵) با مدل CA-Markov، پیش‌بینی کردند که تخریب شدید زیستگاه‌های کرج تا سال ۲۰۳۲، دو برابر خواهد شد. Dashtbozorgi و همکاران (۲۰۲۳) با ارزش‌گذاری خدمات اکوسیستمی جنگل‌های حرا نشان دادند که با وجود افزایش سطح زیستگاه، کیفیت نسبی آن کاهش یافته است. Wang و همکاران (۲۰۲۳) با شبیه‌سازی تغییر کاربری با مدل PLUS در کلانشهر شنژن چین نشان دادند که تنها سناریوی کنترل سخت‌گیرانه قادر به بهبود کیفیت زیستگاه است. Ahmadi-Mirghaed و Rahmani (۲۰۲۱) با تحلیل نقاط داغ زیستگاهی در مازندران دریافتند زیستگاه‌های جنگلی مرکزی باکیفیت‌ترین و مناطق دشت‌ساحلی کم‌کیفیت‌ترین هستند. Sharp و همکاران (۲۰۲۰) با تدوین راهنمای InVEST، مدل کیفیت زیستگاه را ابزاری قدرتمند برای ارزیابی تهدیدهای انسانی بر سلامت زیستگاه‌ها در مقیاس‌های مختلف معرفی کردند. Berta Aneseyee و همکاران (۲۰۲۰) با تحلیل همبستگی و مدل InVEST در حوضه آبریز آتیوبی، گسترش کشاورزی و فشار جمعیت را علل اصلی کاهش زیستگاه‌های با کیفیت دانستند. همچنین در مطالعات مختلفی، Alemohammad و همکاران (۲۰۲۴، ۲۰۲۳، ۲۰۲۰)، تأکید کرده‌اند که وسعت مناطق حفاظت‌شده الزاماً نشانگر کارایی و کیفیت آنها نیست. هیچ‌یک از مطالعات نتوانسته‌اند به‌طور همزمان تهدیدهای انسان‌ساخت را کمی کرده و کیفیت مناطق حفاظت‌شده را در برابر آن مقایسه کنند، در حالی که چنین رویکردی می‌تواند نقاط قوت و ضعف شبکه حفاظتی را آشکار سازد. در مجموع، بیشتر به ارزیابی‌های موضعی گونه‌ها یا مناطق خاص محدود پرداخته شده و دیدی جامع در مقیاس استانی با تحلیل انتقادی سیاست‌های حفاظتی ارائه نشده است.

استان زنجان، به‌عنوان نمونه‌ای شاخص، پذیرای ۶۴ درصد از پستانداران و ۷۱ درصد از پرندگان منطقه شمال غرب ایران است (Safarilamouti and Karamidehkordi, 2022; Moghanloo et al., 2023). برای صیانت از این گنجینه، ۲۳ درصد مساحت استان، به حفاظت اختصاص یافته است که برای ارزیابی کیفیت زیستگاه، بی‌بديل است. مطابق شواهد میدانی، شبکه مناطق تحت حفاظت در این استان، با فشار فزاینده فعالیت‌های انسانی، مواجه است (Nejat and Dabiri, 2012; Safarilamouti et al., 2022; Karimi et al., 2023; Shahidinejad et al., 2024). هم‌اکنون، ارزیابی کمی کارایی شبکه موجود مناطق تحت حفاظت در برابر تهدیدهای انسان‌ساخت و اصلاح تخصیص فضا به کاربری حفاظت، به نیازی مبرم در عرصه مدیریت این استان تبدیل شده است. بر این اساس، پژوهش حاضر، در پی تحقق سه هدف اصلی است: ۱) تحلیل فضایی تهدیدهای انسانی برای زیستگاه‌های با ارزش استان زنجان، ۲) ارزیابی میزان کیفیت نسبی زیستگاه‌های موجود براساس تهدیدها و ۳) ارائه پیشنهاد‌های سیاستی بازنگری تخصیص زمین به کاربری حفاظت به‌گونه‌ای که به تقویت مدیریت مناطق تحت مدیریت بینجامد.

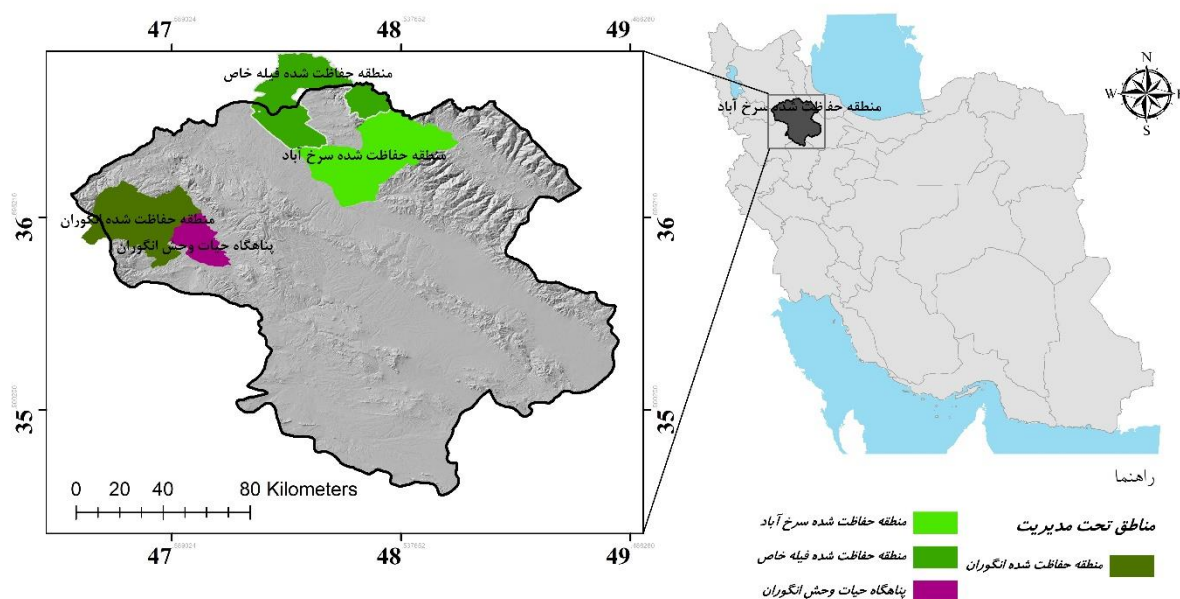
نوآوری اصلی پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات پیشین که عمدتاً به ارزیابی وضعیت موجود یک منطقه یا گونه خاص پرداخته‌اند، در چهار جنبه متجلی است: نخست، کمی‌سازی همزمان اثر تجمعی هفت تهدید انسان‌ساخت (شامل سکونتگاه‌های شهری، کاربری صنعتی، راه‌آهن، جاده‌های اصلی، فرعی، روستایی و اراضی کشاورزی) بر کیفیت زیستگاه؛ دوم، ارائه چارچوب چهارسطحی اولویت‌بندی مدیریتی مبتنی بر منطق «وضعیت اکولوژیک در مقابل سطح تهدید» برای مناطق تحت حفاظت؛ سوم، تحلیل شکاف بین شبکه حفاظتی موجود و قانون‌های با کیفیت زیستگاهی استثنایی در خارج از مرزها و چهارم، استخراج پیشنهاد‌های سیاستی عینی برای بازنگری در تخصیص زمین به کاربری حفاظت. روش و نتایج این مطالعه، گامی به‌سوی تقویت نگرش‌های خردمندانه برای ارتقای پایداری اکولوژیک سیمای سرزمین است که می‌تواند در قانون تصمیم‌گیری‌های توسعه‌ای و در خدمت مطالعات پایه آمایش سرزمین قرار گیرد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه: استان زنجان با مساحتی حدود ۲۱۷۷۳ کیلومتر مربع، در محدوده جغرافیایی ۴۵° ۴۷' تا ۴۹° ۲۸' طول شرقی و ۳۷° ۳۷' تا ۳۷° ۱۵' عرض شمالی در شمال غرب ایران واقع شده است (Farid Giglou et al., 2022). این استان از شمال به استان‌های اردبیل و گیلان، از شرق به قزوین، از جنوب به همدان و از غرب به آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی

محدود می‌شود. چهره توپوگرافیک استان عمدتاً کوهستانی و نیمه‌کوهستانی است که بخش عمده‌ای از آن را ارتفاعات رشته‌کوه البرز غربی دربرگرفته است (Rahimi *et al.*, 2021). این شرایط، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری اقلیم‌های متنوع و در نتیجه ایجاد اکوسیستم‌های متمایز داشته است. استان زنجان، اقلیم نیمه‌خشک تا خشک سرد دارد (Jafarian and Kargar, 2019).

پوشش گیاهی طبیعی استان عمدتاً متشکل از گونه‌های استپی و مرتعی مقاوم به خشکی است. در ارتفاعات شمالی، رویشگاه‌های جنگلی با گونه‌های غالب بلوط ایرانی و ارس مشاهده می‌شود (Mojarad *et al.*, 2021). زیستگاه‌های متنوع کوهستانی (البرز و زاگرس)، استپی (سارمساقلو)، دشتی (سهرین)، رودخانه‌ای (قزل‌اوزن) و تالابی (خندقلو)، شرایط منحصر به فردی را برای بقای گونه‌های شاخص (آهوی ایرانی، قوچ و میش ارمنی، کل‌وبز، پلنگ و خرس قهوه‌ای، فراهم ساخته است. منطقه حفاظت‌شده سرخ‌آباد به‌عنوان زیستگاه اصلی کل‌وبز و خرس قهوه‌ای محسوب می‌شود و تغییرات کاربری اراضی در آن، به‌ویژه تبدیل مراتع به اراضی کشاورزی، تأثیر منفی بر جمعیت گونه‌های کاراکال و آهو داشته است (Hosseini, 2021). پناهگاه حیات‌وحش انگوران نیز یکی از مهم‌ترین زیستگاه‌های قوچ و میش ارمنی در کشور است که با چالش توسعه راه‌ها روبه‌رو است. منطقه حفاظت‌شده فیله خاصه زیستگاه اصلی آهوی ایرانی است. همچنین پلنگ ایرانی در بخش‌های کوهستانی آن مشاهده شده است (Yaftian, 2022). منطقه حفاظت‌شده سهرین نیز زیستگاه آهوی ایرانی است که تحت محاصره کشاورزی مکانیزه و توسعه زیرساخت‌ها قرار دارد. همچنین این استان، از پتانسیل بالایی گردشگری طبیعی برخوردار است (Zarandian *et al.*, 2026). شکل ۱، موقعیت استان و مناطق تحت حفاظت آن را در کشور ایران نمایش می‌دهد.



شکل ۱- استان زنجان و توزیع مناطق موجود تحت حفاظت

Figure 1. Zanjan Province and the distribution of existing protected areas

روش پژوهش: این پژوهش از نوع توصیفی-تحلیلی است و با هدف کاربردی انجام شده است. چارچوب روش‌شناسی آن مبتنی بر مدل‌سازی فضایی-کمی و تحلیل‌های مکانی برای ارزیابی یکپارچه کیفیت زیستگاه و تأثیر تهدیدهای انسان‌ساخت است. روش‌شناسی این پژوهش در چهار گام اصلی و پیوسته سازماندهی شد: (۱) تهیه و پردازش لایه‌های مکانی (پوشش/کاربری اراضی و منابع تهدید)، (۲) اجرای مدل InVEST برای تولید نقشه‌های کمی تخریب تجمعی و کیفیت نسبی زیستگاه، (۳) تحلیل آمار فضایی نتایج و ارزیابی کارایی مناطق تحت حفاظت موجود و (۴) اولویت‌بندی مدیریتی مناطق تحت حفاظت و استخراج پیشنهاد‌های سیاستی.

پژوهش حاضر از مدل کیفیت نسبی زیستگاه در چارچوب نرم‌افزار InVEST نسخه ۳/۱۲ بهره می‌برد. این مدل اگرچه داده‌های رخداد دقیق گونه‌ها را در نظر نمی‌گیرد، اما به دلیل توانایی بالا در سنجش تفاوت حساسیت انواع مختلف پوشش/کاربری زمین (زیستگاه) به تهدیدهای گوناگون و محاسبه اثر تجمعی و وزن‌دار تهدیدها با در نظر گرفتن فاصله، برای ارزیابی‌های یکپارچه در مقیاس سرزمین مناسب است. منطق هسته‌ای مدل بر این اصل استوار است که کیفیت یک زیستگاه تابعی است از: ۱) شدت و دامنه مکانی تهدیدهای انسان‌ساخت، ۲) حساسیت ذاتی آن نوع پوشش به هر تهدید و ۳) وجود موانع حفاظتی (مناطق تحت حفاظت) که می‌توانند اثر تهدید را تعدیل کنند (Sharp *et al.*, 2020).

تهیه و پردازش ورودی‌های مدل

نقشه رستری پوشش/کاربری اراضی با قدرت تفکیک ۳۰ متر برای سال ۱۴۰۱ از پردازش تصاویر ماهواره‌ای لندست ۹ و سنجنده OLI/TIRS Collection 2 Level-1 با مسیرهای گذر ۳۴-۱۶۸ و ۳۵-۱۶۸ در تاریخ ۱۰ تیر ۱۴۰۱ مصادف با ۱ ژوئیه ۲۰۲۲، عاری از ابر و با زاویه خورشید کمتر از ۳۰ درجه و با روش طبقه‌بندی نظارت‌شده با الگوریتم حداکثر احتمال تهیه شده است. سطح طبقه‌بندی براساس سامانه طراحی شده توسط Anderson و همکاران (۱۹۷۶) در سطح دوم انجام شده است. ۲۵۰ نقطه کنترل میدانی (توسط متخصص با دستگاه GPS دستی با دقت سانتی‌متر)، همزمان با تهیه تصاویر در تابستان ۱۴۰۱ برداشت شده است. به این ترتیب، صحت کلی و ضریب کاپای کوهن نقشه به ترتیب ۰/۹۲ و ۰/۸۹ به دست آمد که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان بالا برای استفاده در مدل‌سازی است. تطابق مکانی داده‌ها نیز از طریق یکسان‌سازی سیستم مختصات (UTM Zone 39N) و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر برای همه لایه‌های ورودی شامل نقشه پوشش/کاربری اراضی، لایه‌های تهدید و مناطق تحت حفاظت تأمین شده است. تمامی طبقات پوشش/کاربری زمین مندرج در جدول ۱ (بخش یافته‌ها) از همین نقشه استخراج شده‌اند. طبقات پوشش زمین طبیعی (شامل جنگل‌ها، مراتع، درختچه‌زارها، تالاب‌ها و پهنه‌های آبی که فاقد دخل و تصرف انسانی نظیر کشت و زرع، سکونتگاه و صنعت هستند) به عنوان «زیستگاه» تعریف شده‌اند.

امتیازدهی حساسیت انواع پوشش/کاربری زمین به تهدیدها و نیز تعیین پارامترهای هر تهدید (وزن نسبی تهدید، فاصله اثر، تابع کاهش)، براساس ترکیبی از سه منبع انجام شد: ۱) مطالعات پیشین که مقادیر مرجع برای حساسیت و وزن تهدیدها را ارائه داده‌اند. برای هر طبقه، یک امتیاز حساسیت یا مناسب بودن ذاتی (Hj) بین ۰ (غیر زیستگاه، مانند مناطق شهری) تا ۱ (بهترین زیستگاه) اختصاص یافت. این امتیاز بر اساس درجه طبیعی بودن، پیچیدگی ساختاری و ظرفیت اکولوژیک هر نوع پوشش برای پشتیبانی از جوامع حیات وحش تعیین شد. برای مثال، جنگل‌های انبوه با ساختار پیچیده و تالاب‌های پایدار به عنوان بهترین زیستگاه‌ها (امتیاز ۱) در نظر گرفته شدند، در حالی که مراتع تنک‌تر به دلیل ظرفیت پایین‌تر، امتیاز کمتری دریافت کردند. عرصه‌های کاملاً انسان‌ساخت مانند شهرها و زمین‌های کشاورزی، فاقد ارزش ذاتی به عنوان زیستگاه طبیعی محسوب و امتیاز صفر گرفتند (Terrado *et al.*, 2020; Sharp *et al.*, 2020; Berta Aneseyee *et al.*, 2020; Dashtbozorgi *et al.*, 2023). ۲) ویژگی‌های بوم‌شناختی منطقه و شدت کاربری‌های انسان‌ساخت در استان زنجان که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای میدانی بررسی شد و ۳) نظرات اجماع‌یافته گروه کارشناسی متشکل از بوم‌شناسان و متخصصان برنامه‌ریزی محیط‌زیست منطقه که طی دو جلسه تخصصی (هر جلسه ۳ ساعته) با استفاده از روش دلفی (تکنیک رسیدن به اجماع از طریق پرسشنامه و بحث گروهی) به توافق در مورد مقادیر حساسیت انواع پوشش/کاربری زمین (در دامنه ۰ تا ۱) و وزن نسبی تهدیدها (در دامنه ۰ تا ۱) دست یافتند. این رویکرد باعث بومی‌سازی پارامترها و افزایش اتکاپذیری نتایج مدل در شرایط خاص استان زنجان گردید. در مجموع براساس استنتاج نویسندگان، حساسیت بالا (مقادیر ۰/۸ تا ۰/۹) به ترکیبی از زیستگاه‌های با ارزش (مانند جنگل‌ها، تالاب‌ها) که در برابر تهدیدهای دگرگون‌کننده و با شدت اثر بالا مانند توسعه شهری، صنعتی و راه‌آهن، آسیب‌پذیر هستند، اختصاص یافت. این نشان می‌دهد که چنین تهدیدهایی می‌توانند کارکردهای اکولوژیک این زیستگاه‌ها را به شدت و اغلب به طور غیرقابل بازگشت مختل کنند. حساسیت متوسط (مقادیر ۰/۵ تا ۰/۷) برای زیستگاه‌های با انعطاف‌تر یا تهدیدها با اثر محدودتر در نظر گرفته شد. به عنوان مثال، مراتع ممکن است در برابر کشاورزی یا جاده‌های فرعی حساسیت متوسطی نشان دهند، زیرا از پیش در معرض برخی اختلالات بوده‌اند. حساسیت صفر برای عرصه‌های غیر زیستگاهی مانند طبقات شهری و کشاورزی به همه تهدیدها اختصاص یافت، چرا که این عرصه‌ها اساساً فاقد کیفیت طبیعی برای از دست دادن هستند. این شیوه،

امکان می‌دهد مدل به‌طور واقع‌بینانه‌ای تفاوت بین تأثیر یک جاده بر یک جنگل بکر و تأثیر همان جاده بر یک مرتع دگرگون‌شده را محاسبه کند. جزئیات کامل تمامی مقادیر در جدول ۱ در بخش یافته‌ها، ارائه شده است.

برای کمی‌سازی اثر فعالیت‌های انسانی بر زیستگاه‌ها، برای هفت منبع تهدید اصلی، لایه‌های رستری دودویی (با مقدار ۱ برای پیکسل‌های تحت تأثیر و ۰ برای سایر پیکسل‌ها)، تهیه شد. برای هر لایه، وزن نسبی تهدید (W_r)، حداکثر فاصله اثر (d_{ax}) و نوع تابع کاهش اثر (خطی یا نمایی)، در جدول ۲ در بخش یافته‌ها، ثبت گردید. این پارامترها تعیین می‌کنند که اثر هر تهدید با چه سرعتی و تا چه فاصله‌ای از منبع، کاهش می‌یابد. این پارامترها همانطور که پیشتر گفته شد، براساس مطالعات مشابه، ویژگی‌های بوم‌شناختی منطقه و نظرات اجماع یافته گروه کارشناسی تعیین شدند. فاصله اثر حداکثر، بیشترین فاصله‌ای است که منبع تهدید می‌تواند بر کیفیت زیستگاه تأثیر منفی بگذارد. به‌عنوان مثال، اثر کاربری صنعتی تا ۱۲ کیلومتر در نظر گرفته شده است. وزن نسبی هر تهدید (اهمیت و شدت تأثیر هر تهدید نسبت به سایر تهدیدها)، در مقیاس ۰ (بی‌تأثیر) تا ۱ (بیشترین تأثیر) است. برای مثال، تهدیدهای شهری و صنعتی با وزن ۱، دارای بیشترین تأثیر در نظر گرفته شده‌اند. نوع تابع کاهش، شکل ریاضی شدت تأثیر تهدید با افزایش فاصله از منبع آن است. دلیل استفاده صرفاً از دو تابع خطی و نمایی این است که مدل InVEST به‌طور پیش‌فرض (Sharp et al., 2020)، تنها همین دو گزینه را برای تعریف نحوه کاهش اثر تهدیدها ارائه می‌دهد. در تابع خطی، شدت تهدید با فاصله، یکنواخت و با نرخ ثابت کاهش می‌یابد. در تابع نمایی، شدت تهدید در فواصل نزدیک به منبع، بسیار سریع کاهش می‌یابد و سپس در فواصل دورتر، نرخ کاهش آن آهسته می‌شود. «نقاط کنترل» این توابع، همان حداکثر فاصله اثر هر تهدید است که براساس مطالعات مشابه (که پیشتر گفته شده) و نظرات اجماع یافته گروه کارشناسی مشخص می‌کند تأثیر تهدید تا چه فاصله‌ای ادامه دارد.

معادلات محاسباتی

برای لحاظ کردن نقش تعدیل‌کننده مناطق تحت مدیریت، یک لایه مکانی از مناطق تحت حفاظت ایجاد شد. براساس درجه حفاظت رسمی، به هر سلول، یک ضریب دسترسی (β_x) بین ۰/۱ (حفاظت شدید و دسترسی محدود) تا ۱ (فاقد حفاظت و دسترسی کامل) تخصیص یافت. براساس منطق مدل InVEST، هرچه ضریب دسترسی کوچک‌تر باشد، نقش حفاظتی قوی‌تر و اثر تهدیدهای انسانی کاهش بیشتری می‌یابد. بنابراین به‌ترتیب (از بیشترین حفاظت به کمترین حفاظت)، به سلول‌های واقع در پناهگاه حیات‌وحش ضریب ۰/۵، به مناطق حفاظت‌شده ضریب ۰/۸ و به سلول‌های خارج از مناطق تحت حفاظت (فاقد هرگونه حفاظت)، ضریب ۱ تعلق گرفت. مطابق رابطه ۱، کل تخریب واردشده به هر سلول (D_{xj}) برآورد شده است که در آن اثر تجمعی و وزن‌دار همه تهدیدها با در نظر گرفتن فاصله (i_{rxy})، وزن (W_r)، ضریب دسترسی (β_x) و حساسیت (S_{jr}) برای هر پیکسل (x) با پوشش (j) جمع‌بندی می‌شود:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^Y \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad \text{رابطه ۱) کیفیت نسبی زیستگاه}$$

سپس، میزان تخریب (D_{xj}) و امتیاز ذاتی زیستگاه (H_j) در یک تابع پاسخ نیمه‌اشباع قرار می‌گیرد تا شاخص نهایی کیفیت نسبی زیستگاه (Q_{xj}) محاسبه شود. خروجی این تابع مطابق رابطه ۲ به‌دست می‌آید و مقداری پیوسته بین صفر (پایین‌ترین کیفیت) تا یک (بالا‌ترین کیفیت) دارد:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right) \quad \text{رابطه ۲) تخریب تجمعی زیستگاه}$$

در این معادله، k ثابت نیمه‌اشباع (با مقدار پیش‌فرض ۰/۵) و z یک پارامتر مقیاس (معمولاً ۲/۵) است. تابع فوق تضمین می‌کند که با افزایش تخریب، کیفیت به‌صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. نتیجه اجرای مدل، تولید دو لایه رستری پیوسته با مقادیر تخریب (D) و کیفیت نسبی زیستگاه (Q) است.

اولویت‌بندی مدیریتی مناطق تحت حفاظت و پیشنهادهای سیاستی

این مرحله خود شامل سه گام بوده است:

(۱) گام نخست، با هدف ارزیابی عملکرد و تعیین اولویت‌های مدیریتی، مقایسه مناطق تحت حفاظت موجود انجام شد. برای این منظور، با استفاده از روش آمار توصیفی، شاخص‌های کلیدی (شامل میانگین کیفیت نسبی زیستگاه، میانگین درجه تخریب تجمعی و انحراف معیار هر یک از آنها) برای هر یک از چهار منطقه تحت حفاظت، محاسبه شد. همچنین این مقادیر با یکدیگر و با میانگین استان مقایسه شد (بدون استفاده از آزمون‌های آماری استنباطی). تلفیق این شاخص‌ها در یک چارچوب ماتریسی دو بعدی بر مبنای منطق "وضعیت اکولوژیک (کیفیت) در مقابل سطح تهدید (تخریب)" مبنای عینی برای طبقه‌بندی و اولویت‌بندی منطقی مناطق فراهم آورد.

(۲) در گام بعدی، تحلیل شکاف کارایی شبکه حفاظتی با رویکردی مکانی صورت پذیرفت. در این راستا، پهنه‌های دارای کیفیت زیستگاهی برتر (۲۰ درصد بالای توزیع کیفیت در سطح استان)، شناسایی و مرزهای آنها با محدوده‌های رسمی چهار منطقه تحت حفاظت موجود، مقایسه شد.

(۳) در گام نهایی، به منظور تبدیل یافته‌های تحلیلی به خروجی‌های راهبردی، پیشنهاد‌های سیاستی تدوین شدند. این پیشنهادها با استدلال عقلایی، مستقیماً از دو دسته یافته کمی نشأت گرفتند: الف) حاصل از اولویت‌بندی مناطق موجود که نیاز به رویکردهای مدیریتی متفاوت را اثبات می‌کرد و ب) شناسایی شکاف‌های مکانی مرتبط با ناهمپوشانی مناطق دارای کیفیت زیستگاهی برتر با مناطق موجود تحت حفاظت.

یافته‌های پژوهش

پیش از ارائه یافته‌های حاصل از اجرای مدل، لازم است پارامترهای کلیدی ورودی که براساس مطالعات مشابه و نظرات اجماع یافته گروه کارشناسی بومی‌سازی شده‌اند، ارائه گردند. این پارامترها شامل حساسیت هر نوع پوشش/کاربری زمین به هر یک از هفت تهدید انسان‌ساخت (جدول ۱) و نیز ویژگی‌های هر تهدید از جمله وزن نسبی، حداکثر فاصله اثر و نوع تابع کاهش (جدول ۲) می‌باشند. این مقادیر به عنوان ورودی‌های مدل InVEST تعریف شده و سپس خروجی‌های مدل شامل نقشه‌های تخریب تجمعی و کیفیت نسبی زیستگاه تولید شده‌اند.

جدول ۱- حساسیت انواع پوشش/کاربری زمین به انواع هفتگانه تهدید در استان زنجان

Table 1. Sensitivity of land cover/land use classes to the seven threat types in Zanjan Province

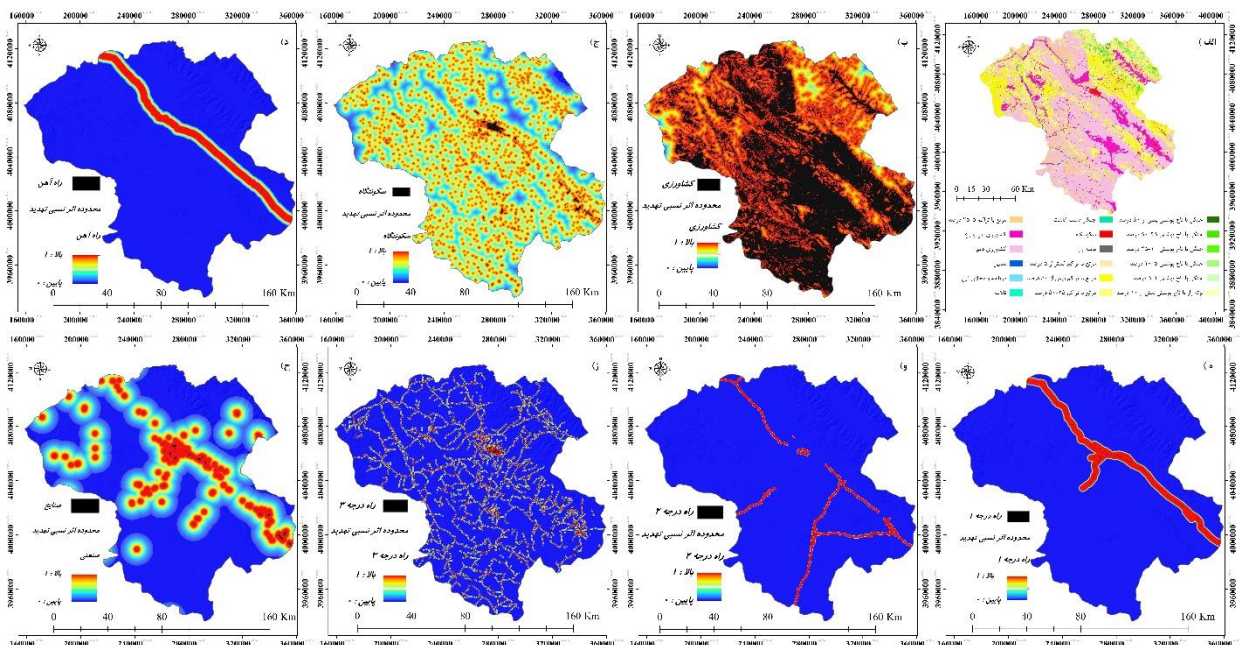
ردیف	تهدیدها	امتیاز زیستگاه	اراضی کشاورزی	راه آهن	شهر	جاده اصلی	جاده فرعی	جاده روستایی	صنعت
	پوشش/کاربری زمین								
1	مناطق سکونتگاهی و زیرساخت‌ها	0	0	0	0	0	0	0	0
2	جنگل-تاج‌پوشش بیش از ۵۰٪	1	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
3	جنگل-تاج‌پوشش ۲۵٪ تا ۵۰٪	1	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
4	جنگل-تاج‌پوشش ۱۰٪ تا ۲۵٪	0.9	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
5	درختچه‌زار-تاج‌پوشش بالای ۱۰٪	0.9	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
6	جنگل دست‌کاشت	0.9	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
7	مرتع-پوشش بیش از ۵۰٪	0.8	0.6	0.8	0.8	0.6	0.5	0.4	0.8
8	مرتع-پوشش ۲۵٪ تا ۵۰٪	0.7	0.6	0.8	0.8	0.6	0.5	0.4	0.8
9	مرتع-پوشش ۵٪ تا ۲۵٪	0.6	0.6	0.8	0.8	0.6	0.5	0.4	0.8
10	کشاورزی آبی و باغات	.	.	.	.	.	.	.	.
11	کشاورزی دیم	.	.	.	.	.	.	.	.
12	سطوح ماسه‌ای هموار (بیابانی)	.	.	.	.	.	.	.	.
13	اراضی باتلاقی با سطح آب بالا	1	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
14	مرتع با پوشش زیر ۵٪ و برون‌زدگی سنگی	0.5	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
15	دریاچه‌ها و مخازن آبی	0.5	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
16	بستر رودخانه‌های بزرگ	1	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
17	جنگل با تاج‌پوشش ۵٪ تا ۱۰٪	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9
18	جنگل با تاج‌پوشش ۱٪ تا ۵٪	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.9

جدول ۲- ویژگی‌های تهدیدهای انسان‌ساخت ورودی به مدل کیفیت نسبی زیستگاه

Table 2. Attributes of the human-induced threat layers used as input to the relative habitat quality model

ردیف	تهدید	تابع کاهش	نام تهدید	وزن نسبی	حداکثر فاصله اثر (km)
1	زمین‌های کشاورزی	خطی	اراضی کشاورزی	0.7	8
2	خطوط راه‌آهن	نمایی	راه‌آهن	0.6	5
3	سکونتگاه‌های انسانی	نمایی	شهری	1	10
4	جاده‌های درجه ۱	خطی	جاده اصلی	1	3
5	جاده‌های درجه ۲	خطی	جاده فرعی	0.7	1
6	جاده‌های روستایی	نمایی	جاده روستایی	0.5	0.5
7	کاربری صنعتی	نمایی	صنعتی	1	12

توزیع فضایی تخریب و کیفیت زیستگاه تحت تأثیر عوارض انسان‌ساخت: شکل ۲، داده‌های ورودی لازم برای مدل در محدوده مورد مطالعه استان زنجان را نمایش می‌دهد. ابتدا، پوشش/کاربری اراضی، نمایش داده شده است (شکل ۲- الف)، سپس هریک از تهدیدهای هفتگانه، محل استقرار آنها و محدوده اثرات نسبی آنها، ترسیم شده است (شکل ۲- ب تا شکل ۲- ح).

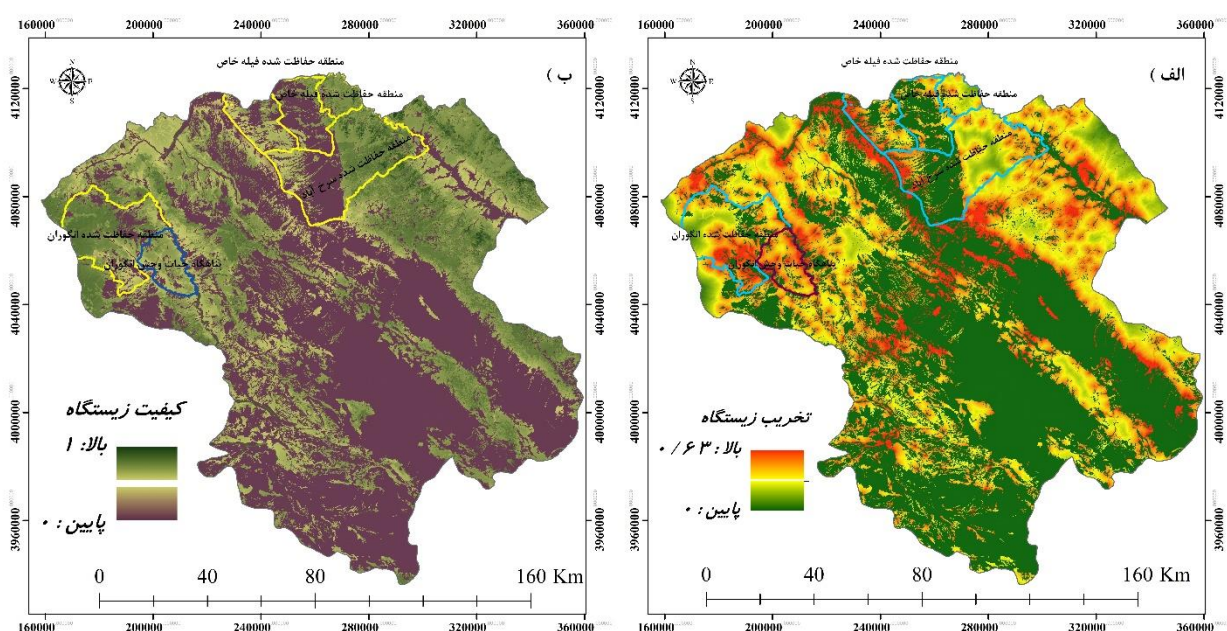


شکل ۲- الف) توزیع فضایی پوشش/کاربری زمین، ب) توزیع فضایی تهدید کاربری زراعی، ج) توزیع فضایی تهدید سکونتگاه‌های شهری، د) توزیع فضایی تهدید راه آهن، ه) توزیع فضایی تهدید راه‌های درجه ۱ و و) توزیع فضایی تهدید راه‌های درجه ۲، ز) توزیع فضایی تهدید راه‌های درجه ۳ و ح) توزیع فضایی تهدید کاربری صنعتی

Figure 2. Spatial distribution of (a) land cover/land use, (b) agricultural land use, (c) urban settlements, (d) railway, (e) class 1 roads, (f) class 2 roads, (g) class 3 roads, and (h) industrial land use as threat layers

شکل ۳، اطلاعات خروجی حاصل از به‌کارگیری مدل در محدوده مورد مطالعه استان زنجان (درجه تخریب تجمعی زیستگاه و کیفیت نسبی زیستگاه) را نمایش می‌دهد (به‌ترتیب شکل ۳- الف و شکل ۳- ب). پراکنش شاخص تخریب تجمعی در استان، مقادیری بین ۰ تا ۰/۶۳ را به‌خود اختصاص داده است. شاخص کیفیت نسبی زیستگاه در سطح استان از ۰ (کمترین کیفیت) تا ۱ (بالاترین کیفیت) در نوسان است. میانگین کیفیت نسبی زیستگاه در سطح استان ۰/۴۲ و میانگین درجه تخریب ۰/۱۸ محاسبه شد. تقریباً نیمی از عرصه استان، از کیفیت زیستگاهی متوسط به پایین، برخوردار است و فشار تجمعی تهدیدهای انسان‌ساخت به‌طور میانگین در سطحی معادل ۱۸ درصد از حداکثر تخریب ممکن قرار دارد. بالاترین مقادیر کیفیت (نزدیک به ۱) به‌وضوح در پهنه‌های جنگلی انبوه شمال شرقی استان متمرکز شده‌اند. پس از آن، عرصه‌های مرتعی با تراکم پوشش متوسط و بالا در شمال

غربی استان، مقادیر کیفیت مطلوبی را نشان می‌دهند. در نقطه مقابل، پایین‌ترین مقادیر کیفیت (نزدیک به صفر) کاملاً بر روی کاربری‌های انسان‌ساخت شهری، صنعتی و زراعت آبی منطبق است. نقشه تخریب تجمعی (شکل ۳-الف)، نیز مؤید این رابطه است، زیرا بیشترین مقادیر تخریب، به‌صورت هاله‌ای پیرامون کانون‌های تهدید مذکور و به‌ویژه در نقاط تلاقی چندین تهدید (مانند حاشیه شهرهای بزرگ و تقاطع راه‌های اصلی) مشاهده می‌شود. الگوی نقشه‌ها، دوگانگی سرزمینی را نشان می‌دهد: هسته‌های باکیفیت بالا در جنگل‌ها و مراتع دور از توسعه و کانون‌های شدید تخریب در پهنه‌های شهری، صنعتی و مسیرهای مواصلاتی متمرکز هستند. این پراکنش، رابطه معنی‌دار نزدیکی به منابع تهدید و کاهش کیفیت زیستگاه را نمایش می‌دهد. نقشه‌های تولیدشده در این پژوهش، صرفاً نمایش توزیع مکانی کیفیت زیستگاه نیست، بلکه کمی‌سازی اثر تجمعی هفت تهدید انسان‌ساخت بر کاهش کیفیت زیستگاه و تفکیک مناطق با کیفیت ذاتی بالا اما تخریب‌شده (مانند انگوران) از مناطق با کیفیت بالا و دست‌نخورده (مانند جنگل‌های شمال شرق) است. به عبارت دیگر، نقشه کیفیت زیستگاه به‌تنهایی همپوشانی زیادی با نقشه پوشش سرزمین دارد، اما نقشه تخریب تجمعی و تلفیق تفسیر آن با نقشه کیفیت زیستگاه است که ارزش افزوده تحلیلی این پژوهش را شکل می‌دهد و امکان اولویت‌بندی مدیریتی مناطق حفاظتی را فراهم می‌آورد.



شکل ۳-الف) توزیع فضایی تخریب تجمعی و ب) توزیع فضایی کیفیت نسبی زیستگاه

Figure 3. Spatial distribution of (a) cumulative degradation and (b) relative habitat quality

مقایسه شرایط مناطق تحت حفاظت و مناطق اولویت‌دار برای امکان‌سنجی تخصیص جدید به کاربری حفاظت: ارزیابی کارایی و تعیین اولویت‌های مدیریتی مناطق تحت حفاظت، بر پایه تحلیل مقایسه‌ای میانگین و انحراف معیار کیفیت نسبی زیستگاه و همچنین میانگین و انحراف معیار درجه تخریب تجمعی به‌همراه دامنه تغییرات آنها بوده است. در نتیجه "وضعیت اکولوژیک مناطق تحت حفاظت در مقابل سطح تهدید"، در چهار سطح متمایز اولویت مدیریتی (فوری، بالا، متوسط و پایین)، طبقه‌بندی شده است. یافته‌های این مقایسه به شرح زیر است:

۱) اولویت فوری (مدیریت بحرانی): پناهگاه حیات وحش انگوران، وضعیتی بحرانی و هشداردهنده را نشان می‌دهد. اگرچه میانگین کیفیت زیستگاه آن (۰/۴۹۹)، در رده بسیار خوب قرار دارد (دومین رتبه پس از منطقه حفاظت‌شده انگوران)، اما متأسفانه بالاترین میانگین تخریب (۰/۱۶) را در بین همه مناطق چهارگانه استان دارد. این مقدار تخریب در مقایسه با میانگین تخریب استان (۰/۱۸) اندکی پایین‌تر است، اما در مقایسه با سایر مناطق تحت حفاظت (که میانگین تخریب آنها بین ۰/۰۷۶ تا

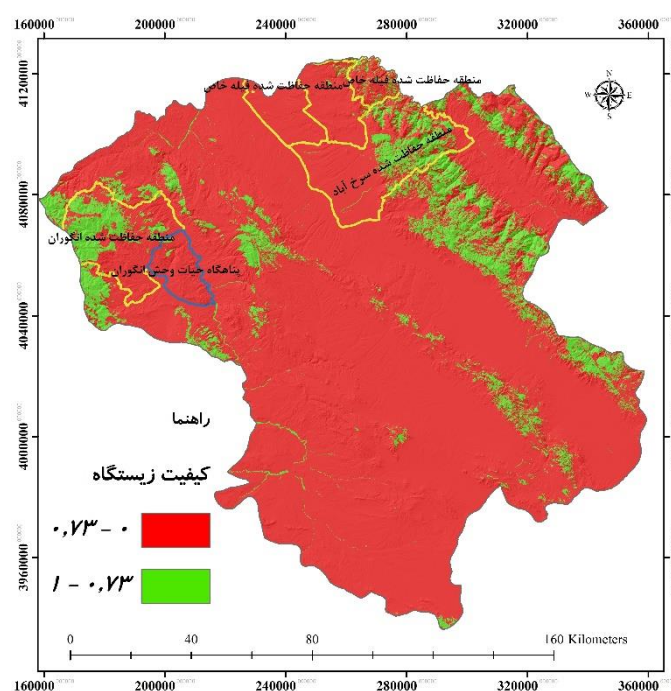
۰/۱۱۸ است)، بالاترین مقدار محسوب می‌شود و نگران‌کننده است. این ترکیب متضاد شامل کیفیت بالا و تخریب بالا، این پناهگاه را به یک اولویت قطعی و فوری برای مداخله مدیریتی تبدیل می‌کند. فشارهای انسانی ناشی از عوامل انسان‌ساخت، در حال خدشه‌دار کردن این عرصه با ارزش اکولوژیک ممتاز هستند. از میان هفت تهدید مورد بررسی در این پژوهش، تهدیدهای اصلی شناسایی شده در محدوده این پناهگاه شامل جاده اصلی، جاده فرعی، اراضی کشاورزی (به‌ویژه در حاشیه‌ها) و سکونتگاه‌های روستایی هستند. دامنه تغییرات کیفیت (۰/۹۲) و حداکثر کیفیت (۰/۹۲)، بر وجود قابلیت احتمالی احیا در برخی مکان‌ها تأکید دارند. این پناهگاه، به دلیل تلفیق ارزش اکولوژیک بالا و سطح تخریب قابل توجه، نیازمند مدیریت اضطراری، تقویت گشت و کنترل و اجرای برنامه‌های کاهش تعارض و احیاء است.

۲) اولویت بالا (ایجاد منطقه حائل حفاظتی): منطقه حفاظت‌شده انگوران، به‌وضوح به‌عنوان یک هسته با ارزش عمل می‌کند، زیرا بالاترین میانگین کیفیت زیستگاه (۰/۵۲۶) را در بین تمامی مناطق دارا است. با این وجود، میانگین تخریب آن (۰/۱۱۸)، اگرچه از متوسط استان پایین‌تر است، اما در بین مناطق تحت مدیریت (به‌جز پناهگاه حیات‌وحش) بالاترین مقدار را دارد. این موضوع زنگ خطری برای فشار تهدیدهای پیرامونی بر این منطقه تحت حفاظت است. انحراف معیار قابل توجه (۰/۳۰۵) در کیفیت و حداکثر کیفیت بالا (۰/۹۲۸)، تأکید می‌کند که این منطقه علی‌رغم فشارها، هنوز عرصه‌های بسیار ممتازی را در خود جای داده است. این منطقه با توجه به دارا بودن میانگین کیفیت زیستگاه عالی اما در معرض تخریب متوسط، نیازمند پایش مستمر، مدیریت فعال و ایجاد منطقه حائل حفاظتی در مرزها به‌ویژه در مناطقی است که در مجاورت کانون‌های تهدید قرار دارند تا از تشدید فشارها جلوگیری شود.

۳) اولویت متوسط (احیاء و بهبود): منطقه حفاظت‌شده فیله خاصه، با پایین‌ترین میانگین کیفیت زیستگاه (۰/۳۶۷)، دارای کیفیتی پایین‌تر از متوسط استان است. با این حال، کمترین میانگین تخریب (۰/۰۷۶) نیز در این منطقه ثبت شده است. حداکثر کیفیت (۰/۹۹۷) و همین میزان دامنه تغییرات بسیار زیاد (۰/۹۹۷)، نشان می‌دهد که بسیار ناهمگون است و نقاط با ارزش بسیار بالای حفاظتی، در آن یافت می‌شود. این منطقه به دلیل پایین بودن میانگین کیفیت، گزینه برای بررسی‌های کارشناسی عمیق است. در صورت تشخیص علل انسانی کاهش کیفیت در گذشته، این منطقه می‌تواند هدف پروژه‌های احیاء اکولوژیک و بهبود کیفیت زیستگاه شود.

۴) اولویت حفاظتی پایین (حفظ و نگهداری): منطقه حفاظت‌شده سرخ‌آباد، بزرگ‌ترین منطقه تحت حفاظت استان است و کمترین میانگین تخریب، (۰/۰۹۷) را دارد که نشان‌دهنده اثر بخشی نسبی مدیریت امر حفاظت به‌منظور کاهش فشارهای انسانی است. همچنین میانگین کیفیت زیستگاه این منطقه (۰/۴۵۱)، کمی بالاتر از متوسط استان است. این مقدار همراه با حداکثر کیفیت ثبت‌شده (۰/۹۹۳) در دورن آن و دامنه تغییرات گسترده (۰/۹۹۳)، حکایت از حضور همزمان عرصه‌های با کیفیت تقریباً دست‌نخورده و همچنین مناطق تحت تأثیر عوارض انسان‌ساخت در درون محدوده دارد. انحراف معیار نسبتاً بالا (۰/۳۴۹) برای کیفیت، این ناهمگونی فضایی را تأیید می‌کند. مجموع مقادیر پیکسل‌های رستری ۶۰۸۷۷۰/۸ که از همه مناطق دیگر بالاتر است، به علت وسعت زیاد این منطقه است و بر اهمیت کلی آن در شبکه حفاظتی استان می‌افزاید. این منطقه، الگویی از کارایی حفاظتی را نشان می‌دهد. اولویت در اینجا حفظ وضع موجود، تقویت مدیریت یکپارچه و کاهش ناهمگونی داخلی از طریق تمرکز بر عرصه‌هایی است که کیفیت پایین‌تری دارند. شکل ۴، مناطق دارای بالاترین کیفیت زیستگاه (به رنگ سبز و شامل ۲۰ درصد توزیع بالای کیفیت زیستگاه) و در عین حال مناطق تحت حفاظت موجود را نمایش می‌دهد. ۶۸۳۹۸۹۲۰۰ متر مربع از مساحت مناطق حفاظت‌شده موجود در محدوده مناطق با کیفیت برتر قرار گرفته است. مساحت کل محدوده با کیفیت برتر در کل استان برابر است با ۲۶۹۲۷۵۹۵۰۰ متر مربع. پس براساس تحلیل همپوشانی مکانی، تنها ۲۵٪ از پهنه‌های با کیفیت زیستگاهی برتر در داخل مرزهای مناطق تحت حفاظت موجود قرار گرفته‌اند و ۷۵٪ درصد باقیمانده در خارج از این مناطق واقع شده‌اند. آنچه نیاز به تأمل عمیق دارد این است که مناطقی در خارج از چهار منطقه موجود تحت حفاظت وجود دارد که دارای کیفیت زیستگاه بسیار بالا هستند. این مناطق نیازمند مطالعات عمیق امکان‌سنجی به‌منظور تخصیص جدید به کاربری حفاظت به‌معنی ایجاد مناطق

تحت حفاظت جدید هستند. نتایج این تحلیل فضایی، ناهمپوشانی معنی‌دار میان مرزهای حفاظت قانونی کنونی و کانون‌های استثنایی کیفیت زیستگاه را آشکار ساخت. این ناهمخوانی، شکاف بارز در پوشش حفاظتی و همچنین عدم کارایی بهینه در مکان‌گذاری فعلی شبکه را به‌وضوح نشان داد و ضرورت تجدید نظر در تخصیص فضایی کاربری حفاظت را عینیت بخشید. در کنار تفاوت‌های چشمگیر از پناهگاه انگوران با وضعیت بحرانی تا منطقه سرخ‌آباد با کارایی نسبی بهتر، مرزهای کنونی این مناطق، لزوماً با کانون‌های استثنایی کیفیت زیستگاه همخوانی ندارند که شکاف کارایی تخصیص کاربری حفاظت را تأیید می‌کند.



شکل ۴- پهنه‌های دارای کیفیت زیستگاهی برتر (به رنگ سبز) و مناطق موجود تحت حفاظت

Figure 4. Areas with superior habitat quality (in green) and existing protected areas

بحث و نتیجه‌گیری

پیش از بحث درباره یافته‌ها، تأکید می‌شود که این پژوهش صرفاً از منظر کیفیت زیستگاه و تهدیدهای انسان‌ساخت به ارزیابی شبکه حفاظتی پرداخته است. بدیهی است که مکان‌گزینی مناطق تحت حفاظت در عمل تحت تأثیر ملاحظات اجتماعی-اقتصادی هم است و این مناطق تحت حفاظت به‌تدریج و طی زمان در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، نتایج این پژوهش به‌معنای نفی ارزش‌های کنونی این مناطق تحت حفاظت نیست، بلکه شکاف‌های موجود در پوشش حفاظتی را از یک منظر خاص (کیفیت زیستگاه در برابر تهدیدها) آشکار می‌سازد و بر ضرورت بازنگری در اولویت‌بندی مدیریتی و ضرورت امکان‌سنجی پهنه‌های با ارزش دیگر، تأکید دارد.

یافته‌های این پژوهش به‌طور مشخص از دو گزاره کلیدی پشتیبانی می‌کند. نخست آنکه، وسعت قانونی مناطق تحت حفاظت معیار کافی برای تضمین حفاظت کیفیت زیستگاه یا مصونیت آن در برابر تخریب نیست (Alemohammad et al, 2020; Alemohammad et al, 2022; Nematollahi et al., 2022; Alemohammad et al., 2024; Gharagozlou et al., 2025). میانگین کیفیت زیستگاه در سطح استان ۰/۴۲ و میانگین درجه تخریب ۰/۱۸ محاسبه شد که رابطه معکوس آشکاری میان این دو شاخص وجود دارد. هسته‌های با کیفیت بالا در جنگل‌های انبوه شمال شرق و مراتع متراکم شمال غرب متمرکز شده‌اند، در حالی که کانون‌های تخریب بالا بر مناطق شهری، صنعتی و تقاطع شریان‌های ارتباطی

اصلی منطبق هستند. دلیل این الگوی فضایی را می‌توان در اثر تجمعی هفت تهدید انسان‌ساخت (سکونتگاه‌های شهری، کاربری صنعتی، راه‌آهن، جاده‌های اصلی، فرعی، روستایی و اراضی کشاورزی) جستجو کرد که با افزایش فاصله از منابع تهدید، شدت تخریب کاهش می‌یابد.

دوم آنکه، حفاظت صرف از مناطق دوردست، بدون مدیریت تعارض در کانون‌های تنش، ناکافی بوده و می‌تواند سبب انتقال و تشدید فشار توسعه به زیستگاه‌های بالارزش دیگر شود (Jones et al., 2018; Alemohammad et al., 2022). ارزیابی چهار منطقه تحت حفاظت استان نشان داد که پناهگاه حیات‌وحش انگوران با میانگین کیفیت ۰/۴۹۹ اما بالاترین میانگین تخریب (۰/۱۶) در میان مناطق چهارگانه، وضعیتی بحرانی دارد. تهدیدهای اصلی این پناهگاه شامل جاده اصلی، جاده فرعی، اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌ها هستند. در مقابل، منطقه حفاظت‌شده سرخ‌آباد با میانگین تخریب ۰/۰۹۷، الگویی از کارایی نسبی مدیریت حفاظت را نشان می‌دهد. دلیل تفاوت کارایی این مناطق در میزان انزوای مکانی، تراکم تهدیدهای پیرامونی و درجه حفاظت رسمی است.

مقایسه یافته‌های این پژوهش با مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۲۲) و مطالعه Ding و همکاران (۲۰۲۱)، نشان می‌دهد که همچنان تغییر کاربری زمین، قوی‌ترین عامل کاهش کیفیت زیستگاه است. همچنین یافته‌های این پژوهش با مطالعاتی که به کاهش کیفیت زیستگاه تحت فشار توسعه اشاره داشته‌اند، همسو است از جمله Naseri و همکاران (۲۰۲۵)، Dashtbozorgi و همکاران (۲۰۲۳)، Gharagozlou و همکاران (۲۰۲۵) و Abdollahi و Morovati (۲۰۲۵). به‌علاوه، در این پژوهش، نتایج تحلیل شکاف نشان داد که تنها حدود ۲۵٪ از زیستگاه‌های برتر در داخل مرزهای مناطق تحت حفاظت موجود قرار دارند. این ناهم‌پوشانی، شکاف بارزی را در پوشش شبکه حفاظتی آشکار می‌سازد و ضرورت ایجاد مناطق حفاظتی جدید در خارج از مرزهای کنونی را عینیت می‌بخشد. این یافته نیز با نتایج مطالعه Nematollahi و همکاران (۲۰۲۲) و مطالعه Karimi و همکاران (۲۰۲۳)، که کارایی شبکه‌های حفاظتی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند، هم‌راستایی دارد.

محدودیت‌های پژوهش

اعتبارسنجی مستقل خروجی‌های مدل به دلیل نبود داده‌های میدانی مستقل از گونه‌ها یا شاخص‌های پایش کیفی زیستگاه در مقیاس استانی انجام نشده است. همچنین آنالیز حساسیت نسبت به تغییرات پارامترهای ورودی به دلیل زمان‌بر بودن اجرای مکرر مدل و نبود زیرساخت محاسباتی مناسب میسر نبوده است. با این حال، صحت بالای نقشه ورودی (۹۲٪) و انطباق منطقی الگوهای خروجی با دانش بوم‌شناختی منطقه و پیروی از مدل InVEST، اطمینان نسبی به نتایج را افزایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی و پیشنهاد‌های سیاستی

این مطالعه به صراحت تأکید می‌کند که رویکرد فعلی مبتنی بر وسعت در تخصیص زمین به کاربری حفاظت ناکارآمد بوده و نیازمند بازنگری اساسی است. بر این اساس، در ادامه سه پیشنهاد سیاستی ارائه می‌شود:

اول) بازمهندسی چارچوب حفاظت: نظام کنونی ارزیابی موفقیت حفاظت، عمدتاً بر شاخص‌های کمی (درصد سطح تحت پوشش) متمرکز است. در حالی که اولویت‌بندی مناطق براساس ترکیب کیفیت ذاتی زیستگاه و سطح تهدید می‌تواند یک چارچوب بازنگرانه را در تخصیص زمین به کاربری حفاظت ایجاد نماید. در این چارچوب، مناطق به چهار دسته «پرکیفیت-پرتهدید» (اولویت فوری مدیریت بحران)، «پرکیفیت-کم‌تهدید» (هسته‌های پایدار)، «کم‌کیفیت-پرتهدید» (عرصه‌های مخاطره‌آمیز) و «کم‌کیفیت-کم‌تهدید» (اولویت احیاء) تقسیم می‌شوند.

دوم) توسعه شبکه حفاظتی براساس ارزش‌های اکولوژیک، نه محدودیت‌های اداری: شناسایی عرصه‌های با کیفیت زیستگاهی بسیار بالا در خارج از مرزهای مناطق تحت حفاظت موجود، یک نقصان جدی در شبکه فعلی را آشکار می‌سازد. این مناطق، کاندیدهای اصلی برای مطالعات امکان‌سنجی فوری جهت الحاق به شبکه حفاظتی هستند. سیاست حفاظت باید به‌صورت پویا و مبتنی بر داده‌های اکولوژیک به‌روز، شبکه‌ای از هسته‌ها و دالان‌های به هم پیوسته را در سطح سرزمین طراحی کند.

سوم) افزایش تاب‌آوری از طریق ادغام لایه «تعارض‌سنجی» در برنامه‌ریزی توسعه: نقشه‌های تخریب تجمعی، در واقع نقشه‌های پیش‌بینانه تنش بین اهداف توسعه و حفاظت هستند. این لایه اطلاعاتی حیاتی باید به‌صورت الزامی در مراحل اولیه مطالعات آمایش سرزمین، طرح‌های جامع و تفصیلی و ارزیابی اثرات محیط‌زیستی طرح‌های کلان ادغام شود. چنین اقدامی، توسعه را به

سمت پهنه‌های «کم‌تعارض» هدایت کرده و از تقابل پرهزینه منافع مختلف و حل تعارض دیر هنگام، جلوگیری می‌نماید. پایش مستمر و اجرای دوره‌ای این مدل با داده‌های به‌روز می‌تواند روند تغییرات و اثرات تأخیری تخریب را آشکار سازد. همچنین عملگر نمودن یافته‌های این پژوهش، مستلزم مطالعات امکان‌سنجی برای ایجاد مناطق تحت حفاظت جدید در کنار ارزیابی‌های اجتماعی از نظر مقبولیت عمومی و عدم تعارض منافع است. در نهایت، این داده‌ها و تحلیل‌ها می‌تواند به‌عنوان زبان مشترک و مبنای عینی در فرآیندهای مشارکتی و گفت‌وگوهای چندذی‌نفعی مورد استفاده قرار گیرد. تأکید می‌شود که نتایج این پژوهش مکمل فرآیندهای چندمعیاره برنامه‌ریزی حفاظت است و پیشنهاد‌های ارائه شده باید در چارچوب مطالعات تکمیلی و با در نظر گرفتن ملاحظات اجتماعی، اقتصادی و مدیریتی مورد ارزیابی و تصمیم‌گیری نهایی قرار گیرند.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

این پژوهش با حمایت مالی اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان زنجان (سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران) در چارچوب طرح «ارزیابی خدمات اکوسیستمی استان زنجان» (۱۴۰۴) انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به‌خاطر ارائه نظرات ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

References

- Abdollahi, S., Morovati, M., 2025. Habitat Risk Assessment of the Persian Leopard in Golestan National Park Using InVEST Model. *Journal of Natural Environmental Hazards* 15(47), 23- 44. (In Persian)
- Alemohammad, S., Omidifar, R., Yousefvand, S., Ramezani Mehrian, M., 2023. Comparative Analysis of Approaches to Protected Area Governance and the Evolution Process of Landscape Conservation. *Strategy* 32(2), 307-330. (In Persian)
- Alemohammad, S., Ramezani Mehrian, M., Radmehr, A., 2024. Using the biosphere reserve model to landscape conservation planning and promote sustainable community uses (Study area: Dena District). *Geography and Environmental Sustainability* 14(3), 19-38. (In Persian)
- Alemohammad, S., Yavari, A.R., Malek mohammadi, B., Salehi, E., Amiri, M.J., 2020. Participatory Mapping of Community Use Zone in Dena District Adjacent to Dena Preserved Area. *Geography and Environmental Sustainability* 10(1), 53-68. (In Persian)
- Alemohammad, S., Yavari, A.R., Malek-Mohammadi, B., Salehi, E., Amiri, M.J., 2022. Landscape conservation and protected areas (case of Dena, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment* 194(2), 54.

- Allan, J.R., Possingham, H.P., Atkinson, S.C., Waldron, A., Di Marco, M., Butchart, S.H., Watson, J.E., 2022. The minimum land area requiring conservation attention to safeguard biodiversity. *Science* 376(6597), 1094-1101.
- Almond, R.E.A., Grooten, M., Juffe Bignoli, D., Petersen, T., 2022. Living Planet Report 2022—Building a nature-positive society. *WWF: Gland, Switzerland*.
- Anderson, J., Hardy, E.E., Roach, J.T., Witmer, R.E., 1976. *A land use and land cover classification system for use with remote sensor data* (Professional Paper No. 964). U.S. Geological Survey.
- Berta Aneseyee, A., Noszczyk, T., Soromessa, T., Elias, E., 2020. The InVEST habitat quality model associated with land use/cover changes: A qualitative case study of the Winike Watershed in the Omo-Gibe Basin, Southwest Ethiopia. *Remote Sensing* 12(7), 1103.
- Chaplin-Kramer, R., Sharp, R.P., Weil, C., Bennett, E.M., Pascual, U., Arkema, K.K., Daily, G.C., 2019. Global modeling of nature's contributions to people. *Science* 366(6462), 255-258.
- Dashtbozorgi, F., Hedayatiaghmashhadi, A., Dashtbozorgi, A., Ruiz-Agudelo, C.A., Fürst, C., Cirella, G.T., Naderi, M., 2023. Ecosystem services valuation using InVEST modeling: Case from southern Iranian mangrove forests. *Regional Studies in Marine Science* 60, 102813.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E.S., Ngo, H.T., Agard, J., Arneth, A., Zayas, C.N., 2019. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science* 366(6471), eaax3100.
- Ding, Q., Chen, Y., Bu, L., Ye, Y., 2021. Multi-scenario analysis of habitat quality in the Yellow River delta by coupling FLUS with InVEST model. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(5), 2389.
- Farid Giglou, M., Dastorani, M., Sadodin, A., 2022a. Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Zanjan province, Iran. *Environmental Earth Sciences* 81(4), 1-15. (In Persian)
- Farid Giglou, M., Dastorani, M., Sadodin, A., 2022b. Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Zanjan province, Iran. *Environmental Earth Sciences* 81(4), 1-15. (In Persian).
- Gharagozlou, A., Karbalaee Ali, M., Karbalaee Ali, M., 2025. Habitat Quality Assessment in Relation to Urban Development Using the InVEST Model and GIS: A Case Study of Qamsar City. *Interdisciplinary Journal of Civil Engineering* 1(1), 53-67. (In Persian)
- Gong, J., Xie, Y., Cao, S., Liu, D., 2023. Integrating the InVEST and FLUS models to assess future impacts of land use change on ecosystem services in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators* 151, 110323.
- Haddad, N.M., Gonzalez, A., Brudvig, L.A., Burt, M.A., Levey, D.J., Damschen, E.I., 2021. Experimental evidence does not support the Habitat Amount Hypothesis. *Ecography* 44(1), 45-57.
- Ibisch, P.L., Hoffmann, M.T., Kreft, S., Pe'er, G., Kati, V., Biber-Freudenberger, L., Selva, N., 2020. A global map of roadless areas and their conservation status. *Science* 370(6516), 698-701.
- Jafarian, Z., Kargar, M., 2019. Forecasting of drought in Zanjan province using time series models. *Journal of Rangeland Science* 9(3), 245-256. (In Persian).
- Jones, K.R., Venter, O., Fuller, R.A., Allan, J.R., Maxwell, S.L., Negret, P.J., Watson, J.E., 2018. One-third of global protected land is under intense human pressure. *Science* 360(6390), 788-791.
- Kareiva, P., Watts, S., McDonald, R., Boucher, T., 2007. Domesticated nature: shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science* 316(5833), 1866-1869.
- Karimi, A., Yazdandad, H., Reside, A.E., 2023. Spatial conservation prioritization for locating protected area gaps in Iran. *Biological Conservation*. 279, 109902.
- Kukkala, A.S., Moilanen, A., 2020. Ecosystem services and connectivity in spatial conservation prioritization. *Landscape Ecology* 35(6), 1285-1298.
- Moghanloo, L., Ghahremaninejad, F., Bidarlord, M., Norastehnia, A., 2023. Diversity and distribution of endemic and threatened plant species in the Sorkhabad protected area, Zanjan, NW Iran and identification of the biodiversity hotspots in the area. *Natura Croatica: Periodicum Musei Historiae Naturalis Croatici* 32(1), 17-34.
- Mojarad, M., Zare Chahouki, M.A., Jafari, M., 2021. The role of environmental factors on the distribution of *Juniperus* species in Zanjan province, Iran. *Journal of Mountain Science*. 18(5), 1235-1248. (In Persian).

- Naseri, N., Danehkar, A., Mostafazadeh, R., 2025. Geospatial modelling of land use-based habitat quality changes and predicting its degradation using the InVEST model. *Geografický časopis/Geographical Journal* 77(3), 143–153.
- Nejat, S.A., Dabiri, F., 2012. The study of Administrative and legal Challenges of the Protected Areas of Zanjan Province. *Journal of Environmental Studies* 38(2), 55–68. (In Persian).
- Nematollahi, S., Fakheran, S., Jafari, A., Pourmanafi, S., Kienast, F., 2022. Applying a systematic conservation planning tool and ecological risk index for spatial prioritization and optimization of protected area networks in Iran. *Journal for Nature Conservation* 66, 126144.
- Rahimi, D., Arzani, H., Jalili, A., 2021. The relationship between soil characteristics and plant distribution in the rangelands of Zanjan province, Iran. *Journal of Arid Environments* 184, 104312. (In Persian).
- Rahimi, E., Dong, P., 2022. What are the main human pressures affecting Iran's protected areas?. *Journal of Environmental Studies and Sciences* 12(4), 682–691.
- Safarilamouti, P., Karamidehkordi, E., 2022. Specialists' views on participation of local communities in the biodiversity conservation interventions of the Sorkhabad protected area in the Zanjan province. *Iranian Journal of Forest & Range Protection Research* 20(2). (In Persian)
- Safarilamouti, P., Karamidehkordi, E., Aazami, J., 2022. Analyzing biodiversity management challenges in the Sorkhabad protected area of the Zanjan Province, using a grounded theory study. *Journal of Natural Environmental Hazards* 11(33), 59–76. (In Persian).
- Santos, M.J., Smith, A.B., Dekker, S.C., Eppinga, M.B., Leitão, P.J., Moreno-Mateos, D., Pfister, S., 2021. The role of land use and land cover change in climate change vulnerability assessments. *Environmental Research Letters* 16(9), 093005.
- Shahidinejad, F., Danehkar, A., Alizadeh Shabani, A., Sobhani, P., 2024. Investigation of road accidents on the loss of wildlife species in the different provinces of Iran. *Journal of Natural Environment*. 77(Ecology and Biodiversity Management) 199–211. (In Persian).
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Vigerstol, K., 2020. InVEST 3.12.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University. Available online at: <https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>.
- Terrado, M., Sabater, S., Barceló, D., 2020. Integrating ecosystem services in river basin management: The role of modeling. *Science of The Total Environment* 744, 140992.
- Wang, J., Wu, Y., Gou, A., 2023. Habitat quality evolution characteristics and multi-scenario prediction in Shenzhen based on PLUS and InVEST models. *Frontiers in Environmental Science* 11, 1146347.
- Zarandian, A., Alemohammad, S., Ramezani Mehrian, M., 2026. Spatial-Fuzzy Analysis of Nature-Based Tourism Potential and Sustainable Management Strategies for Identified Zones (Case Study: Zanjan Province). *Journal of Tourism Planning and Development* 15 (56), 217- 237.
- Zhang, X., Liao, L., Xu, Z., Zhang, J., Chi, M., Lan, S., Gan, Q., 2022. Interactive effects on habitat quality using InVEST and GeoDetector models in Wenzhou, China. *Land* 11(5), 630.