Journal of Geography and Planning
Online ISSN: 2717-3534 Print ISSN: 2008-8078
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

Evaluating and modeling of spatiotemporal land use/land cover change impact on habitat quality (Case study: Amol City)

Bahman Veisi Nabikandi [1], Aboalfazl Ghanbari [2]✉

1. M.A. Student in Landscape Architecture Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: bahmanveisi19@gmail.com
2. Corresponding Author, Professor, Department of Remote Sensing and Geographical Information System, Tabriz University, Tabriz, Iran. E-mail: a_ghanbari@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 7 May 2024
Revised: 8 June 2024
Accepted: 10 June 2024
Published: 22 August 2025

Keywords:
Land Use/Land Cover,
Habitat Quality,
Urbanization,
InVEST Model,
Amol City.

ABSTRACT

Evaluating and forecasting the changes in habitat quality (HQ) caused by land use/land cover (LULC) variations during urbanization is crucial for establishing a comprehensive ecological planning system and tackling the obstacles to global sustainable development. Over the last several decades, the biodiversity and environmental quality of the northern provinces have seen significant transformations as a result of population growth, urban development, climate change, and the rise in tourist activities. In this research, the LULC maps of Amol City were preparing for the years 2000 and 2020 using remote sensing data. Additionally, using the CA-Markov model, a simulation was conducted for the year 2035, considering two scenarios: Business-As-Usual (BAU) and Ecological Protection (EP). To assess the spatiotemporal changes occurring at HQ, we integrated the InVEST-HQ model with the CA-Markov model. The findings indicate a significant decline in overall HQ in the city of Amol between 2000 and 2020, mostly due to urbanization and agricultural expansion. Between 2020 and 2035, according to the BAU scenario, the landscape pattern and HQ will continue to deteriorate, following the previous trend of decline. The EP scenario, on the other hand, will be critical in stabilizing and supporting the area's HQ. This emphasizes the significance of preserving ecological spaces like forests and grasslands. The study's maps and findings may assist local managers and related organizations in implementing more efficient plans and solutions for the preservation of these ecosystems.

Cite this article: Veisi Nabikandi, B., Ghanbari, A. (2025). Evaluating and modeling of spatiotemporal land use/land cover change impact on habitat quality (Case study: Amol City). *Journal of Geography and Planning*, 30 (92), 373-392. https://doi.org/ 10.22034/gp.2024.61560.3259

© The Author(s).
Publisher: University of Tabriz.
DOI: https://doi.org/10.22034/gp.2024.61560.3259

Introduction

Habitat quality (HQ) is an important measure of the variety of living organisms and the benefits they provide to the environment. It may be influenced by changes in how land is used and covered, particularly urbanization (He et al., 2023). Land Use and Land Cover (LULC) change is the main factor influencing the changes and movements seen in natural environments. These changes have significant repercussions for the environment at the local, regional, and global levels. To preserve ecological stability and promote organized and sustainable growth, it is necessary to evaluate the HQ by considering changes in the LULC (Wang et al., 2021). Urbanization, agriculture reclaiming, and deforestation may cause a decrease in HQ due to the direct effects of occupying natural habitat areas, such as reducing their size and breaking them up into smaller fragments. Furthermore, there are indirect consequences such as disturbance, resource appropriation, pollution, and alien species invasion (Wei et al., 2023). The goal of this research is to assess the HQ in the Amol City area, a region in northern Iran undergoing rapid urbanization (Firozjaei et al., 2020). It will do this by analyzing the temporal and spatial patterns of LULC change, and examining how these patterns impact the appropriateness of habitats for various species under different circumstances. The study's objectives are as follows: (1) to analyze and delineate the patterns of HQ in Amol City from 2000 to 2020; (2) to simulate and predict the spatial distribution of HQ in Amol City in 2035 based on the business-as-usual (BAU) scenario; and (3) to examine the impact of the proposed scenario, which involves the protection of ecological spaces (EP), on future HQ in Amol City.

Materials and Methods

To monitor LULC changes in the study area, the researchers used remote sensing images from 2000 and 2020. The images were pre-processed and classified using a Neural Network algorithm in Envi 5.6 software. Four classes of land were considered: built-up, agricultural, forest, and grassland. To verify the accuracy of the classification, a spatiotemporal analysis was performed using real Google Earth images. The study also used the CA-Markov model in TerrSet 2020 software to model future LULC in 2035 under two scenarios (Fu et al., 2022; Ghalehteimouri et al., 2022). The InVEST model was used to evaluate the HQ of the LULCs derived from the acquired LULCs. Based on the types of land use, the model calculated the degree of habitat destruction and the HQ index using threat factors, the sensitivity of different habitat types to threat factors, and the suitability of habitat types (Tang et al., 2023). The results were compared to determine the HQ under different scenarios.

Results

The results showed that the highest area in 2013 was covered by agriculture (49.4%), followed by forest (38.5%), built-up (9.6%), and grassland (2.5%). The developed land use and water bodies are predominantly located in lower-elevation areas with gentle slopes. In addition, the forest cover was in the southern part of the study area. Furthermore, findings illustrate that the built-up areas increased significantly from 9.6% to 23% in 2020 and are projected to reach 32.4% in 2035 under the BAU scenario, while the EP scenario reduced the built-up areas by 1743 hectares. The forest areas decreased from 38.5% to 20% in 2020 and are expected to decline further to 13.5% in 2035 under the BAU scenario, while the EP scenario preserved the forest areas by 4209 hectares. The agricultural and grassland areas showed less change, but grassland increased fourfold in 2020 due to deforestation. The HQ was higher in the southern forest and mountainous areas, but lower in the northern agricultural and urban areas. HQ also decreased over time and space, especially in the central and northern areas of the city, due to urban expansion and land use conversion. The implementation of the EP scenario resulted in a favourable impact on mitigating the reduction in HQ rates and increasing the percentage of regions with high or excellent HQ. The research indicated that HQ is impacted by several variables, including land cover, human activities, and urbanization. It emphasised the need for well-designed policies and planning to achieve a harmonious balance between socio-economic growth and biodiversity protection in urban suburbs. The study conducted a comparative analysis of its findings with previous research on HQ evaluation and prediction. It proposed the implementation of specific policies and actions to achieve a balance between development and conservation requirements in the area. To summarise, the research reveals that the LULC transformation in the Amol City region has been marked by a notable rise in urban and agricultural zones, together with a decline in forested regions from 2000 to 2020. The degradation of the environment posed a significant obstacle for LULC categories that depend on forests for their survival. The simulation results suggest that under the BAU scenario, there would be a continued decrease in HQ. However, in the EP scenario, HQ would be improved by appropriate management of urban and agricultural areas, as well as an increase in forest coverage. Hence, our study not only offers more proof that urban growth is a significant driver of the aforementioned transformations but also highlights the significance of remote sensing in ecological modelling, particularly in areas where data is limited. The results of this study are very significant for the remote sensing community since they include combining remote sensing images with innovative methods to monitor changes in LULC related to land degradation and sustainable development objectives.

Conclusion

This study takes a close look at the patterns of HQ in Amol City over time and space by combining CA-Markov and InVEST models with open-source remote sensing data. The study also showed that the InVEST and CA-Markov models can be useful for figuring out how good habitats are in a range of LULC change scenarios. According to the findings, the HQ index experienced a significant decline from 2000 to 2020. Moreover, the loss of environmental ecological spaces, such as tree covers, pastures, and farmland, led to a substantial decrease in the HQ index. To address this issue, it is crucial to implement efficient land use management measures in order to reduce the environmental effects of human activities on the HQ. This study emphasises the critical role of remote sensing in monitoring LULC changes in both short- and long-term scenarios. By integrating CA-Markov and InVEST models, we were able to effectively track the spatial and temporal changes in HQ by analysing LULC changes. Ultimately, our study provides a more profound comprehension of the connections between LULC changes caused by environmental restoration projects and changes in habitat quality. The study found that implementing measures such as afforestation and reforestation initiatives, combined with promoting tourist development, may mitigate the negative impacts of LULC changes on HQ. In addition, several policy actions were suggested to align urbanisation with ecological preservation.

جغرافیا و برنامه ریزی
شاپا چاپی: ۲۰۰۸-۸۰۷۸ شاپا الکترونیکی: ۲۷۱۷-۳۵۳۴
Homepage: https://geoplanning.tabrizu.ac.ir

ارزیابی و مدل سازی تاثیر تغییرات مکانی–زمانی کاربری و پوشش اراضی بر کیفیت زیستگاه (نمونه موردی: شهر آمل)

بهمن ویسی نبی‌کندی [۱] ، ابوالفضل قنبری [۲]✉

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.. رایانامه: bahmanveisi19@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، استاد گروه سنجش از دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: a_ghanbari@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۱
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۵/۳۱

کلیدواژه‌ها:
کاربری و پوشش اراضی،
کیفیت زیستگاه،
شهرنشینی،
مدل InVEST،
شهر آمل.

چکیده

ارزیابی و پیش‌بینی تکامل کیفیت زیستگاه بر اساس تغییرات کاربری و پوشش اراضی تحت فرآیند شهرنشینی برای برنامه‌ریزی یک سیستم جامع اکولوژیکی و پرداختن به چالش‌های توسعه پایدار مهم است. در دهه‌های گذشته، تنوع زیستی و کیفیت زیستگاه استان‌های شمالی به دلیل رشد جمعیت، گسترش زمین‌های ساخته شده، تغییر اقلیم و افزایش فعالیت‌های گردشگری دستخوش تغییرات اساسی شده است. در این پژوهش، نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی شهر آمل برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه شد. علاوه بر این، با استفاده از مدل CA-Markov، یک شبیه‌سازی برای سال ۲۰۳۵ تحت دو سناریو پایه (BAU) و حافظت اکولوژیکی (EP) جهت پیش‌بینی و ارزیابی کیفیت و تنوع زیستی منطقه مورد مطالعه در آینده صورت گرفت. برای ارزیابی تغییرات مکانی–زمانی رخ داده در کیفیت زیستگاه، مدل InVEST را با مدل CA-Markov یکپارچه شد. نتایج نشان می‌دهد که کیفیت زیستگاه در محدوده‌ی شهر آمل به طور قابل توجه‌ای در طول دوره ۲۰۲۰–۲۰۰۰ کاهش یافته است که عمدتاً متأثر از گسترش شهرنشینی و توسعه کشاورزی است. در طول دوره ۲۰۳۵–۲۰۲۰ بر اساس سناریو BAU الگوی منظر و کیفیت زیستگاه همچنان روند کاهشی شدید قبلی را حفظ می‌کند، در حالی که سناریو EP نقش کلیدی در تثبیت و حمایت از کیفیت و شاخص زیستگاه منطقه خواهد داشت، که اهمیت حفاظت از فضاهای اکولوژیکی مانند پوشش جنگلی و علفزار را برجسته می‌کند. این تحقیق فراتر از ارائه شواهد مبنی بر اینکه گسترش شهری یک عامل کلیدی در تغییرات فوق‌الذکر است، اهمیت سنجش از دور را در مدل‌سازی اکولوژیکی به‌ویژه در مناطقی همچون ایران که اطلاعات و جمع آوری داده‌ها محدود است را نشان می‌دهد. نتایج این تحقیق با ادغام تصاویر سنجش از دور با تکنیک‌های جدید در پایش تغییرات کاربری و پوشش اراضی اهمیت زیادی برای مدیران محلی و سازمان‌های مربوطه در تعیین راهکارهای موثرتری برای حفاظت از زیستگاه‌ها و دستیابی به اهداف توسعه پایدار دارد.

استناد: ویسی نبی‌کندی ، بهمن ؛ قنبری ، ابوالفضل ؛ (۱۴۰۴). ارزیابی و مدل سازی تاثیر تغییرات مکانی–زمانی کاربری و پوشش اراضی بر کیفیت زیستگاه (نمونه موردی: شهر آمل). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۳۰ (۹۲)، ۳۹۲-۳۷۳.

http//doi.org/10.22034/gp.2024.61560.3259

ناشر: دانشگاه تبریز.

© نویسندگان

مقدمه

کیفیت زیستگاه[1] به توانایی یک اکوسیستم در فراهم کردن شرایط مناسب برای پایداری افراد و جمعیت‌ها اشاره دارد و تا حدودی در وضعیت تنوع زیستی منطقه‌ای منعکس می‌شود (Lei et al., 2022). تنوع زیستی با حفظ عملکرد و انعطاف‌پذیری اکوسیستم‌ها به رفاه انسان و توسعه پایدار کمک می‌کند (Sallustio et al., 2017). تنوع زیستی شامل تنوع جانوران، گیاهان و میکروارگانیسم‌ها در سطوح ژنتیکی و گونه‌ای است که خدمات اکوسیستم تنظیمی، حمایتی و فرهنگی را ارائه می‌کند (Watson et al., 2019). با این حال، فعالیت‌های مخرب انسانی و تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر تهدیدی برای رفاه و پایداری اکوسیستم‌ها بوده‌اند (He et al., 2023). این تغییرات پیامدهای گسترده‌ای برای محیط زیست در مقیاس محلی، منطقه‌ای و جهانی دارد (زاهدی کلاکی و همکاران، ۱۴۰۰). در حال حاضر، بیش از دو سوم از سطح زمین عاری از یخ جهان تحت نوعی فعالیت انسانی قرار گرفته است (Krause et al., 2019). در واقع گستره، وسعت و پیامدهای استفاده جهانی از زمین در تاریخ بی‌سابقه است (Hurtt et al., 2020). افزایش فعالیت‌های انسانی موجب تکه‌تکه‌شدن زیستگاه، انقراض گونه‌های انبوه و تهاجم گونه‌های بیگانه شده است (Wei et al., 2023). این موضوع امروزه مهم‌ترین عامل کاهش تنوع زیستی و کیفیت زیستگاه محسوب می‌شود (Díaz et al., 2019). تغییر کاربری و پوشش اراضی[2] به عنوان یکی از مهم‌ترین پیامدهای فعالیت انسانی به طور گسترده به عنوان عامل اصلی تخریب کیفیت زیستگاه شناخته شده است (Chen et al., 2023a). بدین لحاظ، بررسی ارتباط بین الگوهای چشم‌انداز، پیش‌بینی و ارزیابی تکامل الگوی تغییرات کاربری و پوشش اراضی تحت سناریوهای مختلف، مسئله‌ی حیاتی برای زیست‌محیط آینده هستند و اهمیت قابل توجهی در حفاظت از تنوع زیستی منطقه‌ای و توسعه پایدار دارند (Wang et al., 2021).

کیفیت زیستگاه در سطوح مکانی و مقیاس‌های متفاوتی ارزیابی می‌شود و انتخاب روش ارزیابی به نوع منبع داده بستگی دارد. مطالعات قبلی، ارزیابی کیفیت زیستگاه برای افراد و جمعیت‌ها را با استفاده از داده‌های میدانی و شاخص‌های کیفیت زیستگاه بررسی می‌کردند (de Mendonça et al., 2003). این روش به دلیل هزینه‌های بالا و محدودیت‌های زمانی و مکانی، قادر به ردیابی پویایی زیستگاه‌ها نبوده است (Berta Aneseyee et al., 2020). مدل ارزش‌گذاری یکپارچه خدمات اکوسیستمی و مبادلات (InVEST) امروزه به دلایلی همچون قابل اطمینان بودن، نیاز به داده‌های کم، دسترسی آسان، نتایج قابل مشاهده و همبستگی با مشاهدات تنوع زیستی روشی پرکاربرد برای مطالعات کیفیت زیستگاه است (Chen et al., 2023b; Shao et al., 2022). مدل کیفیت زیستگاه InVEST وضعیت تنوع زیستی را در یک چشم انداز ارزیابی می‌کند و با استفاده از ورودی‌های همچون کاربری و پوشش اراضی و تهدیدات تنوع زیستی، نقشه‌های کیفیت زیستگاه را تولید می‌کند (Terrado et al., 2016). این مدل امکان ارزیابی کیفیت و تخریب زیستگاه را در دوره‌های زمانی و مقیاس‌های مختلفی از جمله حوزه‌های آبخیز (Yohannes et al., 2021)، تجمعات شهری (Li et al., 2022)، ذخایر طبیعی (Sallustio et al., 2017) و کریدورهای رودخانه (Hack et al., 2020) را ممکن می‌سازد. تمرکز مطالعه حاضر بر تغییرات مکانی و زمانی کیفیت زیستگاه در پاسخ به تغییرات کاربری زمین متأثر از گسترش فعالیت‌های انسانی و شهرنشینی می‌باشد.

مدل‌های تغییرات کاربری زمین در حال تبدیل شدن به ابزارهای مهم برنامه‌ریزی و مدیریت راهبردهای توسعه پایدار هستند (رستمی و همکاران، ۱۴۰۱). در طول چند دهه گذشته، چندین روش نقشه برداری تغییرات کاربری و پوشش اراضی در سراسر جهان به کار گرفته شده است (Fu et al., 2022). در این میان ترکیب زنجیره اتومات سلولی و مارکوف تحت عنوان مدل CA-Markov به دلیل شبیه‌سازی پویا، بهره‌وری بالا، کالیبراسیون ساده و قابلیت شبیه‌سازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی

[1] Habitat Quality
[2] Land Use/Land Cover

چندگانه امروزه به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (رضائی مقدم و همکاران، ۱۴۰۲). بنابراین، مدل‌های InVEST و CA-Markov برای تجزیه، تحلیل و پیش‌بینی مسیر تکامل مکانی-زمانی کیفیت زیستگاه استفاده شد.

شهرستان آمل به عنوان یک منطقه مهم اکولوژیکی در استان مازندران در سال‌های اخیر به دلیل افزایش فعالیت‌های مخرب انسانی مثل توسعه بی‌رویه کشاورزی و مناطق صنعتی تحت تاثیر انواع دگرگونی‌ها و تغییرات کاربری قرار گرفته است. تحقیقات نشان می‌دهد که در ۵۰ سال گذشته ایران بیشترین تغییرات کاربری و پوشش اراضی را تجربه کرده است (Bahrami et al., 2010). این وضعیت در شمال ایران به دلیل آب و هوای مناسب و افزایش شهرنشینی، به خصوص در سال‌های اخیر، بیشتر به چشم می‌آید. مهم‌ترین منطقه‌ی کشاورزی و اقتصادی ایران، با افزایش جمعیت و گردشگران محلی با فشارهای زیست محیطی بالای روبه‌رو است (Yousefi et al., 2019). بنابراین، بررسی تغییرات مکانی-زمانی کیفیت زیستگاه در دوره‌های گذشته، حال و آینده در این منطقه از اهمیت حیاتی برخوردار است. از این رو اهداف این مطالعه، (۱) تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی محدوده شهر آمل از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از نرم افزار Envi 5.6، (۲) شبیه‌سازی و پیش‌بینی نقشه کاربری و پوشش اراضی در سال ۲۰۳۵، تحت سناریوهای پایه[1] (BAU) و حفاظت از فضاهای اکولوژیکی[2] (EP) با استفاده از مدل CA-Markov، (۳) ارزیابی و مدل‌سازی تأثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی در گذشته، حال و آینده بر کیفیت زیستگاه منطقه مورد مطالعه. در همین راستا، این پژوهش در صدد پاسخ به سوالات ذیل می‌باشد: ۱) روند تاثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر کیفیت زیستگاه در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۰ در شهرستان آمل چگونه بوده است؟ ۲) تاثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی در سال ۲۰۳۵ تحت سناریوهای مختلف بر تنوع زیستی و کیفیت زیستگاه منطقه مورد مطالعه چگونه خواهد بود؟

پیشینه پژوهش

۱. مطالعات داخلی

در سال‌های اخیر، افزایش خدمات اکوسیستمی به عنوان یک نگرانی حیاتی مطرح شده است. با این حال، کمبود اطلاعات در مورد خدمات اکوسیستم در حوزه برنامه‌ریزی وجود دارد. در ایران مطالعات متعددی به دنبال بررسی این شکاف با ارزیابی تأثیر ساختار منظر بر عملکرد اکوسیستم بودند. برای دستیابی به این هدف استفاده از مدل InVEST برای مدل‌سازی خدمات اکوسیستم در چندین مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمونه زرندیان و همکاران (۱۳۹۴)، تأثیر توزیع انواع کاربری و پوشش اراضی بر کیفیت زیستگاه سرزمین‌های جنگلی سرولات و جواهردشت را در شرایط جاری و آتی مورد ارزیابی و پیش‌بینی قرار دادند که اثربخشی مهم مناطق حفاظت شده از نتایج آنها بود. دانشی و همکاران (۱۳۹۹). در تحقیق خود اثر تغییر کاربری اراضی بر وضعیت کیفیت زیستگاه حوزه سد نرماب در استان گلستان را با مدل InVEST مورد ارزیابی قرار داده‌اند. نتایج پژوهش نشان داد که در اثر تغییرات شدید کاربری اراضی به ویژه تبدیل جنگل به کشاورزی و مناطق مسکونی کیفیت زیستگاه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ کاهش پیدا کرده و تخریب سرزمین نیز به همان میزان افزایش پیدا کرده است.

Abdollahi و همکاران (۲۰۲۳). کیفیت زیستگاه گونه‌های پرنده شکاری در همدان را بر اساس نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی، دانش کارشناسان محلی و الگوهای منظر ارزیابی کردند. نقش برجسته پویایی الگوی منظر در تعیین کیفیت زیستگاه گونه‌ها و حفاظت از تنوع زیستی از نتایج تحقیق آنها بود. در تحقیقی دیگر سادات و همکاران (۱۴۰۳) از طریق بررسی اثرهای شاخص‌های اکولوژیکی لکه‌های جنگلی بر روی عرضه خدمات اکوسیستمی همچون کیفیت زیستگاه، کاهش ارائه خدمات اکوسیستم همراه با افزایش تکه‌تکه‌شدن و ناپایداری در استان‌های شمالی کشور را مشاهده کردند. تحقیق فوق اهمیت حفظ و

[1] Business-As-Usual scenario
[2] Ecological Protection

گسترش جنگل‌های هیرکانی و همچنین اولویت‌بندی یکپارچگی و کاهش لکه‌های جدا شده برای افزایش بهره‌وری اکولوژیکی در استان‌های شمالی کشور را نشان می‌دهد.

۲. مطالعات خارجی

تحقیقات متعددی در مناطق مختلف تاثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر کیفیت زیستگاه را ارزیابی کرده‌اند. به عنوان مثال Wu و همکاران (2021). اثرات تغییرات مکانی–زمانی پراکندگی شهری بر کیفیت زیستگاه در رودخانه مروارید از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۸ را بررسی کردند و شهرنشینی در این منطقه را عامل اصلی تخریب کیفیت زیستگاه معرفی کردند. Li و همکاران (2022). پس از شبیه‌سازی توسعه زمین تحت سناریوهای مختلف دریافتند که تغییر کاربری زمین شهری علت اصلی تخریب کیفیت زیستگاه است و سناریوی حفاظت از محیط زیست نسبت به سایر سناریوهای توسعه وضعیت بهتری در ارتباط با کیفیت زیستگاه دارد.

همچنین Lei و همکاران (2022)، در مطالعه خود تغییرات مکانی–زمانی کیفیت زیستگاه جزیره هاینان و پارک ملی را از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۴۰ با استفاده از مدل‌های InVEST و CA-Markov بررسی و پیش‌بینی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش کلی کیفیت زیستگاه جزیره هاینان عمدتاً متأثر از تغییرات در خارج از پارک ملی است و این بخش از جزیره نقش کلیدی در تثبیت و حمایت از کیفیت زیستگاه دارد، که اهمیت حفاظت از مناطق حفاظت شده را برجسته می‌کند. Zhu & Xie (2023). نیز از مدل InVEST برای ارزیابی تأثیر گسترش شهری بر شاخص‌های کیفیت زیستگاه در سه دوره ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ استفاده کردند که تغییرات کاربری اراضی در منطقه یکی از دلایل مهم کاهش تنوع زیستی و کیفیت اکوسیستم معرفی شد.

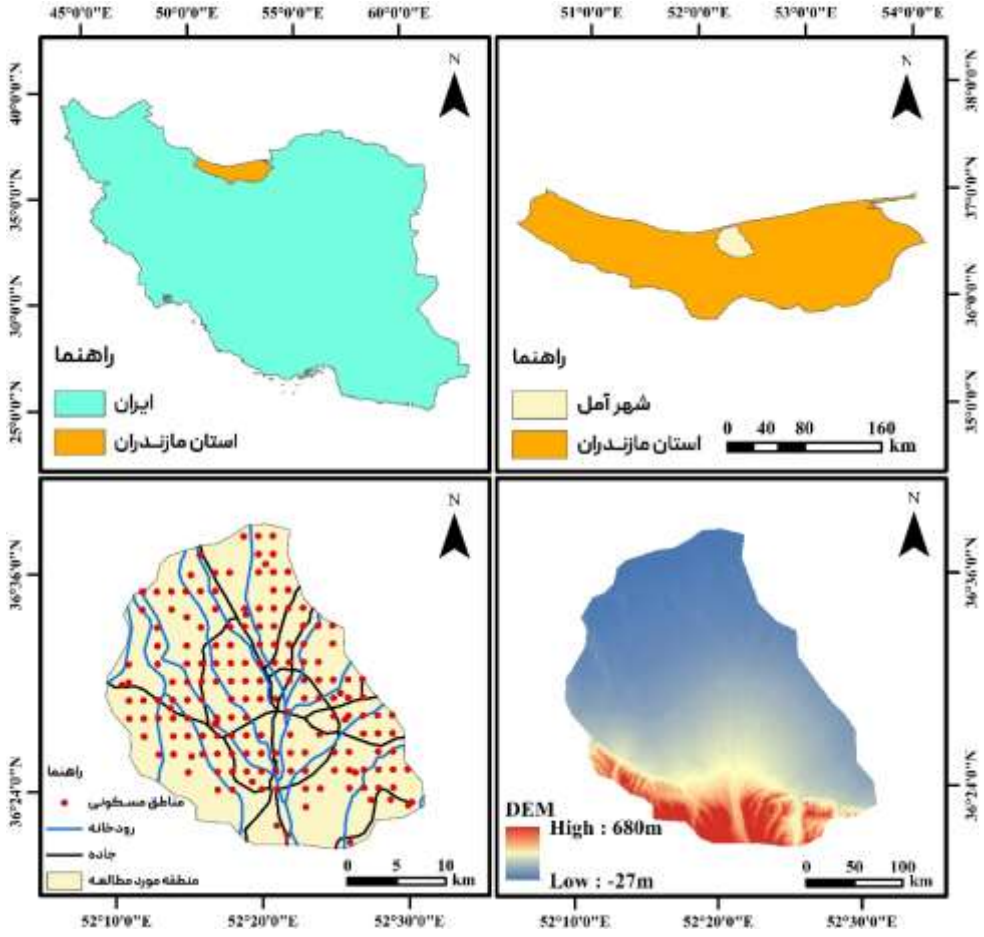
به طور کلی بررسی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که بیشتر تحقیقات انجام شده در حوزه‌های آبخیز و مناطق حفاظت‌شده و یا بر روی یک گونه خاص بوده است و تأثیر گسترش شهرنشینی و تغییرات کاربری و پوشش اراضی در سناریوهای مختلف بر کیفیت زیستگاه، به طور عمیق مورد مطالعه قرار نگرفته است (Wei et al., 2022) که این موضوع در ایران به طور چشم-گیرتری مشاهده می‌شود. به عبارتی دیگر تحقیقات قبلی صورت گرفته در ایران به تأثیر مخرب فعالیت‌های انسانی متأثر از گسترش شهرنشینی همچون گسترش مناطق ساخته‌شده و توسعه کشاورزی کمتر پرداخته شده است. همچنین اکثر تحقیقات سناریوسازی مبتنی بر طبیعت جهت بهبود وضعیت کیفیت زیستگاه را مورد ارزیابی قرار نداده‌اند، از این رو وجه تمایز و نوآوری تحقیق حاضر بررسی کیفیت زیستگاه متاثر از گسترش شهرنشینی و فعالیت‌های مخرب انسانی با استفاده از داده‌های دورسنجی بود. همچنین مقایسه سناریوی پیشنهادی با وضعیت پایه در جهت مدیریت بهتر از رویکردهای متمایز این تحقیق به شمار می-رود که در تحقیقات دیگر کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی رویکرد حفاظت اکولوژیکی در این تحقیق نیز در راستای پوشش تحقیقاتی بوده است که سناریوهای جهت آشکارسازی بهتر تاثیر تغییرات کاربری بر کیفیت زیستگاه را در تحقیقات خود پوشش نداده‌اند.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

برای اجرا و ارزیابی مدل‌های ارائه شده در این تحقیق، محدوده شهر آمل و اطراف آن در استان مازندران با مساحت حدود ۶۸۸/۵۶ کیلومتر مربع انتخاب شد. این منطقه دارای رطوبت نسبی ماهانه بیش از ۷۰ درصد، میانگین سالانه ۸۲ درصد و میزان بارش سالانه ۸۱۷ میلی‌متر می‌باشد. سردترین ماه سال دی ماه با ۶/۶ درجه سانتیگراد و گرم‌ترین ماه مرداد با ۲۵/۳ درج سانتیگراد است (IRIMO, 2021). شهر آمل یکی از بزرگترین، پرجمعیت‌ترین و صنعتی‌ترین شهرهای شمال ایران می‌باشد که

جمعیت آن به دلیل شرایط اقلیمی مطلوب، محبوبیت بالای شهر در بین گردشگران و توسعه شهرک‌های صنعتی از ۱۱۸۰۰۰ نفر در سال ۱۹۸۵ به ۲۳۸۰۰۰ نفر در سال ۲۰۱۷ یعنی نزدیک به دو برابر شده است (Firozjaei et al., 2020). محاسبات مدل هولدرن در شمال ایران نشان می‌دهد که ۷۴ درصد از افزایش جمعیت منطقه مربوط به رشد جمعیت بوده، در حالی که ۲۶ درصد دیگر ناشی از پراکندگی جمعیت در منطقه است. در واقع افزایش رشد ناخالص جمعیت و توسعه افقی شهری منجر به ساخت و سازهای بی‌رویه، سکونتگاه‌های غیررسمی و همچنین الحاق مناطق روستایی همجوار شده است (Kamran et al., 2020) که از دلایل مهم انتخاب این منطقه برای این تحقیق می‌باشد (شکل ۱).

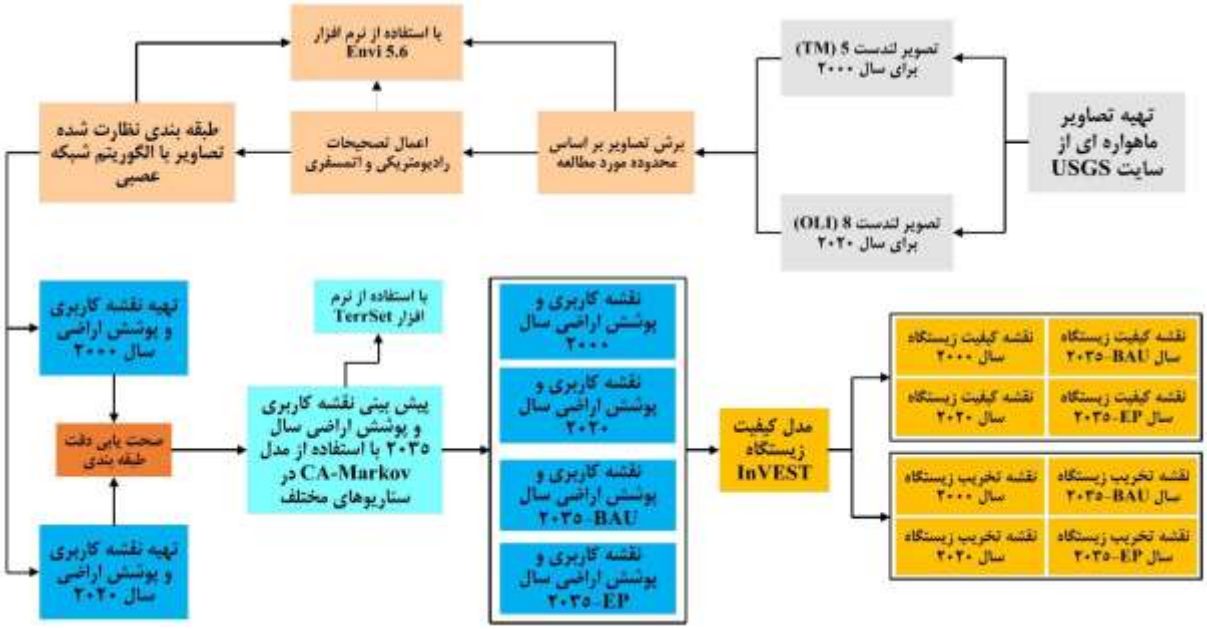


شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدودهٔ مورد مطالعه در ایران و استان مازندران

روش پژوهش

مطالعه موجود به لحاظ روش، تحلیلی-توصیفی و به لحاظ هدف، کاربردی می‌باشد که با تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ آغاز شد. این امر با استفاده از تکنیک‌های پیش پردازش بر روی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از نرم‌افزار Envi 5.6 به دست آمد. سپس یک شبیه‌سازی برای سال ۲۰۳۵ با استفاده از مدل CA-Markov در نرم‌افزار TerrSet انجام گرفت. با استفاده از نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی طبقه‌بندی شده و داده‌های مورد نیاز مدل نقشه‌های کیفیت و

تخریب زیستگاه برای سال‌های مربوطه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. این رویکرد جامع این امکان را می‌دهد که تأثیر زیست محیطی توسعه شهری بر تنوع زیستی و کیفیت زیستگاه را درک و کمی‌سازی شود. شکل ۲ نمودار جریانی پژوهش استفاده شده برای محاسبه کیفیت زیستگاه در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمودار جریانی پژوهش که تمام فرآیندها را نشان می‌دهد

تهیه نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی

با ظهور فناوری سنجش از دور و دسترسی گسترده به داده‌های ماهواره‌ای، توانایی ساخت نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی برای ارزیابی و کنترل تغییرات افزایش یافته است (Babbar et al., 2021). در همین راستا در این تحقیق تصاویر خانواده ماهواره لندست از سازمان زمین شناسی ایالات متحده جهت به دست آوردن نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی برای منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ استفاده شد. برای ارزیابی بهتر تغییرات، تصاویر در هوای روشن و آفتابی و پوشش ابری زیر ۵ درصد مربوط به ماه‌های تیر و مرداد گرفته شده‌اند که در آن پوشش گیاهی وضوح بهتری داشته باشد. در جدول (۱) مشخصات تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات داده‌های مورد استفاده در این پژوهش

ردیف	ماهواره	سنجنده	تاریخ تصویر برداری	قدرت تفکیک مکانی	منبع داده
۱	لندست ۵	TM	۲۰۰۰/۰۷/۲۶	۳۰ متری	سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS)
۲	لندست ۸	OLI	۲۰۲۰/۰۶/۱۵	۳۰متری	سازمان زمین شناسی ایالات متحده آمریکا (USGS)

دو شاخص مهم برای طبقه‌بندی تصاویر یعنی انعکاس و درخشندگی را نمی‌توان مستقیماً از تصاویر خام دریافت کرد. همچنین، این تصاویر معمولاً حاوی اختلال یا خطا هستند، بنابراین تصحیحات اتمسفری و رادیومتریکی نخستین مرحله ضروری در پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای بعد از دریافت تصاویر می‌باشد (Zhou et al., 2022; Dinguirard & Slater, 1999). به ویژه در مواردی که تصاویر برای آشکارسازی تغییرات کاربری و پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه در طول زمان مورد نیاز است

(Poncet et al., 2019). بنابراین، این تصحیحات برای اثرات جوی با استفاده از نرم افزار ENVI 5.6 انجام شد. باتوجه به پیشنهاد Floreano & de Moraes (2021) مبنی بر طبقه‌بندی کاربری و پوشش اراضی در کلاس‌های کلی جهت دقت بالاتر در این پژوهش منطقه مورد مطالعه در چهار کلاس اصلی: ۱. ساخته‌شده (Built-up)، ۲. جنگل (Forest) ۳. کشاورزی (Agriculture) و ۴. علفزار (Grassland) طبقه‌بندی شد. جهت بدست آوردن نقشه کاربری و پوشش اراضی منطقه در این دو سال از روش طبقه‌بندی نظارت‌شده و الگوریتم شبکه عصبی[1] در نرم افزار Envi 5.6 استفاده شد. این روش و الگوریتم بیشترین دقت را برای طبقه‌بندی کاربری و پوشش اراضی در مطالعه Shihab و همکاران (2021) به دست آورده است.

صحت‌یابی طبقه‌بندی تصاویر

پس از طبقه‌بندی تصاویر و تعیین نقشه کاربری و پوشش اراضی منطقه، بایستی دقت نتیجه به دست آمده بررسی شود. طبقه-بندی تصاویر سنجش از دور برای به دست آوردن اطلاعات قابل اعتماد و دقیق درباره تغییرات کاربری و پوشش اراضی همچنان یک چالش است که به عوامل بسیاری مانند پیچیدگی چشم انداز، داده‌های سنجش از دور انتخاب شده، پردازش تصویر و روش-های طبقه‌بندی بستگی دارد (Islami et al., 2022). این امر معمولاً با مقایسه نقشه مرجع (نقشه واقعی زمینی) و یا تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا (مثل گوگل ارث) انجام می‌پذیرد. ضریب کاپا روشی است که برای ارزیابی طبقه‌بندی به کار می‌رود و در آن به صورت تصادفی از تمامی عناصر ماتریس خطا برای محاسبه دقت استفاده می‌کنند. تمام اجزای ماتریس خطا جهت محاسبه دقت در روش ضریب کاپا، برای ارزیابی طبقه‌بندی استفاده می‌شود. مقدار کاپا تفاوت در دقت طبقه‌بندی را نسبت به سناریویی که در آن تصاویر به صورت تصادفی طبقه‌بندی می‌شوند، تعیین می‌کند (جهانداری و همکاران، ۱۴۰۱). بر همین اساس در این پژوهش جهت ارزیابی صحت تصاویر طبقه‌بندی شده از تصاویر زمان‌دار گوگل ارث استفاده شد.

پیش‌بینی نقشه کاربری و پوشش اراضی برای سال ۲۰۳۵

برای پیش‌بینی تغییرات مکانی–زمانی نقشه کاربری و پوشش اراضی از ترکیب زنجیره اتومات سلولی (CA) و زنجیره‌ای مارکوف تحت عنوان مدل CA-Markov استفاده شد. این مدل ریاضی نشان می‌دهد که چگونه عناصر مختلف از نظر زمان و تأثیر مقادیر نزدیکترین همسایه به طور چشمگیری تغییر می‌کنند. در واقع، CA تمایل به ایجاد حالت‌های همگن دارد و الگوهای مشابه خود تولید می‌کند و بیشتر در مورد خود سازماندهی در سیستم‌های پویا استفاده می‌شود. علاوه بر این، CA فعل و انفعالات سلولی و تغییرات کمی هر مقدار را در سلول‌های مختلف نشان می‌دهد. از آنجا که مدل CA مربوط به کاربری و پوشش اراضی از نظر زمان، مکان و حالت گسسته هستند، بسیار پیچیده و پویا می‌باشند، بنابراین باید با مدل‌های دیگر از جمله زنجیره مارکوف ادغام شوند. (Abdulrahman & Ameen, 2020; Karimi et al., 2018). در مطالعات کاربری زمین، هر طبقه شناسایی شده ممکن است برای مدت طولانی ثابت بماند و برخی از آنها به طبقه دیگر تغییر کنند. بدین ترتیب می‌توان از ماتریس احتمالات انتقال واقعی برای پیش‌بینی تغییر کاربری زمین در آینده بر اساس سوابق تاریخی هر طبقه استفاده کرد (Ghalehteimouri et al., 2022). بر همین اساس با استفاده از نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ با به کارگیری مدل CA-Markov در نرم افزار TerrSet نقشه سال ۲۰۳۵ پیش‌بینی شد.

استفاده از مدل InVEST جهت تهیه نقشه‌های کیفیت زیستگاه

مدل کیفیت زیستگاه InVEST به دلیل تقاضای کم برای داده‌ها و جلوه تجسم فضایی بهتر به طور گسترده در زمینه اکولوژی شهری استفاده می‌شود (Moreira et al., 2018). بر اساس انواع کاربری، این مدل درجه تخریب زیستگاه و شاخص کیفیت زیستگاه را با استفاده از عوامل تهدید، حساسیت انواع مختلف زیستگاه به عوامل تهدید و مناسب بودن زیستگاه محاسبه می‌کند (Lei et al., 2022). در این مدل هر چه زیستگاه به تهدیدات حساس‌تر و نزدیکتر باشد تخریب آن بیشتر می‌شود (Berta

[1] Neural Network Algorithm

Aneseyee et al., 2020). به عبارتی دیگر هر چه فعالیت‌های انسانی بیشتر باشد، تنوع زیستی منطقه‌ای کمتر، کیفیت زیستگاه پایین‌تر، درجه تخریب زیستگاه بالاتر و اکوسیستم ناپایدارتر می‌شود (Tang et al.,2023). فرمول‌ها به صورت زیر بیان می‌شوند:

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

$$Linear\ decay:\ i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r\,max}} \right) \quad \text{رابطه 2)}$$

$$Exponential\ decay:\ i_{rxy} = exp\left[-\left(\frac{2.99}{d_{r\,max}} \right) \times d_{xy} \right] \quad \text{رابطه 3)}$$

که در آن D_{xj} درجه کل تخریب زیستگاه پیکسل x در jامین نوع کاربری اراضی است (معادل (۱))، R تعداد کل منابع تهدید و r محرک تهدید زیستگاه است. Y_r تعداد کل پیکسل های منابع تهدید، y حساسیت نسبی منابع تهدید و w_r وزن عامل تهدید زیستگاه می‌باشد. r_y مقدار تنش یا همان شدت عامل تهدید، β_x سطح حفاظت شده زیستگاه یا مقاومت زیستگاه در برابر اختلال و S_{jr} حساسیت زیستگاه j به عامل تنش r است. i_{rxy} اثر عامل تهدید r در شبکه y بر شبکه x است که می‌تواند با تضعیف خطی یا نمایی به دست آید (معادل (۳) و (۴)). همچنین d_{xy} فاصله خطی بین واحد فضایی x و j است و $d_{r\,max}$ حداکثر فاصله تنش عامل تهدید است. به طور کلی کیفیت زیستگاه معیاری بدون بعد با مقدار بین ۰ تا ۱ است که هر چه ارزش بالاتر باشد، زیستگاه بهتر است. این مقدار بر اساس تخریب زیستگاه محاسبه می‌شود و فرمول به شرح زیر است (Tang et al., 2023):

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad \text{رابطه 4)}$$

که در آن Q_{xj} نمایانگر شاخص کیفیت زیستگاه پیکسل x در نوع کاربری j، H_j تناسب زیستگاه از نوع کاربری jام و k ثابت نیمه اشباع است که معمولاً نیمی از حداکثر با مقدار پیش فرض ۰/۵ است. همچنین z یک ثابت نرمال سازی است که روی ۲/۵ در مدل تنظیم می‌شود. با توجه رویکرد رو به رشد جمعیتی و اقتصادی در منطقه مورد مطالعه، دو کاربری پر فعالیت انسانی یعنی زمین‌های کشاورزی و مناطق ساخته‌شده از عوامل تهدید در نظر گرفته شدند. بر اساس مقدار توصیه شده مدل InVEST، فاصله تأثیر، وزن و حساسیت انواع مختلف زیستگاه عوامل تهدید (جدول ۲) با توجه به مطالعات قبلی تعیین شد (Lei et al., 2022; Yang, 2021). پارامترهای فوق برای تولید نقشه کیفیت زیستگاه در مدل اعمال شد. محدوده مقادیر کیفیت زیستگاه بین ۰ و ۱ است که هرچه این مقدار کمتر باشد کیفیت زیستگاه ضعیف‌تر است. با استفاده از محیط نرم‌افزاری ArcGIS 10.8 مقادیر شاخص کیفیت زیستگاه به محدوده‌های مختلف: ۰–۰/۱۵، ۰/۱۵–۰/۳، ۰/۳–۰/۶، ۰/۶–۰/۸ و ۰/۸–۱ تقسیم شدند تا به ترتیب نشان دهنده خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و عالی باشد (Tang et al., 2020).

جدول۲. عوامل تهدید و پاسخ استرس آنها

عامل تهدید	حداکثر فاصله تاثیر (کیلومتر)	وزن	نوع تخریب
کشاورزی	۲/۰	۰/۴	خطی
ساخته شده	۱۰/۰	۱/۰	تصاعدی
جاده‌ها	۴/۰	۰/۶	خطی

جدول۳. حساسیت انواع کاربری اراضی به عوامل تهدید زیستگاه

نوع کاربری	مناسب بودن زیستگاه	کشاورزی	ساخته شده	جاده‌ها
ساخته شده	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰
جنگل	۱/۰	۰/۵	۰/۸۵	۰/۷
کشاورزی	۰/۵	۰/۳	۰/۹	۰/۶
علفزار	۰/۸	۰/۵	۰/۶	۰/۴

نتایج و بحث

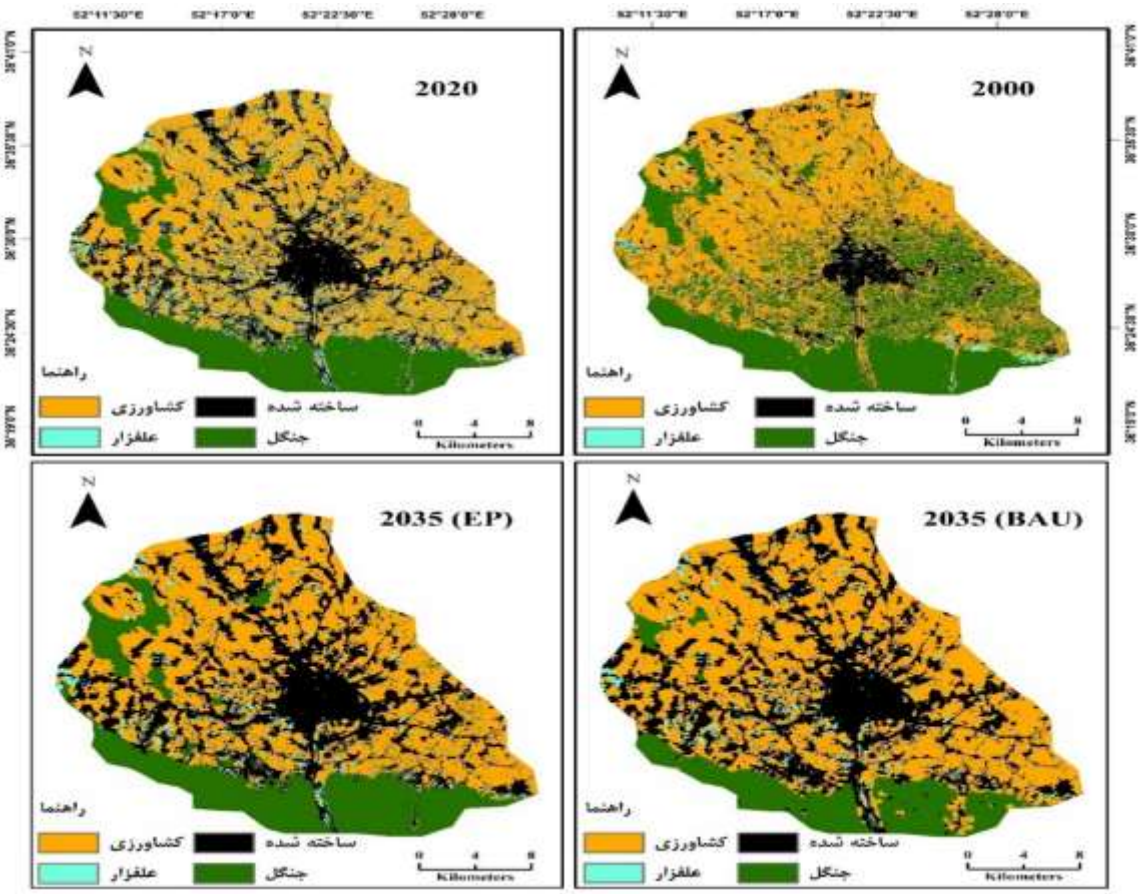
صحت‌یابی نقشه‌های طبقه‌بندی شده

حدود ۳۰۵ نقطه به صورت تصادفی و بر اساس نسبت مساحت هر کلاس برای هر سال در گوگل ارث تهیه شد. بعد از تبدیل فرمت در ArcMap با تصویر طبقه‌بندی شده در نرم افزار Envi جهت بدست آوردن ضریب کاپا مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که دقت کلی و ضریب کاپا برای نقشه کاربری و پوشش اراضی سال ۲۰۰۰ به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۸۱ و برای سال ۲۰۲۰ به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۸۷ بود (جدول ۴). دلیل بالا بودن دقت در سال ۲۰۲۰ را می‌توان به تفاوت نوع ماهواره (لندست ۸) با تصویر ۲۰۰۰ (لندست ۵) نسبت داد. روندی که در تحقیق Babbar و همکاران (2021) نیز مشاهده شد.

جدول٤. دقت طبقه‌بندی کلاس‌های مختلف

سال	کاربری اراضی	ساخته شده	جنگل	کشاورزی	علفزار	مجموع	صحت یابی
۲۰۰۰	ساخته شده	۵۷	۲	۲	۱	۶۲	۹۱/۹۴
	جنگل	۸	۸۱	۶	۱	۹۶	۸۴/۳۸
	کشاورزی	۲	۶	۹۶	۴	۱۰۸	۸۸/۸۹
	علفزار	۲	۰	۶	۳۱	۳۹	۷۹/۴۹
	مجموع	۶۹	۸۹	۱۱۰	۳۷	۳۰۵	۸۶/۸۹
۲۰۲۰	ساخته شده	۸۹	۰	۰	۸	۹۷	۹۱/۷۵
	جنگل	۰	۷۹	۲	۱	۸۲	۹۶/۳۴
	کشاورزی	۰	۰	۸۱	۲	۸۳	۹۷/۵۹
	علفزار	۲	۰	۱۳	۲۷	۴۲	۶۴/۲۹
	مجموع	۹۱	۷۹	۹۶	۳۸	۳۰۴	۹۰/۷۹

نقشه کاربری و پوشش اراضی طبقه‌بندی شده محدوده اطراف شهر آمل برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ بر اساس ساختار اصلی منطقه و همچنین هدف پژوهش تهیه شد. پس از اطمینان از دقت مناسب صحت‌یابی طبقه‌بندی (۰/۸۶ برای سال ۲۰۰۰ و ۰/۹۰ برای سال ۲۰۲۰) و با استناد بر مناسب بودن ضریب کاپا، نقشه کاربری و پوشش اراضی سال ۲۰۳۵ بر اساس دو سناریو پیش‌بینی شد (شکل ۳).



شکل ۳. نقشه کاربری و پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۲۰ و نقشه‌های پیش‌بینی شده برای سال ۲۰۳۵

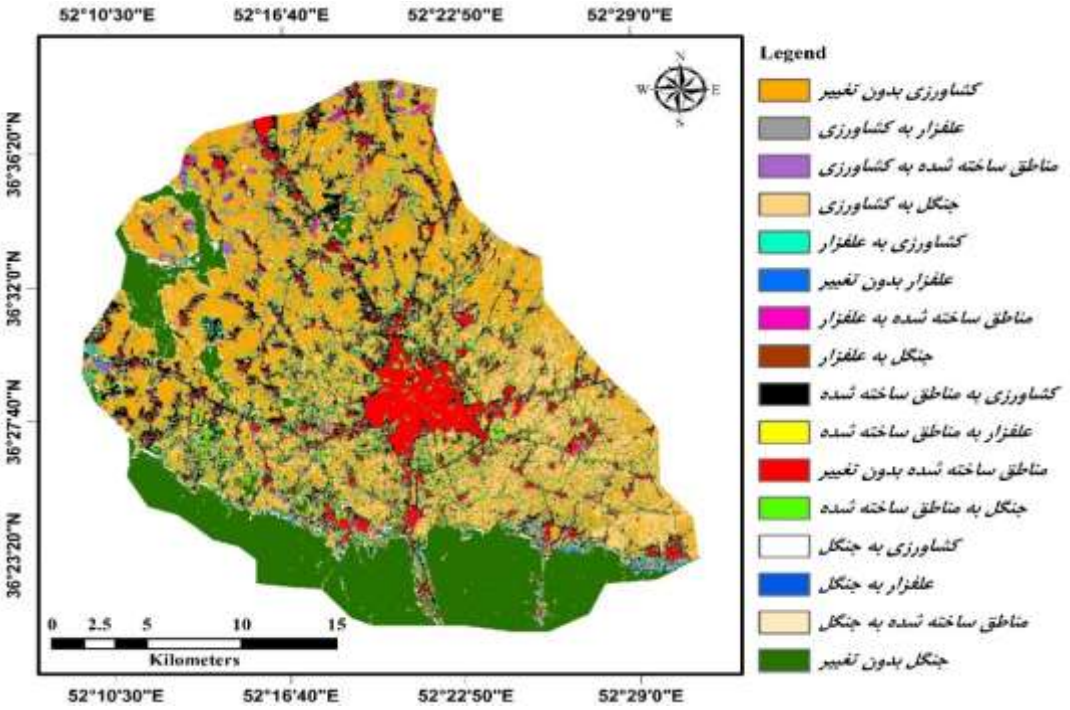
بخش عمده نقشه کاربری و پوشش اراضی در منطقه مورد مطالعه را در سال ۲۰۰۰ کشاورزی (۴۹/۴ درصد) و جنگل (۳۸/۵ درصد) تشکیل می‌دهد و مناطق ساخته‌شده و علفزار هر کدام به ترتیب ۹/۶ و ۲/۵ درصد از کل مساحت منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. بر اساس جدول ۵ از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰، مقوله رشد شهری به عنوان پویاترین ویژگی زمین روند افزایشی ثابتی را با توجه به نرخ رشد جمعیت نشان می‌دهد. همچنین با توجه به جدول احتمال انتقال از دوره ۲۰۰۰–۲۰۲۰ پیش‌بینی شد که این روند افزایشی مناطق شهری و ساخته‌شده از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۵ طبق روند موجود (سناریو BAU) ادامه خواهد داشت. با این حال، زمین‌های جنگلی بیشترین کاهش را در هر دو دوره را نشان می‌دهند.

جدول ۵. مساحت و تغییرات کاربری و پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه

کاربری و پوشش اراضی	۲۰۰۰		۲۰۲۰		۲۰۳۵–BAU		۲۰۳۵–EP	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
ساخته شده	۶۶۱۳	۹/۶	۱۵۸۵۶	۲۳/۰	۲۲۳۳۵	۳۲/۴	۲۰۵۹۲	۲۹/۹
جنگل	۲۶۵۱۹	۳۸/۵	۱۳۷۸۴	۲۰/۰	۹۲۷۴	۱۳/۵	۱۵۲۵۴	۲۲/۲
کشاورزی	۳۴۰۳۸	۴۹/۴	۳۱۷۸۱	۴۶/۲	۳۴۶۹۰	۵۰/۴	۳۰۴۸۱	۴۴/۳
علفزار	۱۶۸۶	۲/۵	۷۴۳۵	۱۰/۸	۲۵۵۷	۳/۷	۲۵۲۹	۳/۶

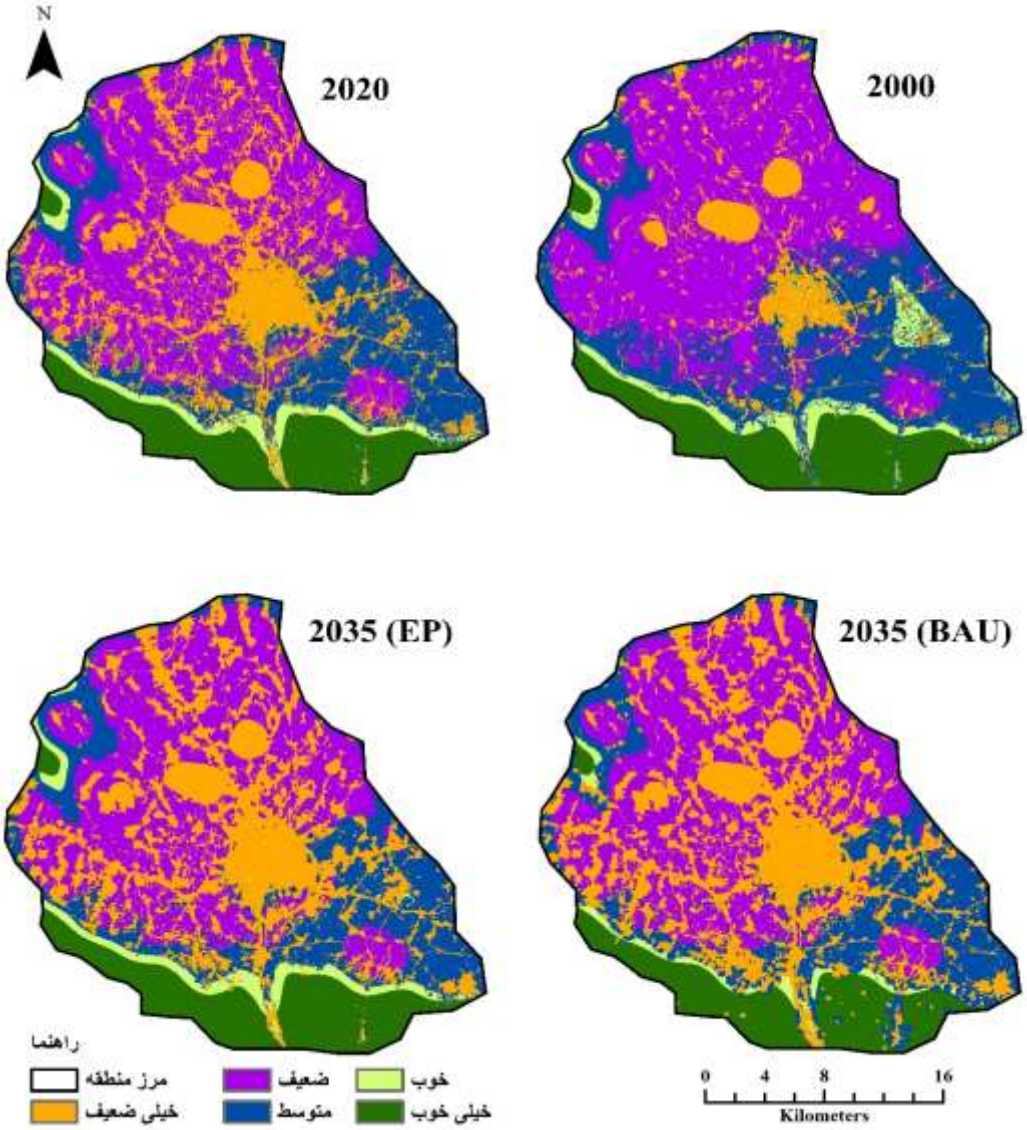
کلاس ساخته‌شده از ۹/۶ درصد در سال ۲۰۰۰ به ۲۳ درصد در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است و انتظار می‌رود در سناریوی BAU به ۳۲/۴ درصد افزایش یابد. هرچند طبق پیش‌بینی بر اساس سناریو EP روند افزایش مناطق ساخته‌شده تا حدودی کنترل

شده و نسبت به سناریو BAU، ۱۷۴۳ هکتار کاهش مساحت مشاهده می‌شود. این نشان می‌دهد که شهرنشینی و توسعه در این منطقه در حال انجام است و تا زمانی که اقداماتی برای حفاظت از محیط زیست انجام نشود، ادامه خواهد یافت (Chen et al., 2023c). کلاس جنگل روند متفاوتی نسبت به مناطق ساخته‌شده نشان می‌دهد، به طوری که مساحت این کلاس از ۳۸/۵ درصد در سال ۲۰۰۰ به ۲۰ درصد در سال ۲۰۲۰ کاهش یافته است و انتظار می‌رود در سناریوی BAU به ۱۳/۵ درصد برسد. اما در سناریو EP که رویکرد آن حفاظت از جنگل بوده تفاوت قابل توجه ۴۲۰۹ هکتاری را نسبت به BAU نشان می‌دهد. روند تغییرات در کاربری کشاورزی که بیشترین سهم منطقه مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است نسبت به سایر کاربری‌ها بسیار کمتر بوده است. می‌توان اشباع شدن منطقه از گسترش کشاورزی و عدم ظرفیت منطقه برای رشد این کاربری را عامل این موضوع دانست. همچنین رشد ۴ برابری مناطق علفزار در سال ۲۰۲۰ نسبت به ۲۰۰۰ را می‌توان به کاهش چشمگیر جنگل و قطع درختان گسترده در این منطقه نسبت داد (Pourmajidian & Rahmani, 2009). در واقع از بین رفتن و تخریب جنگل اغلب با گسترش بیوم‌های علفزار همراه است که می‌توانند در دوره‌های طولانی باقی بمانند و به راحتی به جنگل تبدیل نمی‌شوند (Veldman et al., 2015). به طور خلاصه، نتایج نشان می‌دهد که این منطقه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در کاربری‌های خود دستخوش تغییرات قابل توجه‌ای شده است و در آینده نیز در صورت عدم کنترل (سناریوی BAU) این روند ادامه‌دار خواهد بود. در حالی که سناریوی EP نتیجه بهتری نشان می‌دهد اما همچنان شامل از دست دادن برخی زیستگاه‌های طبیعی و تنوع زیستی است. بنابراین، اجرای برخی سیاست‌ها و اقداماتی که بتواند نیازهای توسعه و حفاظت را در منطقه متعادل کند، دارای اهمیت است. شکل ۴، نیز روند کلی تغییرات و تبدیل کاربری‌های مختلف به یکدیگر را نشان می‌دهد که متناسب با توضیحات داده شده در بالا بیشترین تغییر مربوط به تبدیل کاربری جنگل به کشاورزی می‌باشد که بیشتر در مرکز منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. همچنین، تغییرات متعددی در لبه جنگل مشاهده می‌شود که نشان از آسیب‌پذیر بودن این منطقه است. Franklin و همکاران (2021)، در مطالعه خود که بر روی تأثیر فعالیت‌های انسانی بر لبه جنگل در ۵۵ کشور مختلف به اهمیت لبه‌های جنگلی و آسیب‌پذیر بودن آنها تحت فعالیت‌های انسانی اشاره کرده‌اند.



شکل ٤. تغییرات کاربری و پوشش اراضی در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۰ در منطقه مورد مطالعه

گام بعدی مدل‌سازی کیفیت و درجه تخریب زیستگاه در محدوده شهر آمل برای دوره‌های گذشته (۲۰۰۰)، جاری (۲۰۲۰) و آینده (۲۰۳۵) تحت دو سناریو BAU و EP بود. مناطق با ارزش زیستگاهی بالا در محدوده شهر آمل از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ عمدتاً در مناطق جنگلی و کوهستانی جنوب شهر توزیع شده است (شکل ۵). این منطقه به دلیل پوشش جنگلی و مرتعی و همچنین محدود بودن فعالیت‌های انسانی منطقه با کیفیت زیستگاه بالاتری نسبت به مناطق پست‌تر شمالی دارد که به طور گسترده زیر کشت محصولات کشاورزی رفته است. روند گسترش شهری و مناطق ساخته شده در مرکز محدوه در این دوره ۲۰ ساله کاهش شدید کیفیت زیستگاه را به دنبال داشته است و پیش‌بینی می‌شود در سال ۲۰۳۵ تحت سناریو BAU این روند بیشتر کیفیت زیستگاه را تحت تأثیر قرار دهد. هر چند در سناریو حفاظتی (EP) کیفیت زیستگاه مناطق جنوبی به واسطه حفاظت از مناطق جنگلی و مرتعی حفظ می‌شود اما عدم کنترل رشد مناطق ساخته شده در محدوده شهر تغییری در وضعیت کیفیت زیستگاه در مرکز منطقه مورد مطالعه نداشته است. به طور کلی در مقیاس فضای کیفیت زیستگاه در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۵ در مناطق مرکزی به دلیل مناطق ساخته‌شده شهری دارای کیفیت زیستگاه پایین و مناطق جنوب منطقه به دلیل وجود جنگل و عدم دخالت کمتر انسان دارای کیفیت زیستگاه بالاتری می‌باشد. همچنین در مقیاس زمانی کیفیت زیستگاه روندی کاهشی را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۵ نشان می‌دهد. با این وجود کیفیت زیستگاه تحت سناریو EP وضعیت بهتری دارد (جدول۵).



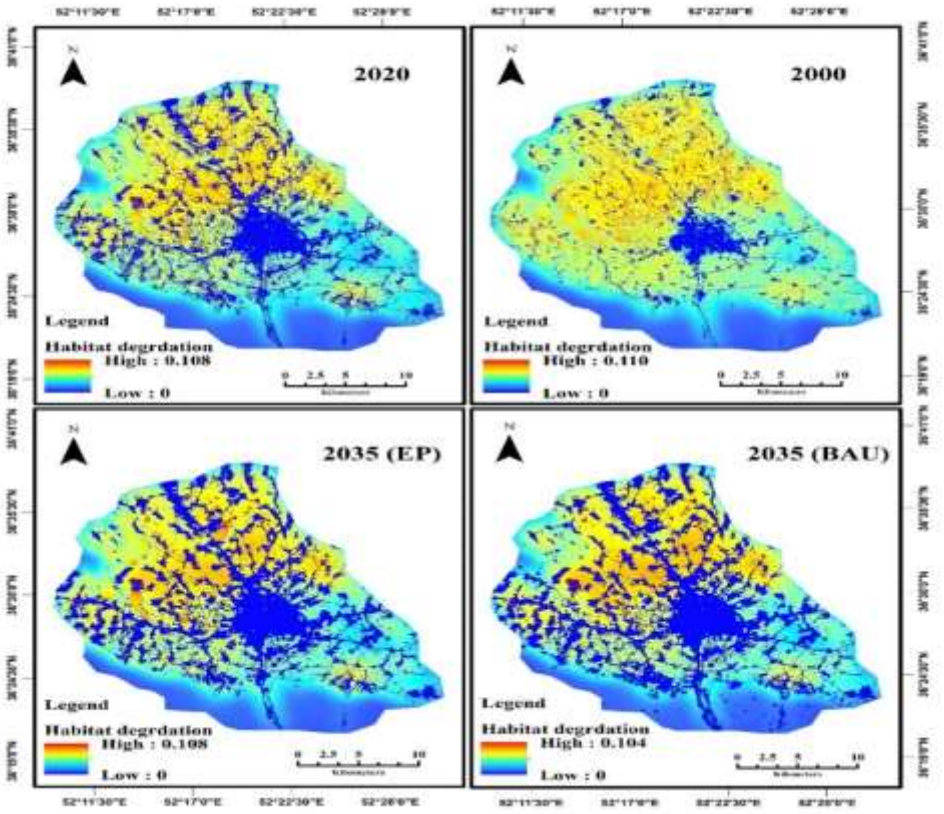
شکل ۵. کیفیت زیستگاه منطقه مورد مطالعه در دوره‌های مختلف

بر اساس جدول ۶ میانگین کیفیت زیستگاه محدوده شهر آمل در سال های ۲۰۰۰، ۲۰۲۰ و ۲۰۳۵ تحت دو سناریو BAU و EP به ترتیب ۰/۳۵۶۸، ۰/۳۰۵۷، ۰/۲۶۲۴ و ۰/۲۸۹۴ بوده است، که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ نزدیک به ۱۴/۳ درصد کاهش یافته است و بیانگر کاهش شدید کیفیت زیستگاه با گذشت زمان است. اما تغییر کیفیت زیستگاه بین سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۵ تحت دو سناریو BAU و EP به ترتیب ۱۴/۱ درصد و ۵/۳ درصد کاهشی بوده است. به عبارت دیگر، درجه کیفیت زیستگاه در کل روندی کاهشی داشته و فقط در صورت حفاظت اکولوژیکی میزان کاهش کیفیت کمتر می‌باشد. منطقه با کیفیت زیستگاه ضعیف در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۲۰ بیشترین نسبت را به خود اختصاص داده است در حالی که در سناریو پیشنهادی منطقه با کیفیت زیستگاه خیلی ضعیف درصد غالب را شامل می‌شود.

جدول ٦. نسبت مساحت و میانگین ارزش کیفیت زیستگاه در محدوه شهر آمل از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۳۵

کیفیت زیستگاه	۲۰۰۰		۲۰۲۰		۲۰۳۵–BAU		۲۰۳۵–EP	
درجه کیفیت	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
خیلی ضعیف	۸۸۵۰	۱۲/۹	۱۸۴۵۲	۲۶/۸	۲۴۰۶۵	۳۴/۹	۲۲۳۳۰	۳۲/۴
ضعیف	۲۹۵۸۰	۴۲/۹	۲۴۷۲۴	۳۵/۹	۲۲۶۰۴	۳۲/۸	۲۲۲۳۷	۳۲/۳
متوسط	۱۸۲۵۶	۲۶/۵	۱۴۴۰۴	۲۱/۰	۱۳۱۷۲	۱۹/۱	۱۲۷۷۸	۱۸/۶
خوب	۳۳۵۸	۴/۹	۲۵۳۷	۳/۷	۱۱۷۹	۱/۸	۲۶۳۰	۳/۸
عالی	۸۸۱۲	۱۲/۸	۸۷۳۹	۱۲/۶	۷۸۳۶	۱۱/۴	۸۸۸۱	۱۲/۹
میانگین	۰/۳۵۶۸		۰/۳۰۵۷		۰/۲۶۲۴		۰/۲۸۹۴	

شکل ۶ نقشه تخریب زیستگاه را برای سه دوره مورد بررسی در بازه بین صفر تا حدود ۰/۱۲ را نشان می‌دهد که به طور کلی حاکی از تخریب زیستگاه با گذشت زمان است. بیشترین تخریب بین سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ و در قسمت شمالی منطقه مشاهده می‌شود که مربوط به تخریب جنگل و مرتع در این قسمت و تبدیل آن به کشاورزی و مناطق ساخته‌شده است.



شکل ٦. درجه تخریب زیستگاه منطقه مورد مطالعه در دوره‌های مختلف

به طور کلی، مطالعه حاضر تغییرات زمانی و مکانی در کیفیت زیستگاه محدوده شهر آمل را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ تجزیه و تحلیل کرد. بر اساس نتایج پیش‌بینی سناریوهای مختلف در سال ۲۰۳۵، توزیع مکانی کیفیت زیستگاه تجزیه و تحلیل شد. در سناریوهای مختلف در سال ۲۰۳۵ مشخص شد که سناریوی EP برای بهبود کیفیت زیستگاه منطقه مورد مطالعه مساعد است. روند و نتیجه‌ای که در مطالعات متعددی نیز بدست آمده است (Wei et al., 2022). نتایج این مطالعه مبنایی برای حفاظت از تنوع زیستی و برنامه‌ریزی اکولوژیکی منطقه‌ای در حومه‌های شهری فراهم می‌کند. با این وجود، عواملی که بر تغییرات کیفیت زیستگاه تأثیر می‌گذارند، پیچیده و متنوع هستند که باید این عوامل تأثیرگذار بر تغییرات کیفیت زیستگاه شناسایی و بررسی شوند

(Xiao et al., 2023). به عنوان مثال در برخی از تحقیقات سناریوی حفاظتی نتیجه مطلوبی به دلایلی همچون گسترش شهرنشینی شدید و اشغال فضاهای طبیعی دیگر نداشته است (Nie et al., 2023). درواقع ارزیابی کاربری و پوشش اراضی یک اکوسیستم پیچیده است و فعالیت‌های انسانی تأثیر بسزایی در توسعه و تغییرات آن دارد که در تحقیق Wei و همکاران (2022) نیز مورد بحث و نتیجه‌گیری قرار گرفته است. گسترش زمین‌های ساخت و ساز شهری در محدوده شهر آمل از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ ارتباط نزدیکی با کیفیت زیستگاه و تنوع زیستی منطقه دارد. در میان انواع کاربری اراضی، مناطق ساخته‌شده شهری بارزترین تأثیر را بر کیفیت زیستگاه داشت و زمین‌های زیر کشت نیز یکی از مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت زیستگاه شناسایی شد. به طور مشخص نتیجه‌گیری شده که تغییر در مساحت کاربری‌ها مختلف مستقیماً بر تغییر کیفیت زیستگاه در یک منطقه شهری تأثیر می‌گذارد. بنابراین، ما می‌توانیم بهترین رویکردها و سیاست‌ها را برای دستیابی به تعادل بین توسعه اجتماعی-اقتصادی و حفاظت از کیفیت زیستگاه در محدوده‌های شهری که محیط زیست‌بوم‌شناختی ذاتاً شکننده است، پیش‌بینی کنیم.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی و مدل‌سازی تاثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی در محدوده‌ی شهر آمل در استان مازندران انجام گرفت و تحلیلی جامع از پویایی مکانی-زمانی کیفیت زیستگاه از طریق پیوند دادن مدل‌های CA-Markov و InVEST با استفاده از داده‌های سنجش از دور موجود ارائه می‌کند. نتایج پژوهش حاضر نشان داده است که منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر تغییرات شدید کاربری و پوشش اراضی قرار دارد. کاهش فضاهای اکولوژیکی همچون پوشش‌های جنگلی و مراتع همگام با گسترش فضاهای انسان ساخت همچون مناطق ساخته‌شده و کشاورزی در منطقه چشمگیر است. این روند برای آینده در سناریو BAU نیز قابل پیش‌بینی است. هرچند در سناریو پیشنهادی (EP) که بر اساس اصول حفاظت از فضاهای اکولوژیکی تنظیم شده روند تخریبی و تغییرات کاربری و پوشش اراضی تا حدودی قابل پیشگیری است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، کیفیت زیستگاه طی سال‌های ۲۰۰۰-۲۰۲۰ به‌طور چشمگیری کاهش یافته و روند کاهشی موجود برای سال ۲۰۳۵ نیز پیش‌بینی می‌شود. گسترش شهرنشینی و افزایش فعالیت‌های انسانی همچون توسعه کشاورزی به عنوان عامل اصلی کاهش کیفیت زیستگاه در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. علاوه بر این، افزایش قابل‌توجهی در تخریب زیستگاه به دلیل از دست‌دادن فضاهای اکولوژیکی محیطی مانند پوشش درختان، مراتع و کشاورزی مشاهده شد. برای غلبه بر این، استراتژی‌های مدیریت کاربری موثر زمین برای به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی فعالیت‌های انسانی بر ظرفیت کیفیت زیستگاه ضروری است. بر همین اساس سناریو حفاظت اکولوژیکی (EP) نتایج مطلوب‌تری در بهبود کیفیت زیستگاه در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. این تحقیق بر نقش مهم سنجش از دور در نظارت بر تغییرات کاربری و پوشش اراضی برای سناریوهای کوتاه مدت و بلندمدت تاکید می‌کند. در این پژوهش پیونددادن مدل‌های CA-Markov و InVEST به عنوان یک رویکرد نوآورانه به ما کمک کرد تا تحلیل‌های مکانی-زمانی کیفیت زیستگاه را بر اساس تغییرات کاربری و پوشش اراضی را مدل‌سازی کنیم. در نهایت، تحقیقات ما درک عمیق‌تری از پیوندهای بین کاربری و پوشش اراضی ناشی از برنامه‌های بازسازی محیطی و تغییرات کیفیت زیستگاه را نشان می‌دهد. نتیجه‌گیری شد که برخی از اقدامات مانند کنترل توسعه شهری، کاهش فعالیت‌های انسانی و برنامه‌های احیای جنگل می‌تواند اثرات نامطلوب تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر کیفیت زیستگاه را کاهش دهد.

پیشنهادات سیاستی

- گسترش شهری و رشد جمعیت عامل کلیدی در تغییرات کیفیت زیستگاه است از این رو سیاست های کنترل جمعیت و شهرنشینی در برنامه‌ریزی‌های کلان در حفظ تنوع زیستی محیط زیست شهری موثر است.
- استفاده از داده‌های سنجش از دور (لندست) و فن‌آوری‌های نوین (CA-Markov و InVEST) در مدل‌سازی اکولوژیکی، به‌ویژه در مناطقی همچون ایران که با محدودیت داده روبه‌رو هستند، در دستیابی به شهرها و جوامع پایدارتر مفید می‌باشد.
- استراتژی‌های مدیریت کاربری زمین و حفاظت از فضاهای اکولوژیکی همچون جلوگیری از تخریب جنگل، مرتع و کنترل توسعه شهری می‌توانند تأثیرات تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر کیفیت زیستگاه را کاهش دهند.
- برنامه‌ریزی جامع‌تر در مناطقی همچون شمال ایران که با رشد شهرنشینی سریع و افزایش جمعیت مواجه هستند جهت مقابله با چالش تاثیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر کاهش کیفیت زیستگاه و تخریب زمین لازم است.

منابع

جهانداری، جاوید؛ حجازی، رخشاد؛ جوزی، سیّد علی و مرادی، عباس (۱۴۰۱). اثرات توسعه شهری بر الگوهای مکانی، زمانی خدمت اکوسیستمی ذخیره کربن در حوزه آبخیز بندرعباس با نرم‌افزار InVEST. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۲ (۴)، ۹۱-۱۰۶. https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11069.1097

دانشی، علیرضا؛ نجفی نژاد، علی؛ پناهی، مصطفی و زرندیان، اردوان (۱۳۹۹). پیش بینی اثرات تغییر کاربری اراضی بر کیفیت زیستگاه حوزه سد نرماب در استان گلستان. *تخریب و احیاء اراضی طبیعی*، ۱ (۱)، ۱۲۰-۱۳۱. http://drnl.sanru.ac.ir/article-1-155-fa.html

رستمی، رحیمه؛ محمد خورشید دوست، علی و باکویی، مائده (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات کاربری حاشیه شرق دریاچه ارومیه با تاکید بر شوری خاک به روش شی گرا. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۶ (۸۲)، ۸۳-۹۳. https://doi.org/10.22034/gp.2023.10835

رضائی مقدم، محمد حسین؛ رجبی، معصومه و موسوی، سیده معصومه (۱۴۰۲). بررسی و پایش تغییرات کاربری اراضی حوضه آبریز رود زرد با استفاده از سنجش از دور و مدل زنجیره مارکوف. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۷ (۸۳)، ۴۹-۶۱. https://doi.org/10.22034/gp.2023.14704

زاهدی کلاکی، ابراهیم؛ متولی، صدرالدین؛ محمودزاده، حسن و غلامرضا، جانباز قبادی (۱۴۰۰). تبیین ساختار اکولوژی شهری در راستای ارتقای ضریب تاب آوری زیست محیطی با استفاده از تحلیل متریکهای سیمای سرزمین (مطالعه موردی شهر بهشهر). *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۵ (۷۸)، ۱۹۷-۲۱۸. https://doi.org/10.22034/gp.2021.42841.2741

زرندیان، اردوان؛ یاوری، احمدرضا؛ جعفری، حمیدرضا و امیرنژاد، حمید (۱۳۹۴). مدل سازی آثار تغییر پوشش زمین بر کیفیت زیستگاه در سرزمین جنگلی سرولات و جواهردشت. *پژوهش‌های محیط زیست*، ۶ (۱۲)، ۱۸۳-۱۹۴. https://sid.ir/paper/192330/fa

سادات، مهدیس؛ ذوقی، محمود و امیری، محمدجواد (۱۴۰۳). بررسی اثرهای برخی از شاخص‌های اکولوژیکی لکه‌های جنگلی برروی عرضهٔ خدمات اکوسیستمی منتخب (منطقهٔ مورد مطالعه: بخش شرقی استان گیلان). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۳۵ (۱), ۸۹-۱۱۰. https://10.22108/gep.2023.138399.1595

Abdollahi, S., Zeilabi, E., & Xu, C. C. (2024). Habitat quality assessment based on local expert knowledge and landscape patterns for bird of prey species in Hamadan, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(2), 2051-2061. https://doi.org/10.1007/s40808-023-01896-y

Abdulrahman, A. I., & Ameen, S. A. (2020). Predicting Land use and land cover spatiotemporal changes utilizing CA-Markov model in Duhok district between 1999 and 2033. *Academic Journal of Nawroz University*, 9(4), 71-80. https://doi.org/10.25007/ajnu.v9n4a892

Babbar, D., Areendran, G., Sahana, M., Sarma, K., Raj, K., & Sivadas, A. (2021). Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123333. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123333

Bahrami, A., Emadodin, I., Ranjbar Atashi, M., & Rudolf Bork, H. (2010). Land-use change and soil degradation: A case study, North of Iran. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1(4), 600-605.

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. https://doi.org/10.3390/rs12071103

Chen, C., Liu, J., & Bi, L. (2023b). Spatial and temporal changes of habitat quality and its influential factors in China based on the InVEST model. *Forests*, 14(2), 374. https://doi.org/10.3390/f14020374

Chen, R., Chen, Y., Lyulyov, O., & Pimonenko, T. (2023c). Interplay of urbanization and ecological environment: Coordinated development and drivers. *Land*, 12(7), 1459. https://doi.org/10.3390/land12071459

Chen, X., Yu, L., Cao, Y., Xu, Y., Zhao, Z., Zhuang, Y., ... & Gong, P. (2023a). Habitat quality dynamics in China's first group of national parks in recent four decades: Evidence from land use and land cover changes. *Journal of Environmental Management*, 325, 116505. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116505

de Mendonça, M. J. C., Sachsida, A., & Loureiro, P. R. (2003). A study on the valuing of biodiversity: the case of three endangered species in Brazil. *Ecological Economics*, 46(1), 9-18. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(03)00080-6

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. DOI:10.1126/science.aax3100

Dinguirard, M., & Slater, P. N. (1999). Calibration of space-multispectral imaging sensors: A review. *Remote Sensing of Environment*, 68(3), 194-205. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00111-4

Firozjaei, M. K., Fathololoumi, S., Kiavarz, M., Arsanjani, J. J., & Alavipanah, S. K. (2020). Modelling surface heat island intensity according to differences of biophysical characteristics: A case study of Amol city, Iran. *Ecological Indicators*, 109, 105816. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105816

Floreano, I. X., & de Moraes, L. A. F. (2021). Land use/land cover (LULC) analysis (2009–2019) with Google Earth Engine and 2030 prediction using Markov-CA in the Rondônia State, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 239. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09016-y

Franklin, C. M., Harper, K. A., & Clarke, M. J. (2021). Trends in studies of edge influence on vegetation at human-created and natural forest edges across time and space. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(2), 274-282. https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0308

Fu, F., Deng, S., Wu, D., Liu, W., & Bai, Z. (2022). Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a county area based on CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103760. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103760

Ghalehteimouri, K. J., Shamsoddini, A., Mousavi, M. N., Ros, F. B. C., & Khedmatzadeh, A. (2022). Predicting spatial and decadal of land use and land cover change using integrated cellular automata Markov chain model based scenarios (2019–2049) Zarriné-Rūd River Basin in Iran. *Environmental Challenges*, 6, 100399. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100399

Hack, J., Molewijk, D., & Beißler, M. R. (2020). A conceptual approach to modeling the geospatial impact of typical urban threats on the habitat quality of river corridors. *Remote Sensing*, 12(8), 1345. https://doi.org/10.3390/rs12081345

He, N., Guo, W., Wang, H., Yu, L., Cheng, S., Huang, L., ... & Zhou, H. (2023). Temporal and Spatial Variations in Landscape Habitat Quality under Multiple Land-Use/Land-Cover Scenarios Based on the PLUS-InVEST Model in the Yangtze River Basin, China. *Land*, 12(7), 1338. https://doi.org/10.3390/land12071338

Hurtt, G. C., Chini, L., Sahajpal, R., Frolking, S., Bodirsky, B. L., Calvin, K., ... & Zhang, X. (2020). Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 13(11), 5425-5464. https://doi.org/10.5194/gmd-13-5425-2020

IRIMO (2020). Islamic Republic of Iran Meteorological Organization. Tehran, Iran.

Islami, F. A., Tarigan, S. D., Wahjunie, E. D., & Dasanto, B. D. (2022). Accuracy assessment of land use change analysis using Google Earth in Sadar watershed mojokerto regency. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 950, No. 1, p. 012091). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/950/1/012091

Kamran, J. G., Musa, K. K., & Sadegh, G. F. (2020). An investigation into urban development patterns with sprawl and other corresponding changes: A case study of Babol City. *Journal of Urban Culture Research*, 20, 26-43. https://doi.org/10.14456/jucr.2020.2

Karimi, H., Jafarnezhad, J., Khaledi, J., & Ahmadi, P. (2018). Monitoring and prediction of land use/land cover changes using CA-Markov model: a case study of Ravansar County in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-9. https://doi.org/10.1007/s12517-018-3940-5

Krause, A., Haverd, V., Poulter, B., Anthoni, P., Quesada, B., Rammig, A., & Arneth, A. (2019). Multimodel analysis of future land use and climate change impacts on ecosystem functioning. *Earth's Future*, 7(7), 833-851. https://doi.org/10.1029/2018EF001123

Lei, J., Chen, Y., Li, L., Chen, Z., Chen, X., Wu, T., & Li, Y. (2022). Spatiotemporal change of habitat quality in Hainan Island of China based on changes in land use. *Ecological Indicators*, 145, 109707. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109707

Li, X., Liu, Z., Li, S., & Li, Y. (2022). Multi-scenario simulation analysis of land use impacts on habitat quality in Tianjin based on the PLUS model coupled with the InVEST model. *Sustainability*, 14(11), 6923. https://doi.org/10.3390/su14116923

Moreira, M., Fonseca, C., Vergílio, M., Calado, H., & Gil, A. (2018). Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian island based on the InVEST model: a case study of Pico Island (Azores, Portugal). *Land use policy*, 78, 637-649. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.015

Nie, Y., Zhang, X., Yang, Y., Liu, Z., He, C., Chen, X., & Lu, T. (2023). Assessing the impacts of historical and future land-use/cover change on habitat quality in the urbanizing Lhasa River Basin on the Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 148, 110147. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110147

Poncet, A. M., Knappenberger, T., Brodbeck, C., Fogle Jr, M., Shaw, J. N., & Ortiz, B. V. (2019). Multispectral UAS data accuracy for different radiometric calibration methods. *Remote Sensing*, 11(16), 1917. https://doi.org/10.3390/rs11161917

Pourmajidian, M. R., & Rahmani, A. (2009). The influence of single-tree selection cutting on silvicultural properties of a northern hardwood forest in Iran. *American-Eurasian J Agric Environ Sci*, 5(4), 526-532.

Sallustio, L., De Toni, A., Strollo, A., Di Febbraro, M., Gissi, E., Casella, L., ... & Marchetti, M. (2017). Assessing habitat quality in relation to the spatial distribution of protected areas in Italy. *Journal of Environmental Management*, 201, 129-137. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.031

Shao, Z., Chen, R., Zhao, J., Xia, C. Y., He, Y., & Tang, F. (2022). Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models. *Acta Ecol. Sin*, 42, 9456-9469.

Shihab, T. H., Al-Hameedawi, A. N., & Hamza, A. M. (2020). Random forest (RF) and artificial neural network (ANN) algorithms for LULC mapping. *Engineering and Technology Journal*, 38(4A), 510-514. https://doi.org/10.30684/etj.v38i4A.399

Tang, F., Fu, M., Wang, L., & Zhang, P. (2020). Land-use change in Changli County, China: Predicting its spatio-temporal evolution in habitat quality. *Ecological Indicators*, 117, 106719. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106719

Tang, J., Zhou, L., Dang, X., Hu, F., Yuan, B., Yuan, Z., & Wei, L. (2023). Impacts and predictions of urban expansion on habitat quality in the densely populated areas: A case study of the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 151, 110320. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110320

Terrado, M., Sabater, S., Chaplin-Kramer, B., Mandle, L., Ziv, G., & Acuña, V. (2016). Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 540, 63-70. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.064

Veldman, J. W., Overbeck, G. E., Negreiros, D., Mahy, G., Le Stradic, S., Fernandes, G. W., ... & Bond, W. J. (2015). Where tree planting and forest expansion are bad for biodiversity and ecosystem services. *BioScience*, 65(10), 1011-1018. https://doi.org/10.1093/biosci/biv118

Wang, B., & Cheng, W. (2022). Effects of land use/cover on regional habitat quality under different geomorphic types based on InVEST model. *Remote Sensing*, 14(5), 1279. https://doi.org/10.3390/rs14051279

Wang, Q., Guan, Q., Lin, J., Luo, H., Tan, Z., & Ma, Y. (2021). Simulating land use/land cover change in an arid region with the coupling models. *Ecological Indicators*, 122, 107231. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107231

Watson, K. B., Galford, G. L., Sonter, L. J., Koh, I., & Ricketts, T. H. (2019). Effects of human demand on conservation planning for biodiversity and ecosystem services. *Conservation Biology*, 33(4), 942-952. https://doi.org/10.1111/cobi.13276

Wei, Q., Abudureheman, M., Halike, A., Yao, K., Yao, L., Tang, H., & Tuheti, B. (2022). Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China. *Ecological Indicators*, 145, 109632. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109632

Wei, W., Bao, Y., Wang, Z., Chen, X., Luo, Q., & Mo, Y. (2023). Response of habitat quality to urban spatial morphological structure in multi-mountainous city. *Ecological Indicators*, 146, 109877. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109877

Wu, J., Li, X., Luo, Y., & Zhang, D. (2021). Spatiotemporal effects of urban sprawl on habitat quality in the Pearl River Delta from 1990 to 2018. *Scientific Reports*, 11(1), 13981. https://doi.org/10.1038/s41598-021-92916-3

Xiao, P., Zhou, Y., Li, M., & Xu, J. (2023). Spatiotemporal patterns of habitat quality and its topographic gradient effects of Hubei Province based on the InVEST model. *Environment, Development and Sustainability*, 25(7), 6419-6448. https://doi.org/10.1007/s10668-022-02310-w

Xie, X., & Zhu, Q. (2023). Research on the Impact of Urban Expansion on Habitat Quality in Chengdu. *Sustainability*, 15(7), 6271. https://doi.org/10.3390/su15076271

Yang, Y. (2021). Evolution of habitat quality and association with land-use changes in mountainous areas: A case study of the Taihang Mountains in Hebei Province, China. *Ecological Indicators*, 129, 107967. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107967

Yohannes, H., Soromessa, T., Argaw, M., & Dewan, A. (2021). Spatio-temporal changes in habitat quality and linkage with landscape characteristics in the Beressa watershed, Blue Nile basin of Ethiopian highlands. *Journal of Environmental Management*, 281, 111885. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111885

Yousefi, S., Moradi, H. R., Keesstra, S., Pourghasemi, H. R., Navratil, O., & Hooke, J. (2019). Effects of urbanization on river morphology of the Talar River, Mazandarn Province, Iran. *Geocarto International*, 34(3), 276-292. https://doi.org/10.1080/10106049.2017.1386722

Zhou, X., Liu, C., Xue, Y., Akbar, A., Jia, S., Zhou, Y., & Zeng, D. (2022). Radiometric calibration of a large-array commodity CMOS multispectral camera for UAV-borne remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112, 102968. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102968