University of Tehran Press

Journal of Environmental Studies

Vol. 51, No. 4, Winter 2026

Print ISSN: 1025-8620
Online ISSN 2345-6922

Homepage: www.Jes.ut.ac.ir

Analysis of Spatio-Temporal Changes in Ecological Sources Identified Using the Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) Method and Ecosystem Services Assessment in the Hyrcanian Forests

Sepideh Karimi[1], Mohammad Javad Amiri[2]✉, Ahmad Reza Yavari[3]

1. Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: sepidehkarimi@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mjamiri@ut.ac.ir
3. Department of Environmental Planning, Management and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: ayavari@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 28 December 2024
Received in revised form: 17 May 2025
Accepted: 11 August 2025
Available online: 16 March 2026

Keywords:
Ecological networks,
Ecological sources,
Ecosystem services,
Hyrcanian forest.

ABSTRACT

Objective: The issues of loss and fragmentation of forest habitats are significant challenges diminishing the resilience of these ecosystems. The identification of ecological source regions is crucial for enhancing landscape connectivity and building ecological networks. These regions not only provide suitable habitats for species but are also essential in sustaining ecological processes and functions. This study employed a combination of morphological spatial pattern analysis (MSPA) and ecosystem service assessment to identify critical locations for sustaining ecological connectivity and providing multiple ecosystem services within the ecological networks. Ecological sources were, thus, identified, and their temporal trends were assessed for the years 2002, 2013, and 2022.

Method: In order to meet the research objectives, InVEST software was used to model ecosystem services, including carbon sequestration, flood retention, and habitat quality. The results of these models were integrated using the fuzzy weighted overlay method. Subsequently, the core areas that were determined by the MSPA method were integrated with the regions that provided the most ecosystem services. Temporal changes in these areas were then analyzed by examining 20 years of data. To provide a thorough method aimed at locating regions that have not been impacted by human-induced degradation, a set of threat factors were also used in the habitat quality mapping process, in which the use of the Nighttime Light Index and Impervious Surface Index specifically played a pivotal role in identifying high-quality habitats.

Results: According to the derived results of the temporal change analysis, it was demonstrated that ecological sources shrank by 29,053 hectares during the study period, and the counties of Abbasabad, Chalous, and Nowshahr witnessed the highest declines. The analysis of land cover changes in 2002, 2013, and 2022 revealed that built-up areas increased by 12,473 hectares and agricultural land by 7,156 hectares, while forest area decreased by 32,723 hectares. Moreover, the results of the morphological spatial pattern analysis indicated that the core class had the largest share in the study area during the period of investigation. The results of this study also illustrated that in 20 years, the habitat quality within the area had declined. The greatest reduction in habitat quality occurred in the northern coastal areas of the study area, which were influenced by human-made land cover and road networks, acting as serious threats to wildlife.

Conclusions: According to the results, assessing how multiple ecosystem services are distributed spatially is crucial in effective conservation planning. These findings can play an important role in planning and conserving key patches of the Hyrcanian forests and assist policymakers and managers in the sustainable management of these areas.

Cite this article: Karimi, S., Amiri, M. J. & Yavari, A. R. (2026). Analysis of Spatio- Temporal Changes in Ecological Sources Identified Using the Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) Method and Ecosystem Services Assessment in the Hyrcanian Forests. *Journal of Environmental Studies, 51* (4), 411-430. http//doi.org/10.22059/jes.2025.387395.1008564

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

http//doi.org/10.22059/jes.2025.387395.1008564

Introduction

In recent decades, habitat destruction caused by land cover changes has challenged forests' capacity to sustain their historical functions through fragmentation. Habitat fragmentation causes reduced connectivity and isolates the habitats into smaller and discrete patches surrounded by a matrix of human-altered land cover. Identifying ecological source areas is vital in improving landscape connectivity and building an ecological network. One of the methods that has been increasingly adopted for this purpose in recent years is the Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA). Since the MSPA method can only evaluate patches from a structural and morphological perspective, one effective approach to enhance the process of identifying ecological sources is to use the ecosystem services assessment. Hence, in this paper, a combination of the MSPA method and ecosystem service assessment was applied to identify ecological source areas in the Hyrcanian Forest region.

Method

The study area is located in northern Iran and in the western part of Mazandaran Province. Encompassing eight counties covering an area of 7,283 square kilometers, this watershed is located between latitudes 36°32′ to 36°36′ and longitudes 50°20′ to 52°18′.

In order to classify land cover, satellite images of Landsat 8 in the year 2022 and Landsat 7 in the years 2002 and 2013 were used. The Support Vector Machine (SVM) approach was adopted to classify the satellite images into six distinct categories, including water, built-up land, rangeland, agricultural land, forest, and barren land. The study area's land cover map was first converted into a binary image using the parameters of the Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA) approach. Other types of land cover were assigned as the background in this conversion, whereas forest lands were defined as the foreground. This technique separates the landscape into seven spatial pattern classes: core, islet, perforation, edge, bridge, loop, and branch. This was done through applying four mathematical operations to the image: erosion, expansion, opening, and closing (Vogt et al., 2007).

To meet the research objectives, three ecosystem services were selected for evaluation: carbon storage and sequestration, flood risk reduction, and habitat quality. These services were modeled using the InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs). Through this process, three raster maps representing carbon storage, flood prevention, and habitat quality were generated. A fuzzy weighted overlay was then applied in ArcGIS 10.8 software to produce a map showing the spatial distribution of ecosystem services in the study area. The Breaking Point approach was then used to categorize this map into three levels: high importance, medium importance, and low importance. Finally, the highest priority category (high importance) was extracted from the core class, which was identified in the MSPA step and selected as ecological sources.

Results

Analysis of land cover in the years 2002, 2013, and 2022 revealed that forests accounted for the largest area of the region in each year, followed by rangelands. An analysis of these changes indicated that over the 20-year period, built-up and agricultural areas increased by 124.73 and 71.56 square kilometers, respectively, while forest areas in the region declined significantly by 327.23 square kilometers.

The spatial morphological pattern class map of the study area, which was derived from MSPA analyses for the years 2002, 2013, and 2022, showed that the core class made up approximately 94% of the foreground area and represented the largest area among all classes. It was also demonstrated that only a relatively small

portion of the landscape was covered by bridges serving as structural corridors. Additionally, the area of the branch class, which disrupts corridor connectivity, has increased from 64 hectares in 2002 to 266 hectares in 2022. Isolated forest patches, referred to as islands, have experienced a notable expansion of 175 hectares in recent years. The rise in branch and island classes, coupled with the decline in core area, signified the fragmentation of the forest landscape within the watershed throughout the analyzed timeframe. Finally, the core areas in all three years were extracted to identify ecological sources.

The ecosystem services assessment results indicated a diminishing trend within the 20-year period for the studied ecosystem services, specifically carbon sequestration, runoff retention, and habitat quality. Carbon storage in the watershed experienced a 17% reduction in 2022 relative to 2002. A 29 percent decline in runoff retention was observed over the past two decades. During this period, the average habitat quality underwent a downward trend, whereas the average rate of habitat degradation increased dramatically. The spatial distribution of all three ecosystem services in the study area was nearly identical. The central part of the watershed, dominated by forest cover, illustrated high capacity for carbon sequestration, runoff retention, and habitat quality. Throughout the last two decades, the number of ecological sources decreased by 1,220 patches, and their total area dropped by 29,053 hectares. According to the percentage of changes in the area of ecological sources in the counties of the study area over the mentioned period of time, Abbasabad underwent a decrease of 21.6%, Chalous 20.2%, Nowshahr 17.1%, Kelardasht 10.7%, Tonekabon 6.4%, Ramsar 5.5%, and Noor 3.8%.

Conclusions

Findings of the study depict that the ecological sources experienced a 67% reduction in number and a 9% decline in total area during 20 years. The primary drivers of these changes are the expansion of agricultural and built-up areas, along with the reduction in forest cover. The growing structural fragmentation of the forest landscape, evidenced by the shrinking forest area and the increase in isolated forest patches, poses a serious threat to the region's biodiversity and ecological functions. The counties of Abbasabad, Chalous, and Nowshahr witnessed the most significant changes, with declines of 21%, 20%, and 17%, respectively, in the area of ecological sources. This trend highlights the urgent need for conservation planning and sustainable management of these sources in the mentioned counties. These measures could include increasing monitoring of land use changes, imposing strict restrictions on forest destruction, implementing vegetation restoration projects, and educating local communities about the value of protecting ecological sources. In order to compare the outcomes of different services, future studies are recommended to model ecological sources using a wider range of ecosystem services. The findings of this study could be crucial in the planning and conservation of key patches in the Hyrcanian forests and assist policymakers and managers in the sustainable management of these areas.

Author Contributions

Sepideh Karimi: Conceptualization, Methodology, Software, Visualization, Writing, Reviewing and Editing, Mohammad Javad Amiri: Data Curation, Conceptualization, Reviewing and Editing, Ahmad Reza Yavari: Data Curation, Reviewing and Editing.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors

Acknowledgements
The authors express their gratitude to all the participants involved in this study.

Ethical considerations
The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding
This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

نشریه محیط شناسی
دوره ۵۱، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۴
Homepage: http://Jes.ut.ac.ir
شاپای چاپی: ۸۶۲۰– ۱۰۲۵
شاپای الکترونیکی: ۶۹۲۲– ۲۳۴۵
University of Tehran Press

تحلیل تغییرات زمانی–مکانی منابع اکولوژیکی شناسایی شده با روش تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی و ارزیابی خدمات اکوسیستمی جنگل‌های هیرکانی

سپیده کریمی[۱] ، محمدجواد امیری[۲]✉، احمدرضا یاوری[۳]

۱.گروه برنامه‌ریزی، مدیریت محیط‌زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: sepidehkarimi@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mjamiri@ut.ac.ir
۳. گروه برنامه‌ریزی، مدیریت محیط‌زیست و HSE، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ayavari@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰
تاریخ‌انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

کلیدواژه‌ها:
جنگل‌های هیرکانی،
خدمات اکوسیستمی،
شبکه‌های اکولوژیکی،
منابع اکولوژیکی.

چکیده

هدف: کاهش سطح و کیفیت زیستگاه و قطعه‌قطعه شدن اکوسیستم‌های جنگلی از جمله تهدیدات جدی و نگران‌کننده‌ای هستند که به کاهش تاب‌آوری این اکوسیستم‌ها منجر می‌شوند. تعیین و شناسایی مناطق منابع اکولوژیکی، نقش کلیدی در بهبود اتصال چشم‌انداز و ایجاد شبکه‌های اکولوژیکی دارد. این مناطق نه‌تنها زیستگاه‌های مناسبی برای موجودات زنده فراهم می‌کنند، بلکه در حفظ فرآیندها و عملکردهای اکولوژیکی نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. در این مطالعه، با هدف شناسایی مناطق کلیدی برای حفظ اتصال اکولوژیکی و ارائه خدمات اکوسیستمی چندگانه در شبکه اکولوژیکی، از ترکیب روش تحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی (MSPA) و ارزیابی خدمات اکوسیستمی استفاده شد. بر این اساس، منابع اکولوژیکی شناسایی و روند تغییرات آنها در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ مورد ارزیابی قرار گرفتند.

روش: برای این منظور، خدمات اکوسیستمی شامل ترسیب کربن، کنترل سیلاب و کیفیت زیستگاه با استفاده از نرم‌افزار InVEST مدل‌سازی شدند. سپس نتایج این مدل‌سازی‌ها با بهره‌گیری از روش وزنی فازی تلفیق شدند. در گام بعدی، مناطقی که ارائه‌دهنده بیشترین خدمات اکوسیستمی بودند با مناطق هسته شناسایی شده از طریق روش تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی (MSPA) ادغام گردیدند. علاوه بر این، در تهیه نقشه کیفیت زیستگاه، مجموعه‌ای از عوامل تهدید و تأثیرگذار بر کیفیت زیستگاه مورد استفاده قرار گرفت تا رویکردی جامع ارائه شود که بر شناسایی مناطقی تمرکز دارد که از اثرات مخرب انسانی مصون مانده‌اند. در این راستا از داده‌های شاخص نور شب و سطوح نفوذناپذیر که نقشی کلیدی در شناسایی زیستگاه‌های با کیفیت بالا ایفا می‌کنند، نیز استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج تحلیل تغییرات زمانی نشان داد که منابع اکولوژیکی طی دوره زمانی مورد مطالعه، به میزان ۲۹۰۵۳ هکتار کاهش یافته‌اند و از نظر مکانی، بیشترین کاهش در شهرستان‌های عباس‌آباد، چالوس و نوشهر مشاهده شده است. بررسی تغییرات پوشش زمین نشان داد که مساحت طبقات ساخته شده ۱۲۴۷۳ هکتار و اراضی کشاورزی ۷۱۵۶ هکتار در این سال‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است، در حالی که مساحت جنگل‌ها با کاهشی معادل ۳۲۷۲۳ هکتار روبه‌رو بوده است. علاوه بر این، نتایج تحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی نشان داد که کلاس هسته در سال‌های مورد بررسی بیشترین سهم را در منطقه مورد مطالعه داشته است.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج، ارزیابی نحوه توزیع فضایی خدمت اکوسیستمی چندگانه برای برنامه‌ریزی مؤثر حفاظت بسیار حیاتی است. یافته‌های این تحقیق می‌توانند نقش مهمی در برنامه‌ریزی و حفاظت از مناطق کلیدی در شبکه اکولوژیکی جنگل‌های هیرکانی ایفا کنند و به سیاست‌گذاران و مدیران در جهت مدیریت پایدار این مناطق کمک نمایند.

استناد: کریمی، سپیده؛ امیری، محمدجواد و یاوری، احمدرضا (۱۴۰۴). تحلیل تغییرات زمانی–مکانی منابع اکولوژیکی شناسایی شده با روش تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی و ارزیابی خدمات اکوسیستمی جنگل‌های هیرکانی. *نشریه محیط‌شناسی*، ۵۱(۴)، ۴۱۱-۴۳۰.
http//doi.org/10.22059/jes.2025.387395.1008564

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: http//doi.org/10.22059/jes.2025.387395.1008564

مقدمه

در عصر آنتروپوسن، فعالیت‌های انسانی مانند تغییرات اقلیمی، گسترش گونه‌های مهاجم و تغییر کاربری اراضی موجب تخریب زیستگاه‌ها در جنگل‌ها شده و با افزایش ازهم‌گسیختگی[1] این اکوسیستم‌ها، توانایی آن‌ها را در حفظ عملکردهای گذشته به چالش کشیده است (Forzieri et al., 2022). ازهم‌گسیختگی به معنای جداسازی زیستگاه‌ها به قطعات کوچک‌تر و منزوی‌تر است که در میان ماتریسی از پوشش زمین تغییر یافته احاطه شده‌اند. این فرآیند باعث کاهش یکپارچگی جنگل‌ها شده و با تغییر در پیکربندی فضایی، اتصال اکولوژیکی را در سطح سیمای سرزمین دگرگون می‌کند (Grantham et al., 2020).

شبکه‌های اکولوژیکی ابزاری کلیدی برای مقابله با ازهم‌گسیختگی سیمای سرزمین، ارتقای یکپارچگی و اتصال و حفظ تاب‌آوری اکوسیستم‌ها ارائه می‌دهند (Dos Santos et al., 2020). این شبکه‌های اکولوژیکی به گروه‌هایی از اکوسیستم‌های هم نوع اشاره دارند که با ماتریس سیمای سرزمین اطراف تعامل داشته و از طریق جریان‌های زیستی به هم متصل هستند و یک سیستم فضایی منسجم را تشکیل می‌دهند (Opdam et al., 2006). این شبکه‌ها از لکه‌های زیستگاهی که به‌عنوان نودها[2] شناخته می‌شوند و ارتباطات بین آن‌ها که به عنوان یال‌ها[3] تلقی می‌شوند، تشکیل شده‌اند (Urban & Keitt, 2001). منابع اکولوژیکی به‌عنوان پایه‌ای برای ساخت شبکه‌های اکولوژیکی محسوب می‌شوند و شامل لکه‌های زیستگاهی هستند که فرآیندهای اکولوژیکی را تقویت کرده، یکپارچگی اکوسیستم را حفظ می‌کنند و زیستگاه‌های مناسبی برای موجودات زنده فراهم می‌سازند. این منابع همچنین خدمات اکوسیستمی با کیفیت بالا ارائه می‌دهند (Peng et al., 2018).

خدمات اکوسیستمی منافعی هستند که انسان‌ها مستقیم یا غیرمستقیم از عملکردهای طبیعی اکوسیستم‌ها دریافت می‌کنند. این خدمات شامل فرآیندهایی مانند تنظیم آب‌وهوا، حفظ تنوع‌زیستی، تولید منابع‌طبیعی، کنترل فرسایش و ارائه فضاهای فرهنگی و تفریحی است که برای رفاه و پایداری جوامع انسانی ضروری هستند(Millennium Ecosystem Assessment, 2005). تغییرات سریع در کاربری و پوشش اراضی اکوسیستم‌های طبیعی، باعث دگرگونی سیمای سرزمین شده، عملکرد اکوسیستم را مختل می‌کند و ظرفیت آن را برای ارائه خدمات اکوسیستمی تغییر می‌دهد (Fang et al., 2022).

جنگل‌های هیرکانی، به‌عنوان یکی از غنی‌ترین اکوسیستم‌های جهان از نظر تنوع‌زیستی، همچون یک کمربند سبز بر روی دامنه‌های شمالی رشته‌کوه البرز و در امتداد مرزهای جنوبی دریای خزر گسترده شده‌اند و دارای مجموعه‌ای منحصربه‌فرد از گونه‌های بومی هستند. با این حال، در دهه‌های اخیر با چالش‌های جدی از جمله تغییر کاربری زمین و افزایش ازهم‌گسیختگی مواجه بوده‌اند (Hosseini et al., 2024). روند تخریب و قطعه‌قطعه شدن این زیستگاه‌ها می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری برای گونه‌های بومی و فرآیندهای اکولوژیکی وابسته به آنها به همراه داشته باشد. بنابراین، شناسایی مناطق کلیدی جهت حفاظت در جنگل‌های هیرکانی که علاوه بر اهمیت ساختاری، نقش مؤثری در ارائه خدمات ارزشمند اکوسیستمی دارند، امری ضروری است.

پیشینهٔ پژوهش

رویکرد تعیین مناطق منابع اکولوژیکی نقش مهمی در بهبود اتصال سیمای سرزمین و ایجاد یک شبکه اکولوژیکی دارد (Guan et al., 2023). برای این منظور، روش‌های متعددی وجود دارد، از جمله استفاده از ویژگی‌های نود (Martensen et al., 2017)، زیرا نودها دارای ویژگی‌هایی مانند مختصات مکانی، اندازه و کیفیت هستند که از این ویژگی‌ها می‌توان برای تعیین منابع اکولوژیکی استفاده کرد (Urban & Keitt, 2001). انتخاب مستقیم لکه‌های جنگلی، مناطق حفاظت شده یا ذخایر طبیعی به‌عنوان منابع اکولوژیکی (Tannier et al., 2016). تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی[4] (MSPA) (Vogt et al., 2007) اخیراً

1. Fragmentation
2. Nodes
3. Edges
4. Morphological Spatial Pattern Analysis

به‌طور گسترده‌ای در تحقیقات استفاده شده است (An et al., 2020). همچنین می توان به انتخاب منابع اکولوژیکی با استفاده از روش‌های کمّی‌سازی خدمات اکوسیستمی (Zhai and Huang, 2022; Guan et al., 2023) اشاره کرد.

روش تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی (MSPA) که عمدتاً بر اتصال ساختاری متمرکز است، به‌عنوان یک روش تخصصی برای تحلیل سیمای سرزمین اکولوژیکی و زیست‌محیطی توسط وت و همکاران در سال ۲۰۰۷ توسعه داده شد. هدف اصلی از ایجاد این روش فراهم آوردن ابزاری بود که بتواند به‌طور دقیق و جامع الگوهای فضایی پیچیده و ارتباطات بین مناطق مختلف در یک سیمای سرزمین را شناسایی و توصیف کند (Vogt et al., 2007).

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه شناسایی منابع اکولوژیکی و مناطق کلیدی به‌منظور حفظ پایداری و یکپارچگی اکوسیستم انجام شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۱۸ توسط پنگ و همکاران با هدف شناسایی و حفاظت از مکان‌های کلیدی برای پایداری اکولوژیکی انجام شد، منابع اکولوژیکی از طریق تحلیل خدمات اکوسیستمی شامل حفاظت خاک، حفاظت آب و ذخیره کربن شناسایی گردیدند (Peng et al., 2018). تحقیقی که در سال ۲۰۲۲ توسط ژی و هوآنگ انجام شد، به بررسی شبکه‌های اکولوژیکی پرداخته و محدوده‌های فضایی و مکان‌های اولویت‌دار برای حفاظت و بازسازی اکولوژیکی را تعیین کرده است. در این تحقیق، منابع اکولوژیکی با استفاده از روش تحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی (MSPA) و ارزیابی کیفیت زیستگاه شناسایی شدند (Zhai and Huang, 2022). همچنین، در مطالعه‌ای که در سال ۲۰۲۳ توسط گوآن و همکاران انجام شد، منابع اکولوژیکی با بهره‌گیری از روش تلفیق خدمات اکوسیستمی شناسایی گردیدند (Guan et al., 2023). سادات و همکاران در سال ۱۳۹۹ از روش MSPA برای شناسایی زیستگاه قرقاول در گیلان استفاده کردند. در پژوهش خیرخواه قهی و همکاران (۱۴۰۰) از ارزیابی کیفیت زیستگاه مدل InVEST برای تعیین لکه‌های با مطلوبیت بالا برای زیستگاه و جابه‌جایی گونه قوچ و میش در منطقه حفاظت شده ورجین استفاده شد.

در میان پژوهش‌های انجام شده، مطالعه‌ای که از روش تلفیقی MSPA و ارزیابی خدمات اکوسیستمی شامل ترسیب کربن، کنترل رواناب و همچنین ارزیابی کیفیت زیستگاه استفاده کرده باشد، انجام نشده است. از آنجا که روش MSPA تنها قادر به ارزیابی اهمیت لکه‌ها از نظر ساختاری و مورفولوژیکی می‌باشد (Zhai & Huang, 2022)، یکی از روش‌های موثر در بهبود فرآیند شناسایی منابع اکولوژیکی، استفاده از روش ارزیابی خدمات اکوسیستمی است تا لکه‌هایی در سیمای سرزمین که علاوه بر اهمیت ساختاری خود، ارائه‌دهندگان اصلی خدمات اکوسیستمی نیز هستند، شناسایی شوند. با توجه به اهمیت این موضوع، انجام این مطالعه در جنگل‌های هیرکانی امری ضروری است. بنابراین، مطالعه حاضر، با هدف شناسایی مناطق کلیدی برای حفظ اتصال اکولوژیکی و ارائه خدمات اکوسیستمی و تحلیل تغییرات زمانی و مکانی آنها در جنگل‌های هیرکانی انجام شده است. برای این منظور، از روش ترکیبی تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی و ارزیابی خدمات اکوسیستمی برای شناسایی منابع اکولوژیکی جنگل‌های هیرکانی استفاده شد. سپس روند تغییرات این منابع طی یک دوره ۲۰ ساله تجزیه‌وتحلیل شد. علاوه بر این، در تهیه نقشه کیفیت زیستگاه، مجموعه‌ای از عوامل تهدیدزا و تأثیرگذار بر کیفیت زیستگاه مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، کیفیت زیستگاه به حضور یا عدم‌حضور تهدیدها وابسته است و بر شناسایی مناطقی تمرکز دارد که از اثرات مخرب انسانی مصون مانده‌اند. همچنین، برای نخستین بار در فرآیند تهیه این نقشه، شاخص‌های نور شب[1] و شاخص سطوح نفوذناپذیر[2] به‌عنوان عوامل کلیدی در نقشه‌سازی تهدیدها مورد استفاده قرار گرفتند.

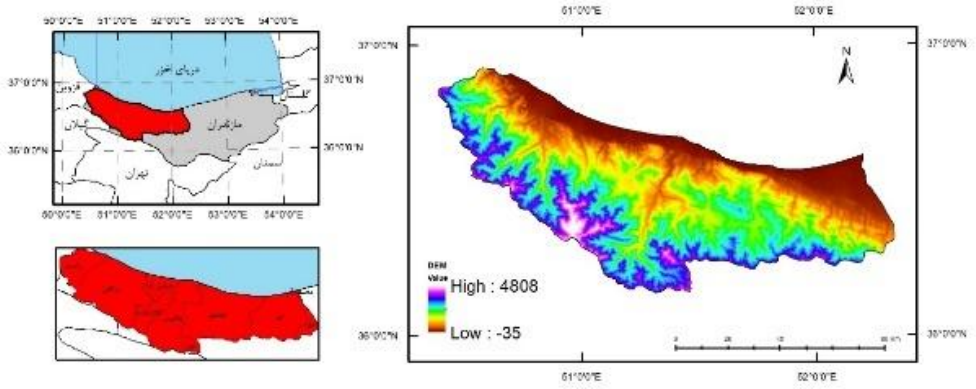
روش‌شناسی پژوهش

- معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شمال ایران و غرب استان مازندران واقع شده است. این حوضه آبخیز با مساحت ۷۲۸۳ کیلومتر مربع،

1. Night light Index
2. Normalized Difference Impervious Surface Index

بین عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه و طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۲۰ دقیقه، شهرستان‌های رامسر، تنکابن، عباس‌آباد، کلاردشت، چالوس، نوشهر و بخش‌هایی از نور را پوشش می‌دهد. ارتفاع منطقه از ۳۵- متر تا ۴۸۰۸ متر از شمال به جنوب متغیر است و میانگین ارتفاع ۱۵۱۲ متر می‌باشد. اقلیم منطقه معتدل و مرطوب است و میانگین بارندگی سالانه ۹۷۷ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۴/۷ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۱).



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق)

- مدلسازی پوشش زمین

جهت طبقه‌بندی پوشش زمین در سال ۲۰۲۲ تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و تصاویر لندست ۷ برای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۰۲ مربوط به منطقه مورد مطالعه که پوشش ابرناکی کمتر از پنج درصد داشتند، در سه فریم تهیه شدند. سپس از نرم‌افزار ENVI5.6 جهت انجام مراحل پیش‌پردازش و همچنین طبقه‌بندی تصاویر استفاده شد. به این ترتیب، داده‌های تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از روش ماشین بردار پشتیبان[1] به شش طبقه جنگل، مرتع، زمین کشاورزی، زمین ساخته شده، بایر و آب طبقه‌بندی شدند.

- شناسایی منابع اکولوژیکی با استفاده از روش MSPA

بر اساس تنظیمات روش تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی، نقشه پوشش زمین منطقه مورد مطالعه ابتدا به یک تصویر دودویی تبدیل شد. در این تبدیل، اراضی جنگلی به‌عنوان پیش‌زمینه تعیین شدند، در حالی که سایر طبقات پوشش زمین به‌عنوان پس‌زمینه اختصاص یافتند. برای انجام MSPA در این مطالعه از نرم‌افزار Guidos Toolbox استفاده شد (Vogt et al., 2007). طبقه‌بندی الگوهای نامبرده و معانی اکولوژیکی آنها در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱. طبقه‌بندی مدل تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی و معانی اکولوژیکی آن‌ها (Vogt et al., 2007)

طبقه الگو	معنی اکولوژیکی
هسته (Core)	لکه‌های بزرگ زیستگاه که می‌توانند به‌عنوان منبع مورد استفاده قرار گیرند و زیستگاه‌ها یا مکان‌های مهاجرت را برای حیات‌وحش فراهم کنند.
جزیره کوچک (Islet)	لکه‌های کوچکی که به‌صورت ضعیف به یکدیگر متصل هستند و مکانی را برای گسترش و ارتباط گونه‌ها فراهم و جریان مواد و انرژی را تقویت می‌کنند.
نفوذ (Perforation)	منطقه انتقال بین منطقه هسته و سایر مناطق غیر سبز: لبه لکه داخلی، که دارای اثرات لبه است.
لبه (Edge)	منطقه انتقال بین هسته و بستر سیمای سرزمین؛ دارای اثرات لبه است و از محیط‌زیست محافظت می‌کند.
پل (Bridge)	کریدور متصل‌کننده دو هسته مجاور؛ مسیرهای لازم برای انتشار گونه‌ها و تبادل انرژی بین لکه‌های مجاور هسته را فراهم می‌کند.
حلقه (Loop)	منطقه متصل‌کننده کریدورهای داخلی یک هسته هستند؛ دسترسی به انتشار گونه‌ها و تبادل انرژی در هسته را فراهم می‌کنند.
شاخه (Branch)	مناطقی هستند که تنها ازیک‌طرف به لبه ، پل ، حلقه یا نفوذ، متصل هستند.

1. Support Vector Machine

- شناسایی منابع اکولوژیکی با روش طبقه‌بندی خدمات اکوسیستمی

با توجه به هدف تحقیق از ارزیابی خدمات اکوسیستمی، ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه و داده‌های موجود، خدمت اکوسیستمی ذخیره‌سازی و ترسیب کربن، کاهش خطر سیلاب و کیفیت زیستگاه برای ارزیابی انتخاب شدند. مدلسازی این خدمات با استفاده از مدل InVEST[1] انجام شد. این مدل به کاربران اجازه می‌دهد که تأثیرات تغییرات در زمین، آب و دیگر عوامل محیطی را بر خدمات اکوسیستمی و در نهایت بر رفاه انسان‌ها تحلیل کنند (https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest).

- ترسیب و ذخیره کربن

مدل ذخیره‌سازی و جذب کربن InVEST میزان کربن ذخیره شده در حال حاضر در یک سیمای سرزمین در طول زمان را با استفاده از نقشه‌های کاربری و پوشش زمین و داده‌های مربوط به چهار مخزن کربن، یعنی زیست‌توده موجود در بالای سطح زمین، زیست‌توده زیرزمین، خاک و مواد آلی مرده تخمین می‌زند (Sharp et al., 2018). مقدار جذب کربن در طول زمان برای یک نوع خاص از پوشش زمین با استفاده از رابطه ۱ تعیین می‌شود. در این مطالعه، مقادیر برای تمام مخازن کربن در شش کلاس پوشش زمین بر اساس مطالعات مشابه ارائه شده است (Asadolahi et al., 2017; Sadat et al., 2023).

$$C_i = C_{i\,above} + C_{i\,below} + C_{i\,soil} + C_{i\,dead} \qquad C_{total} = \sum_{i=1}^{n} C_i \times S_i$$ رابطه ۱)

در این فرمول‌ها Ci نشان‌دهنده تراکم کربن کل خاک و موجودات از نوع زمین i است. Si نشان‌دهنده مساحت کل کاربری زمین نوع i است. n تعداد کل انواع کاربری زمین را نشان می‌دهد.

- جلوگیری از سیلاب

مدل کاهش خطر سیلاب InVEST میزان کاهش رواناب را محاسبه می‌کند. این مدل مقدار روانابی که در هر پیکسل نسبت به حجم طوفان حفظ می‌شود، تخمین می‌زند. رواناب هر پیکسل، که توسط نوع کاربری و پوشش زمین و ویژگی‌های خاک تعریف می‌شود، می‌تواند با استفاده از روش عدد منحنی (Curve Number) برآورد شود (Sharp et al., 2018). اعداد منحنی برای هر نوع پوشش زمین با استفاده از منبع (USDA, 1986) و رابطه شماره ۲ استخراج شد.

$$Q_{p,i} = \begin{cases} \dfrac{(\mathrm{P} - \lambda S_{max,i})^2}{P + (1-\lambda)S_{max,i}} \; if \; P > \lambda . S_{max,i} \\ 0 \quad otherwise \end{cases}$$ رابطه ۲)

در این فرمول P عمق طوفان طراحی شده بر حسب میلی‌متر، Smax,i میزان پتانسیل نگهداشت بر حسب میلی‌متر و λSmax عمق بارندگی مورد نیاز برای شروع رواناب می‌باشد.

- کیفیت زیستگاه

کیفیت زیستگاه به شرایط و سلامت کلی یک زیستگاه اشاره دارد و نشان‌دهنده توانایی آن برای حفظ و حمایت از گونه‌های مختلف است. کیفیت زیستگاه با عواملی مانند حضور یا عدم‌حضور تهدیدات، سطح تنوع‌زیستی و وضعیت پوشش گیاهی در اکوسیستم اندازه‌گیری می‌شود (Sharp et al., 2016).

مدل کیفیت زیستگاه InVEST، امکان ارزیابی وضعیت زیستگاه و تغییرات آن را به‌عنوان نماینده‌ای برای شاخص‌های دقیق‌تر وضعیت تنوع‌زیستی فراهم می‌کند. اگر تغییرات زیستگاه به‌عنوان نماینده‌ای از تغییرات ژنتیکی، گونه‌ای یا اکوسیستمی در نظر گرفته شود، کاربر این فرض را می‌پذیرد که مناطق با زیستگاه با کیفیت بالا، بهتر می‌تواند از تمام سطوح تنوع‌زیستی حمایت

1. Integrated Valuation of Ecosystem Service and Tradeoffs

کند. بنابراین کاهش وسعت و کیفیت زیستگاه در طول زمان به معنای کاهش پایداری و مقاومت می‌باشد که نشان می‌دهد گستردگی و عمق تنوع‌زیستی در منطقه کاهش یافته است (Sharp et al., 2018).

مدل کیفیت زیستگاه InVEST داده‌های مربوط به کاربری و پوشش زمین را با تهدیدات تنوع‌زیستی ترکیب می‌کند تا نقشهٔ کیفیت زیستگاه را ایجاد کند. این نقشه‌ها بر اساس فاصله، شدت و حساسیت زیستگاه نسبت به منابع تهدید تهیه می‌شوند. مقادیر کیفیت زیستگاه و تخریب زیستگاه بر اساس رابطه شماره ۳ محاسبه می‌شوند.

رابطه ۳)
$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + K^2}\right)$$

در اینجا، Qxj کیفیت زیستگاه x در پوشش/کاربری زمین نوع j و تناسب زیستگاه Hj نشان‌دهنده درجه مناسب بودن زیستگاه است. Dxj به درجه کاهش کیفیت زیستگاه در شبکه x و نوع زیستگاه j اشاره دارد. k یک ثابت نیمه اشباع است.

در این تحقیق، لایه‌های جمعیت، جاده، پوشش ساخته شده، پوشش کشاورزی، نقشه شاخص پوشش گیاهی، شاخص نور شب و شاخص سطوح نفوذناپذیر به‌عنوان عوامل تهدید برای مدل‌سازی وارد مدل شدند.

شاخص نور شب (NTL)، به داده‌های بر گرفته از تصاویر ماهواره‌ای اشاره دارد که میزان تابش نور مصنوعی منتشر شده توسط شهرها، مناطق صنعتی، جاده‌ها و زیرساخت‌های انسانی در سطح زمین را در طول شب اندازه‌گیری می‌کند (Yang et al., 2020). حیات‌وحش معمولاً از مناطقی که دارای شدت بالای نور مصنوعی هستند، در حین فعالیت‌های خود اجتناب می‌کنند و عواقب مواجهه با این نور می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر اتصال زیستگاهی داشته باشد (Beier, 2006).

شاخص تفاضل نرمال شده سطح نفوذناپذیر (NDISI)، یک شاخص طیفی است که برای شناسایی و اندازه‌گیری سطوح نفوذناپذیر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده می‌شود. مناطق نفوذناپذیر مانند ساختمان‌های بتنی، جاده‌ها و پیاده‌روها که به‌عنوان گسترش‌های انسان‌ساخت ناشی از توسعه شهری تعریف می‌شوند، تأثیر قابل‌توجهی بر محیط‌زیست، شبکه فضاهای سبز و سلامت زیستگاه‌ها دارند (Xu, 2010).

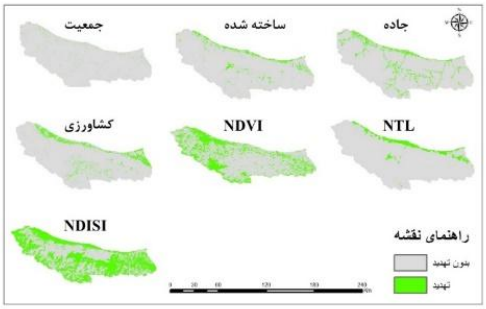
داده‌های مربوط به عوامل تهدید و حساسیت انواع زیستگاه به هر تهدید (جدول ۲) با استفاده از تحقیقات مرتبط (Asadolahi et al., 2017; Sharp et al., 2018; Ansari et al., 2023) و نظر کارشناسی تعیین گردید. در این جدول هر چه زیستگاه حساس‌تر باشد عدد بزرگتری را به خود اختصاص می‌دهد. عوامل تهدید استفاده شده در ساخت نقشه کیفیت زیستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. حساسیت زیستگاه‌ها نسبت به عوامل تهدید در انواع مختلف پوشش زمین (منبع: یافته‌های تحقیق)

تهدیدها	حداکثر فاصله	وزن	حساسیت به تهدید					
			کشاورزی	مرتع	جنگل	ساخته شده	بایر	آب
جمعیت	۶	۰/۲۸	۰	۰/۶	۰/۸	۰	۰	۰/۷
کشاورزی	۵	۰/۵	۰	۰/۳	۰/۸	۰	۰	۰/۶
جاده	۴	۰/۵	۰	۰/۶	۰/۸	۰	۰	۰/۵
ساخته شده	۵	۰/۴	۰	۰/۶	۰/۹	۰	۰	۰/۷
NDVI	۴	۰/۲۵	۰	۰/۵	۰/۷	۰	۰	۰/۷
NTL	۴	۰/۲	۰	۰/۵	۰/۷	۰	۰	۰/۶
NDISI	۵	۰/۱	۰	۰/۶	۰/۹	۰	۰	۰/۶

در این فرآیند، سه نقشه رستری ذخیره کربن، جلوگیری از سیلاب و کیفیت زیستگاه ایجاد شد. سپس از ترکیب وزنی فازی در نرم‌افزار ArcGIS 10.8 برای تولید نقشه‌ای که توزیع فضایی خدمات اکوسیستمی را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد، استفاده گردید. این نقشه سپس با استفاده از روش Breaking Point به سه سطح مجزا دسته‌بندی شد: بسیار مهم، متوسط و

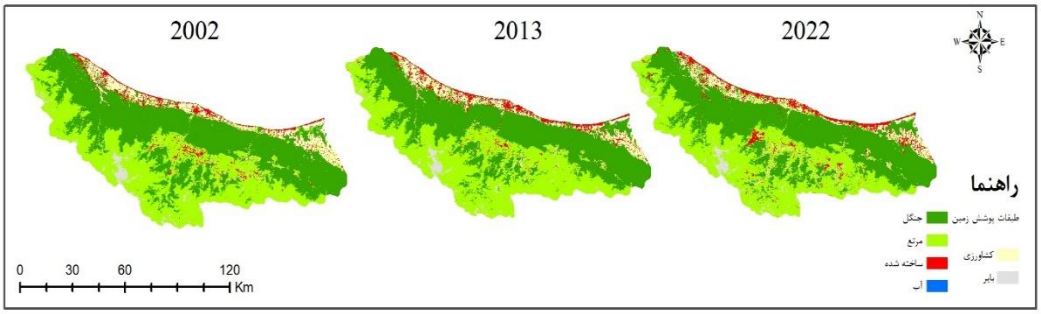
کم‌اهمیت. نقاط شکست در این روش بر اساس توزیع داده‌ها تعیین شدند، به‌طوری که نقاطی با تغییرات ناگهانی در روند توزیع داده‌ها به‌عنوان نقاط شکست در نظر گرفته شدند. در نهایت، طبقه اول (بسیار مهم) در کلاس هسته استخراج شده از مرحله MSPA به‌عنوان منابع اکولوژیکی انتخاب شدند و تغییرات زمانی و مکانی این منابع اکولوژیکی در طول ۲۰ سال مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۲. عوامل تهدید در نظر گرفته شده در ساخت نقشه‌های کیفیت زیستگاه (منبع: یافته‌های تحقیق)

یافته‌های پژوهش

تغییرات پوشش زمین در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ در منطقه مورد مطالعه در شکل ۳ نشان داده شده است. بررسی این تغییرات نشان می‌دهد که در این سال‌ها بیشترین مساحت در منطقه را پوشش جنگل و سپس مراتع به خود اختصاص داده‌اند. نکته مهم در بررسی نتایج حاصل از این تغییرات، افزایش مساحت در طبقه ساخته شده (۱۲۴/۷۳ کیلومتر مربع) و کشاورزی (۷۱/۵۶ کیلومتر مربع) و کاهش قابل توجه در جنگل‌های منطقه مورد مطالعه به میزان ۳۲۷/۲۳ کیلومتر مربع در این دوره ۲۰ ساله است. از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۳، ۱۹۵/۶۳ کیلومترمربع از مساحت جنگل‌ها کاهش یافته و به دنبال آن در فاصله سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲، پوشش جنگلی کاهش مساحت به میزان ۱۳۱/۶ کیلومترمربع را تجربه کرده است. در جدول ۳ مساحت طبقات مختلف پوشش زمین و درصد سهم هر یک در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ در حوضه آبخیز مورد مطالعه به تفکیک آورده شده است.



شکل ۳. تغییرات پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ (منبع: یافته‌های تحقیق)

نقشه کلاس‌های الگوی فضایی مورفولوژیکی منطقه مورد مطالعه، که از محاسبات MSPA در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ به‌دست آمده، در شکل ۴ نشان داده شده است. هسته مهمترین کلاس برای استخراج منابع اکولوژیکی در ساخت شبکه‌های اکولوژیکی است که تأمین‌کننده زیستگاه برای حیات‌وحش محسوب می‌شود. در طی سال‌های مورد بررسی، این کلاس بزرگترین مساحت را داشته و تقریباً ۹۴ درصد از داده‌های پیش‌زمینه را تشکیل داده است. پل‌ها، که به‌عنوان کریدورهای

جدول ۳. مساحت طبقات پوشش زمین و درصد سهم هر طبقه نسبت به کل حوضه آبخیز (منبع: یافته‌های تحقیق)

طبقات پوشش زمین	۲۰۰۲		۲۰۱۳		۲۰۲۲	
	مساحت (Km^2)	درصد سهم هر طبقه	مساحت (Km^2)	درصد سهم هر طبقه	مساحت (Km^2)	درصد سهم هر طبقه
جنگل	۳۴۸۴/۵۲	۴۷/۶۹	۳۲۸۸/۸۹	۴۵/۰۱	۳۱۵۷/۲۹	۴۳/۲۱
مرتع	۲۸۲۸/۱۲	۳۸/۷	۲۹۱۵/۸	۳۹/۹	۲۹۳۷/۵۳	۴۰/۲
کشاورزی	۵۷۸/۳۵	۷/۹۱	۶۲۴/۱۳	۸/۵۴	۶۴۹/۹۱	۸/۸۹
ساخته شده	۲۶۱/۹۳	۳/۵۸	۳۰۹/۱۴	۴/۲۳	۳۸۶/۶۶	۵/۲۹
بایر	۱۴۵/۸۳	۱/۹۹	۱۶۱/۱۳	۲/۲	۱۶۸/۹۳	۲/۳۱
آب	۷/۵۶	۰/۱	۷/۰۲	۰/۰۹	۵/۸۲	۰/۰۷

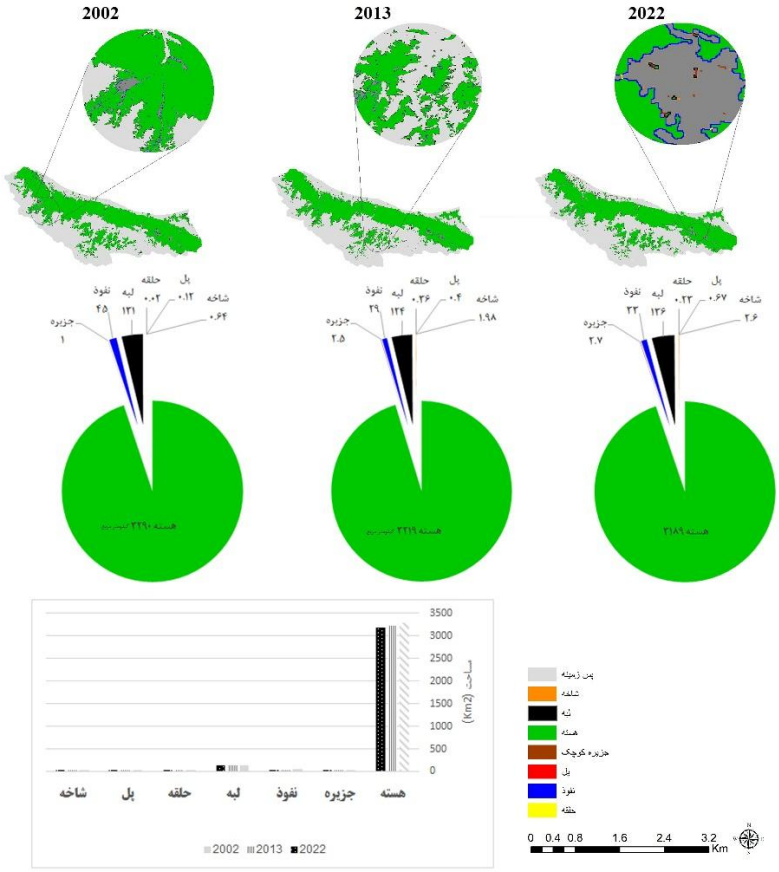
ساختاری در محیط عمل می‌کنند، درصد بسیار ناچیزی از منطقه را پوشش داده‌اند. منطقه لبه ۳/۶، ۳/۷ و ۴ درصد از سیمای سرزمین جنگل را در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ تشکیل داده و به‌عنوان یک بافر انتقالی بین هسته و منطقه بیرونی پس‌زمینه عمل می‌کند. منطقه نفوذ، که مرز داخلی هسته می‌باشد، ۱/۳، ۰/۸ و ۰/۹ درصد از مساحت جنگل را تشکیل داده است. به‌صورت کلی مناطق لبه و نفوذ تحت تأثیر اثرات لبه[1] قرار دارند. همچنین مساحت کلاس شاخه، که به‌عنوان عاملی مزاحم برای اتصال کریدور عمل می‌کند، از ۶۴ هکتار در سال ۲۰۰۲ به ۲۶۶ هکتار در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته است. لکه‌های جدا شده جنگل که به نام جزیره‌ها شناخته می‌شوند، نیز افزایش قابل‌توجهی به میزان ۱۷۵ هکتار در این سال‌ها داشته‌اند. منطقه حلقه به‌عنوان مسیری برای مهاجرت و جریان مواد در داخل همان لکه جنگلی محسوب می‌شود و درصد بسیار ناچیزی از سیمای سرزمین جنگل را شامل شده است. افزایش کلاس‌های شاخه و جزیره به همراه کاهش مساحت هسته‌ها، نشان‌دهنده از هم گسیختگی سیمای سرزمین جنگل در حوضه آبخیز در طول دوره زمانی مورد بررسی می‌باشد. در نهایت مناطق هسته در هر سه سال برای شناسایی منابع اکولوژیکی جدا شدند.

نتایج حاصل از ارزیابی خدمات اکوسیستمی در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده مناطقی هستند که ظرفیت بالاتری برای ارائه خدمات اکوسیستمی دارند و زیستگاه‌های مطلوبی برای گونه‌ها محسوب می‌شوند. این نتایج نشان می‌دهند که خدمات اکوسیستمی مورد بررسی ترسیب کربن، کنترل رواناب و کیفیت زیستگاه، در طول دوره ۲۰ ساله روند کاهشی داشته‌اند.

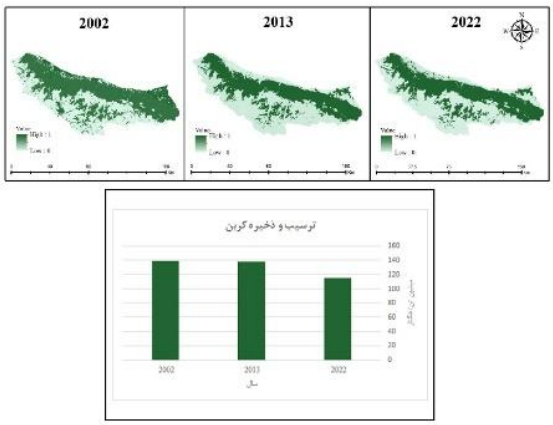
روند نزولی تغییرات مجموع ذخیره کربن در سال‌های مورد بررسی در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد. مقدار کربن ذخیره شده در حوضه آبخیز، در سال ۲۰۰۲ برابر ۱۳۹/۲ میلیون تن بوده است و در سال ۲۰۱۳ این میزان به ۱۳۸/۵۳ میلیون تن کاهش می‌یابد. همچنین ادامه این روند نزولی موجب شده تا میزان کربن ذخیره شده در منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۲ به ۱۱۵/۴ میلیون تن برسد که نشان می‌دهد این خدمت اکوسیستمی ۲۳/۸ میلیون تن معادل ۱۷ درصد کاهش را نسبت به سال ۲۰۰۲ شاهد بوده است.

با توجه به شکل ۶، مقدار نگهداشت رواناب[2] در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ روند نزولی را تجربه کرده است. به‌صورتی که مجموع حجم رواناب نگهداری شده در منطقه مورد مطالعه، کاهش ۲۹ درصد معادل ۱۱۳/۵۱ میلیون مترمکعب را در دوره ۲۰ ساله، شاهد بوده است. این رقم از ۳۹۰/۲۸ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۰۲ به ۳۷۲/۲۸ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۳ رسیده و به دنبال این روند کاهشی، حجم رواناب نگهداری شده به میزان ۲۷۶/۷۸ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۲۲ بوده است. برخلاف قابلیت نگهداشت رواناب که در حوضه آبخیز کاهش یافته، داده‌های خروجی مدل نشان می‌دهد که حجم سیلاب[3] ایجاد شده در

1. Edge effect
2. Runoff retention
3. Flood volume

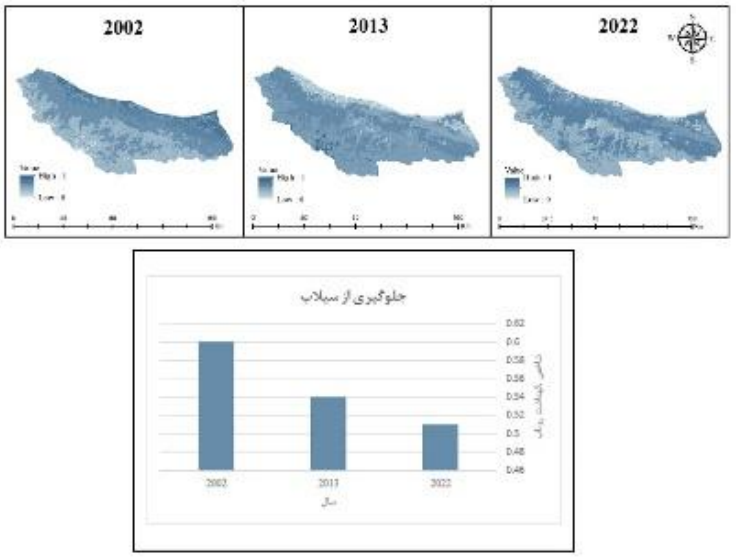


شکل ٤. مقایسه طبقات حاصل از روش تجزیه‌وتحلیل الگوی فضایی مورفولوژیکی در منطقه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق)



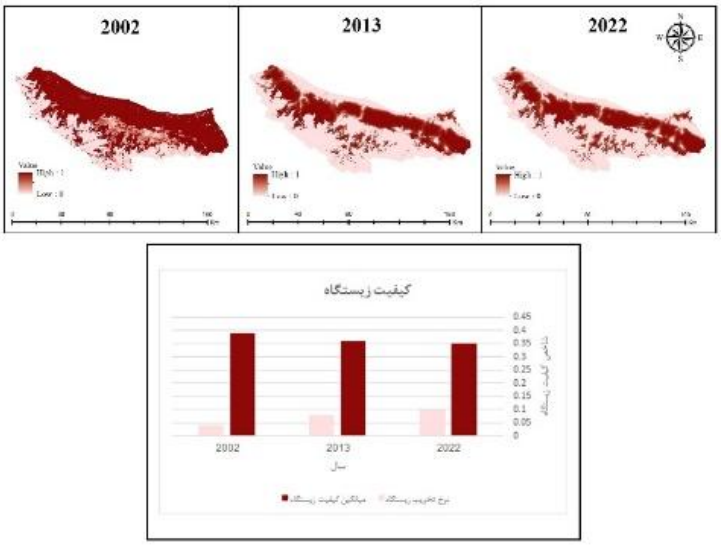
شکل ۵. تغییرات مجموع ذخیره کربن در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ (منبع: یافته‌های تحقیق)

منطقه افزایش یافته است. به‌عبارتی دیگر، در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲، حجم سیلاب در حوضه آبخیز به‌ترتیب برابر ۳۷۳/۸۸، ۳۸۳/۱۷ و ۴۲۹/۰۸ میلیون مترمکعب بوده است که افزایش ۵۵/۲ میلیون مترمکعب را در این دوره ۲۰ ساله داشته است. همچنین شاخص نگهداشت رواناب که نشان‌دهنده میانگین مقادیر نگهداری رواناب در هر حوضه آبخیز می‌باشد، در سال‌ها ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ به ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۵۴ و ۰/۵۱ بوده است.



شکل ٦. تغییرات مقدار نگهداشت رواناب در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲(منبع: یافته‌های تحقیق)

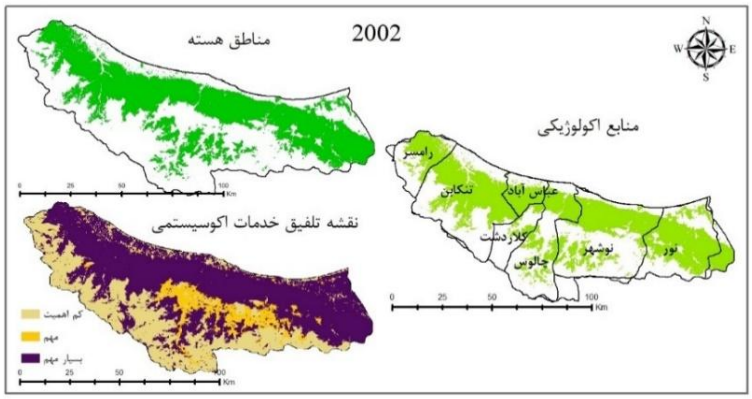
نقشه ارزش کیفیت زیستگاه در شکل ۷ نشان داده شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که ۳۵ درصد از حوضه آبخیز در سال ۲۰۰۲ مطلوبیت زیستگاهی بالاتر از ۰/۷۵ داشته‌اند. این رقم به‌ترتیب برای سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲، ۳۳ و ۳۲ درصد از کل حوضه آبخیز بوده که با روند نزولی همراه است. میانگین کیفیت زیستگاه در سال ۲۰۰۲ برابر ۰/۳۷، ۲۰۱۳ مساوی ۰/۳۵ و در سال ۲۰۲۲ برابر ۰/۳۴ بوده است. همچنین نتایج این برررسی نشان داد که کمترین میزان کیفیت زیستگاه به مناطق ساحلی شمال حوضه آبخیز اختصاص دارد. پوشش اراضی غالب در این قسمت‌ها، مناطق انسان‌ساخت با تراکم بالایی از شبکه حمل‌ونقل جاده‌ای است و به‌عنوان تهدیدی برای حیات‌وحش محسوب می‌شوند. در این راستا، میانگین نرخ تخریب زیستگاه در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ به ترتیب برابر ۰/۰۸، ۰/۱ و ۰/۱۲ بوده است که با افزایش قابل‌توجهی همراه است.



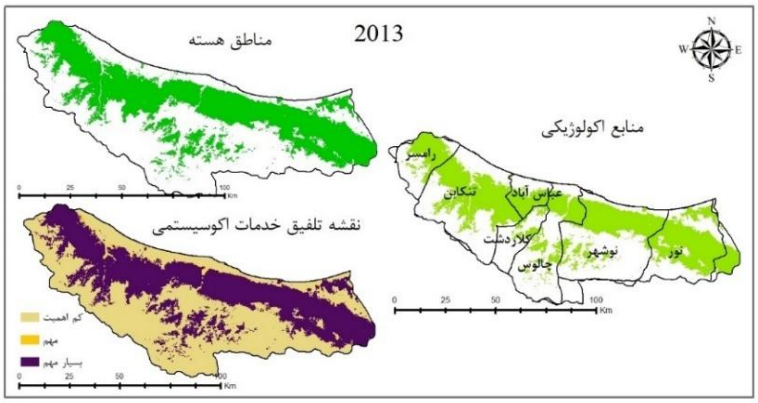
شکل ۷. نقشه ارزش کیفیت زیستگاه در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲(منبع: یافته‌های تحقیق)

وضعیت منابع اکولوژیکی برای سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. مساحت، تعداد و نسبت مساحت این منابع به کل منطقه مورد مطالعه در جدول ۴ بیان گردیده است. مساحت منابع اکولوژیکی در سال ۲۰۰۲،

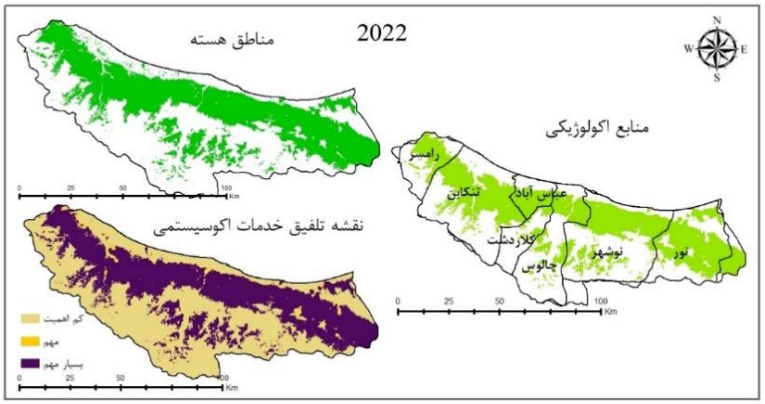
۳۲۸۵۰۱ هکتار بوده که ۴۵ درصد از منطقه مورد مطالعه را تشکیل و شامل ۱۸۰۰ لکه می‌باشد. در سال ۲۰۱۳، مساحت منابع اکولوژیکی به ۳۰۰۷۳۴ هکتار کاهش و این رقم برای سال ۲۰۲۲ به ۲۹۹۴۴۸ هکتار کاهش یافته است. منابع اکولوژیکی، از نظر تعداد، کاهش ۱۲۲۰ لکه و از نظر مساحت، کاهش ۲۹۰۵۳ هکتار را در دوره ۲۰ ساله تجربه کرده‌اند. با توجه به نتایج حاصل از بررسی شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰، درصد تغییرات مساحت منابع اکولوژیکی در شهرستان‌های منطقه مورد مطالعه طی بیست سال گذشته، شهرستان عباس‌آباد ۲۱/۶ درصد کاهش، چالوس ۲۰/۲ درصد کاهش، نوشهر ۱۷/۱ درصد کاهش، کلاردشت ۱۰/۷ درصد کاهش، تنکابن ۶/۴ درصد کاهش، رامسر ۵/۵ درصد کاهش و نور ۳/۸ درصد کاهش را تجربه کرده‌اند.



شکل ۸. منابع اکولوژیکی منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۰۲ (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۹. منابع اکولوژیکی منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۱۳ (منبع: یافته‌های تحقیق)



شکل ۱۰. منابع اکولوژیکی منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۲۲ (منبع: یافته‌های تحقیق)

جدول ٤. مساحت، تعداد لکه و درصد سهم منابع اکولوژیکی نسبت به کل حوضه آبخیز (منبع: یافته‌های تحقیق)

	مساحت (هکتار)	تعداد لکه	درصد سهم منابع اکولوژیکی
۲۰۰۲	۳۲۸۵۰۱	۱۸۰۰	۴۵
۲۰۱۳	۳۰۰۷۳۴	۷۰۲	۴۲
۲۰۲۲	۲۹۹۴۴۸	۵۸۰	۴۰

بحث

نتایج حاصل از تحلیل روند تغییرات پوشش زمین در منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده کاهش قابل توجه مساحت جنگل‌ها بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ است. در حالی که مساحت اراضی ساخته شده و کشاورزی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. طبق آمار منتشر شده توسط مرکز آمار ایران (۱۴۰۰)، جمعیت استان مازندران از ۲۷۴۸۰۱۴ نفر در سال ۱۳۷۹ به ۳۲۸۳۵۸۲ نفر در سال ۱۳۹۵ رشد کرده است، که این افزایش جمعیت یکی از عوامل اصلی تخریب جنگل‌ها و تغییر کاربری زمین در این منطقه به‌شمار می‌رود. علاوه بر این، موقعیت حوضه آبخیز مورد مطالعه در نوار ساحلی دریای خزر، همراه با نرخ بالای مهاجرت به استان و گسترش ساخت‌وساز در سال‌های اخیر، نقش مهمی در تغییرات پوشش زمین ایفا کرده است. یافته‌های این پژوهش، در رابطه با تجزیه‌وتحلیل تغییرات پوشش زمین با نتایج داداشپور و سالاریان (۲۰۲۰)، دستی‌گردی و همکاران (۱۴۰۳) مطابقت دارد.

در مطالعات پیشین، معمولاً پارک‌های جنگلی و ذخایر طبیعی به همراه نتایج تحلیل متریک‌های ارزیابی پیوستگی به‌عنوان منابع اکولوژیکی در ساخت شبکه‌های اکولوژیکی در نظر گرفته می‌شدند (موحد و طبیبیان، ۱۳۹۷؛ Tannier et al., 2016) یا صرفاً از روش MSPA برای شناسایی این منابع استفاده می‌گردید (An et al., 2020). اما در این تحقیق از رویکردی تلفیقی بهره شده که ابتدا با استفاده از روش MSPA مناطق هسته شناسایی و سپس این مناطق را با بخش‌هایی که دارای ارزش بالایی در ارائه خدمات اکوسیستمی هستند، ادغام شده‌اند. این رویکرد تلفیقی، به‌طور قابل‌توجهی دقت و جامعیت فرآیند شناسایی و حفاظت از منابع اکولوژیکی را ارتقا می‌دهد. نتایج حاصل از شناسایی منابع اکولوژیکی نشان داد که در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۲ مناطق هسته بیش از ۹۴ درصد از جنگل‌های منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند، که نشان‌دهنده ارزش حفاظتی بالای این جنگل‌ها می‌باشد. از سوی دیگر، افزایش تعداد کلاس‌های شاخه، که به‌عنوان موانعی برای اتصال کریدورهای اکولوژیکی عمل می‌کنند و نیز گسترش لکه‌های جدا افتاده جنگل (جزایر)، همراه با کاهش مساحت هسته‌ها در طول دوره مطالعه، به وضوح نشان‌دهنده روند رو به رشد از هم‌گسیختگی و گسستگی ساختاری سیمای سرزمین جنگل مورد مطالعه است. این تحولات بیانگر افزایش فشارهای محیطی و انسانی بر پویایی و یکپارچگی اکوسیستم جنگلی می‌باشند.

از نظر توزیع مکانی خدمات اکوسیستمی، نواحی مرکزی منطقه مورد مطالعه که عمدتاً شامل بخش‌های جنگلی هستند، در هر سه سال بیشترین میزان خدمات ترسیب کربن و جلوگیری از سیلاب را ارائه داده و بالاترین کیفیت زیستگاه را برای حمایت از گونه‌های حیات‌وحش فراهم کرده‌اند.

تحلیل تغییر مقادیر خدمات اکوسیستمی در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که میزان ذخیره کربن طی بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ روندی کاهشی داشته است. تخریب ۳۲۷ کیلومتر مربع از جنگل‌ها، که به‌عنوان پوشش‌هایی با حداکثر توانایی در ذخیره‌سازی کربن شناخته می‌شوند، همراه با افزایش ۱۹۶ کیلومتر مربع در مساحت اراضی ساخته شده و کشاورزی، از عوامل اصلی کاهش ذخیره کربن در حوضه آبخیز محسوب می‌شوند. اگر این روند کاهشی کنترل نشود، می‌تواند اثرات شدیدی بر خدمات تنظیم آب‌وهوا داشته و تغییرات اقلیمی را تشدید کند.

بررسی خدمات اکوسیستمی کنترل سیلاب نیز نشان می‌دهد که مشابه با کاهش خدمات ترسیب کربن، کاهش وسعت جنگل‌های هیرکانی در سال‌های اخیر، همراه با گسترش مناطق ساخته شده و اراضی کشاورزی، به‌عنوان پوشش‌هایی با کمترین توانایی در مدیریت رواناب، سبب کاهش چشمگیر ظرفیت نگهداشت رواناب در حوضه آبخیز شده است. در نتیجه، حجم سیلاب در منطقه روندی افزایشی داشته است. با توجه به پتانسیل بالای منطقه در تولید رواناب و وقوع سیلاب، ادامه این روند می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را به جوامع محلی و اکوسیستم طبیعی وارد کند (سادات و همکاران، ۱۴۰۲). لذا ضرورت اقدامات حفاظتی

و مدیریت پایدار جنگل‌ها برای جلوگیری از پیامدهای مخرب زیست‌محیطی و اجتماعی در این منطقه کاملاً مشهود است. نتایج حاصل از پژوهش‌های سادات، صالحی و امیری (۲۰۲۳) و اسداللهی، سلمان ماهینی و سکیه (۲۰۱۷) هم‌راستا با نتایج این بخش از تحقیق می‌باشند.

نتایج این تحقیق روند کاهشی کیفیت زیستگاه در حوضه آبخیز را طی دو دهه گذشته نشان داد طوری که درصد مناطقی از حوضه آبخیز که مطلوبیت زیستگاهی بالایی داشتند به همراه میانگین کیفیت زیستگاه، کاهش یافته است. بیشترین کاهش کیفیت زیستگاه در مناطق ساحلی شمال حوضه مشاهده شد، که تحت تأثیر پوشش اراضی انسان‌ساخت و شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای بودند. علاوه بر این، میانگین نرخ تخریب زیستگاه در این سال‌ها افزایش یافته است، که بیانگر شدت گرفتن فشارهای انسانی بر زیستگاه‌های طبیعی است. این روندها بر اهمیت برنامه‌ریزی حفاظتی و مدیریت پایدار اکوسیستم‌ها برای کاهش اثرات منفی انسانی و حفاظت از زیستگاه‌های حساس تأکید دارد.

بررسی مساحت منابع اکولوژیکی شناسایی شده نشان داد که این منابع، از نظر تعداد، کاهش ۱۲۲۰ لکه و از نظر مساحت، ۲۹۰۵۳ هکتار کاهش را در دوره ۲۰ ساله تجربه کرده‌اند. همچنین نتایج نشان داد که شهرستان‌های عباس‌آباد، چالوس، نوشهر و کلاردشت به ترتیب با کاهش ۲۱، ۲۰، ۱۷ و ۱۰ درصدی، بیشترین کاهش مساحت منابع اکولوژیکی را داشته‌اند. در مقابل، شهرستان‌های تنکابن، رامسر و نور به‌ترتیب با کاهش ۶، ۵/۵ و ۴ درصدی، کمترین تغییر را در مساحت این منابع تجربه کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که منابع اکولوژیکی در منطقه مورد مطالعه طی بیست سال اخیر با کاهش ۹ درصدی در مساحت و ۶۷ درصدی در تعداد مواجه بوده‌اند. این تغییرات عمدتاً ناشی از کاهش مساحت جنگل‌ها و گسترش اراضی کشاورزی و مناطق ساخته شده است. کاهش مساحت جنگل‌ها و افزایش تعداد لکه‌های جنگلی جدا شده، نشان‌دهنده افزایش گسستگی ساختاری سیمای سرزمین جنگل است که تهدیدی جدی برای تنوع‌زیستی و عملکرد اکولوژیکی این منطقه محسوب می‌شود. این روند منجر به کاهش چشمگیر خدمات اکوسیستمی وابسته به جنگل، از جمله ذخیره کربن و کنترل سیلاب و همچنین افت کیفیت زیستگاه‌های طبیعی شده که به‌نوبه خود، تنوع‌زیستی منطقه را به خطر انداخته است. در این میان، شهرستان‌های عباس‌آباد، چالوس و نوشهر به‌ترتیب با کاهش ۲۱، ۲۰ و ۱۷ درصدی در مساحت منابع اکولوژیکی، بیشترین میزان تغییرات را تجربه کرده‌اند که این روند ضرورت برنامه‌ریزی حفاظتی و مدیریت پایدار این منابع در شهرستان‌های مذکور را برجسته می‌سازد. رویکرد تلفیقی به‌کار رفته در این تحقیق که به شناسایی دقیق‌تر منابع اکولوژیکی منجر شده است، می‌تواند الگویی مؤثر برای برنامه‌ریزی حفاظتی و مدیریت پایدار اکوسیستم‌ها در مناطق مشابه باشد.

پیشنهادها

از آنجا که در کل منطقه مورد مطالعه، مساحت جنگل‌ها کاهش چشمگیری داشته و اراضی ساخته شده و کشاورزی گسترش یافته‌اند، پیشنهاد می‌شود از سیستم‌های پایش ماهواره‌ای و پهپادی برای نظارت دقیق بر تغییرات کاربری زمین استفاده شود. برای جلوگیری از کاهش خدمات اکوسیستمی، جایگزینی شیوه‌های کشاورزی پایدار به جای توسعه بی‌رویه زمین‌های کشاورزی، از طریق حمایت مالی از کشاورزان، توصیه می‌شود. با توجه به این که شهرستان‌های عباس‌آباد، چالوس و نوشهر بیشترین میزان کاهش در مساحت منابع اکولوژیکی را تجربه کرده‌اند، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های حفاظتی در این مناطق با اولویت بیشتری اجرا شوند. این اقدامات می‌تواند شامل افزایش نظارت بر تغییرات کاربری زمین، اعمال محدودیت‌های سخت‌گیرانه برای تخریب جنگل‌ها، اجرای طرح‌های احیای پوشش گیاهی و آگاه‌سازی جوامع محلی درباره اهمیت حفظ منابع اکولوژیکی باشد. همچنین در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود از طیف گسترده‌تری از خدمات اکوسیستمی برای مدل‌سازی منابع اکولوژیکی استفاده شود تا امکان مقایسه نتایج حاصل از خدمات مختلف فراهم شود. علاوه بر این، مطالعه اثرات اجتماعی و اقتصادی کاهش منابع اکولوژیکی شناسایی شده بر جوامع محلی می‌تواند به شناسایی راهکارهای بهبود معیشت و توانمندسازی این جوامع کمک کند.

نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند نقش موثری در برنامه‌ریزی و حفاظت از لکه‌های کلیدی جنگل‌های هیرکانی ایفا کرده و بدین ترتیب، به سیاست‌گذاران و مدیران در جهت مدیریت پایدار این مناطق کمک نماید.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

سپیده کریمی: جمع‌آوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله

محمدجواد امیری: استاد راهنمای رساله، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

احمدرضا یاوری: استاد مشاور رساله، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

این تحقیق هیچ‌گونه حمایت مالی دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

این پژوهش در راستای مطالعات رساله دکتری دانشگاه تهران می‌باشد که توسط دانشجو و تحت نظارت استاد راهنما انجام شده است. نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی ارزشمند سپاسگزاری نمایند.

منابع

خیرخواه قهی، نسیم؛ ملک‌محمدی، بهرام و جعفری، حمیدرضا (۱۴۰۰). ارزیابی سنجه‌های ارتباطات سیمای سرزمین و کیفیت زیستگاه برای شناسایی لکه‌های زیستگاهی کلیدی قوچ و میش البرز مرکزی (مطالعه موردی: منطقه حفاظت شده ورجین، تهران). *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۹(۳)، ۲۳-۴۰. https://doi.org/10.52547/envs.2021.31778

دستی‌گردی، مرتضی؛ نادری، مهدی؛ شامگانی مشهدی، بهاره؛ حاتمی‌پور، محدثه و مهدوی امرئی، امید (۱۴۰۳). تحلیل روند پوشش گیاهی در استان مازندران با تاکید بر تغییرات کاربری اراضی با استفاده از سری زمانی NDVI سنجنده مودیس. *پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۵(۲)، ۱۰۵-۱۱۸. https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.105

سادات، مهدیس؛ صالحی، اسماعیل؛ امیری، محمدجواد و احسانی، امیرهوشنگ (۱۳۹۹). بهینه‌سازی ساختار سیمای سرزمین با رویکرد تجزیه تحلیل شبکه اکولوژیک و تئوری گراف. *محیط‌شناسی*، ۴۶(۴)، ۶۲۵-۶۴۴. https://doi.org/10.22059/jes.2021.323284.1008169

موحد، سپیده و طبیبیان، منوچهر (۱۳۹۷). بررسی تغییرات شبکه اکولوژیک و نقش آن در تاب‌آوری اکولوژیکی کلانشهر مشهد. *محیط‌شناسی*، ۴۴(۲)، ۳۷۳-۳۹۴. https://doi.org/10.22059/jes.2018.236242.1007458

References

An, Y., Liu, S., Sun, Y., Shi, F., & Beazley, R. (2020). Construction and optimization of an ecological network based on morphological spatial pattern analysis and circuit theory. *Landscape Ecology*, *36*(7), 2059–2076. https://doi.org/10.1007/s10980-020-01027-3

Ansari, A., Ghorbanpour, M., Kazemi, A., & Kariman, K. (2023). Ecological assessment of Iran's terrestrial biomes for wildlife conservation. *Scientific Reports*, *13*(1), 17761. https://doi.org/10.1038/s41598-023-45120-4

Asadolahi, Z., Salmanmahiny, A., & Sakieh, Y. (2017). Hyrcanian forests conservation based on ecosystem services approach. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-18. https://doi:10.1007/s12665-017-6702-x

Beier, P. (2006). Effects of artificial night lighting on terrestrial mammals. InEcological Consequences of Artificial Night Lighting; Rich, C.,Longcore, T., Eds.; *Island Press*: Washington, DC, USA; pp. 19–42.

Dadashpoor, H., & Salarian, F. (2020). Urban sprawl on natural lands: Analyzing and predicting the trend of land use changes and sprawl in Mazandaran city region, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 593-614. https://doi.org/10.1007/s10668-018-0211-2

Dastigerdi, M., Nadi, M., Shamgani Mashhadi, B., & Hatamipour, M. (2024). Analysis of Vegetation Trend in Mazandaran Province with an Emphasis on Land Use Changes Using MODIS NDVI Time Series. *Journal of Watershed Management Research*, 105-118. https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.105 [*in Persian*]

Dos Santos, A. R., Araújo, E. F., Barros, Q. S., Fernandes, M. M., de Moura Fernandes, M. R., Moreira, T. R., ... & de AlmeidaTelles, L. A. (2020). Fuzzy concept applied in determining potential forest fragments for deployment of a network of ecological corridors in the Brazilian Atlantic Forest. Ecological Indicators, 115, 106423. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106423

Fang, Z., Ding, T., Chen, J., Xue, S., Zhou, Q., Wang, Y., ... & Yang, S. (2022). Impacts of land use/land cover changes on ecosystem services in ecologically fragile regions. Science of the Total Environment, 831, 154967. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154967

Forzieri, G., Dakos, V., McDowell, N. G., Ramdane, A., & Cescatti, A. (2022). Emerging signals of declining forest resilience under climate change. *Nature*, 608(7923), 534-539. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04959-9

Guan, H., Bai, Y., Tang, Y., Zhang, C., & Zou, J. (2023). Spatial identification and optimization of ecological network in desert-oasis area of Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 147, 109999. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109999

Grantham, H. S., Duncan, A., Evans, T. D., Jones, K. R., Beyer, H. L., Schuster, R., ... & Watson, J. E. M. (2020). Anthropogenic modification of forests means only 40% of remaining forests have high ecosystem integrity. Nature communications, 11(1), 5978. https://doi.org/10.1038/s41467-020-19493-3

Hosseini, S., Amirnejad, H., & Azadi, H. (2024). Impacts of Hyrcanian forest ecosystem loss: the case of Northern Iran. Environment, Development and Sustainability, 1-22. https://doi.org/10.1007/s10668-023-04408-1

Kheirkhah Ghahi, M., Malek Mohammadi, B., & Jafari, R. (2021). Evaluating landscape connectivity metrics and habitat quality to identify key habitat patches for urial (Ovis vignei) in the central Alborz region (Case study: Varjin Protected Area, Tehran). *Advanced Environmental Sciences*, *19*(3), 23-40. https://doi.org/10.52547/envs.2021.31778 [*in Persian*]

Martensen, A. C., Saura, S., & Fortin, M. (2017). Spatio-temporal connectivity: Assessing the amount of reachable habitat in dynamic landscapes. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(10), 1253–1264. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12799

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Scenarios: Findings of the Scenarios Working Group (Vol. 2).* Island Press.

Movahed, S., & Tabibian, M. (2018). Investigating the changes of ecological network and its role in the ecological resilience of Mashhad city. *Journal of Environmental Studies*, 44(2), 373-394. https://doi.org/10.22059/jes.2018.236242.1007458 [*in Persian*]

Opdam, P., Steingröver, E., & Rooij, S. V. (2006). Ecological networks: A spatial concept for multi-actor planning of sustainable landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 75(3–4), 322–332. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.015

Peng, J., Yang, Y., Liu, Y., Hu, Y., Du, Y., Meersmans, J., & Qiu, S. (2018). Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of The Total Environment*, 644, 781–790. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.292

Sadat, M., Salehi, E., Amiri, M. J., & Ehsani, A. H. (2023). Spatiotemporal ecosystem services: Response to structural changes (A case study in Lahijan, Iran). *Integrated Environmental Assessment and Management*. https://doi.org/10.1002/ieam.4843

Sadat, M., Salehi, E., Amiri, M. J., & Ehsani, A. H. (2020). Optimization of Landscape Structure Using an Ecological Network Analysis and Graph Theory Approach. *Journal of Environmental Studies*, *46*(4), 625-644. https://doi.org/10.22059/jes.2021.323284.1008169 [in Persian]

Sharp, R., Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., ... & Daily, G. C. (2018). InVEST 3.6.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.

Tannier, C., Bourgeois, M., Houot, H., & Foltête, J. C. (2016). Impact of urban developments on the functional connectivity of forested habitats: A joint contribution of advanced urban models and landscape graphs. *Land Use Policy*, 52, 76–91. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.12.002

Urban, D., & Keitt, T. (2001). LANDSCAPE CONNECTIVITY: A GRAPH-THEORETIC PERSPECTIVE. *Ecology*, 82(5), 1205–1218. https://doi.org/10.1890/0012-9658

USDA. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Washington DC.

Vogt, P., Riitters, K.H., Iwanowski, M., Estreguil, C., Kozak, J., Soille, P. (2007). Mapping landscape corridors. Ecol. Ind. 7 (2), 481–488. https://doi.org/10.1016/j. ecolind.2006.11.001

Yang, J., Wang, Y., Xiu, C., Xiao, X., Xia, J., & Jin, C. (2020). Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123767. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123767

Zhai, T., & Huang, L. (2022). Linking MSPA and Circuit Theory to Identify the Spatial Range of Ecological Networks and Its Priority Areas for Conservation and Restoration in Urban Agglomeration. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 828979. https://doi.org/10.3389/fevo.2022.828979

Xu, H. (2010). Analysis of impervious surface and its impact on urban heat environment using the normalized difference impervious surface index (NDISI). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(5), 557-565. https://doi.org/10.14358/PERS.76.5.557