Modeling the Effects of Land Use Change on Soil Retention Ecosystem Services (Case Study: Lavasanat Watershed)

Marzie Motesharei [a], Bahram Malekmohammadi [b*], Majid Ramezani mehrian [c]

[a] *Master's graduate in the Department of Environmental Planning, Management, and HSE, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: marziemotesharei@gmail.com, https://orcid.org/0009-0000-5414-4470*

[b*] *Corresponding author: Professor, Department of Environmental Planning, Management, and Education, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: malekb@ut.ac.ir, https://orcid.org/0000-0002-3964-7536*

[c] *Assistant Professor, Department of Environmental Studies, The Institute for Research and Development in the Humanities (SAMT), Tehran, Iran. E-mail: mehrian@samt.ac.ir, https://orcid.org/0000-0002-0216-299X*

Research Full Paper
Article History (Received: 2025/06/11 Accepted: 2025/07/11)

Extended abstract

1 –Introduction

Soil is a vital component of natural capital, providing essential ecosystem services such as flood regulation, habitat provision, carbon sequestration, and agricultural production. As awareness of these services grows, soil retention has become a priority in environmental management. Key factors influencing soil retention and sediment control include changes in land use and land cover. This study aims to monitor land use and land cover changes in the Lavasanat watershed from 2000 to 2023 and assess their impact on soil-related ecosystem services. The Lavasanat watershed is crucial for managing water and soil resources due to its location upstream of the Latian Dam and its proximity to protected areas and national parks.

2 –Materials and Methods

Landsat satellite imagery from 2000 and 2023 was used to assess changes in land use and land cover, as well as their impacts on ecosystem services. Land-use classification maps were created using eCognition Developer 9.01 and incorporated into the InVEST-SDR model. The inputs for this analysis included the rainfall factor (R), soil erodibility (K), vegetation cover (C), protective measures (P), a Digital Elevation Model (DEM), a biophysical table, and the land-use maps. Additionally, the Geographically Weighted Regression (GWR) model was applied to examine the spatial relationships between land-use changes and ecosystem service indices, specifically focusing on Avoiding Erosion and Avoiding Export.

3 –Results

The study revealed that green cover—including rangelands, coniferous forests, orchards, and agricultural lands—declined by approximately 152 square kilometers (15.4 percent), leading to a conversion of these areas into built-up land. This transformation resulted in a 56.14 percent increase in potential soil loss, a 10.32 percent reduction in the Avoid Erosion index, and a 23.31 percent rise in the Avoid Export index. The Geographically Weighted Regression (GWR) model demonstrated a strong spatial correlation between land use and ecosystem services related to Avoid Erosion and Avoid Export in both 2000 and 2023. In 2000, the Adjusted R^2 values were 0.98 for Avoid Erosion and 0.99 for Avoid Export, with lower residual sums of squares and standard deviations compared to 2023. Rangelands exhibited the highest Avoid Erosion and the lowest Avoid Export, while built-up areas showed the highest Avoid Export. In 2023, the Adjusted R^2 increased to 0.99 for Avoid Erosion but decreased to 0.96 for Avoid Export, accompanied by higher residual sums of squares and standard deviations. Orchards recorded the lowest Avoid Export, whereas coniferous forests had the highest. The decrease in the Akaike Information Criterion corrected (AICc) in 2023 indicated an enhanced model fit under more homogeneous spatial conditions. However, this improvement did not reflect ecological progress, as the reduction in natural

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

cover and the expansion of built-up areas negatively impacted ecosystem performance in soil retention and erosion prevention. A comparison between 2000 and 2023 demonstrated a diminished capacity of the ecosystem to conserve soil, evidenced by a significant decline in Avoid Erosion and an increase in Avoid Export, driven by urban expansion and reduced vegetation cover. This underscores the urgent need for improved land-use management to mitigate soil degradation and preserve ecosystem functions.

4 –Discussion & Conclusions

The findings highlight the importance of protecting vegetation cover and improving land-use management in sensitive areas. Changes in the Lavasanat watershed have led to decreased vegetation cover and an increase in built-up areas, negatively impacting ecosystem services such as soil retention and sediment control. As a result, soil erosion and excess sediment accumulation have worsened, reducing the ecosystem's resilience. Enhancing land-use management in areas with high erosion potential is crucial. Additionally, integrating the InVEST model with advanced hydrological models like SWAT and RUSLE is recommended for more accurate simulations of soil erosion and ecosystem services. Future research should explore the effects of climate and socio-economic scenarios on soil erosion and land-use changes to better understand environmental change patterns and inform effective management strategies. These approaches can help improve planning for the preservation of soil and water resources, mitigating the harmful effects of climate change and human activities on ecosystems.

Key Words: Soil retention ecosystem services, Land use/land cover (LULC) changes; InVEST-SDR model, Geographically Weighted Regression (GWR), Lavasanat Watershed.

Cite this article: Motesharei, M., Malekmohammadi, B., & Ramezani mehrian, M. (2025). Modeling the Effects of Land Use Change on Soil Retention Ecosystem Services (Case Study: Lavasanat Watershed). *Journal of* Environmental *Erosion Research. 2025; 15 (3):59-80*. http//doi.org/10.61186/jeer.15.3.59

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/10.61186/jeer.15.3.59
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

مدل‌سازی اثرات تغییر کاربری اراضی بر خدمات اکوسیستمی نگهداشت خاک (مطالعه موردی: حوضه آبخیز لواسانات)

مرضیه متشرعی: *دانش‌آموختهٔ کارشناسی‌ارشد برنامه‌ریزی محیطزیست، گروه برنامه‌ریزی، مدیریت محیطزیست و HSE ، دانشکدهٔ محیطزیست، دانشگاه تهران، تهران*

بهرام ملک‌محمدی*: *استاد گروه آموزشی برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران، تهران*

مجید رمضانی مهریان: *استادیار گروه تحقیق و توسعه علوم انسانی، پژوهشکده سمت، تهران*

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰)

DOI: http//doi.org/10.61186/jeer.15.3.59

چکیده

خاک به‌عنوان یکی از ارکان سرمایه طبیعی، نقش مهمی در ارائه خدمات اکوسیستمی مانند کاهش خطر سیل، زیستگاه‌دهی، ترسیب کربن و پشتیبانی کشاورزی دارد. افزایش آگاهی جهانی نسبت به اهمیت این خدمات، حفاظت از خاک را به اولویت زیست‌محیطی تبدیل کرده است. تغییرات کاربری/پوشش اراضی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خدمات اکوسیستمی، به‌ویژه نگهداشت خاک و حفظ رسوب است. این مطالعه با هدف پایش تغییرات کاربری/پوشش حوضه لواسانات طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ و ارزیابی تأثیر آن بر خدمات اکوسیستمی انجام شد. برای این منظور از تصاویر لندست، مدل InVEST-SDR و رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) استفاده گردید؛ ورودی‌های مدل شامل نقشه‌های کاربری، فاکتورهای فرسایش خاک (R، K، C، P) و مدل رقومی ارتفاع (DEM) بود. نتایج نشان داد سطح اراضی سبز شامل مراتع، جنگل‌های سوزنی‌برگ، باغات و زمین‌های کشاورزی حدود ۱۵۲ کیلومتر مربع (۱۵/۴ درصد) کاهش یافته و به مناطق انسان‌ساخت تبدیل شده است. این تغییرات موجب افزایش ۵۶/۱۴ درصدی پتانسیل اتلاف خاک، کاهش ۱۰/۳۲ درصدی شاخص اجتناب از فرسایش و افزایش ۲۳/۳۱ درصدی شاخص اجتناب از حمل رسوب شده است. نتایج مدل GWR در ۲۰۰۰ و ۲۰۲۳ رابطه فضایی قوی بین درصد کاربری و خدمات اجتناب از فرسایش و حمل رسوب را نشان داد. در ۲۰۰۰، ضریب تعیین تنظیم‌شده برای اجتناب از فرسایش ۰/۹۸ و برای اجتناب از حمل رسوب ۰/۹۹ بود، با مجموع مربعات باقی‌مانده و انحراف معیار کمتر نسبت به ۲۰۲۳. در ۲۰۲۳، ضریب تعیین تنظیم‌شده برای اجتناب از فرسایش به ۰/۹۹ افزایش و برای اجتناب از حمل رسوب به ۰/۹۶ کاهش یافت، در حالی که مجموع مربعات باقی‌مانده و انحراف معیار افزایش یافت. کاهش AICc در ۲۰۲۳ بیانگر بهبود برازش مدل در شرایط همگن‌تر است. بر این اساس، حفاظت از پوشش‌های گیاهی، بهینه‌سازی مدیریت کاربری و اجرای سیاست‌های توسعه پایدار، به‌ویژه در مناطق آسیب‌پذیر و پرخطر فرسایش، برای حفظ خدمات اکوسیستمی و پایداری محیطی ضروری است.

واژگان کلیدی: خدمات اکوسیستمی نگهداشت خاک، تغییرات کاربری/پوشش اراضی، مدل **InVEST-SDR**، مدل رگرسیونی **GWR**، حوضه آبخیز لواسانات.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

۱ـ مقدمه

خاک به‌عنوان منبعی حیاتی، در تأمین کالاها و ارائه خدماتی چون کاهش خطر سیل، فراهم‌سازی زیستگاه و ترسیب کربن نقش دارد (da Gama, 2023). همچنین به‌عنوان زیرساختی سبز در کشاورزی و باغداری عمل کرده و توانایی جذب آلاینده‌ها و ایجاد زیستگاه را دارد (Deeb et al., 2020). پس از انتشار گزارش ارزیابی اکوسیستم هزاره در ۲۰۰۵، اهمیت خدمات اکوسیستمی خاک به‌عنوان یک منبع حیاتی و بخشی از سرمایه طبیعی بیشتر مورد توجه قرار گرفت (Anikwe & Ife, 2023). شواهد نشان می‌دهند که خاک‌ها با ارائه این خدمات، تأثیر زیادی بر پایداری زیست‌محیطی دارند (Cadel et al., 2023). خدمات تنظیمی خاک، مانند کنترل فرسایش و حفظ پایداری اکوسیستم‌ها، اهمیت ویژه‌ای دارند (MEA, 2005). با این‌حال، این اکوسیستم‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار می‌گیرند و توانایی آن‌ها برای ارائه خدمات کاهش می‌یابد (Hou, 2023). تغییرات کاربری و پوشش اراضی، عامل اصلی فرسایش و تخریب خاک هستند (Li et al., 2022). در مناطقی که کاربری اراضی تغییر می‌کند، فرسایش خاک افزایش یافته و بر خدمات اکوسیستمی اثر منفی می‌گذارد (Filchev & Kolev, 2023). این تغییرات بر ویژگی‌های اکولوژیکی، از جمله پوشش گیاهی، تأثیر گذاشته و موجب کاهش پایداری سیستم‌های خاکی می‌شوند (Sharma et al., 2023).

با توجه به تأثیر چشمگیر تغییرات کاربری و پوشش اراضی بر فرسایش خاک، ابزارهای مدل‌سازی برای ارزیابی این اثرات توسعه یافته‌اند. مدل SDR[1]-InVEST[2] که مبتنی بر RUSLE است، از جمله ابزارهای پرکاربرد در مقیاس‌های مختلف و با کاربرد جهانی برای بررسی فرسایش و حفظ خاک به شمار می‌رود (Marques et al., 2021). در ایران، مطالعه Zabihi و همکاران (۲۰۲۱) در حوضه تالار مازندران نشان داد که جنگل‌ها نقش مهمی در کاهش فرسایش دارند، در حالی که تبدیل آن‌ها به اراضی کشاورزی و مرتعی موجب کاهش ظرفیت خاک در نگه‌داشت رسوب می‌شود. همچنین، Jahandari و همکاران (۲۰۲۲) در حوضه بندرعباس دریافتند که توسعه شهری و گسترش زمین‌های کشاورزی بدون مدیریت، فرسایش را افزایش داده و پایداری خاک را تضعیف کرده است. یافته‌های Chamani و همکاران (۲۰۲۳) در حوضه شارقنج نیز نشان داد که گسترش اراضی کشاورزی و کاهش پوشش گیاهی طبیعی به تشدید فرسایش منجر شده است. در خارج از ایران Tamire و همکاران (۲۰۲۲) در اتیوپی گزارش کردند که کاهش پوشش گیاهی در مناطق مرتفع و افزایش زمین‌های زراعی، تهدیدی برای منابع آبی پایین‌دست به‌دنبال دارد. در اسلواکی، Adelisardou و همکاران (۲۰۲۳) با بررسی ۱۸ ساله دریافتند که تغییر اقلیم و تبدیل جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی باعث افت شدید ظرفیت خاک در حفظ رطوبت و افزایش فرسایش شده است. همچنین، Mwanga و همکاران (۲۰۲۴) در غنا نشان دادند که تبدیل زمین‌های طبیعی به زراعی، افزایش چشمگیر فرسایش را در پی داشته است. این مطالعات به‌طور کلی حاکی از آن‌اند که کاهش پوشش گیاهی طبیعی و تغییر کاربری اراضی، ارتباط مستقیمی با افزایش فرسایش و کاهش نگه‌داشت رسوب دارد؛ بااین‌حال، شدت این اثرات تحت تأثیر شرایط اقلیمی و مدیریتی هر منطقه متغیر است.

[1]. Sediment Delivery Ratio
[2]. Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]
[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

با وجود مطالعات متعدد، همچنان کاستی‌هایی در تحلیل کمی رابطه بین تغییر کاربری اراضی و فرسایش خاک وجود دارد. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات کاربری/پوشش اراضی طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ با استفاده از تصاویر لندست و ارزیابی اثر آن بر نگه‌داشت خاک در حوضه لواسانات انجام شده است. این حوضه به‌دلیل شیب‌های زیاد، توسعه شهری سریع و تغییرات گسترده کاربری، منطقه‌ای حساس برای تحلیل اثرات تغییرات اراضی بر فرسایش به‌شمار می‌رود. نزدیکی به مناطق پرجمعیت، منابع آبی و زیستگاه‌های ارزشمند، اهمیت زیست‌محیطی و هیدرولوژیکی آن را افزایش داده است. در این مطالعه از مدل SDR-InVEST و روش رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR[1]) استفاده شده است. GWR با محاسبه ضرایب محلی، نسبت به OLS[2] امکان تحلیل دقیق‌تری از روابط فضایی بین متغیرها فراهم می‌کند. نوآوری اصلی پژوهش در ترکیب این دو روش و بهره‌گیری از داده‌های بلندمدت است که تحلیلی جامع از تأثیرات فضایی–زمانی تغییرات کاربری بر نگهداشت خاک ارائه می‌دهد.

۲- مواد و روش‌ها

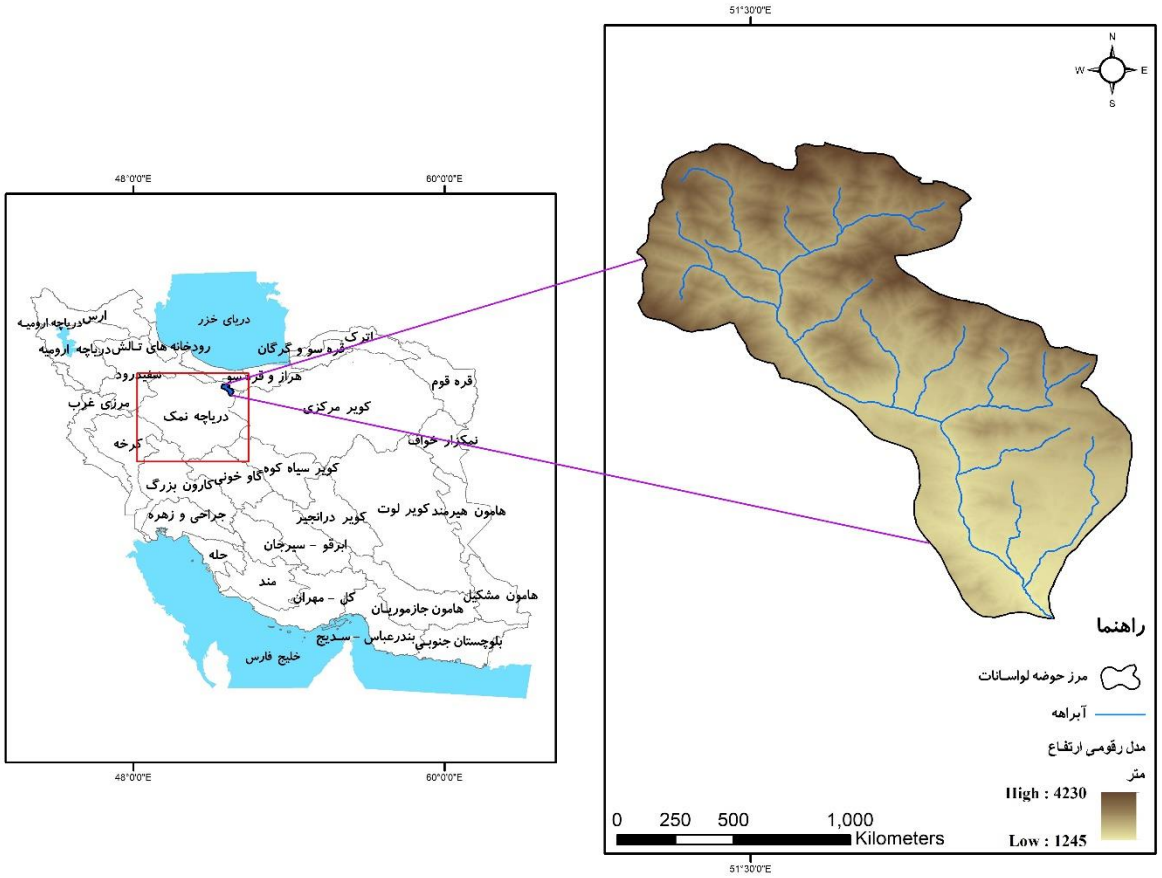
۲ـ۱- منطقهٔ مورد مطالعه

حوضه آبخیز لواسانات با مساحتی حدود ۹۸۶ کیلومتر مربع، در شمال استان تهران و در دامنه‌های جنوبی رشته کوه البرز قرار دارد و بخشی از زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه نمک محسوب می‌شود. این حوضه در محدوده جغرافیایی °۳۵ ´۳۶ تا °۳۶ ´۰۳ عرض شمالی و °۵۱ ´۲۳ تا °۵۱ ´۵۱ طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع منطقه از ۱۲۴۵ تا ۴۲۳۰ متر از سطح دریا متغیر است و شبکه آبراهه اصلی آن را رودخانه جاجرود و شاخه‌های آن تشکیل می‌دهند که در نهایت به سد لتیان در جنوب لواسان تخلیه می‌شوند. سد لتیان یکی از منابع مهم تأمین آب شرب شهر تهران است که اهمیت هیدرولوژیک منطقه را برجسته می‌کند. وجود پارک‌های ملی خوجیر و لار و مناطق حفاظت‌شده ورجین، جاجرود و البرز مرکزی در محدوده این حوضه، ارزش اکولوژیکی آن را افزایش داده است. منطقه دارای چشم‌اندازهای طبیعی زیبا، آب و هوای مطبوع و منابع آبی قابل توجهی است که نقش مهمی در خدمات اکوسیستمی ایفا می‌کند.

[1]. Geographically Weighted Regression
[2]. Ordinary Least Squares

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

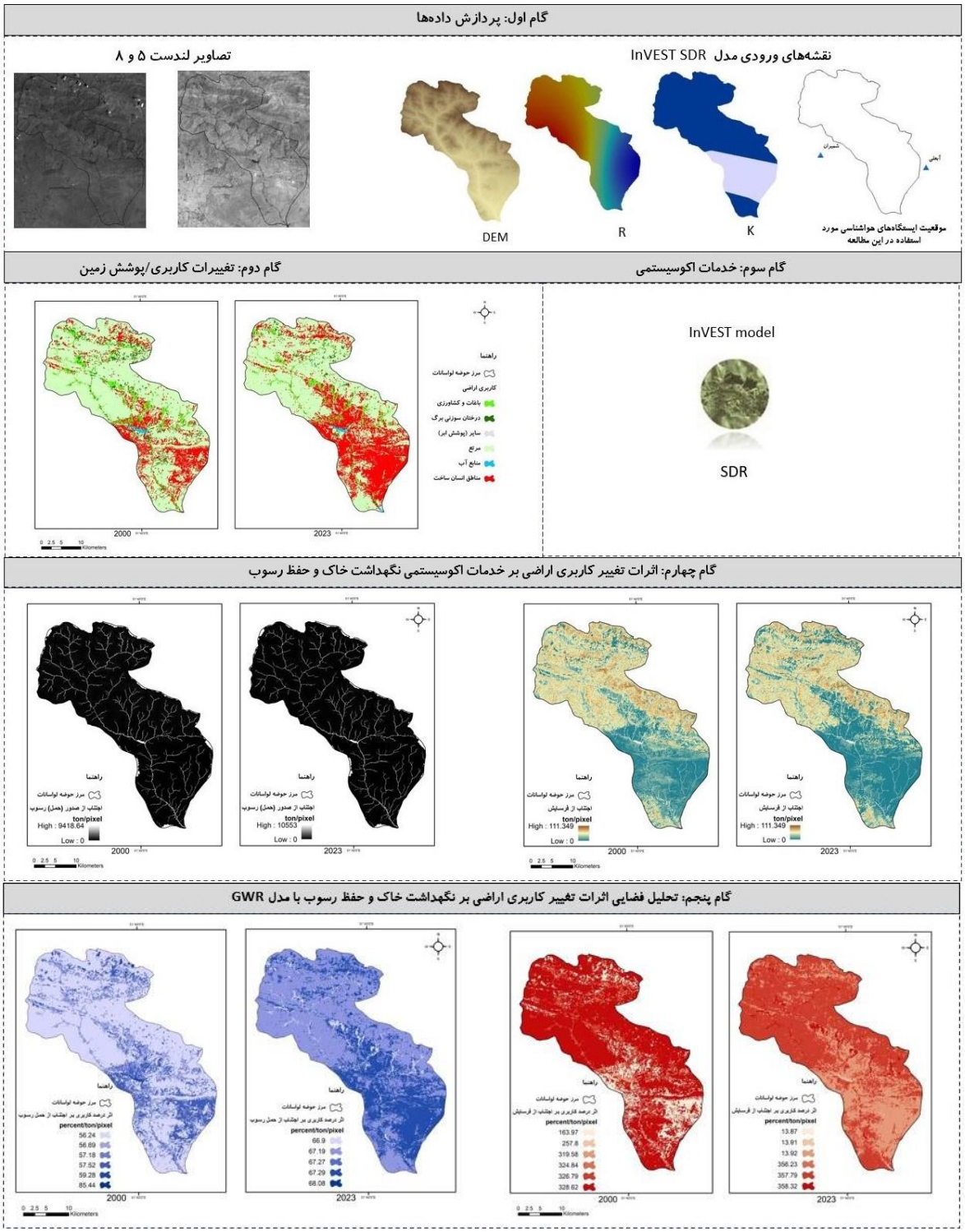


شکل ۱: موقعیت کلی منطقه مورد مطالعه نسبت به حوضه آبخیز دریاچه نمک کشور (WRM, 2023)

۲ـ۲ـ داده‌ها و مراحل اجرای پژوهش

این مطالعه به بررسی تغییرات کاربری/پوشش اراضی در حوضه لواسانات طی یک بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ می‌پردازد و تأثیر این تغییرات را بر نگه‌داشت خاک و حفظ رسوب ارزیابی می‌کند. برای این منظور، تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های مطالعه انتخاب و پردازش شد تا وضعیت کاربری/پوشش اراضی مشخص شود. سپس مدل‌سازی نگه‌داشت خاک و حفظ رسوب با استفاده از نرم‌افزار InVEST انجام گرفت. ورودی‌های مدل شامل عامل فرسایندگی باران (فاکتور R)، فرسایش‌پذیری خاک (فاکتور K)، نقشه‌های کاربری اراضی، نوع کاربری/پوشش اراضی (فاکتور C)، اقدامات حفاظتی (فاکتور P)، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، جدول بیوفیزیکی و نقشه مرز منطقه مورد مطالعه است. در نهایت، با بهره‌گیری از مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)، روابط فضایی میان تغییرات کاربری/پوشش اراضی و خدمات اکوسیستمی مرتبط با نگه‌داشت خاک و حفظ رسوب تحلیل گردید (شکل ۲).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]
[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]



شکل ۲: مراحل انجام تحقیق

۳-۲- تولید نقشه‌های کاربری/پوشش زمین

گام اول: تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸ مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۳ از مجموعه Collection-2 Level-2 به صورت داده‌های آماده تحلیل (ARD[1]) دانلود شدند که نیاز به تصحیح اتمسفری و رادیومتریکی ندارند (USGS, 2022). انتخاب این سال‌ها بر اساس تطابق میانگین بارش سالانه ایستگاه‌های شمیران و آبعلی با میانگین بلندمدت بارندگی

[1]. Analysis Ready Data

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]
[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

حوضــه و با هدف ایجاد مبنای اقلیمی یکنواخت و کاهش اثر نوسانات بارشی انجام شد. تصاویر از ماه‌های رشد گیاهی (مانند جولای) برای بهبود تفکیک طیفی کلاس‌های پوشش/کاربری زمین انتخاب و با نرم‌افزار شیءگرا (eCognition Developer 9.01) پردازش شدند. جزئیات بیشتر در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در نرم‌افزار eCognition Developer 9.01

نام لایه اطلاعاتی	تاریخ تولید	قدرت تفکیک	منبع
Landsat 5 TM	Jul 26, 2000	۳۰ متر	https://earthexplorer.usgs.gov
Landsat 8 OLI and TIRS	Jul 10, 2023	۳۰ متر	https://earthexplorer.usgs.gov
تصاویر و اطلاعات کمکی	-	-	ArcBruTile; Google Earth Pro

گام دوم: تصــاویر ماهواره‌ای با اســتفاده از نرم‌افزار eCognition Developer 9.01 (Definiens, 2015) پردازش شــدند. این نرم‌افزار با بهره‌گیری از روش شــیءگرا، امکان اســتخراج دقیق نقشــه‌های کاربری/پوشش اراضی را فراهم می‌کند. در این روش، تصویر با الگوریتم Multiresolution Segmentation به واحدهای همگن سگمنت شده و سپس بــا انتخــاب دســتی نمونــه‌هــای آموزشــی، طبقــه‌بنــدی نهایی از طریق الگوریتم نزدیک‌ترین همســایه (Nearest Neighbourhood) انجام گرفت (Gbodjo et al., 2020).

۴-۲- کمی‌سازی نگهداشت و فرسایش خاک

در این مطالعه از نرم‌افزار InVEST 3.14.1 (Natural Capital Project, 2023) به دلیل دقت مکانی بالا، نیاز حداقلی به داده، مقیاس‌پذیری، متن‌باز بودن و کاربرد موفق در مطالعات جهانی، برای مدل‌ســازی خدمات اکوسیستم استفاده شد (Sharp et al., 2020). مدل کنترل رسوب این نرم‌افزار با عنوان Sediment Delivery Ratio میزان تلفات سالانه خاک را برای هر پیکسل، بر حسب تن در هکتار در سال، با استفاده از معادله جهانی فرسایش خاک محاسبه می‌کند.

رابطهٔ ۱ $USLE= R. K. LS. C. P$

که در این معادله، R عامل فرســایندگی باران، K فرســایش‌پذیری خاک، LS گرادیان طول شیب، C نوع پوشش و کاربری/پوشش اراضی، و P اقدامات مدیریتی است.

مدل رقومی ارتفاع (DEM): در این مطالعه از مدل رقومی ارتفاع با دقت ۳۰ متر مربوط به داده‌های SRTM 1 Arc-Second Global برای حوضــه مورد مطالعه اســتفاده شــد (USGS, 2014) و پارامتر LS نیز توســط مدل از این DEM استخراج گردید.

فاکتور R (فرســایندگی باران): این شــاخص یکی از عوامل کلیدی در ارزیابی فرســایش خاک اســت که انرژی جنبشی بارندگی را اندازه‌گیری می‌کند (Hermassi et al., 2017). این عامل نقش بارش و رواناب را در فرآیند فرسایش مشــخص می‌ســازد (Chatterjee et al., 2013). مقدار R تحت تأثیر عواملی مانند شــدت، توزیع مکانی و اندازه قطرات باران قرار دارد (Carollo et al., 2018). در این مطالعه، به دلیل نبود داده‌های شــدت بارش، از میانگین بارندگی سالانه ایســتگاه‌های شــمیران و آبعلی برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ استفاده شد (IRIMO, 2024). این ایستگاه‌ها به دلیل داده‌های کامل و مجاورت با حوضــه انتخاب شــدند. ایستگاه‌های دورتر مانند ژئوفیزیک و مهرآباد به‌دلیل فاصله بیشتر از تحلیل

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]
[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

حذف شـدند. برای برآورد بارندگی در سطح حوضه، از روش درون‌یابی فاصله معکوس (IDW[1]) در ArcMap 10.8.2 اسـتفاده شـد به‌طوری‌که ایسـتگاه‌های نزدیک‌تر به حوضه وزن بیشتری در برآوردها داشته و تأثیر ایستگاه‌های دورتر کاهش یافته اسـت. ابتدا شـاخص فرسایندگی باران با استفاده از رابطه (۲) و بر اساس مدل Roose (Roose, 1977) به صورت مگاژول در میلی‌متر بر هکتار بر ساعت محاسبه گردید، که در آن R_R ضریب فرسایندگی بارندگی سالیانه و P متوسـط بارندگی سـالانه هسـتند. سـپس شـاخص فرسایندگی باران سالیانه (R_{WS}) با استفاده از رابطه (۳) به دست آمد (Sadeghi & Tavangar, 2015).

$$R_R = [0.5 + 0.05P]$$ **رابطهٔ ۲**

$$R_{WS} = 6.5R_R + 1.52$$ **رابطهٔ ۳**

فاکتور K (فرسـایش‌پذیری خاک): میزان آمادگی ذرات خاک برای جدا شـدن و انتقال توسـط باران و رواناب را نشـان می‌دهد و به‌صورت لایه رستری برای هر سلول مدل محاسبه می‌شود. در این مطالعه، بافت خاک از پایگاه جهانی خاک (HWSD) نسـخه ۲,۰ تهیه و برای حوضـه لواسانات استخراج شد (FAO & IIASA, 2023). مقدار K با توجه به جدول ۲ (جدول راهنمای مدل InVEST SDR) و براسـاس نوع بافت خاک تعیین گردید. پایگاه HWSD با وضـوح مکانی حدود ۱ کیلومتر، اطلاعات فیزیکی، شیمیایی و مورفولوژیکی خاک را در هفت لایه عمقی ارائه می‌دهد که نسبت به نسـخه‌های قبلی ارتقاء یافته اسـت (FAO & IIASA, 2023 a). همچنین مطالعاتی مانند (Stoorvogel & Mulder, 2021) نشان داده‌اند که این پایگاه داده می‌تواند جایگزینی دقیق و قابل‌اعتماد برای داده‌های میدانی در مطالعات منطقه‌ای باشـد. بهره‌گیری از HWSD موجب کاهش هزینه و زمان، افزایش انسـجام داده‌ها، تسهیل مدل‌سازی هیدرولوژیکی و ارتقاء قابلیت بازتولید نتایج می‌شود (FAO & IIASA, 2023 a).

جدول ۲: برآورد فاکتور K (Sharp et al., 2020)

نوع بافت خاک	میزان فاکتور K براساس درصد ماده آلی		
	< ۰/۲	≥ ۰/۲	نبود اطلاعات
شنی	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲
شنی-لومی	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۴
رسی-لومی	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۳
سیلتی	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۳۸
سیلتی-لومی	۰/۳۷	۰/۴۱	۰/۳۸
رسی	۰/۲۱	۰/۲۴	۰/۲۲
شنی-رسی	۰/۲	۰/۲	۰/۲
سیلتی-رسی	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۲۶
لومی	۰/۲۶	۰/۳۴	۰/۳
لومی-شنی	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴
شنی-رسی-لومی	۰/۲	۰/۲	۰/۲
سیلتی-رسی-لومی	۰/۳	۰/۳۵	۰/۳۲

[1]. Inverse Distance Weighting

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

فاکتور C (نوع کاربری/پوشش اراضی): این فاکتور نقش پوشش گیاهی و فعالیت‌های کشاورزی را در کاهش فرسایش خاک مشخص می‌کند (Wischmeier & Smith, 1978). هر نوع کاربری مانند جنگل، مرتع یا زمین‌های کشاورزی، مقدار متفاوتی از فاکتور C دارد. در این پژوهش، مقادیر C از جدول بیوفیزیکی نرم‌افزار InVEST نسخه ۳,۹,۰ استخراج شد. این جدول توسط پروژه سرمایه طبیعی ارائه شده است (Natural Capital Project, 2020).

فاکتور P (اقدامات حفاظتی): این فاکتور نسبت فرسایش خاک در حضور اقدامات حفاظتی را نسبت به شرایط بدون حفاظت (شخم در جهت شیب) اندازه‌گیری می‌کند (Renard et al., 1997). مقدار آن بر اساس نوع کاربری زمین تعیین می‌شود. در این پژوهش، مقادیر فاکتور P از جدول بیوفیزیکی نرم‌افزار InVEST نسخه ۳,۹,۰ استخراج شده‌اند (Natural Capital Project, 2020) (جدول ۳).

جدول بیوفیزیکی: این جدول شامل مقادیر ضرایب مدیریتی مانند C و P و کدهای کاربری زمین برای هر کلاس پوشش اراضی است. برای هر کلاس، مقادیر مشخص و منحصربه‌فردی تعریف شده که به‌صورت فایل CSV و مستقل از سایر داده‌ها ارائه می‌شود. این جدول برای استفاده مستقیم در نرم‌افزار InVEST آماده شده است (Natural Capital Project, 2020) (جدول ۳).

جدول ۳: جدول بیوفیزیکی نرخ تحویل رسوب بخش لواسانات (Natural Capital Project, 2020)

کاربری‌ها	کد	usle_c	usle_p
منابع آب	۱	۰	۱
باغات و کشاورزی	۲	۰/۴۱۲	۱
مرتع	۳	۰/۰۳۴	۱
مناطق انسان ساخت	۴	۰/۹۹	۱
درختان سوزنی‌برگ	۵	۰/۱۲۱	۱
سایر (پوشش ابر)	۶	۰/۳۱	۱

۵-۲- تحلیل فضایی تأثیر تغییر کاربری/پوشش اراضی بر خدمت اکوسیستمی نگهداشت خاک بر اساس مدل GWR

بررسی تأثیر کاربری اراضی بر نگهداشت خاک و مهار رسوب از موضوعات مهم زیست‌محیطی است، زیرا تغییرات کاربری به طور مستقیم بر فرسایش، حمل رسوب و پایداری خاک اثر می‌گذارد. تحلیل این روابط اغلب با روش‌های آماری انجام می‌شود تا الگوهای مؤثر شناسایی و مدیریت بهینه منابع خاک فراهم گردد. روش‌های کلاسیک مانند همبستگی و رگرسیون رایج‌اند، اما به دلیل بی‌توجهی به بعد مکانی، دقت محدودی دارند. رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) با لحاظ ناهمگنی مکانی، امکان برآورد ضرایب مدل در هر موقعیت جغرافیایی را فراهم می‌سازد (Erfanian et al., 2013). مدل‌سازی GWR با استفاده از نرم‌افزار ArcMap 10.8.2 (ESRI, 2021) انجام گرفت.

۱-۵-۲- رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS)

این روش یکی از متداول‌ترین ابزارهای تحلیل رگرسیون است که فرض می‌کند رابطه‌ای خطی بین متغیر وابسته و مستقل وجود دارد. هدف این روش، یافتن خطی است که مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها را حداقل کند. مدل به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \ldots + \beta_n X_n + \varepsilon$$ **رابطهٔ ۴**

در مدل رگرسیون خطی ساده، y متغیر وابسته، X متغیرهای مستقل، ε خطا یا انحراف مدل، β_0 ضریب متغیر وابسته

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

و β_1 ضریب متغیر مستقل است که برای تمام منطقه مورد مطالعه ثابت فرض می‌شود (Chang et al., 2024).

تخمین پارامترها به صورت ماتریسی چنین است:

$$\beta= (X^TX)^{-1}X^TY$$ **رابطهٔ ۵**

β بردارهای تخمین پارامتر است، X ماتریس طراحی است که تمام متغیرهای مستقل را شامل می‌شود و Y بردار مشاهدات متغیر وابسته می‌باشد (Chang et al., 2024). این روش برای تحلیل کلی رابطه بین تغییرات کاربری اراضی (متغیر مستقل) و خدمات نگهداشت خاک و حفظ رسوب (متغیر وابسته) به‌کار گرفته شد. تا در صورت معنی‌دار بودن این رابطه، داده‌ها به مرحله بعدی یعنی مدل رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR) وارد شوند.

در این مطالعه، به‌جای استفاده از مساحت مطلق هر طبقه کاربری اراضی، از درصد مساحت آن کلاس نسبت به سطح حوضه استفاده گردید. این کار به‌منظور نرمال‌سازی داده‌ها و مقایسه‌پذیری بین واحدهای فضایی با اندازه‌های متفاوت صورت گرفت تا از بروز سوگیری ناشی از تفاوت در وسعت نواحی جلوگیری شود.

۲-۵-۲- رگرسیون وزنی جغرافیایی (GWR)

این مدل به‌منظور بررسی ناهمگنی فضایی روابط بین متغیرها استفاده می‌شود و با بهره‌گیری از مفهوم هموارسازی محلی، به ما امکان می‌دهد تا تغییرات مکانی ضرایب مدل را به‌صورت موضعی مشاهده کنیم. معادله مدل به شکل زیر است:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^{p} \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i$$ **رابطهٔ ۶**

که در آن y_i متغیر وابسته، x_{ik} متغیر مستقل، $\beta_0(u_i, v_i)$ عرض از مبدأ نقطه نمونه‌برداری i، k تعداد کل سلول‌های شبکه، (u_i, v_i) مختصات جغرافیایی نقطه نمونه‌برداری i، ε_i مقدار خطای تصادفی و $\beta_k(u_i, v_i)$ مقدار ضریب رگرسیون برای k امین متغیر مستقل در نقطه نمونه‌برداری i است (Chang et al., 2024). در این مطالعه هیچ وزن‌دهی به طبقات کاربری اراضی یا نقاط خاص انجام نشد و تمرکز صرفاً بر تحلیل الگوی مکانی رابطه میان تغییرات کاربری اراضی و خدمات اکوسیستمی نگهداشت خاک و حفظ رسوب بود.

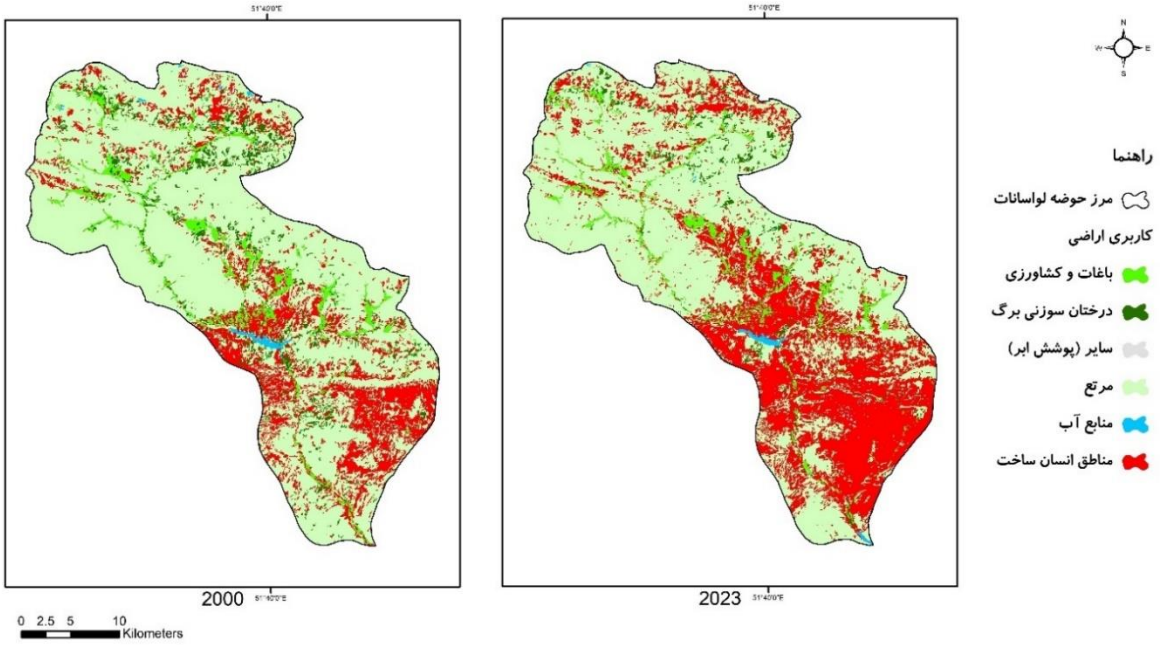
۳-یافته‌ها

۱-۳- تغییرات کاربری/پوشش اراضی

بررسی تغییرات کاربری اراضی طی بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که جنگل‌های سوزنی‌برگ با ۶۳ درصد و مراتع با حدود ۱۶ درصد کاهش، بیشترین افت را تجربه کرده‌اند. پس از آن، باغات و کشاورزی حدود ۱۳ درصد و منابع آب نزدیک به ۸ درصد کاهش داشته‌اند. در مقابل، مناطق انسان‌ساخت با رشدی چشمگیر حدود ۸۹ درصد افزایش یافته است. این تغییرات به‌خوبی روند کاهش کاربری‌های طبیعی و گسترش سریع مناطق شهری و ساخته‌شده را نمایان می‌سازد (شکل ۳ و جدول ۴).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]



شکل ۳: نقشه‌های کاربری/پوشش اراضی

جدول ۴: مساحت و درصد کلاس‌های مختلف کاربری/پوشش اراضی حوضه لواسانات

کاربری‌ها	سال ۲۰۰۰		سال ۲۰۲۳		تغییرات طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳		
	Km^2	درصد	Km^2	درصد	Km^2	درصد نسبی	درصد نسبت به کل حوضه
منابع آب	۳/۷۵	۰/۳۸	۳/۴۴	۰/۳۴	-۰/۳۱	-۸/۲۶	-۰/۰۳۱
باغات و کشاورزی	۴۹/۶۷	۵/۰۳	۴۳/۰۲۶	۴/۳۶	-۶/۶۴	-۱۳/۳۷	-۰/۶۷
مرتع	۷۰۹/۴۱	۷۱/۹۵	۵۹۵/۹۵	۶۰/۴۴	-۱۱۳/۴۶	-۱۵/۹۹	-۱۱/۵۰
مناطق انسان‌ساخت	۱۷۱/۴۵	۱۷/۳۸	۳۲۳/۷۱	۳۲/۸۴	۱۵۲/۲۶	۸۸/۸۰	۱۵/۴۴
درختان سوزنی‌برگ	۵۰/۷۵	۵/۱۴	۱۸/۹۰	۱/۹۱	-۳۱/۸۵	-۶۲/۷۵	-۳/۲۳
سایر (پوشش ابر)	۰/۹۲	۰/۰۹	۰/۹۲	۰/۰۹	۰	۰	۰

۲-۳- نتایج مدل InVEST SDR

بررسی شاخص‌های رسوب و فرسایش طی بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که حمل رسوب ۷۲، رسوب باقی‌مانده ۵۲ و کل پتانسیل اتلاف خاک حدود ۵۶ درصد افزایش یافته‌اند. همچنین، اجتناب از حمل رسوب ۲۳ درصد رشد داشته است. در مقابل، اجتناب از فرسایش حدود ۱۰ درصد کاهش یافته (یعنی فرسایش ۱۰ درصد افزایش داشته). این تغییرات بیانگر افزایش اتلاف خاک، انباشت رسوب و فرسایش طی این دوره است (جدول ۵).

افزایش مقدار اجتناب از حمل رسوب (از ۹۴۱۸ به ۱۰۵۵۳ تن در هر پیکسل، با ابعاد ۲۷/۹۸×۲۷/۹۸ متر) ناشی از افزایش تولید رسوب در اثر کاهش پوشش گیاهی است، که باعث ورود رسوب بیشتر به آبراهه‌ها و انباشت آن در این مناطق شده است (شکل ۴).

مقدار حداکثری اجتناب از فرسایش در هر دو سال برابر با ۱۱۱ تن در هر پیکسل بوده، اما کاهش تعداد پیکسل‌های دارای این مقدار در سال ۲۰۲۳، بیانگر افت توان حوضه در مقابله با فرسایش و شدت گرفتن روند آن است (شکل ۵).

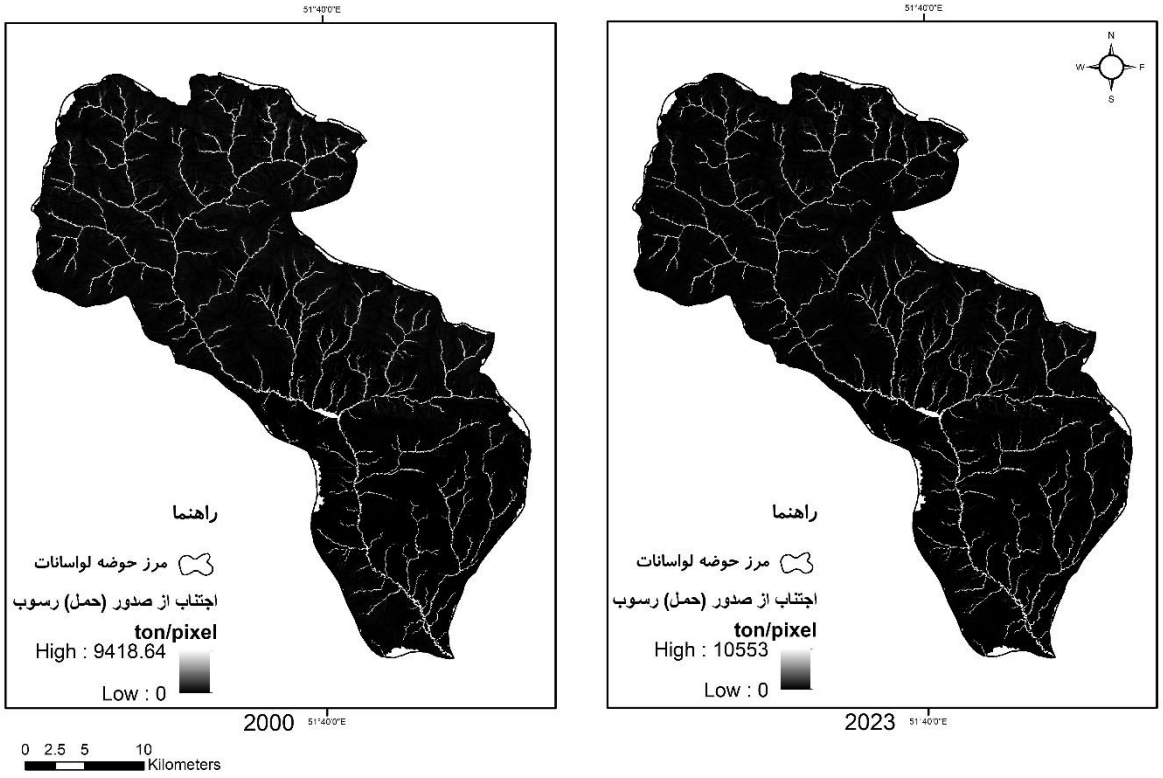
همچنین، به منظور درک بهتر از الگوهای مکانی فرسایش و رسوب در حوضه، نقشه‌های مربوط به کل پتانسیل

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]
[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

اتلاف خاک، رسوب باقی‌مانده و مقدار کل رسوب حمل شده در پیوست مقاله ارائه شده‌اند، زیرا درج آن‌ها در متن اصلی به دلیل محدودیت صفحات ممکن نبود.

جدول ۵: نتایج مدل InVEST SDR

سال میلادی	رسوب باقی‌مانده[1] (تن)	حمل رسوب[2] (تن)	کل پتانسیل اتلاف خاک[3] (تن)	اجتناب از حمل رسوب[4] (تن)	اجتناب از فرسایش[5] (تن)
۲۰۰۰	۳۷۰۹۱۸۳/۷۳	۹۰۱۶۹۱/۵۸	۴۶۶۰۴۷۱/۶۳	۶۳۲۴۹۲۰/۱۱	۲۵۳۳۴۱۸۵/۷۱
۲۰۲۳	۵۶۲۰۷۹۵/۰۱	۱۵۴۷۵۹۸/۶۰	۷۲۷۷۱۷۲/۷۵	۷۷۹۹۲۶۳/۳۲	۲۲۷۱۷۴۸۵/۰۱
تغییرات (تن)	۱۹۱۱۶۱۱/۲۸	۶۴۵۰۹۷/۰۲	۲۶۱۶۷۰۱/۱۲	۱۴۷۴۳۴۳/۲۱	-۲۶۱۶۷۰۰/۷
درصد تغییرات نسبی	۵۱/۵۳	۷۱/۶۳	۵۶/۱۴	۲۳/۳۱	-۱۰/۳۲



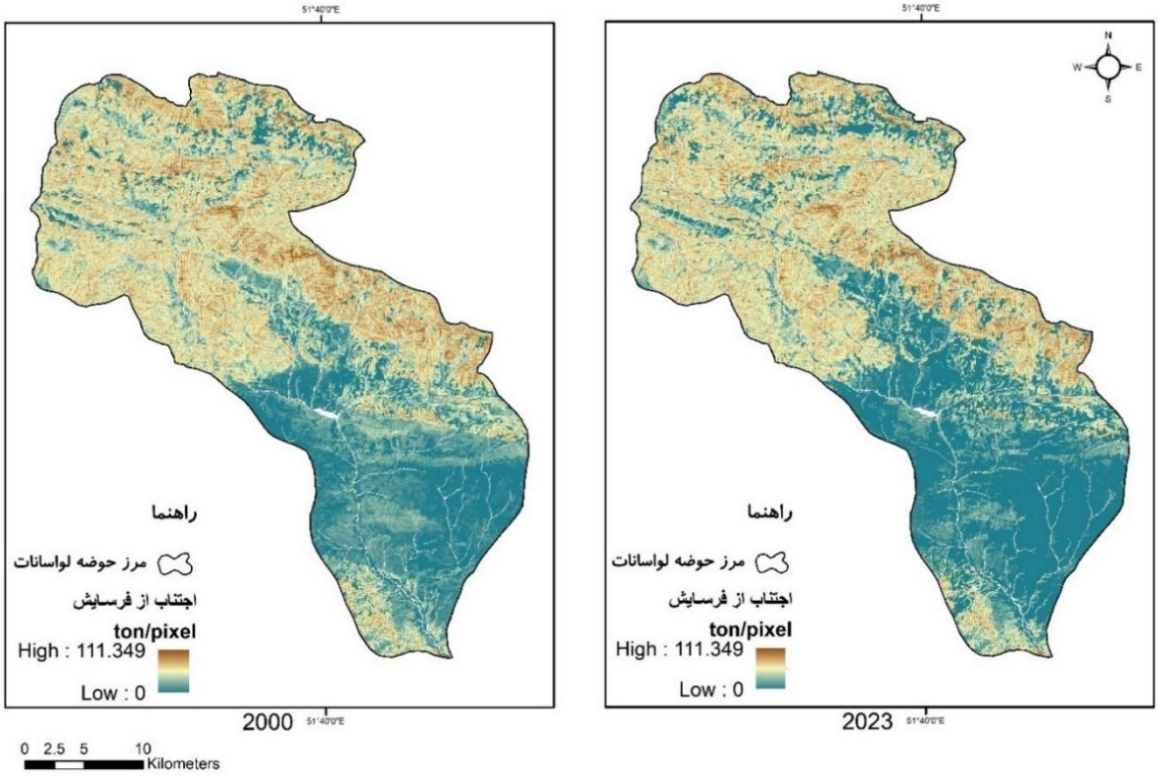
شکل ۴: نقشه‌های اجتناب از صدور (حمل) رسوب

مدل InVEST شاخص اجتناب از حمل رسوب را به صورت رسوبی تعریف می‌کند که یا به واسطه پوشش گیاهی در همان پیکسل حفظ می‌شود یا از بالادست آمده و در آن پیکسل متوقف شده است. این شاخص تنها رسوب‌هایی را در نظر می‌گیرد که پیش از رسیدن به آبراهه‌ها مهار شده‌اند؛ بنابراین در اغلب نقاط حوضه مقدار آن صفر و تنها در مسیر آبراهه‌ها مقدار بالایی دارد. با کاهش پوشش گیاهی، تولید و حمل رسوب افزایش می‌یابد و رسوبات بیشتری در مسیرهای زهکشی ثبت می‌شود که الزاماً نشانه عملکرد مثبت پوشش گیاهی نیست. در واقع، افزایش شاخص اجتناب از حمل

1. Sed_dep
2. Sed_export
3. Usle_tot
4. Avoid_export
5. Avoid_erosion

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]
[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

رسوب می‌تواند ناشی از تشدید تولید و تمرکز رسوب باشد، نه بهبود وضعیت اکوسیستم. بنابراین، هم‌زمانی افزایش فرسایش، حمل و اجتناب از حمل رسوب، بازتابی از فشار مضاعف وارد بر سیستم و کاهش نقش حفاظتی پوشش گیاهی است.

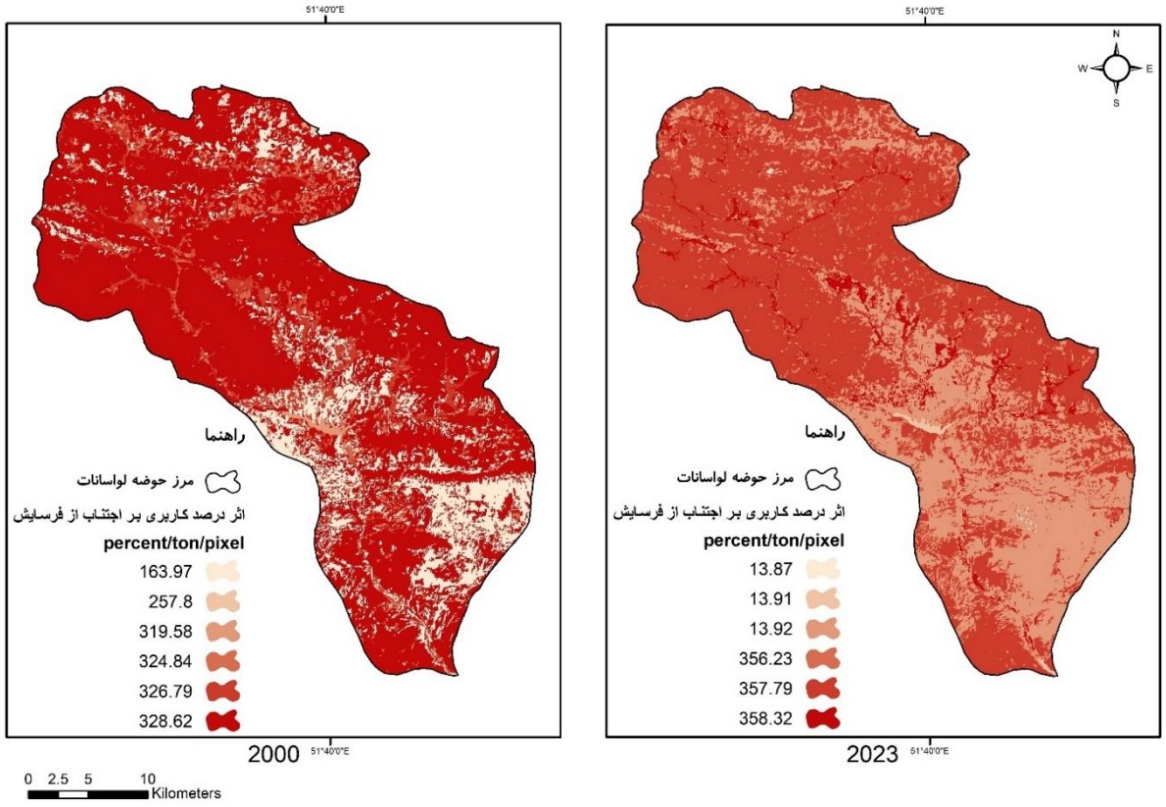


شکل ۵: نقشه‌های اجتناب از فرسایش

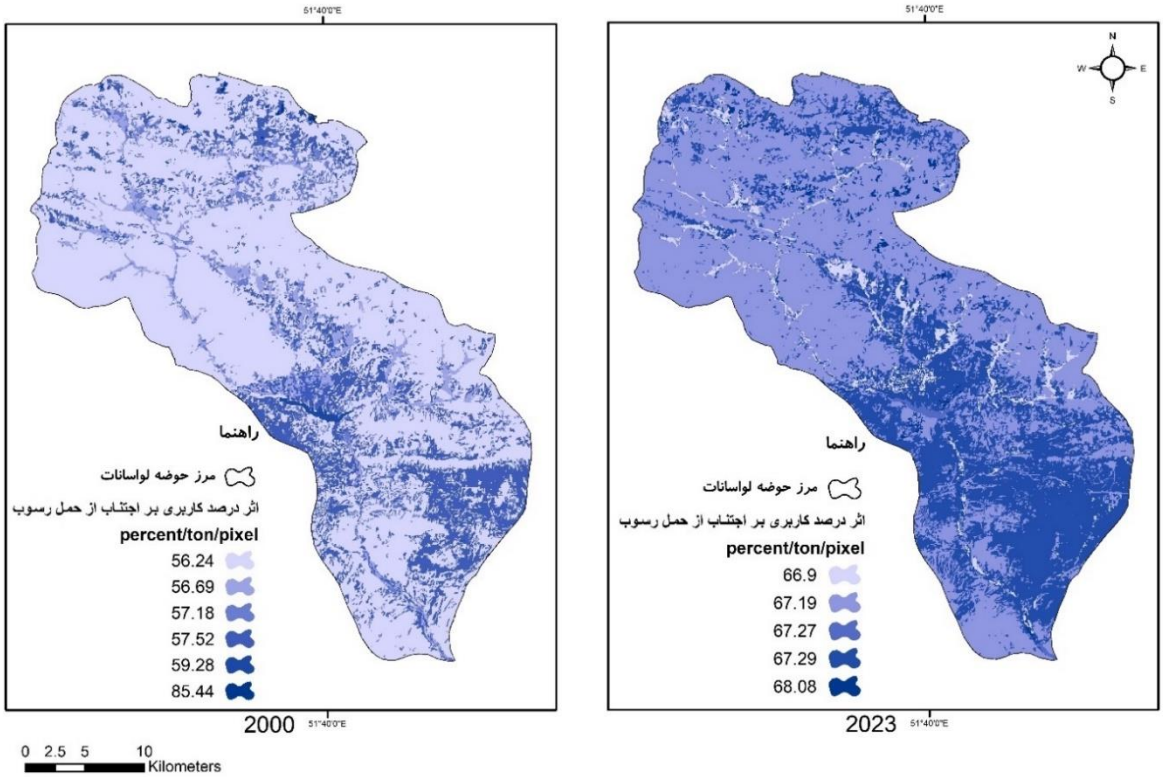
۳-۳- نتایج تحلیل فضایی اثرات تغییر کاربری/پوشش اراضی بر خدمت اکوسیستمی نگهداشت خاک بر اساس مدل GWR

در سال ۲۰۰۰، مراتع به دلیل پوشش گیاهی طبیعی، بیشترین خدمت اجتناب از فرسایش را داشتند، درحالی‌که کمترین مقدار در مناطق انسان‌ساخت مشاهده شد. در سال ۲۰۲۳، با گسترش مناطق انسان‌ساخت و کاهش پوشش‌های طبیعی، توان اکوسیستم برای مهار فرسایش کاهش یافت. در مقابل، برخی کاربری‌ها مانند باغات و اراضی کشاورزی با پوشش گیاهی متراکم یا مدیریت مناسب، عملکرد بهتری نشان دادند. همچنین، در این سال کمترین مقادیر ابتدا در نواحی دارای پوشش ابر و منابع آبی و سپس در مناطق انسان‌ساخت ثبت شد. مقایسه دو دوره، افزایش ناهمگنی و ناپایداری فضایی خدمت نگهداشت خاک را در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد (شکل ۶). در خصوص خدمت اجتناب از حمل رسوب نیز، در سال ۲۰۰۰ کمترین مقدار در مراتع و بیشترین مقدار در نواحی دارای پوشش ابر و منابع آبی مشاهده شد که احتمال بروز مقادیر غیرواقعی در آن‌ها وجود دارد. در سال ۲۰۲۳، باغات کمترین و نواحی سوزنی‌برگ در شیب زیاد بیشترین مقدار را داشتند. الگوی فضایی در این سال نسبت به ۲۰۰۰ یکنواخت‌تر شده که نشان‌دهنده تأثیر کاهش پوشش‌های گیاهی است (شکل ۷) (در شکل‌های ۶ و ۷، به‌منظور تسهیل درک مقادیر، تمامی اعداد بر ۱۰۰۰ تقسیم شده‌اند).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]
[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]



شکل ۶: رابطه فضایی کاربری اراضی با خدمت اکوسیستمی اجتناب از فرسایش



شکل ۷: رابطه فضایی کاربری اراضی با خدمت اکوسیستمی اجتناب از حمل رسوب

نتایج مدل GWR نشـان می‌دهد که رابطه فضـایی بین درصـد کاربری اراضـی و خدمت اکوسـیسـتمی اجتناب از فرسـایش در هر دو سـال با دقت بالایی تبیین شده است؛ به‌گونه‌ای که مقادیر بالای ضریب تعیین (R^2) و کاهش معیار

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

اطلاعات آکائیک اصلاح‌شده (AICc) در سال ۲۰۲۳ نسبت به ۲۰۰۰، بیانگر بهبود برازش مدل در شرایط همگن‌تر است، اما این بهبود آماری به معنای بهبود شرایط اکولوژیکی نیست، زیرا کاهش پوشش‌های طبیعی و گسترش مناطق انسان‌ساخت منجر به افت عملکرد اکوسیستم در جلوگیری از فرسایش خاک شده است. همچنین، نتایج مدل GWR برای خدمت اکوسیستمی اجتناب از حمل رسوب در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۳ رابطه‌ای قوی بین درصد کاربری اراضی و این خدمت نشان می‌دهد؛ ضریب تعیین (R^2) در هر دو سال بالا بود، اما کاهش ضریب تعیین تنظیم‌شده همراه با افزایش مجموع مربعات باقی‌مانده و انحراف معیار مدل در سال ۲۰۲۳ نشان‌دهنده کاهش دقت پیش‌بینی و افزایش خطاهاست که ناشی از تغییرات کاربری اراضی و کاهش پوشش‌های طبیعی، به‌ویژه گسترش مناطق شهری است. تعداد همسایه‌ها در این تحلیل برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۳ متفاوت بود که به دلیل استفاده از مدل پهنه تطبیقی[1] است که تعداد همسایه‌ها را بر اساس ساختار فضایی و تراکم داده‌ها به طور خودکار تعیین می‌کند؛ به طور کلی، نتایج مؤید نقش مؤثر نوع کاربری اراضی در تبیین الگوهای فضایی خدمات نگهداشت خاک است (جدول ۶).

جدول ۶: نتایج رابطه فضایی کاربری اراضی با خدمات اکوسیستمی اجتناب از فرسایش و حمل رسوب

نام متغیر[2]	اجتناب از فرسایش ۲۰۰۰	اجتناب از فرسایش ۲۰۲۳	اجتناب از حمل ۲۰۰۰	اجتناب از حمل ۲۰۲۳
تعداد همسایه‌ها[3]	۴	۵	۴	۵
مجموع مربعات باقی‌مانده[4]	۷۶۰۵۰۰۲۳۴۴۰۲	۴۱۶۴۶۵۶۸۱۰۱۵	۹۶۸۰۲۱۳۴۸۰/۱۱۰۰۰۱	۱۴۴۲۶۹۲۹۰۸۳۵
تعداد مؤثر داده[5]	۵/۲۷۸۳۴۵	۴/۶۰۹۷۴۳	۵/۲۷۸۳۴۵	۴/۶۰۹۷۴۳
انحراف معیار مدل[6]	۱۰۲۶۵۶۱/۲۴۷۳۵	۵۴۷۳۲۰/۸۶۸۰۳۴	۱۱۵۸۱۸/۴۲۵۶۱۲	۳۲۲۱۳۶/۰۶۲۵۶۳
معیار اطلاعات آکائیک اصلاح شده[7]	۹۱/۴۶۱۶۳۵	-۱۰۵/۱۴۰۳۶۳	۶۵/۲۷۸۲۸۱	-۱۱۱/۵۰۱۰۹۷
ضریب تعیین مدل[8]	۰/۹۹۸۱۷۲	۰/۹۹۸۸۴۳	۰/۹۹۹۲۷۷	۰/۹۹۰۴۰۹
ضریب تعیین تنظیم شده[9]	۰/۹۸۷۳۳۵	۰/۹۹۵۸۳۸	۰/۹۹۴۹۹۲	۰/۹۶۵۵۰۷
متغیر وابسته[10]	اجتناب از فرسایش و حمل رسوب			
متغیر توضیحی[11]	درصد کاربری اراضی			

۴ـ بحث و نتیجه‌گیری

در سطح جهانی، تغییرات کاربری/پوشش اراضی یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر خدمات اکوسیستمی، به‌ویژه در زمینه نگهداشت خاک و کنترل رسوب، محسوب می‌شود. مطالعه تغییرات کاربری اراضی و تأثیر آن بر خدمات اکوسیستمی حوضه لواسانات (۲۰۲۳-۲۰۰۰) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، مدل InVEST-SDR و رگرسیون وزنی جغرافیایی انجام شد. نتایج نشان داد سطح اراضی سبز شامل مراتع، درختان سوزنی‌برگ، باغات و اراضی کشاورزی حدود ۱۵۲ کیلومتر مربع (۱۵/۴ درصد) کاهش یافته و به مناطق انسان‌ساخت تبدیل شده است. این تغییرات باعث افزایش ۵۶/۱۴ درصدی پتانسیل اتلاف خاک، کاهش ۱۰/۳۲ درصدی شاخص اجتناب از فرسایش و افزایش ۲۳/۳۱

[1]. Adaptive bandwith
[2]. Varname
[3]. Neighbors
[4]. Residual Squres
[5]. Effective Number
[6]. Sigma
[7]. AICc
[8]. R^2
[9]. Adjusted R^2
[10]. Dependent Field
[11]. Explanatory Field

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]
[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

درصـدی شاخص اجتناب از حمل رسوب شد. تحلیل مدل GWR نشان داد که در سال ۲۰۰۰ مراتع بیشترین مقاومت در برابر فرسـایش و کمترین اجتناب از حمل رسوب را داشتند، اما در ۲۰۲۳ این الگوها تضعیف و یکنواخت‌تر شد. باغات و اراضی کشاورزی بهبود مقاومت نشان دادند، در حالی که منابع آبی و مناطق انسان‌ساخت کمترین مقاومت را داشتند. افزایش ضـــریب تعیین و کاهش AICc در ۲۰۲۳ بهبود برازش مدل را نشـــان داد، اما افزایش خطاها کاهش پایداری اکوسیستم را تایید می‌کند. نتایج نقش مهم کاربری اراضی در نگهداشت خاک را برجسته می‌کند.

به‌عنوان مثال، Sun و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای شـبیه‌سـازی شـهری و روابط اکوسیستم‌ها را بررسی کردند و نشـان دادند تغییرات پوشـش اراضـی خدمات اکوسـیستم را کاهش و فرسایش خاک را افزایش می‌دهد. Filchev & Kolev (۲۰۲۳) نیزکاهش مقاومت خاک در برابر فرسایش را ناشی از تغییرات کاربری اراضی گزارش کردند. Yang و همکاران (۲۰۲۳) تغییرات پوشـش اراضی و تأثیر آن بر خدمات اکوسیستم در جنوب‌غربی چین را بررسی کردند و افزایش فرسـایش خاک را مرتبط دانسـتند. Mwanga و همکاران (۲۰۲۴) در غنا از افزایش قابل‌توجه از دسـت رفتن خاک در زمین‌های کشـاورزی حوضـه آبخیز بونتانگا خبر دادند که ۵۶/۱۶ درصـد رسوب منطقه را صادر می‌کند. این یافته‌ها نشان‌دهنده افزایش فرسایش و انباشت رسوب ناشی از تغییرات کاربری اراضی در مناطق مختلف است.

مدل InVEST فقط فرسـایش ناشـی از بارندگی سطحی را بررسی می‌کند و انواع دیگر فرسایش مثل رانش زمین و فرسـایش کناره رودخانه‌ای را در نظر نمی‌گیرد؛ همچنین در مناطق خشـک فرسایش را صفر فرض می‌کند. (Natural Capital Project, 2023). نتایج نشان داد تغییرات گسترده کاربری/پوشش اراضی حوضه لواسانات طی بیش از دو دهه اخیر با کاهش پوشش گیاهی و افزایش مناطق انسان‌ساخت، موجب کاهش کارایی خدمات نگهداشت خاک و افزایش فرسـایش شـده اسـت. تحلیل فضـایی مدل GWR، ارتباط قوی و مکانی بین نوع کاربری اراضـی و عملکرد خدمات اکوسـیستم را تأیید کرد و بر اهمیت حفظ پوشش گیاهی و مدیریت پایدار اراضی برای کنترل فرسایش تأکید نمود. با توجه به ارزش اکولوژیکی و حسـاسـیت منطقه، حفاظت از پوشـش گیاهی و تدوین سیاست‌های توسعه پایدار باید در اولویت قرار گیرد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به عنوان راهنمایی ارزشـمند برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران محیط زیسـتی جهت بهبود اسـتراتژی‌های مدیریت خاک و توسـعه پایدار مورد اسـتفاده قرار گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده به بررسی تأثیر روش‌های مدیریتی، مدل‌سازی ترکیبی InVEST با مدل‌های هیدرولوژیکی، تغییرات اقلیمی و تحلیل‌های اجتماعی-اقتصـادی بپردازد تا درک جامع‌تری از روندهای فرسـایش و خدمات اکوسـیستم حاصل شود.

سپاسگزاری

این مقاله با کمک سـازمان هواشـناسـی کشور انجام گرفته است و نویسندگان بر خود لازم دانستند که از این سازمان تشکر و قدردانی نمایند.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

منابع

1. Adelisardou, F., Mederly, P., & Minikina, T. (2023). Assessment of soil- and water-related ecosystem services with coupling the factors of climate and land-use change (Example of the Nitra region, Slovakia). *Environmental Geochemistry and Health*, *45*(8), 6605–6620. https://doi.org/10.1007/s10653-023-01656-y.
2. Anikwe, M. A. N., & Ife, K. (2023). The role of soil ecosystem services in the circular bioeconomy. *Frontiers in Soil Science*, *3*. https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1209100.
3. Cadel, M., Cousin, I., & Therond, O. (2023). Relationships between soil ecosystem services in temperate annual field crops: A systematic review. *Science of The Total Environment*, *902*, 165930. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165930.
4. Carollo, F. G., Ferro, V., & Serio, M. A. (2018). Predicting rainfall erosivity by momentum and kinetic energy in Mediterranean environment. *Journal of Hydrology*, *560*, 173–183. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.026.
5. Chamani, R., Mostafaee Yonjali, S., & Sadeghi, S. H. R. (2023). Role of Biological Measures in Soil Erosion Processes using InVEST Model in the Sharghong Watershed, South Khorasan, Iran. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, *13*(2), 95–108. https://civilica.com/doc/1830825 (In Persian).
6. Chang, X., Chen, H., Li, J., Fei, X., Xu, H., & Xiao, R. (2024). Travel characteristics of urban residents based on taxi trajectories in China: Beijing, Shanghai, Shenzhen, and Wuhan. *Sustainability*, *16*(7), 2694. https://doi.org/10.3390/su16072694.
7. Chatterjee, S., Krishna, A.P., Sharma, A.P. (2013). Geospatial assessment of soil erosion vulnerability at watershed level in some sections of the Upper Subarnarekha river basin, Jharkhand, India. *Environmental Earth Sciences*, *71*(1), 357–374. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2439-3.
8. da Gama, J. (2023). The role of soils in sustainability, climate change, and ecosystem services: challenges and opportunities. *Ecologies*, *4*(3), 552–567. https://doi.org/10.3390/ecologies4030036.
9. Deeb, M., Groffman, P. M., Blouin, M., Egendorf, S. P., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D. L., Walsh, D., Morin, T., & Séré, G. (2020). Using constructed soils for green infrastructure – challenges and limitations. *SOIL*, *6*(2), 413–434. https://doi.org/10.5194/soil-6-413-2020.
10. Definiens. (2015). *eCognition Developer* 9.01 [Computer software]. Trimble. https://www.trimble.com.
11. Erfanian, M., Hosseinkhah, M., & Alijanpour, A. (2013). Introduction to Ordinary Least Squares (OLS) and Geographically Weighted Regression (GWR) Methods in Spatial Modeling of Land Use Effects on Water Quality. *Extension and Development of Watershed Management*, *1*(1). (In Persian).
12. ESRI. (2021). *ArcMap* (Version 10.8.2) [Computer software]. Environmental Systems Research Institute. https://www.esri.com.
13. FAO & IIASA. (2023). *Harmonized World Soil Database version 2.0*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en.
14. FAO & IIASA. (2023 a). *Harmonized World Soil Database version 2.0*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Institute for Applied Systems Analysis. https://doi.org/10.4060/cc3823en.
15. Filchev, L., & Kolev, V. (2023). Assessing of soil erosion risk through geoinformation sciences and remote sensing – a review. *arXiv preprint arXiv*. https://arxiv.org/abs/2310.08430.
16. Gbodjo, Y. J. E., Ienco, D., Leroux, L., Interdonato, R., Gaetano, R., & Ndao, B. (2020). Object-based multi-temporal and multi-source land cover mapping leveraging hierarchical class relationships. *Remote Sensing*, *12*(17), 2814. https://doi.org/10.3390/rs12172814.
17. Hermassi, T., El Ammami, H., & Ben, K. W. (2017). Impact of anthropogenic activities on erosive behavior of Nebhana Watershed, Tunisia. In M. Ouessar, Gabriels, D., Tsunekawa, A., Evett (Eds.), *Water and land security in drylands* (pp. 15–26). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54021-4_17.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

18. Hou, D. (2023). Soil health and ecosystem services. *Soil Use and Management.* https://doi.org/10.1111/sum.12945.
19. IRIMO. (2024). Annual precipitation data (1990–2023). Iran Meteorological Organization. https://www.irimo.ir.
20. Jahandari, J., Hejazi, R., Jozi, S. A., & Moradi, A. (2022). Application of InVEST water supply ecosystem service model to predict water erosion in Bandar Abbas Basin. *Quarterly Journal of Environmental Erosion Research 12*(4), 101–123. http://dorl.net/dor/20.1001.1.22517812.1401.12.4.5.6 (In Persian).
21. Li, N., Zhang, Y., Wang, T., Li, J., Yang, J. & Luo, M. (2022). Have anthropogenic factors mitigated or intensified soil erosion over the past three decades in South China? *Journal of Environmental Management*, *302*, 114093. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114093.
22. Marques, S. M., Campos, F.S., David, J., & Cabral, P. (2021). Modelling sediment retention services and soil erosion changes in Portugal: A spatio-temporal approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *10*(4), 262. https://doi.org/10.3390/ijgi10040262.
23. MEA. (2005). *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis*. Millennium Ecosystem Assessment.
24. Mwanga, E. W., Shaibu, A.-G., & Issaka, Z. (2024). Influence of long-term land use and land cover (LULC) changes on soil loss, sediment export, and deposition in the ungauged Bontanga watershed. *H2Open Journal*, *7*(1), 93–113. https://doi.org/10.2166/h2oj.2024.088.
25. Natural Capital Project. (2020). InVEST Data (Version 3.9) [Data set]. http://releases.naturalcapitalproject.org/?prefix=invest/3.9.0/data.
26. Natural Capital Project. (2023). *InVEST* (Version 3.14.1) [Computer software]. Natural Capital Project. https://naturalcapitalproject.stanford.edu/invest.
27. Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Department of Agriculture.
28. Roose, E. (1977). *Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest, vingt années de mesures en parcelles expérimentales*. ORSTOM.
29. Sadeghi, S. H., & Tavangar, S. (2015). Development of stational models for estimation of rainfall erosivity factor in different timescales. *Natural Hazards*, *77*(1), 429–443. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1608-y.
30. Sharma, S., Kumar, A., & Pandey, A. (2023). Soil erosion in relation to land use/land cover change in the Dehar watershed, Himachal Himalaya, North India. *Frontiers in Forests and Global Change*, *6*. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1124677.
31. Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., Chaumont, N., Denu, D., Fisher, D., Glowinski, K., & Griffin, R. (2020). *InVEST 3.8.7 User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
32. Stoorvogel, J. J., & Mulder, V. L. (2021). A comparison, validation, and evaluation of the S-world global soil property database. *Land*, *10*(5), 544. https://doi.org/10.3390/land10050544.
33. Sun, Y., Liu, D., & Wang, P. (2022). Urban simulation incorporating coordination relationships of multiple ecosystem services. *Sustainable Cities and Society*, *76*(2), 103432. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103432.
34. Tamire, C., Elias, E., & Argaw, M. (2022). Spatiotemporal dynamics of soil loss and sediment export in Upper Bilate River Catchment (UBRC), Central Rift Valley of Ethiopia. *Heliyon*, *8*(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11220.
35. USGS. (2014). *Shuttle radar topography mission (SRTM) 1 arc-second global digital elevation model (DEM)*. United States Geological Survey. https://earthexplorer.usgs.gov.
36. USGS. (2022). Landsat Collection-2 Level-2 science products. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products.
37. Wischmeier, W. H., & Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* (Agricultural Handbook No. 537). United States Department of Agriculture.
38. WRM. (2023). *Watersheds of Iran* [Shapefile]. Water Resources Management of Iran. https://data.wrm.ir.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

39. Yang, J., Zhai, D. L., Fang, Z., Alatalo, J. M., Yao, Z., Yang, W., Su, Y., Bai, Y., Zhao, G., & Xu, J. (2023). Changes in and driving forces of ecosystem services in tropical southwestern China. *Ecological Indicators*, *149*, 110180. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110180.
40. Zabihi, M., Moradi, H. R., Khaledi Darvishan, A., & Gholamalifard, M. (2021). Application of InVEST ecosystem services model to prioritize sub-watersheds of Talar in terms of soil erosion, sediment retention and yield. *Environmental Science and Water Engineering*, *7*(2), 293–303. https://doi.org/10.22034/jewe.2020.257980.1470 (In Persian).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

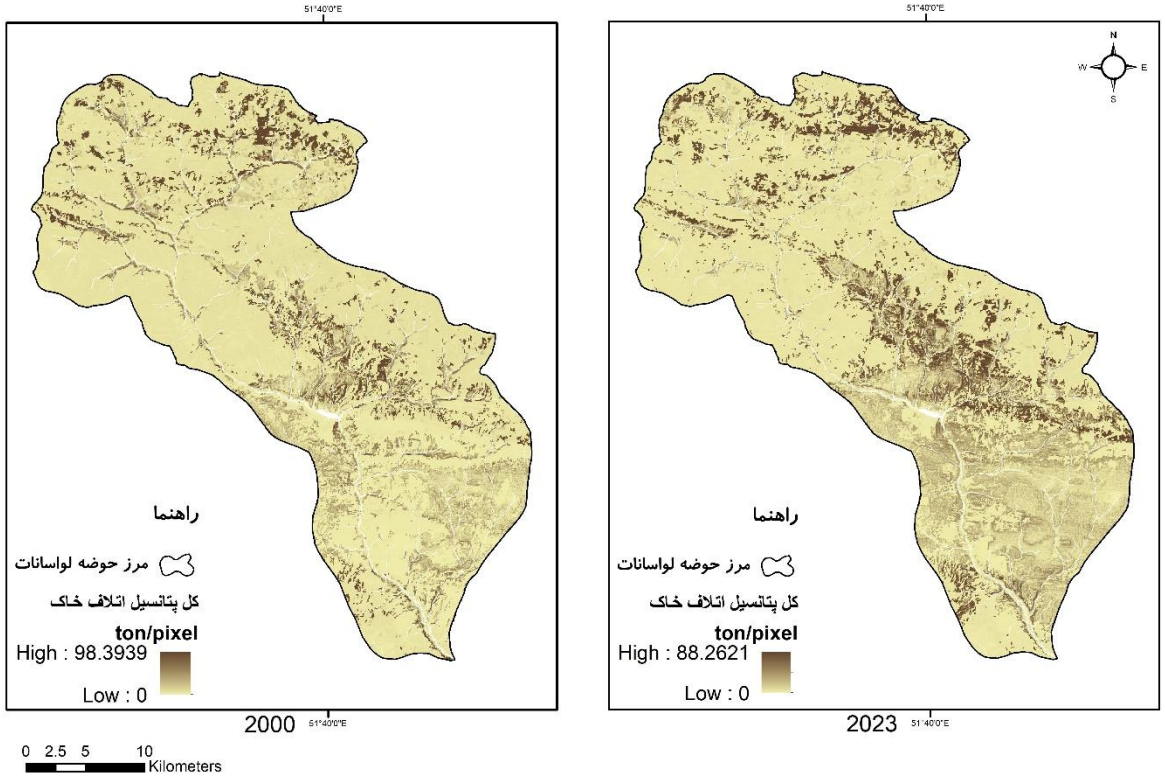
[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]

پیوست‌ها

تحلیل نقشه‌های مختلف اتلاف خاک، رسوب و فرسایش در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که در کل پتانسیل اتلاف خاک، با وجود کاهش حداکثر مقدار از ۹۸ تن به ۸۸ تن در هر پیکسل (ابعاد هر پیکسل در این مطالعه برابر ۲۷/۹۸×۲۷/۹۸ متر)، تعداد پیکسل‌هایی که در محدوده حداکثری قرار دارند، افزایش یافته که نشان‌دهنده گسترش مناطق با پتانسیل بالای اتلاف خاک در سطح حوضه است (شکل پیوست ۱).

در رسوب باقی‌مانده، حد بالای رسوب در هر پیکسل از ۸۴۵۸ تن در سال ۲۰۰۰ به ۱۰۵۵۱ تن در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته، این روند نشان‌دهنده افزایش کلی رسوبگذاری در سطح حوضه است (شکل پیوست ۲).

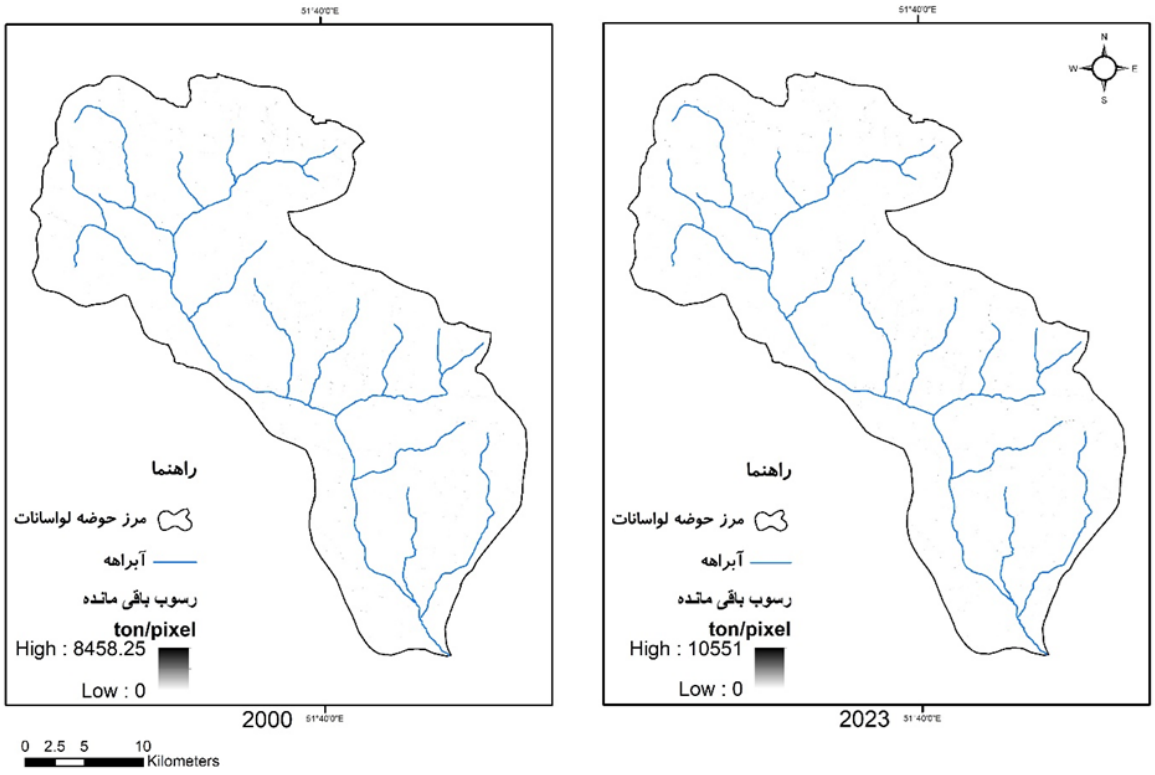
مقدار کل رسوب حمل شده (یا صادر شده)، هرچند حداکثر مقدار آن از ۳۹ به ۳۷ تن در پیکسل کاهش یافته، تعداد پیکسل‌هایی که در محدوده مقادیر حداکثری قرار دارند افزایش یافته است، که نشان‌دهنده کاهش شدت در هر پیکسل و گسترش مناطق تحت تأثیر است (شکل پیوست ۳).



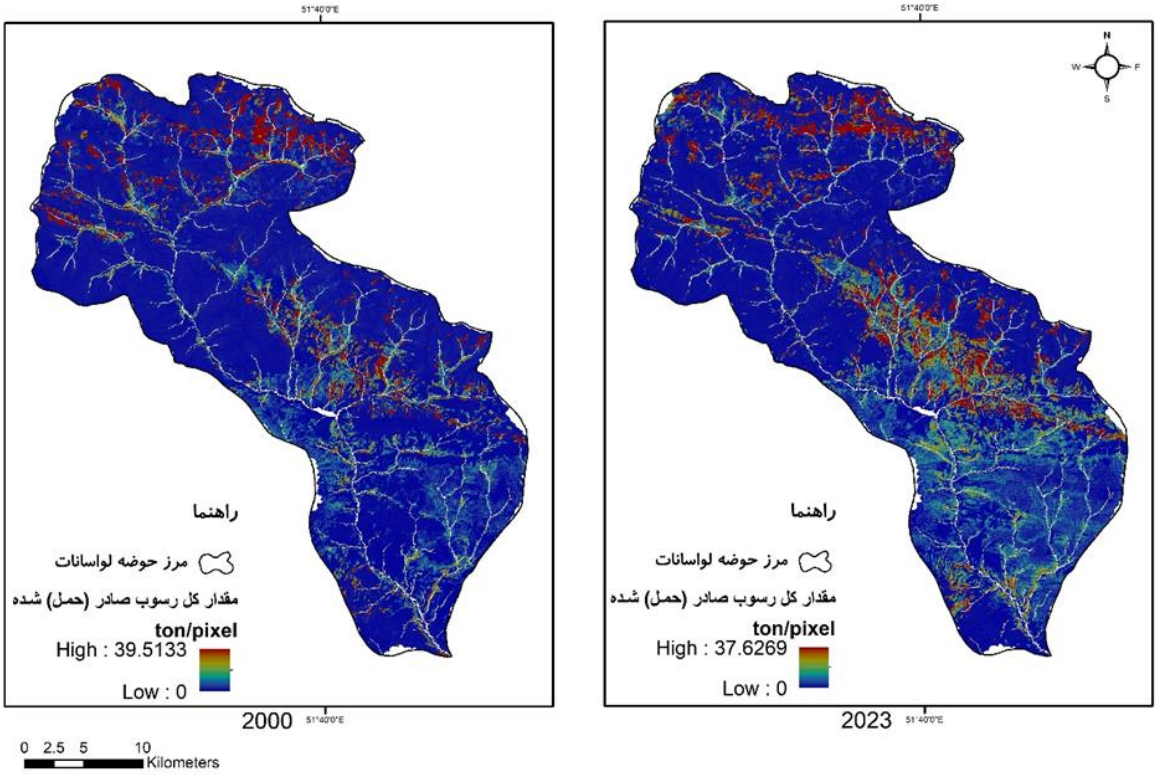
شکل پیوست ۱: نقشه‌های کل پتانسیل اتلاف خاک

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]



شکل پیوست ۲: نقشه‌های رسوب باقی‌مانده



شکل پیوست ۳: نقشه‌های مقدار کل رسوب صادر (حمل) شده

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2025-10-09]

[DOI: 10.61186/jeer.15.3.59]