



Assessing the effects of agricultural land expansion on ecosystem services in a desert protected area using the InVEST model

Amir Memarzadeh Kiani¹ | Mohamad Javad Amiri^{2✉} | Ahmad Nohegar³

1. Department of Planning and Management and Environmental Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: amir.memarzadeh@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Planning and Management and Environmental Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mjamiri@ut.ac.ir

3. Department of Planning and Management and Environmental Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: nohrgar@ut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 20 December 2025 Received in revised form 28 March 2026 Accepted 5 April 2026 Keywords: <i>Ecosystem services,</i> <i>InVEST model,</i> <i>Kavir Protected Area,</i> <i>Spatial analysis.</i>	Land-use change, particularly the expansion of agricultural lands, is considered one of the most significant drivers affecting the transformation of ecosystem services in arid and hyper-arid ecosystems. This study aimed to spatially analyze the impact of agricultural land expansion on ecosystem services in the Kavir Protected Area. To this end, land cover/land use changes for the years 1986 and 2020 were extracted and analyzed based on Landsat satellite imagery. Subsequently, using the InVEST model and spatial analyses within a GIS environment, three ecosystem services—soil retention, habitat quality, and water yield—were evaluated, and a land-use change scenario for 2054 was also analyzed. The results indicated that during the study period, approximately 3,804 hectares of natural rangelands and shrublands were converted into agricultural lands. Outputs from the soil retention module and the USLE equation revealed that agricultural lands exhibited the highest soil loss (approximately 5,000 kg per pixel) and the lowest soil protection capacity, whereas shrublands and rangelands showed the highest soil retention potential (around 16,750 kg per pixel). Habitat quality module results also demonstrated a decline in habitat quality and an increase in degradation intensity due to agricultural expansion, a trend that is projected to intensify in the 2054 scenario. Moreover, the water yield module indicated a reduction in water production resulting from increased evapotranspiration caused by agricultural development. Overall, the findings highlight that agricultural expansion undermines the regulating ecosystem services of the region, emphasizing the necessity of limiting agricultural development and considering ecological factors in the management of the Kavir Protected Area.

Cite this article: Memarzadeh Kiani, A., Amiri, M.J. & Nohegar, A. (2026). Assessing the effects of agricultural land expansion on ecosystem services in a desert protected area using the InVEST model. *Journal of Natural Environment*, 79 (3), 457-473. DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.408430.2871>



Introduction

In recent decades, the increasing interaction between economic development and environmental conservation has emerged as one of the most complex challenges in sustainable natural resource management. Expansion of agricultural lands, particularly in arid and semi-arid regions, is recognized as one of the primary drivers of land-use/land-cover change, leading to profound ecological consequences. Although agricultural development contributes to local livelihoods and short-term economic benefits, it often disrupts ecosystem balance, fragments habitats, and degrades ecosystem services such as soil regulation, water purification, and biodiversity conservation. Protected areas, which are established as key strongholds of biodiversity conservation and genetic resource protection, are increasingly under pressure from surrounding human activities. The Kavir Protected Area in southern Tehran Province, Iran, represents a highly sensitive ecological zone due to its position along a climatic and ecological gradient extending from the Alborz Mountains to the central desert. Its proximity to densely populated metropolitan areas has intensified anthropogenic pressures, especially agricultural expansion in buffer zones and adjacent landscapes. Over the past two decades, substantial conversion of rangelands and natural shrublands into agricultural fields and orchards has been observed in the region. This transformation has resulted in habitat fragmentation, disruption of hydrological cycles, increased chemical pollution from fertilizers and pesticides, and a significant decline in ecosystem service provision. Moreover, the degradation of the buffer zone has reduced its effectiveness as a protective barrier, allowing agricultural impacts to penetrate deeper into the core protected ecosystem. Given the complexity of ecological degradation processes in the Kavir Protected Area, traditional conservation approaches that rely solely on restrictive regulations are no longer sufficient. Instead, integrated strategic planning approaches are required to identify key internal and external factors influencing land-use dynamics and to prioritize effective management interventions. Therefore, this study aims to assess the impacts of agricultural expansion on ecosystem services in the Kavir Protected Area and to develop prioritized management strategies using a combined SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) and Quantitative Strategic Planning Matrix (QSPM) approach.

Material and Methods

This study employed a mixed-methods research design combining quantitative and qualitative approaches. The overall framework was structured in four sequential stages: (1) land-use change analysis, (2) ecosystem service assessment, (3) SWOT analysis, and (4) strategy prioritization using QSPM. In the first stage, multi-temporal satellite imagery from Landsat sensors covering the period 1986 to 2020 was used to detect land-use/land-cover changes in the Kavir Protected Area and its buffer zones. Image preprocessing, classification, and change detection were conducted using supervised machine learning techniques. Land-use categories included rangelands, shrublands, agricultural lands, barren lands, and urban areas. Accuracy assessment was performed to ensure classification reliability. In the second stage, ecosystem service changes were evaluated using ecological indicators and adapted ecosystem service assessment models. Key services assessed included soil erosion control, hydrological regulation, and biodiversity support functions. Field observations and ecological sampling were used to validate remote sensing results and to identify degradation patterns associated with agricultural intensification. The third stage involved the identification of internal and external factors affecting land-use management through SWOT analysis. A panel of 20 experts, including environmental scientists, rangeland managers, protected area rangers, agricultural specialists, and local stakeholders, participated in structured and semi-structured sessions conducted between spring and summer 2024. Factors were identified based on literature review, field evidence, and expert consensus. Internal factors were categorized as strengths and weaknesses, while external factors were classified as opportunities and threats. To quantify SWOT factors, structured questionnaires were designed using a 1–4 Likert scale. Experts assigned weights and importance scores to each factor. Internal Factor Evaluation (IFE) and External Factor Evaluation (EFE) matrices were constructed to determine the overall strategic position of the study area. In the final stage, the Quantitative Strategic Planning Matrix (QSPM) was applied to prioritize management strategies. Fourteen strategic alternatives were developed based on SWOT combinations (SO, WO, ST, WT strategies). Experts evaluated the attractiveness scores of each strategy relative to SWOT factors. The final QSPM scores were calculated by multiplying weights and attractiveness ratings, enabling ranking of strategies based on overall effectiveness.

Results

The analysis of land-use change revealed a substantial transformation of natural ecosystems in the Kavir Protected Area. Over the study period, approximately 3,800 hectares of rangelands and shrublands were converted into agricultural lands. This land-use transition has intensified pressure on limited water resources and accelerated ecological degradation processes. Ecosystem service assessment indicated a significant decline in ecological functions, particularly in soil stability, water regulation, and habitat integrity. The expansion of agriculture contributed to increased soil salinity, groundwater depletion, and contamination of surface water resources, especially in sensitive areas such as the Galu River and Band Ali-Khan wetland. The introduction of chemical fertilizers and pesticides further exacerbated nitrogen accumulation and water pollution levels. The SWOT analysis results showed that the Internal Factor Evaluation (IFE) score was 2.8, indicating relatively moderate internal capacity but significant structural weaknesses. The External Factor Evaluation (EFE) score was 2.88, reflecting a slightly stronger influence of external threats and opportunities compared to internal strengths. Key strengths included the presence of drought-resistant species, low human population density, and active conservation enforcement by rangers. Major weaknesses included water scarcity, soil salinization, ecosystem fragility, and pollution from agricultural runoff. Opportunities identified included natural water inflow from rivers, potential for genetic diversity conservation, proximity to academic institutions, and involvement of local communities such as nomadic populations. Major threats included uncontrolled agricultural expansion, increased human disturbance, climate change impacts, reduced river discharge, and unregulated waste disposal. The QSPM analysis prioritized management strategies based on their overall attractiveness scores. The highest-ranked strategy was preventing the conversion of rangelands into agricultural lands. This was followed by farmer education programs on pesticide and fertilizer use, involvement of academic experts in environmental training, and promoting drought- and salinity-resistant crop varieties. Other important strategies included soil rehabilitation programs, watershed management interventions, restriction of water-intensive agriculture, and development of environmental monitoring systems.

Discussion and Conclusion

The degradation of the buffer zone has significantly reduced its capacity to protect the core protected ecosystem, allowing agricultural impacts such as chemical pollution and habitat fragmentation to penetrate deeper into the landscape. The results also highlight that while agriculture may provide short-term economic benefits, its long-term ecological costs are substantial and often irreversible. The SWOT-QSPM analysis underscores the need for integrated and strategic management approaches rather than isolated conservation measures. The dominance of external threats and internal weaknesses suggests that reactive management strategies alone are insufficient. Instead, proactive strategies such as land-use planning, community engagement, and agricultural regulation are essential. Educational interventions targeting farmers, particularly regarding the use of chemical inputs, are critical for reducing environmental pollution. Similarly, promoting drought-resistant crop varieties and restricting water-intensive agricultural practices can significantly reduce pressure on local water resources. The involvement of academic institutions and local communities can enhance knowledge transfer and improve compliance with conservation policies. Overall, this study concludes that sustainable management of the Kavir Protected Area requires a shift from conventional restrictive approaches toward integrated, participatory, and science-based strategies. Strengthening institutional coordination, improving environmental monitoring, and enforcing land-use regulations are essential for maintaining ecosystem services and biodiversity in the region.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

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

CRedit authorship contribution statement

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

Data availability statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

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

تحلیل مکانی اثر گسترش اراضی کشاورزی بر خدمات اکوسیستمی در منطقه حفاظت شده کویر با استفاده از مدل InVEST

امیرمعمارزاده کیانی^۱ | محمد جواد امیری^۲ | احمد نوحه گر^۳

۱. گروه برنامه ریزی و مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: amir.memarzadeh@ut.ac.ir
 ۲. نویسنده مسئول، گروه برنامه ریزی و مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mjamiri@ut.ac.ir
 ۳. گروه برنامه ریزی و مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: nohrgar@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	فرآیند تغییر کاربری اراضی، به ویژه گسترش و رها سازی اراضی کشاورزی، یکی از مهم ترین عوامل مؤثر بر تغییرات کمی و کیفی خدمات اکوسیستمی در اکوسیستم های آسیب پذیر خشک و فرا خشک محسوب می گردد. هدف این پژوهش، تحلیل مکانی اثر گسترش اراضی کشاورزی بر خدمات اکوسیستمی در منطقه حفاظت شده کویر است. بدین منظور، تغییرات پوشش/کاربری اراضی برای دو مقطع زمانی ۱۹۸۶ و ۲۰۲۰ بر اساس تصاویر ماهواره ای Landsat استخراج و تحلیل گردید. سپس با استفاده از مدل InVEST و تحلیل های مکانی در محیط GIS، سه خدمت اکوسیستمی شامل نگهداشت خاک، کیفیت زیستگاه و تولید آب مورد بررسی و تفسیر قرار گرفت. نتایج نشان داد که طی دوره مورد مطالعه، حدود ۳۸۰۴ هکتار از اراضی مرتعی و بوته زارهای طبیعی به اراضی کشاورزی تبدیل شده است. همچنین خروجی های ماژول نگهداشت خاک و معادله USLE بیانگر آن بود که اراضی کشاورزی دارای بیشترین میزان هدررفت خاک (حدود ۵۰۰۰ کیلوگرم در هر پیکسل) و کمترین ظرفیت حفاظت خاک هستند، در حالی که بوته زارها و مراتع بیشترین توان نگهداشت خاک (حدود ۱۶۷۵۰ کیلوگرم در هر پیکسل) را بیان نمودند. نتایج ماژول کیفیت زیستگاه نیز کاهش کیفیت زیستگاه و افزایش شدت تخریب را در اثر گسترش و پیش روی اراضی کشاورزی نشان داد که این روند، روندی افزایشی است، همچنین نتایج ماژول تولید آب حاکی از کاهش تولید آب در پی افزایش تبخیر و تعرق ناشی از توسعه کشاورزی است. در مجموع، یافته های پژوهش نشان می دهد که گسترش اراضی کشاورزی موجب تضعیف خدمات اکوسیستمی تنظیمی در منطقه حفاظت شده کویر گردیده و توجه به محدود سازی توسعه کشاورزی و ملاحظات اکولوژیک در تدوین برنامه دقیق استراتژیک و مدیریت منطقه حفاظت شده کویر ضروری است.
کلیدواژه ها: تحلیل مکانی، خدمات اکوسیستمی، مدل InVEST، منطقه حفاظت شده کویر.	

استاد: معمارزاده کیانی، امیر؛ امیری، محمد جواد؛ و نوحه گر، احمد (۱۴۰۵). تحلیل مکانی اثر گسترش اراضی کشاورزی بر خدمات اکوسیستمی در منطقه حفاظت شده کویر با استفاده از مدل InVEST. محیط زیست طبیعی، ۷۹ (۳)، ۴۷۳-۴۵۷.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jne.2026.408430.2871>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، شتاب فزاینده فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه گسترش اراضی کشاورزی، به یکی از مهم‌ترین محرک‌های تغییر کاربری سرزمین و اختلال در کارکردهای اکولوژیک مبدل گردیده است. این روند در نواحی خشک و نیمه‌خشک، به دلیل محدودیت منابع آب، شکنندگی ساختار خاک و ظرفیت پایین بازیابی اکوسیستم‌ها، پیامدهای شدیدتر و گاه غیرقابل‌بازگشت به همراه دارد (Hajrahimi et al., 2024). در چنین محیط‌هایی، خدمات اکوسیستمی تنظیمی نظیر نگهداشت خاک، تنظیم چرخه آب، ترسیب کربن و کیفیت زیستگاه، نقش بنیادی در پایداری سرزمین و تداوم حیات انسان و گونه‌های زیستی ایفا می‌کنند و هرگونه اختلال در این خدمات می‌تواند زنجیره‌ای از پیامدهای محیط‌زیستی، اقتصادی و اجتماعی را به دنبال داشته باشد (Costanza et al., 2021). مناطق حفاظت‌شده، به‌عنوان هسته‌های اصلی حفاظت از تنوع زیستی و توازی و همبودی فرآیندهای اکولوژیک، علی‌رغم جایگاه قانونی و حفاظتی، به‌شدت تحت‌تأثیر فشارهای بیرونی و درونی ناشی از توسعه انسانی قرار گرفته‌اند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که گسترش اراضی کشاورزی، استحصال بی‌رویه منابع آب و تخریب پوشش گیاهی، به‌ویژه در حاشیه و حتی درون مناطق حفاظت‌شده، موجب تضعیف تدریجی خدمات اکوسیستمی و کاهش کیفیت زیستگاه‌ها شده است (Zhang et al., 2024). در اکوسیستم‌های خشک، تبدیل بوته‌زارها و مراتع طبیعی به اراضی کشاورزی، الگوی طبیعی فرسایش خاک، چرخه مواد غذایی، توازن سیکل هیدرولوژیک و پیوستگی زیستگاه‌ها را دگرگون کرده و خطر بیابان‌زایی را تشدید می‌کند (Hua et al., 2020; Li et al., 2022). در سال‌های اخیر، تفسیر، ارزیابی و نقشه‌سازی خدمات اکوسیستمی به‌عنوان رویکردی نوین و تصمیم‌یار، به طور گسترده در تحلیل پیامدهای تغییرات پوشش/کاربری اراضی مورد‌استفاده قرار گرفته است. در این میان، مدل InVEST به دلیل قابلیت برآورد کمی و مکانی خدمات اکوسیستمی مختلف، به یکی از پرکاربردترین ابزارها در مطالعات بین‌المللی تبدیل شده است. برای مثال، Zhao و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از این مدل نشان دادند که توسعه کشاورزی متراکم می‌تواند تعارض میان خدمات اکوسیستمی را افزایش داده و ظرفیت تنظیمی سرزمین را تضعیف نماید. با این حال، بخش عمده‌ای از این مطالعات در مقیاس‌های حوضه‌ای یا منطقه‌ای انجام شده و تمرکز مستقیمی بر مناطق حفاظت‌شده و زیستگاه‌های حیات‌وحش به‌عنوان اکوسیستم‌های حساس و محدود شونده نداشته‌اند (Huang et al., 2025; Ludzuweit et al., 2025). در ایران نیز پژوهش‌هایی در زمینه مدل‌سازی فضایی خدمات اکوسیستمی انجام شده است؛ از جمله مطالعاتی که با استفاده از مدل InVEST به ارزیابی نگاهداشت خاک، ذخیره کربن و کیفیت زیستگاه پرداخته‌اند (Zolfaghari et al., 2024; Mohammadyari, 2024). اگرچه این پژوهش‌ها نقش مهمی در توسعه دانش بومی داشته‌اند، اغلب یا بر یک خدمت خاص متمرکز بوده‌اند یا اثرات توسعه کشاورزی را به طور مستقیم در چارچوب مدیریت مناطق حفاظت‌شده بررسی نکرده‌اند. این امر مبین وجود خلأ دانشی در زمینه ارزیابی یکپارچه و فضایی پیامدهای گسترش اراضی کشاورزی بر خدمات اکوسیستمی چندگانه در مناطق حفاظت‌شده خشک و بسیار آسیب‌پذیر در کشور است. براین اساس، مسئله اصلی پژوهش حاضر آن است که گسترش اراضی کشاورزی در منطقه حفاظت‌شده کویر چه تأثیری بر ظرفیت و توزیع فضایی خدمات اکوسیستمی کلیدی دارد و این تغییرات چگونه می‌توانند پایداری اکولوژیک منطقه را در کوتاه‌مدت و بلندمدت تهدید کنند. نوآوری این پژوهش در ارزیابی کمی و نقشه‌سازی فضایی هم‌زمان چند خدمت اکوسیستمی شامل نگهداشت خاک، ذخیره کربن، کیفیت زیستگاه و تولید آب و تحلیل اثرات گسترش اراضی کشاورزی بر این خدمات در یک منطقه حفاظت‌شده فراخشک با استفاده از مدل InVEST نهفته است؛ بنابراین این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت توصیفی و تحلیلی است و با اتکا بر داده‌های سنجش‌ازدور، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مدل InVEST، اثر تغییرات کاربری اراضی بر برخی خدمات اکوسیستمی منطقه حفاظت‌شده کویر را بررسی کرده است. در این راستا، تصاویر ماهواره‌ای لندست سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۰ پس از انجام تصحیحات لازم، برای استخراج و تحلیل طبقات کاربری اراضی شامل اراضی کشاورزی، مرتع، بوته‌زار و اراضی بایر پردازش شدند. سپس خدمات اکوسیستمی ترسیب و ذخیره کربن، نگهداشت خاک و کیفیت و تخریب زیستگاه با استفاده از ماژول‌های مرتبط مدل InVEST و بر پایه داده‌های کاربری اراضی، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و تهدیدات انسانی کمی‌سازی گردید. در نهایت، خروجی مدل‌ها به‌صورت نقشه‌ها و شاخص‌های کمی استخراج و به‌صورت مقایسه‌ای تحلیل گردید تا ارتباط تغییرات سیمای سرزمین با تغییرات خدمات اکوسیستمی به طور منسجم تبیین شود؛ بنابراین هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی اثرات گسترش اراضی کشاورزی بر خدمات اکوسیستمی و ترسیم الگوی مکانی تغییرات آنها به‌منظور پشتیبانی از

تصمیم‌گیری مدیریتی و برنامه‌ریزی راهبردی پایدار در منطقه حفاظت‌شده کویر است. در راستای این هدف، پژوهش حاضر به دنبال پاسخ‌گویی به پرسش‌های ذیل است:

(۱) آیا تخریب سرزمین و نوسانات کمیت و کیفیت خدمات اکوسیستمی که طی سال‌های گذشته در منطقه حادث گردیده است، بررسی گردیده و موکداً، وضعیت اکوسیستم‌های مجاور منطقه که تحت تأثیر رهاسازی و گسترش فعالیت‌های کشاورزی هستند برای سال‌های آینده مورد تحلیل، تفسیر و پیش‌بینی واقع شده‌اند؟

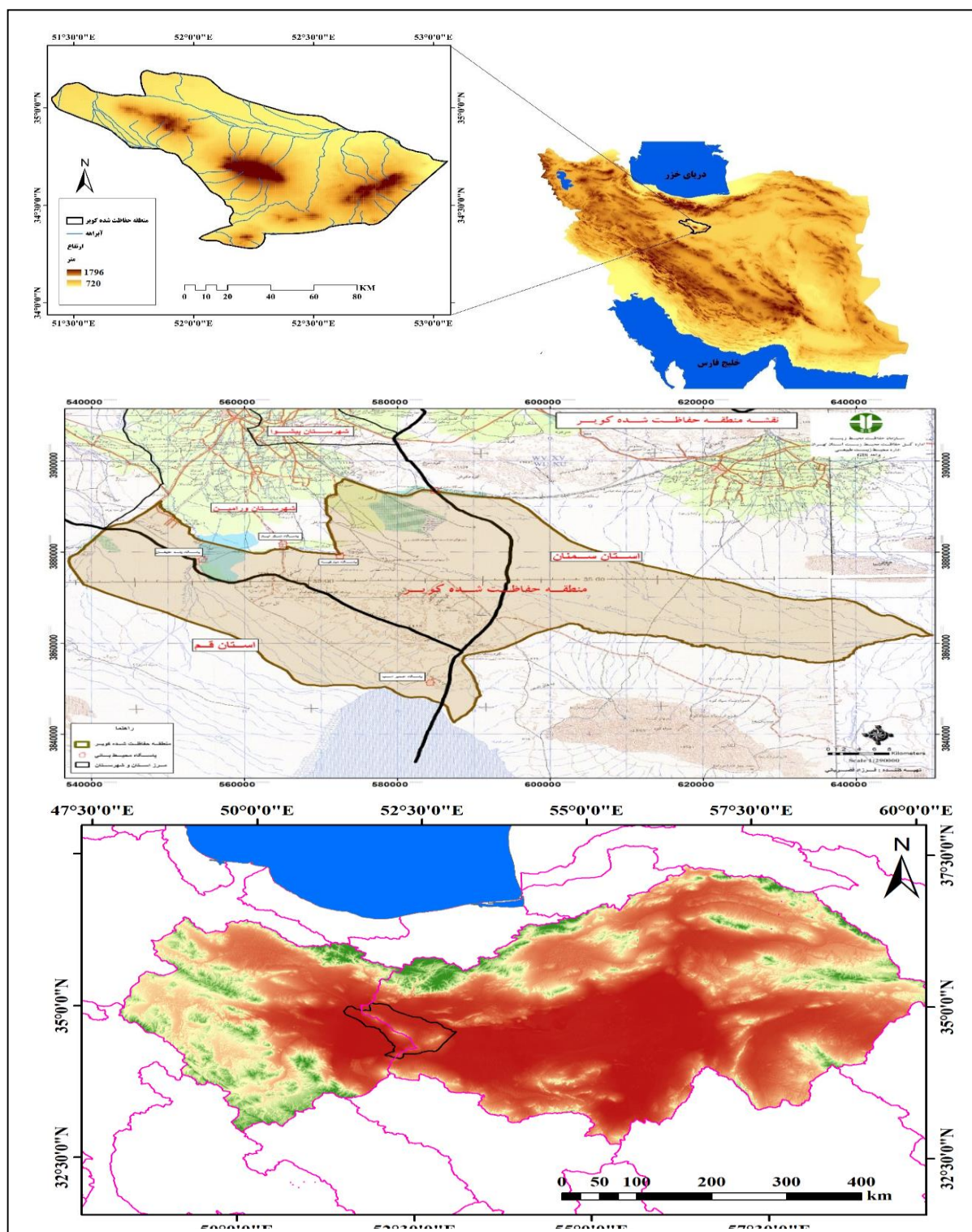
(۲) آیا فرسایش خاک توسط فرآیند کشاورزی بر منطقه مدل‌سازی گردیده و اهم علل و عواملی که بیشترین نقش را در فرسایش و همچنین نگاهداشت و پایداری خاک دارند مشخص گردیده است؟

روش‌شناسی پژوهش

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه: محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، منطقه حفاظت‌شده کویر است که در مرز سه استان تهران، قم و اصفهان واقع شده و با وسعت تقریبی ۲۴۸۹۵۷ هکتار، یکی از مهم‌ترین پهنه‌های خشک و فراخشک کشور به شمار می‌رود. این منطقه شامل مجموعه‌ای از دشت‌های وسیع، عوارض کم‌ارتفاع، تپه‌ماهورها، زیست‌بوم‌های نم‌زار، تالاب‌های فصلی و عرصه‌های استپی است؛ به گونه‌ای که حدود ۷۰ هزار هکتار از آن را عرصه‌های کوهستانی و تپه‌ماهور و نزدیک به ۱۱ هزار هکتار را پهنه‌های تالابی فصلی بند علی خان تشکیل می‌دهد. حداقل و حداکثر ارتفاع منطقه بین ۷۲۰ تا ۱۸۰۰ متر متغیر است و اقلیم منطقه در رده فراخشک معتدل قرار دارد؛ میانگین بارش سالیانه در بازه ۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر و دمای هوا از ۱۵- تا بیش از ۵۰ درجه سانتی‌گراد نوسان دارد. این ویژگی‌ها موجب شکل‌گیری تنوع قابل‌توجه زیستگاهی و ایجاد یک گرادیان غنی زیستگاهی و تنوع بالای فون و فلور، شامل ۲۰۰ گونه جانوری و ۳۰۲ گونه گیاهی گردیده است. وجود گونه‌های شاخصی چون یوزپلنگ ایرانی، کاراکال، گربه شنی، گربه وحشی، گور ایرانی، کفتار راه‌راه، گرگ، کل و بز، قوچ و میش، جبیر و تشی و همچنین پوشش‌هایی نظیر درمنه، تاغ، افدرا، اشنان، گون و گیاهان شورپسند، اهمیت اکولوژیک منطقه را افزایش داده است. این پهنه در سال ۱۳۴۳ برای نخستین بار به‌عنوان منطقه حفاظت‌شده اعلام شد و در سال ۱۳۵۵ با ارتقا به پارک ملی، تحت مقررات سخت‌گیرانه حفاظتی قرار گرفت. تغییرات مدیریتی از سال ۱۳۵۵ تا ۱۳۶۱ موجب تفکیک منطقه به دو بخش «پارک ملی کویر» و «منطقه حفاظت‌شده کویر» شد و مرزهای فعلی شکل گرفتند (شکل ۱). دست‌نخورده بودن نسبی منطقه تا امروز، نبود سکونتگاه انسانی و نظارت مداوم و مؤثر بر چرای دام در منطقه حفاظت‌شده کویر، شرایطی فراهم کرده است که امکان ارزیابی اثرات فعالیت‌های انسانی جدید به‌ویژه گسترش و پیشروی اراضی کشاورزی بر خدمات اکوسیستمی بادقت بالا فراهم گردد.

این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی و تحلیلی است و باتکیه بر مدل‌سازی مکانی و تحلیل داده‌های سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، اثر پوشش و تغییرات کاربری اراضی بر برخی خدمات اکوسیستمی در منطقه حفاظت‌شده کویر را مورد بررسی قرار داده است. چارچوب روش تحقیق به گونه‌ای طراحی شد که نتایج حاصل از هر مرحله، مبنای تحلیل مرحله بعدی قرار گیرد و ارتباط منطقی و پیوسته‌ای میان داده‌ها، پردازش‌ها و خروجی‌ها برقرار باشد. در گام نخست، به‌منظور تحلیل پوشش و تغییرات کاربری اراضی، از تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۰ استفاده گردید. این تصاویر پس از انجام تصحیحات هندسی و رادیومتریکی، در محیط GIS پردازش و طبقه‌بندی شدند. پوشش و تغییرات کاربری اراضی شامل اراضی کشاورزی، بوته‌زار، مرتع، اراضی بایر و کویری و سایر کاربری‌های غالب منطقه بود. خروجی این مرحله، نمودارهای کاربری اراضی برای دو دوره زمانی مورد مطالعه بود که مبنای اصلی تحلیل خدمات اکوسیستمی قرار گرفت. در مرحله بعد، به‌منظور ارزیابی خدمت اکوسیستمی ترسیب و ذخیره کربن، از مدل ترسیب کربن نرم‌افزار InVEST استفاده شد.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه، منطقه حفاظت شده کویر

Figure 1. The study area: kavir protected area

این مدل با در نظر گرفتن چهار مخزن اصلی کربن شامل زیست توده بالا زمینی، زیست توده زیر زمینی، کربن خاک و مواد آلی مرده، میزان ذخیره کربن را در هر یک از طبقات کاربری اراضی برآورد می کند. مقادیر مربوط به هر مخزن کربن متناسب با نوع کاربری اراضی تعریف و مدل برای سال های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۰ اجرا شد. نتایج حاصل امکان مقایسه تغییرات مکانی و مقداری ذخیره کربن در

اثر تغییر سیمای سرزمین، به‌ویژه گسترش و رهاسازی اراضی کشاورزی را فراهم ساخت. در ادامه، خدمت اکوسیستمی نگهداشت خاک و جلوگیری از فرسایش با استفاده از مدل نگهداشت خاک InVEST و بر پایه معادله جهانی هدررفت خاک (USLE) مورد کمی‌سازی قرار گرفت. بدین‌منظور، عوامل فرساینده باران (R)، فرسایش‌پذیری خاک (K)، طول و شیب دامنه (LS)، پوشش و مدیریت اراضی (C) و اقدامات حفاظتی (P) به‌صورت لایه‌های رستری در محیط GIS تهیه شدند. عامل R بر اساس داده‌های بارش و تحلیل شاخص‌های اقلیمی منطقه محاسبه شد. عامل K با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شامل بافت، ماده آلی و نفوذپذیری تهیه گردید. عامل LS از مدل رقومی ارتفاع استخراج شد و عامل C با بهره‌گیری از شاخص NDVI و تبدیل آن به ضریب پوشش گیاهی محاسبه شد. در نهایت، مدل با ترکیب این لایه‌ها، میزان هدررفت بالقوه و واقعی خاک را برای سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۰ برآورد کرد. در گام بعدی، به‌منظور ارزیابی تخریب زیستگاه و کیفیت اکوسیستم، از ماژول‌های تخریب زیستگاه و کیفیت زیستگاه مدل InVEST استفاده شد. در این بخش، شدت تخریب زیستگاه بر اساس آثار تجمعی تهدیدات انسانی و پوشش و تغییرات کاربری اراضی محاسبه و شاخص کیفیت اکوسیستم در مقیاس صفر تا یک برآورد گردید. نتایج این مرحله امکان تحلیل وضعیت فعلی زیستگاه و مقایسه آن با سناریوی آینده را فراهم کرد و تغییرات مکانی کیفیت اکوسیستم در ارتباط با گسترش اراضی کشاورزی و کاهش پوشش طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، خروجی‌های تمامی مدل‌ها به‌صورت نقشه‌ها و شاخص‌های کمی استخراج و تحلیل شدند. مقایسه زمانی نتایج نشان داد که تغییر کاربری اراضی، به‌ویژه افزایش و رهاسازی اراضی کشاورزی، تأثیر مستقیمی بر کاهش ظرفیت ترسیب کربن، افزایش هدررفت خاک، تشدید تخریب زیستگاه و افت کیفیت اکوسیستم در منطقه حفاظت‌شده کویر داشته است. این رویکرد مرحله‌به‌مرحله، امکان ارزیابی یکپارچه خدمات اکوسیستمی و ارتباط آنها با تغییرات سیمای سرزمین را فراهم ساخته و مبنایی علمی برای تحلیل نتایج پژوهش ارائه می‌دهد.

پیش‌بینی اثرات پوشش و تغییرات کاربری اراضی بر خدمت اکوسیستمی ترسیب کربن: در این بخش از پژوهش، اثر تغییر کاربری اراضی با تأکید بر رهاسازی کشاورزی بر خدمت اکوسیستمی ترسیب و ذخیره کربن در منطقه حفاظت‌شده کویر با استفاده از مدل InVEST و تحلیل‌های مکانی در محیط GIS بررسی و پیش‌بینی شد. بدین‌منظور، نقشه‌های کاربری اراضی برای سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۰ بر پایه تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه گردید. مدل InVEST با در نظر گرفتن چهار مخزن اصلی کربن شامل زیست‌توده بالا زمینی، زیست‌توده زیرزمینی، کربن خاک و مواد آلی مرده، میزان ذخیره و ترسیب کربن را در کاربری‌های مختلف برآورد کرد. نتایج حاصل از مقایسه دوره‌های زمانی نشان داد که تغییر سیمای سرزمین و رهاسازی اراضی کشاورزی نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر الگوی مکانی و مقدار کل کربن ذخیره‌شده در منطقه داشته و می‌تواند در بلندمدت منجر به بهبود یا تضعیف ظرفیت ترسیب و ذخیره‌سازی کربن داشته باشد. این یافته‌ها اهمیت توجه به مدیریت کاربری اراضی و سناریوهای آینده‌نگر را در برنامه‌ریزی سیستماتیک حفاظتی و کاهش اثرات تغییرات کاربری بر خدمات تنظیمی اکوسیستم منطقه حفاظت‌شده کویر برجسته می‌سازد.

کمی‌سازی خدمت اکوسیستمی جلوگیری از فرسایش و نگهداشت خاک: خدمت اکوسیستمی نگهداشت خاک و جلوگیری از فرسایش به‌منظور ارزیابی اثرات رهاسازی کشاورزی در منطقه حفاظت‌شده کویر با استفاده از مدل نگهداشت خاک نرم‌افزار InVEST کمی‌سازی شد. این مدل باتکیه بر معادله جهانی هدررفت خاک (USLE)، ظرفیت بالقوه و واقعی اکوسیستم در حفظ خاک را از طریق مقایسه حداکثر هدررفت خاک و هدررفت واقعی برآورد می‌کند. بدین‌منظور، عوامل کلیدی فرساینده باران (R)^۱، فرسایش‌پذیری خاک (K)^۲، طول و شیب دامنه (LS)^۳، پوشش و کاربری اراضی (C)^۴ و اقدامات مدیریتی حفاظتی (P)^۵ به‌صورت لایه‌های رستری در محیط GIS تهیه و وارد مدل شدند. عامل پوشش گیاهی با بهره‌گیری از شاخص NDVI و تبدیل آن به ضریب C محاسبه شد که بیانگر نقش مؤثر پوشش طبیعی در کاهش فرسایش است. نتایج این بخش نشان می‌دهد که کاهش پوشش گیاهی ناشی از تغییر کاربری و رهاسازی اراضی کشاورزی، موجب افزایش حساسیت خاک به فرسایش و کاهش ظرفیت

¹rainfall erosivity

²soil erodibility

³slope length and steepness

⁴land cover and land use

⁵conservation management practices

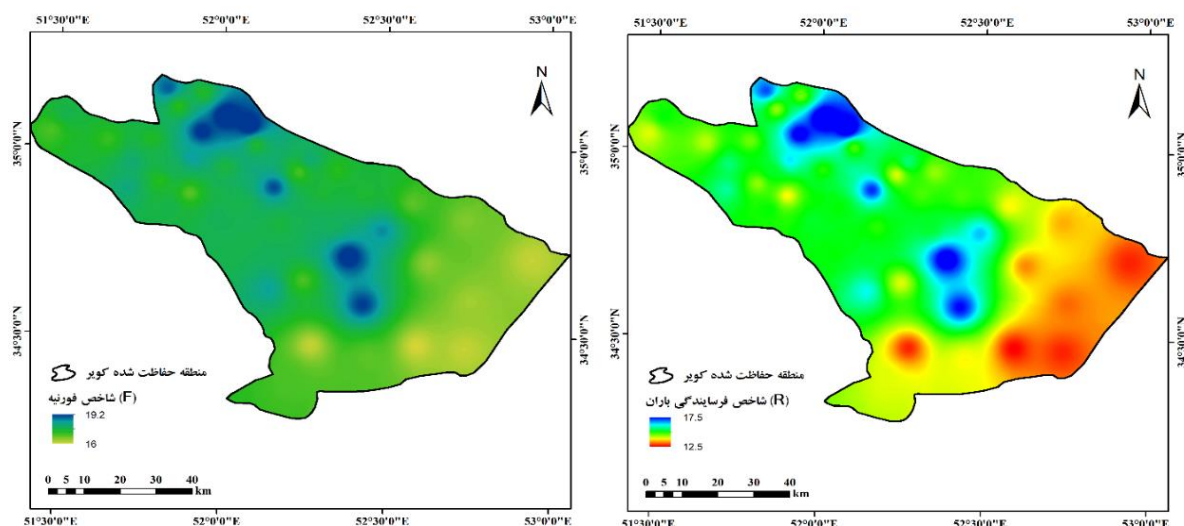
نگهداشت خاک در اراضی منطقه حفاظت‌شده کویر گردیده و بر ضرورت مدیریت پایدار کاربری اراضی و حفاظت از پوشش طبیعی به‌عنوان راهبردی کلیدی در کنترل فرسایش تأکید دارد.

یافته‌های پژوهش

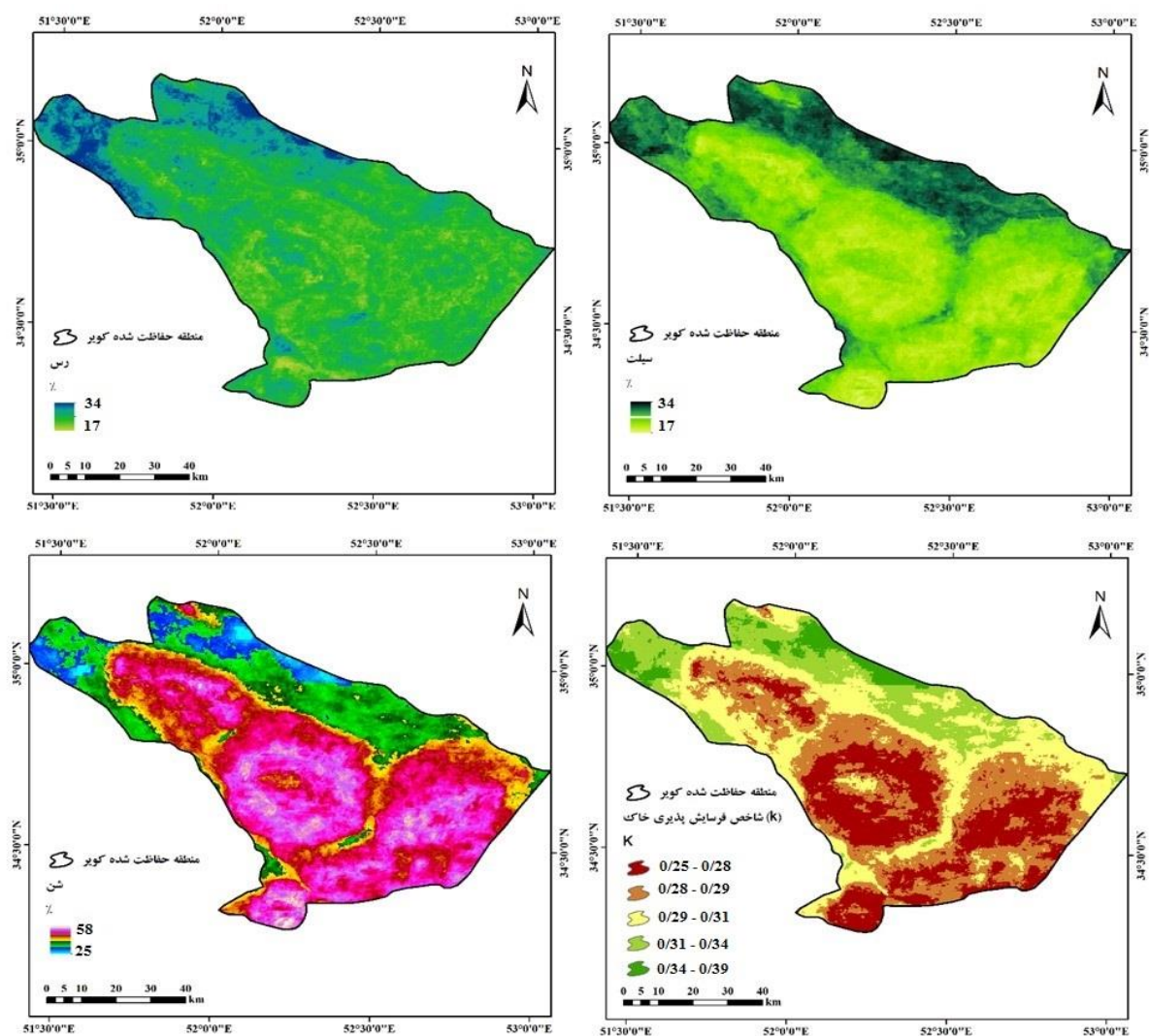
خدمت اکوسیستم

نگهداشت خاک: در این پژوهش، اثر گسترش اراضی کشاورزی بر تغییرات فرسایش و توان نگهداشت خاک در منطقه حفاظت‌شده کویر طی دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ با استفاده از مدل InVEST و معادله جهانی هدررفت خاک (USLE) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پوشش و تغییرات کاربری اراضی، به‌ویژه توسعه کشاورزی در دشت‌ها و سیلاب‌دشت‌ها، موجب افزایش هدررفت خاک و تضعیف ظرفیت اکوسیستم در حفاظت و نگهداشت خاک شده است. بیشترین شدت فرساینده‌گی باران در نواحی با بارش بالاتر و در امتداد سیلاب‌دشت‌های رودخانه گلو و تلخاب مشاهده می‌شود که به دلیل تمرکز رواناب و همگرایی آبراهه‌ها، پتانسیل بالایی برای فرسایش دارند. از سوی دیگر، شاخص فرسایش‌پذیری خاک K نشان داد که دشت‌های هموار با خاک‌های لومی، دارای رس و سیلت بالا و شن کم، بیشترین حساسیت به فرسایش را دارند، درحالی‌که ارتفاعات و نواحی کوهستانی با بافت سخت و سنگی، کمترین میزان فرسایش‌پذیری را نشان می‌دهند. به‌طور کلی، نتایج حاکی از آن است که گسترش کشاورزی در نواحی حساس، به‌ویژه در سیلاب‌دشت‌ها، تعادل طبیعی فرآیندهای ژئومورفولوژیک را بر هم زده و ضرورت بازنگری در الگوی کاربری اراضی و مدیریت حفاظتی خاک در منطقه را برجسته می‌سازد. در شکل‌های ۲ و ۳ نقشه‌های شاخص فرساینده‌گی باران در منطقه و همچنین نقشه‌های شاخص فرسایش‌پذیری خاک ارائه می‌شود که به‌صورت فضایی، تمرکز نواحی پرخطر از نظر فرسایش و نقش عوامل اقلیمی و خاکی در الگوی هدررفت خاک را به‌خوبی نشان می‌دهند. باتوجه‌به شکل ۲ نقشه الف شاخص فوریت‌ها را نشان می‌دهد که بیانگر الگوی مکانی نوسانات شدت بارش و توزیع انرژی بارندگی در منطقه است. مقادیر این شاخص تفاوت‌های ریز اقلیمی و پراکندگی مکانی بارش را منعکس می‌کند. نقشه ب نیز شاخص فرساینده‌گی باران R را نمایش می‌دهد که یکی از عوامل اصلی معادله USLE است. این شاخص میزان پتانسیل بارندگی برای ایجاد فرسایش را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از مدل‌سازی شاخص فرساینده‌گی باران نشان می‌دهد که پراکنش مکانی این عامل در منطقه حفاظت‌شده کویر تابع مستقیم الگوی بارش، شرایط توپوگرافی و تمرکز جریان‌های سطحی است. تمرکز مقادیر بالاتر R در بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه را می‌توان به هم‌زمانی شدت بارش‌های مقطعی، شیب‌های ملایم رو به دشت‌های سیلابی و تجمع رواناب نسبت داد؛ شرایطی که انرژی جنبشی بارندگی را افزایش داده و پتانسیل فرسایش آبی را تشدید می‌کند. در مقابل، نواحی با مقادیر پایین‌تر عوامل کلیدی فرساینده‌گی باران عمدتاً در مناطق مرتفع‌تر یا دارای بارش کمتر قرار دارند که از نظر فرسایشی پایداری بیشتری نشان می‌دهند. همچنین شکل ۳ مجموعه‌ای از نقشه‌های شاخص فرسایش‌پذیری خاک R را در منطقه حفاظت‌شده کویر نمایش می‌دهد. این شاخص بیانگر حساسیت ذاتی خاک نسبت به جداسازی و حمل توسط باران و رواناب است و بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شامل بافت، ماده آلی، ساختار و نفوذپذیری تهیه شده است. با توجه به شکل ۳ پراکندگی مکانی K در منطقه یکنواخت نیست و بخش‌هایی از شمال و شمال‌غرب منطقه دارای مقادیر پایین‌تر بوده، درحالی‌که نواحی مرکزی و جنوبی تمایل به مقادیر بالاتر دارند. الگوی مکانی شاخص فرسایش‌پذیری خاک نیز بازتاب‌دهنده ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک منطقه است. مقادیر بالاتر K در دشت‌ها و نواحی مرکزی و جنوبی، ناشی از غالب‌بودن بافت‌های ریزدانه، درصد بالاتر سیلت و رس و کاهش ماده آلی خاک است که منجر به کاهش چسبندگی ذرات و افزایش استعداد فرسایش می‌شود. در مقابل، مقادیر پایین‌تر K در ارتفاعات و مناطق سنگی بیانگر مقاومت بیشتر خاک در برابر جداسازی و انتقال است. این ناهمگنی مکانی نشان می‌دهد که حساسیت منطقه نسبت به فرسایش، بیش از آنکه یکنواخت باشد، به شرایط موضعی خاک وابسته است. در شکل ۴ نقشه عامل C بر اساس شاخص NDVI تهیه شد. مقدار عامل C بین صفر تا ۰/۸ متغیر است. بیشترین مقدار این پارامتر در مناطق بدون پوشش گیاهی است و کمترین مقدار آن در مناطقی است که پوشش گیاهی دارد.

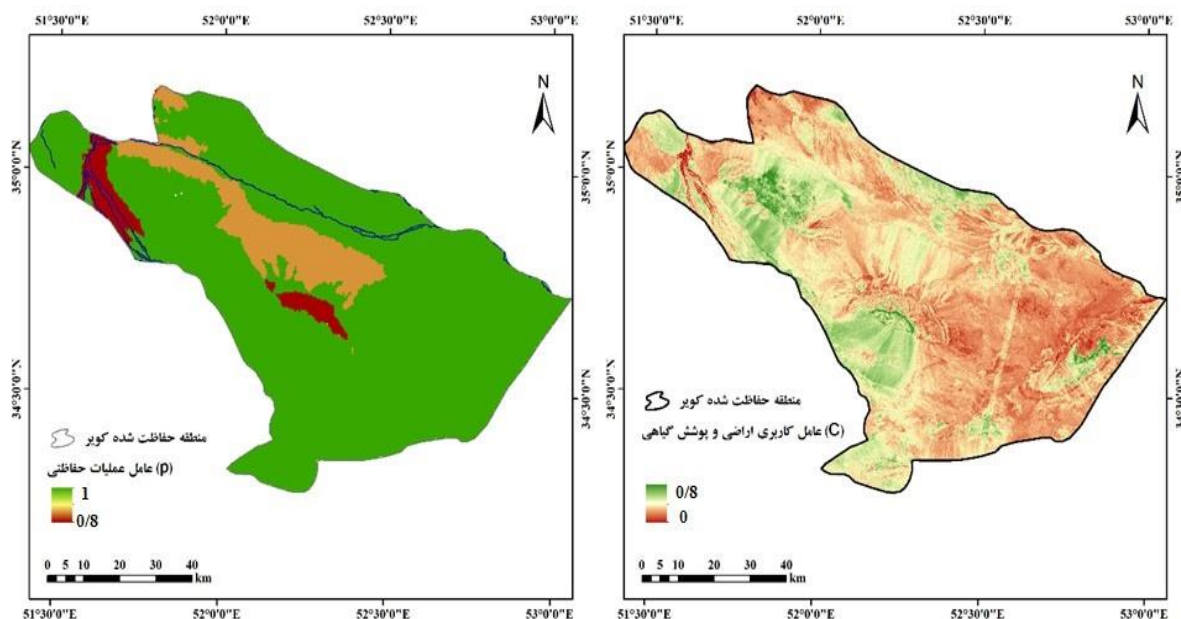
*Soil Erodibility Index



شکل ۲- نقشه‌های شاخص فرساینده‌گی باران در منطقه
Figure 2. Maps of rainfall erosivity index in the study area



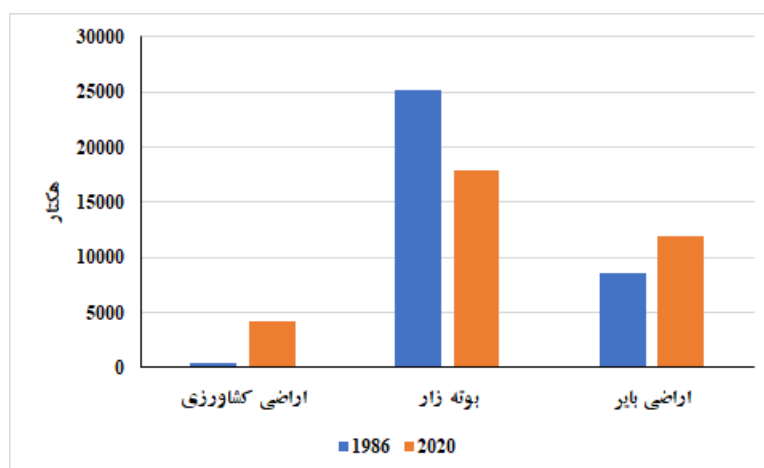
شکل ۳- نقشه‌های شاخص فرسایش پذیری خاک در منطقه
Figure 3. Maps of soil erodibility index in the study area



شکل ۴- نقشه‌های عامل C و P در منطقه

Figure 4. Maps of factors C and P in the study area

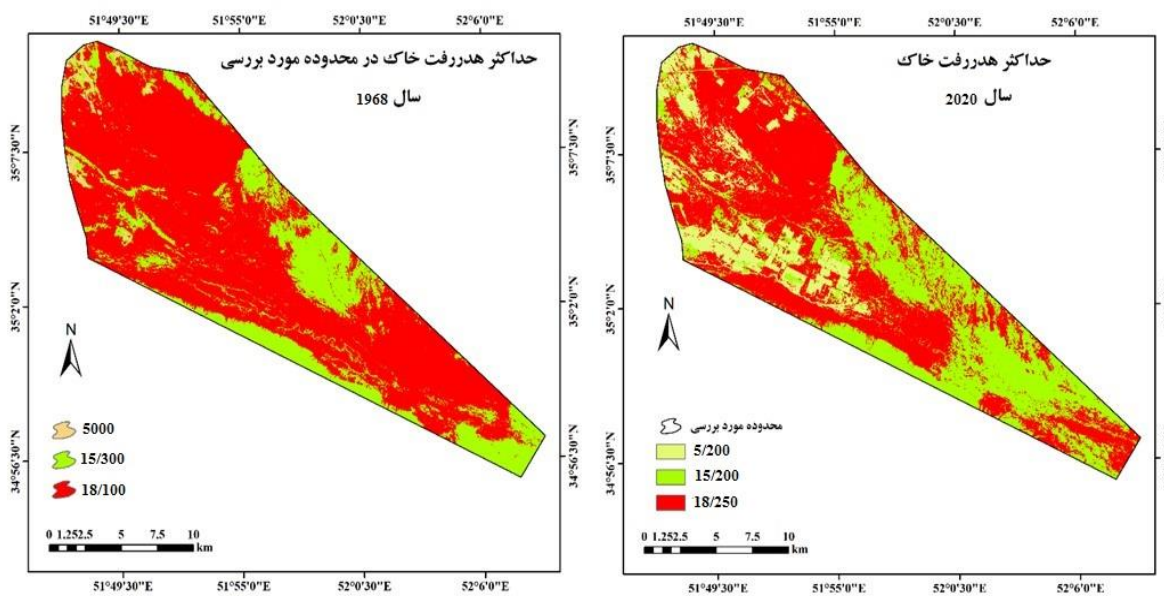
تحلیل عامل پوشش و مدیریت اراضی C نشان داد که تغییرات این عامل به طور مستقیم تحت تأثیر نوع کاربری اراضی و تراکم پوشش گیاهی قرار دارد. مقادیر بالای C در اراضی بایر، کویری و اراضی کشاورزی رهاشده بیانگر نبود پوشش مؤثر برای کاهش انرژی بارندگی و رواناب است؛ در حالی که مقادیر پایین C در بوته‌زارها و مراتع، نقش حفاظتی پوشش گیاهی در کاهش فرسایش خاک را برجسته می‌کند. این تفاوت‌ها بیانگر آن است که تخریب پوشش گیاهی، به‌ویژه در نتیجه گسترش اراضی کشاورزی، یکی از عوامل کلیدی افزایش هدررفت خاک در منطقه است. همچنین باتوجه به شکل ۵ نمودار میزان هدررفت خاک را در سه کاربری اراضی کشاورزی، بوته‌زار و اراضی بایر در سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. نتایج بیانگر افزایش قابل توجه هدررفت خاک در اراضی کشاورزی و بایر و در مقابل کاهش نسبی آن در بوته‌زارها طی دوره مورد مطالعه است که نقش حفاظتی پوشش طبیعی را برجسته می‌سازد.



شکل ۵- نمودار پوشش و تغییرات کاربری اراضی منطقه در سال ۱۹۸۶ و ۲۰۲۰

Figure 5. Land cover and land-use change chart of the study area, 1986 and 2020

همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با اجرای مدل، نقشه حداکثر هدررفت سالانه خاک برای سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۲۰ تهیه گردید. بر اساس نتایج، بیشترین مقدار هدررفت خاک در اراضی کشاورزی حدود ۵۰۰۰ کیلوگرم در هر پیکسل، در بوته‌زارها حدود ۱۸۰۰۰ کیلوگرم و در اراضی بایر و شور نزدیک به ۱۵۰۰۰ کیلوگرم در هر پیکسل برآورد شده است. میزان هدررفت واقعی خاک در اراضی کشاورزی ۴۸۵۰ کیلوگرم در پیکسل، در اراضی مرتعی ۱۵۰۰ و در اراضی بایر و شور ۱۲۰۰ کیلوگرم در پیکسل است. اراضی کشاورزی در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۱۹۸۶ حدود ۱۰ برابر شده است و از ۴۳۴ به ۴۲۳۸ هکتار رسیده است؛ بنابراین هدررفت واقعی خاک نیز ناشی از افزایش اراضی کشاورزی در منطقه، افزایش یافته است.



شکل ۶- نقشه‌های حداکثر هدررفت خاک در منطقه
Figure 6. Maps of maximum soil loss in the study area

تخریب زیستگاه: نتایج ارزیابی تخریب و کیفیت زیستگاه با استفاده از مدل InVEST نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۰ میزان تخریب زیستگاه در منطقه حفاظت‌شده کویر، اگرچه در بازه‌ای نسبتاً محدود (صفر تا ۰/۰۶۲) قرار دارد، اما همین مقدار نیز به دلیل آسیب‌پذیری و ماهیت شکننده اکوسیستم‌های خشک و فراخشک، اثر معنی‌داری بر کیفیت زیستگاهی منطقه حفاظت‌شده کویر برجای گذاشته است. در صورت تداوم روند فعلی پوشش و تغییرات کاربری اراضی و فشارهای انسانی، شدت تخریب اکوسیستم افزایش یافته و به طور هم‌زمان کیفیت اکوسیستم و شاخص‌های عمومی و تخصصی مطلوبیت زیستگاه کاهش خواهد یافت؛ امری که می‌تواند پایداری اکولوژیک منطقه و توان آن در پشتیبانی از گونه‌های شاخص و حساس را با تهدید جدی مواجه سازد.

کیفیت اکوسیستم: یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بالاترین کیفیت اکوسیستم و مطلوبیت زیستگاه در اراضی مرتعی و بوته‌زارها مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که این کاربری‌ها امتیازی بین ۰/۸ تا ۱ را به خود اختصاص داده‌اند، درحالی‌که اراضی کشاورزی کمترین سطح مطلوبیت زیستگاهی را داشته و عملاً در طبقه فاقد کیفیت اکوسیستم قرار می‌گیرند. نتایج بیانگر آن است که در صورت تداوم روند گسترش اراضی کشاورزی، سطح اراضی باکیفیت پایین یا فاقد کیفیت افزایش یافته و در مقابل، مساحت اراضی باکیفیت بالای اکوسیستم کاهش خواهد یافت؛ روندی که حاکی از افت تدریجی شاخص‌های مطلوبیت زیستگاه و اختلال در توازی و همبودی ترازهای اکولوژیک و تضعیف توان زیست‌پذیری آن در آینده خواهد بود.

بحث و نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که گسترش اراضی کشاورزی در منطقه حفاظت‌شده کویر، به‌عنوان یک اکوسیستم فراخشک و شکننده، اثرات چندبعدی و هم‌افزا بر خدمات اکوسیستمی دارد. نتایج مدل InVEST بیانگر آن است که پوشش و تغییرات کاربری اراضی از بوته‌زارها و مراتع طبیعی به اراضی کشاورزی، نه‌تنها موجب کاهش ظرفیت نگهداشت خاک می‌شود، بلکه از طریق تضعیف پوشش گیاهی و تغییر در تیپ و تراکم تنوع فلور، حساسیت اکوسیستم نسبت به فرسایش آبی و بادی را نیز افزایش می‌دهد. این یافته با اصول بوم‌شناسی مناطق خشک همخوانی دارد؛ زیرا در این اکوسیستم‌ها، پوشش گیاهی حتی با تراکم کم، نقش کلیدی در پایداری خاک و تنظیم جریان‌های سطحی ایفا می‌کند. افزایش هدررفت خاک در اراضی کشاورزی نسبت به مراتع و بوته‌زارها نشان می‌دهد که توسعه کشاورزی در چنین شرایطی لزوماً به معنای بهبود بهره‌وری سرزمین نیست، بلکه می‌تواند موجب تسریع فرآیندهای تخریبی شود. خاک‌های لومی با ماده آلی کم که در دشت‌های سیلابی منطقه غالب هستند، در صورت حذف پوشش طبیعی، به‌شدت مستعد فرسایش می‌شوند. این موضوع به‌ویژه در نواحی با مقادیر بالای عامل فرساینده باران، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا هم‌زمانی بارش‌های مقطعی شدید و نبود پوشش گیاهی، منجر به افزایش هدررفت خاک و کاهش توان تولید زیستی سرزمین می‌گردد. در بخش کیفیت زیستگاه، نتایج مدل‌سازی نشان داد که گسترش اراضی کشاورزی با افزایش شدت تخریب و کاهش پیوستگی زیستگاه‌ها همراه است. افول شاخص‌های عمومی و تخصصی مطلوبیت زیستگاه‌های حیات‌وحش و کاهش کیفی و کمی ذخیره‌گاه‌ها در سال‌های آتی را می‌توان پیامد اجماع تهدیدات انسانی، از جمله توسعه کشاورزی، فعالیت‌های دامپروری، تکه‌تکه‌شدن زیستگاه و افزایش اختلالات انسانی دانست. این روند، به‌ویژه برای گونه‌های شاخص و حساس منطقه که نیازمند زیستگاه‌های وسیع، یکپارچه، هماهنگ و کم‌اختلاف و همچنین تراز قابل قبول شاخص‌های تخصصی مطلوبیت زیستگاه هستند، پیامدهای جدی به همراه دارد؛ بنابراین، تغییرات پوشش/کاربری اراضی نه‌تنها یک مسئله در بعد کاربری زمین، بلکه عاملی تعیین‌کننده در پایداری سطوح زیستی منطقه و خدمات گرانبها و حیاتی سیستم‌های شکننده طبیعی محسوب می‌گردد. تحلیل چرخه آب نیز نشان داد که توسعه کشاورزی موجب کاهش تولید آب و تغییر الگوی توزیع رواناب می‌شود. افزایش تبخیر و تعرق در اراضی کشاورزی، در کنار عمق ریشه متفاوت گیاهان زراعی نسبت به پوشش طبیعی، باعث کاهش بازگشت آب به سفره‌های زیرزمینی و جریان‌های سطحی می‌شود. این یافته با منطق هیدرولوژیک مناطق فراخشک سازگار است؛ زیرا در چنین مناطقی، هرگونه افزایش مصرف آب می‌تواند تعادل طبیعی چرخه آب را برهم زده و خشکی سرزمینی را تشدید کند. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اثرات گسترش اراضی کشاورزی در منطقه حفاظت‌شده کویر، ماهیتی تجمعی و چند خدمتی دارد؛ به این معنا که کاهش یک خدمت اکوسیستمی، مانند نگهداشت خاک، به طور هم‌زمان بر سایر خدمات نظیر کیفیت و مطلوبیت زیستگاه و تنظیم منابع آب نیز اثر منفی می‌گذارد. باتوجه به شکنندگی و آسیب‌پذیری بسیار بالای زیستگاه‌های حیات‌وحش در مناطق خشک و فراخشک، یکی از مهم‌ترین موارد و اصول در برنامه‌ریزی استراتژیک و حفاظت از ذخایر زیستگاهی، تأکید و نظارت بسیار جدی بر تخصیص حبابه محیط‌زیستی زیستگاه و مناطق تحت حفاظت می‌باشد که این مهم می‌بایست به‌صورت جامع، بدون انقطاع، دائم و غیرقابل اغماض مورد پایش نظارت و حفاظت قرار گیرد. این یافته بر ضرورت رویکردهای یکپارچه و سیستماتیک در مدیریت سرزمین تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که ارزیابی تغییرات کاربری زمین بدون توجه به پیوند بین خدمات اکوسیستمی، می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های ناپایدار شود و ظهور شرایط نامطلوب غیرقابل بازگشت شود.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که گسترش اراضی کشاورزی در منطقه حفاظت‌شده کویر به‌عنوان یکی از بکرترین و مهم‌ترین زیست‌بوم‌های فراخشک کشور، پیامدهای قابل توجهی بر خدمات اکوسیستمی، پایداری خاک، چرخه آب و کیفیت زیستگاه‌های حیات‌وحش بر جای می‌گذارد. تحلیل‌های مبتنی بر مدل InVEST و لایه‌های زیست‌فیزیکی تهیه‌شده در محیط GIS، تصویر دقیقی از روندهای چهار دهه اخیر ارائه می‌دهد و مشخص می‌کند که فشار ناشی از توسعه فعالیت‌های کشاورزی در این منطقه حساس، فراتر از ظرفیت بوم‌شناختی آن حرکت کرده است. یافته‌های تحقیق آشکار کرد که از سال ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۰ حدود ۳۸۰۴ هکتار از اراضی مرتعی و بوته‌زارهای منطقه به زیر کشت رفته است؛ تغییری که به‌ظاهر جزئی تلقی می‌شود؛ اما در اکوسیستمی با شرایط بسیار حساس و شکننده و بارش محدود، پیامدهای گسترده‌ای بر ساختار و کارکرد زیست‌بوم به همراه دارد و همبودی و

توازی شاخص‌های اکولوژیک زیستگاه را دچار اختلال و تنزل جبران‌ناپذیر قرار خواهد داد. در زمینه خدمت نگهداشت خاک، نتایج مدل USLE بیانگر آن است که اراضی کشاورزی بیشترین میزان هدررفت خاک را تجربه می‌کنند. بر اساس خروجی‌های مدل، حداکثر هدررفت سالانه خاک در اراضی کشاورزی به حدود ۵۰۰۰ کیلوگرم در هر پیکسل می‌رسد، درحالی‌که در بوته‌زارها و مراتع این مقدار به ترتیب حدود ۱۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ کیلوگرم است. این اعداد نشان می‌دهد که حذف پوشش مرتعی و بوته‌زار و جایگزینی آن با زراعت، نه تنها از شدت فرسایش نمی‌کاهد، بلکه با تغییر ساختار خاک، کاهش پایداری سطح زمین و تخریب ریشه دامنه‌ها، میزان هدررفت خاک را افزایش می‌دهد. این مسئله در منطقه‌ای که تشکیل یک سانتی‌متر خاک ممکن است صدها سال زمان ببرد، اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. در مقابل، بوته‌زارها و مراتع به طور متوسط در هر پیکسل حدود ۱۶۷۵۰ کیلوگرم خاک را حفظ می‌کنند؛ بنابراین تداوم روند تبدیل این اراضی، به معنای نابودی تدریجی یکی از حیاتی‌ترین خدمات اکوسیستم است.

تحلیل شاخص‌های فرساینده‌گی باران، فرسایش‌پذیری خاک و عامل پوشش گیاهی نیز تأیید می‌کند که الگوی فرسایش در منطقه یکنواخت نیست و اکوسیستم در برابر تغییرات کاربری آسیب‌پذیری متفاوتی دارد. مقادیر عامل R نشان داد که بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه بیشترین شدت فرساینده‌گی را دارند؛ یعنی هرگونه کاهش پوشش گیاهی در این نواحی مستقیماً به افزایش فرسایش آبی منجر می‌شود. شاخص K نیز بیانگر آن بود که خاک‌های دشت‌های سیلابی با بافت لومی و ماده‌آلی کم مستعد بیشترین میزان فرسایش هستند. این امر به‌ویژه در نواحی که گسترش کشاورزی اتفاق افتاده، اثرات تجمعی فرسایش را تشدید کرده است. ازسوی دیگر، محاسبه شاخص فوریت f برای منطقه نشان داد که نوسانات شدت و الگوی زمانی بارش اگرچه در اقلیم فراخشک محدود است، اما در برخی پهنه‌ها به‌ویژه در دشت‌های جنوبی و جنوبی شرقی انرژی بارندگی قابل‌توجهی تولید می‌کند که می‌تواند در صورت فقدان پوشش گیاهی کافی، به فرسایش قابل‌ملاحظه منجر شود. در بخش خدمت کیفیت زیستگاه، نتایج مدل InVEST سال‌های ۱۹۸۶ الی ۲۰۲۰ نشان داد که روند تخریب زیستگاه، افزایشی و روند کیفیت اکوسیستم، کاهش‌ی است. این الگو نشان‌دهنده تهدید جدی برای گونه‌های شاخص منطقه، از جمله یوزپلنگ ایرانی، کاراکال، گربه شنی، گربه وحشی، گور ایرانی، کفتار راه‌راه، گرگ، کل و بز، قوچ و میش، جبیر و تشی است که به زیستگاه‌های مطلوب، وسیع، یکپارچه، هماهنگ و کم‌اختلاف نیاز دارند. افزایش لکه‌های کشاورزی، مرزهای اکولوژیک را پاره کرده و منجر به تقطیع زیستگاه و کاهش قابلیت زیست‌پذیری آن برای گونه‌های حساس می‌شود. تحلیل چرخه آب نیز نشان داد که توسعه کشاورزی در منطقه حفاظت‌شده کویر، موجب کاهش تولید آب و تغییر الگوی توزیع رواناب می‌شود. مدل سالانه عملکرد آب نشان داد که اراضی کشاورزی به دلیل تبخیر و تعرق بالا و عمق ریشه متفاوت، نسبت به اراضی مرتعی، آب کمتری به سفره‌ها و جریان‌های سطحی بازمی‌گردانند. این مسئله موجب برهم‌خوردن تعادل هیدرولوژیک طبیعی و تشدید خشکی سرزمینی در یک اکوسیستم از پیش خشک و شکننده می‌شود. در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که گسترش اراضی کشاورزی در منطقه حفاظت‌شده کویر نه تنها باعث کاهش ظرفیت اکوسیستم برای حفظ خاک، تنظیم آب و پشتیبانی از تنوع زیستی می‌شود، بلکه روند تخریب زیستگاه‌های طبیعی را تسریع می‌کند و آینده اکولوژیک منطقه را در معرض تهدید جدی قرار می‌دهد؛ بنابراین تأکید می‌شود که مدیریت منطقه باید بر نظارت و محدودسازی کامل گسترش اراضی کشاورزی جدید، احیای بوته‌زارها و مراتع تخریب‌شده، ایجاد کمربندهای حفاظتی گیاهی، تقویت مقررات حفاظتی و استفاده از روش‌های کشاورزی کم‌خطر استوار باشد. افزون بر این، پایش مستمر خدمات اکوسیستمی با استفاده از مدل‌های مکانی و زمانی مانند InVEST، می‌تواند ابزار ارزشمندی برای ارزیابی پیامدهای تغییرات انسانی و ترسیم مسیرهای پایداری توسعه در این زیست‌بوم حساس باشد. نتیجه اصلی پژوهش آن است که تنها با رعایت ظرفیت برد اکولوژیک منطقه و مدیریت دقیق بهره‌برداری می‌توان از تخریب بیشتر زیست‌بوم جلوگیری کرد و امنیت زیستگاهی و بقای گونه‌های ارزشمند منطقه را تضمین نمود. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات اخیر بین‌المللی نشان می‌دهد که الگوی مشاهده‌شده در منطقه حفاظت‌شده کویر، با روندهای گزارش‌شده در سایر اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک جهان همخوانی و تطابق بالایی دارد. پژوهش حاضر نشان داد که گسترش اراضی کشاورزی، از طریق کاهش پوشش طبیعی و افزایش اختلالات انسانی، منجر به افت هم‌زمان خدمات اکوسیستمی تنظیمی از جمله نگهداشت خاک، کیفیت زیستگاه و تنظیم چرخه آب می‌شود. این یافته‌ها با نتایج مطالعه Zhang و همکاران (۲۰۲۴) که تغییرات کاربری زمین و پیامدهای آن بر خدمات اکوسیستمی را در مناطق خشک شمال چین با استفاده از مدل InVEST بررسی کردند، سازگار است. آنها گزارش کردند که تبدیل مراتع و بوته‌زارها به اراضی کشاورزی باعث کاهش

معنی‌دار کیفیت زیستگاه و افزایش شدت فرسایش خاک شده و اثرات تجمعی تهدیدات انسانی را تشدید می‌کند؛ همچنین، نتایج این مطالعه با یافته‌های Huang و همکاران (۲۰۲۵) در حوضه‌های نیمه‌خشک آسیای مرکزی هم‌راستا است. آنها نشان دادند که توسعه کشاورزی، حتی در مقیاس‌های محدود، به دلیل افزایش تبخیر و تعرق و کاهش نفوذپذیری خاک، منجر به کاهش تولید آب و تضعیف تعادل هیدرولوژیک می‌شود. این نتیجه، تفسیر ارائه‌شده در پژوهش حاضر درباره کاهش عملکرد هیدرولوژیک اراضی کشاورزی نسبت به مراتع طبیعی را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که در اکوسیستم‌های فراخشک، اثرات منفی توسعه کشاورزی می‌تواند فراتر از مرزهای محلی گسترش یابد. از منظر کیفیت زیستگاه، مطالعه Li و همکاران (۲۰۲۴) در مناطق حفاظت‌شده آسیای شرقی نشان داد که افزایش لکه‌های کشاورزی موجب تکه‌تکه‌شدن زیستگاه، کاهش پیوستگی اکولوژیک و افت مطلوبیت زیستگاهی برای گونه‌های حساس می‌شود. این یافته‌ها با نتایج پژوهش حاضر درباره کاهش سطوح دارای کیفیت بالای زیستگاه (امتیاز ۰/۸ تا ۱) همخوانی دارد. در هر دو مطالعه، تأکید شده است که حتی افزایش‌های نسبی در سطح اراضی کشاورزی می‌تواند اثرات نامتناسبی بر زیستگاه گونه‌های شاخص داشته باشد. در مجموع، مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات اخیر نشان می‌دهد که کاهش خدمات اکوسیستمی در اثر گسترش اراضی کشاورزی، یک الگوی مشترک در اکوسیستم‌های خشک جهان است و یافته‌های این تحقیق در چارچوب ادبیات بین‌المللی قابل تبیین است. این هم‌سویی علمی، اعتبار نتایج را افزایش داده و نشان می‌دهد که استفاده از مدل InVEST و تحلیل و تفسیر مبتنی بر دانش و تخصص دانشگاهی روز به انضمام تجارب بومی میدانی، ابزاری کارآمد در جهت پیش‌بینی پیامدهای توسعه و نیز پشتیبانی از ریل‌گذاری متناسب جهت برنامه‌ریزی استراتژیک و حفاظت موفق در مناطق حفاظت‌شده محسوب می‌گردد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی و معنوی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران انجام شد.

مشارکت نویسندگان

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

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

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

سپاسگزاری

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

References

- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., 2021. The value of ecosystem services in a changing world. *Ecosystem Services* 51, 101-118.
- Fu, B., 1981. On the calculation of the evaporation from land surface [in Chinese]. *Sciences Atmospheric*.
- Hajrahimi, A., Karimi, S., Rahmati, O., 2024. Monitoring land degradation and ecosystem service decline in arid regions. *Science of the Total Environment* 929, 171-189.
- Hua, F., Wang, L., Zhang, H., 2020. Ecosystem degradation and land-use transitions in drylands. *Environmental Research Letters* 15(8), 1-12.
- Huang, X., Liu, Z., Chen, Y., 2025. Future ecosystem service dynamics under land-use scenarios using InVEST. *Environmental Modelling & Software* 180, 106-119.

- Huang, J., Li, X., Zhang, Y., Chen, F., 2025. Assessing the impacts of agricultural land expansion on ecosystem services in arid regions using the InVEST model. *Science of the Total Environment* 912, 169012.
- Huang, L., Zhao, Y., Li, Q., Sun, W., 2025. Scenario-based assessment of agricultural expansion effects on water yield and ecosystem services in semi-arid basins. *Science of the Total Environment* 912, 169134.
- Kinnell, P.I.A., 2005. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. *Hydrological Processes* 19(3), 851-854.
- Li, Z., Chen, X., Xu, Q., 2022. Impact of agricultural expansion on soil retention services in protected areas. *Land Degradation & Development* 33(7), 1231-1244.
- Ludzuweit, A., Paterson, J., Müller, K., Miller, Y., 2025. Enhancing ecosystem services in agricultural landscapes through integrated land-use strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 195, 115380.
- Li, X., Peng, J., Yang, Y., Liu, Y., 2024. Habitat quality responses to agricultural expansion in protected landscapes: An InVEST-based assessment. *Landscape Ecology* 39(6), 1567-1583.
- Moradi, A., Taghavi, A., Chen, S., 2025. Agricultural expansion and ecosystem service losses in dryland regions. *Ecological Indicators* 172, 112-128.
- Mohammadyari, F., 2024. Spatial modeling of multiple ecosystem services capacity in the planning process of Manesht and Qalarang Protected Area using the InVEST model. *Journal of Natural Environment* 77(4), 611-628. (In Persian)
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., et al., 2020. InVEST User Guide. Natural Capital Project.
- Shen, X., Li, N., Song, Y., 2021. Agricultural intensification and ecosystem service decline. *Science of the Total Environment* 759, 143-158.
- Sobhani, P., Danehkar, A., 2025. Spatial distribution analysis of ecosystem services in Iranian mangrove forests using the InVEST model. *Journal of Natural Environment* 78(1), 125-142. (In Persian)
- Zhang, Q., Yang, X., Liu, H., 2024. Land-use change pressures and ecosystem responses in protected drylands. *Journal of Environmental Management* 354, 120-139.
- Zhang, C., Li, W., Zhang, B., Liu, M., 2012. Water yield of Xitiaoxi river basin based on InVEST modeling. *Journal of Resources and Ecology* 3(1), 50-54.
- Zhao, Y., Sun, L., Huang, J., 2024. Evaluating ecosystem service trends under land-use change using InVEST. *Sustainability* 16(2), 1-15.
- Zhao, Y., Wang, S., Liu, Y., Zhang, H., 2024. Exploring ecosystem service trade-offs under land-use change scenarios using the InVEST model: Evidence from the Yellow River Basin. *Science of the Total Environment* 926, 171630.
- Zolfaghari, M., Salmanmahiny, A., Kamyab, H.R., 2024. Modeling the effects of land use/land cover change on soil retention ecosystem service using the InVEST model (case study: Golestan Province). *Journal of Natural Environment* 77(3), 489-504. (In Persian)
- Zhang, Y., Liu, J., Wang, S., Chen, X., 2024. Assessing land use change impacts on ecosystem services in arid regions using the InVEST model. *Journal of Environmental Management* 356, 120567.