

## Evaluating the effects of land use change on soil conservation with the InVEST model

Mohammad Rahmati<sup>1</sup>, Siamak Dokhani<sup>1\*</sup>, Reza Ghazavi<sup>1</sup>, Alireza Daneshi<sup>2</sup>, Hamid Nouri<sup>3</sup>

1. Department of Watershed Management Science and Engineering, Kashan University, Kashan, Iran

2. Department of Watershed Management Science and Engineering, Gorgan University, Gorgan, Iran

3. Department of Watershed Management Science and Engineering, Malayer University, Malayer, Iran

\*Corresponding author: [siamakdokhani@gmail.com](mailto:siamakdokhani@gmail.com)

(Received: 02 July 2025

Revised: 25 August 2025

Accepted: 10 September 2025)

### Extended Abstract

**Introduction:** Ecosystem services, the direct and indirect benefits provided by natural systems, play an essential role in maintaining ecological balance, environmental sustainability, and effective natural resource management. Among these services, sediment retention is considered a crucial regulating function. It helps reduce soil loss, sustain agricultural productivity, protect water quality, extend the operational lifespan of reservoirs, and mitigate flood risks. However, land use change, driven by human activities such as urbanization, agricultural expansion, industrial development, and deforestation, has increasingly disrupted this service. In recent decades, factors like population growth, climate variability, and increasing demand for land and water have caused significant transformations in land cover, particularly in mountainous and erosion-prone watersheds. These changes have altered sediment production and transport processes, often resulting in increased erosion and downstream sedimentation. To assess and address these impacts, spatially explicit and process-based models have become essential tools. One such tool is the InVEST model, which allows for spatially distributed estimation of ecosystem services under different land use scenarios. This study aims to evaluate the effects of land use change on sediment retention in the Bazoft watershed, located in the upstream area of the Karun-4 Dam in southwestern Iran, using the sediment delivery ratio (SDR) module of the InVEST model. The results can offer useful insights into sediment dynamics and inform integrated watershed management and sustainable land use strategies.

**Materials and Methods:** The study was conducted in the Bazoft watershed, which is located in the upper part of the Northern Karun Basin and drains into the Karun-4 Dam. The area is mountainous, with steep slopes averaging around 45%, a cold and semi-humid climate, and annual precipitation of about 766 mm. The average annual discharge is approximately 57.8 m<sup>3</sup>/s. The natural land cover consists mainly of forests and rangelands, while cultivated and residential areas represent the dominant human-induced land uses. In this study, land use and land cover (LULC) maps were generated for the years 2001 and 2021 using Landsat satellite imagery (ETM+ and OLI sensors, respectively), classified using the Maximum Likelihood algorithm in ENVI and ArcGIS software. Future land use for the year 2041 was simulated using the Scenario Generator tool, incorporating land suitability analysis and expert knowledge. The InVEST SDR model was used to estimate soil loss, sediment export, and sediment retention capacity based on inputs including LULC maps, a 30-meter resolution DEM, rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), slope length and steepness (LS), vegetation cover factor (C), and support practice factor (P). Additional ecological inputs such as NDVI and hydrological connectivity parameters were included.

**Results and Discussion:** The results of this study indicated that human land uses such as rainfed agriculture, irrigated agriculture, and residential areas have shown an increasing trend, while natural covers like dense forests and dense rangelands have declined. The greatest increases during the 2001–2021 period were observed in rainfed agriculture (25.9%) and residential areas (63.07%). These trends are projected to continue, with increases of 21.7% and 20.91% respectively for the 2021–2041 period. The most significant decreases were related to dense forests and dense rangelands, by –7.53% and –9.07%, respectively, in the 2001–2021 period. According to the results of the SDR (Sediment Delivery Ratio) model in the InVEST software, the potential soil loss, sediment export, and sediment deposition are expected to increase by 0.56%, 1.01%, and 0.16%, respectively, compared to the current conditions of the watershed due to land use changes. These findings suggest that the continued expansion of human land uses could lead to a long-term decline in the ecosystem's capacity to control erosion and sedimentation. The results are consistent with similar studies and highlight the importance of sustainable land use management.

**Conclusion:** This study demonstrates that land use changes significantly reduce the sediment retention service in the Bazoft watershed. Continued expansion of agriculture at the expense of natural vegetation exacerbates soil erosion and sediment delivery, undermining watershed sustainability. The findings reinforce the necessity of conserving forests and rangelands, and support the use of scenario-based tools like InVEST for guiding land use planning and environmental policy in fragile mountainous ecosystems.

**Keywords:** Ecosystem Services, InVEST Model, Scenario Modeling, Soil Erosion

Citation: Rahmati, M., Dokhani, S., Ghazavi, R., Daneshi, A., & Nouri, H. (2026). Evaluating the effects of land use change on soil conservation with the InVEST model. *Integrated Watershed Management*, 6(1), 147-163. doi= 10.22034/iwm.2025.2064577.1235

### Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to Integrated Watershed Management. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



## ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر نگهداشت خاک با استفاده از مدل InVEST

محمد رحمتی<sup>۱</sup>، سیامک دخانی<sup>۱\*</sup>، رضا قضاوی<sup>۱</sup>، علیرضا دانشی<sup>۲</sup> و حمید نوری<sup>۳</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، ایران

۲. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گرگان، ایران

۳. گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ایران

\* نویسنده مسئول: [siamakdokhani@gmail.com](mailto:siamakdokhani@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۱

### چکیده مبسوط

**مقدمه:** خدمات بوم‌سازگان به عنوان منافع مستقیم و غیرمستقیم حاصل از طبیعت، نقش بسیار مهمی در پایداری محیط‌زیست و مدیریت منابع طبیعی ایفا می‌کنند. یکی از این خدمات حیاتی، نگهداشت رسوب است که در فرآیند کاهش فرسایش خاک، حفظ حاصلخیزی، افزایش عمر مفید سدها و کنترل سیلاب‌ها اهمیت بالایی دارد. تغییر کاربری اراضی، به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل انسانی مؤثر بر بوم‌سازگان‌ها، می‌تواند تأثیرات چشم‌گیری بر این خدمت بگذارد. در دهه‌های اخیر، به دلیل عواملی نظیر رشد جمعیت، تغییرات اقلیمی، افزایش تقاضا برای غذا و انرژی، گسترش شهرنشینی و توسعه کشاورزی و صنعت، تغییرات قابل توجهی در الگوی کاربری اراضی در بسیاری از مناطق رخ داده است. این تغییرات منجر به برهم خوردن تعادل عملکردهای بوم‌سازگان و تشدید فرسایش و رسوب در حوزه‌های آبخیز شده‌اند. در این راستا، استفاده از مدل‌های مکانی و فرآیندمحور مانند مدل InVEST، با توانایی شبیه‌سازی ساده، اما مؤثر خدمات بوم‌سازگان و طراحی سناریوهای مختلف مدیریتی، رویکردی کاربردی به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی بر خدمات بوم‌سازگان نگهداشت رسوب، برای نخستین بار در حوزه آبخیز بازفت، واقع در بالادست سد کارون ۴، و با بهره‌گیری از ماژول نسبت تحویل رسوب (SDR) مدل InVEST انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** محدوده مورد مطالعه، حوزه آبخیز بازفت واقع در بخش بالادست حوزه کارون شمالی است که با ویژگی‌هایی نظیر اقلیم کوهستانی، شیب متوسط ۴۵ درصد و بارندگی سالانه حدود ۷۶۶ میلی‌متر شناخته می‌شود. برای تحلیل تغییرات کاربری اراضی، تصاویر ماهواره‌ای لندست مربوط به سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۲۱ با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال و نرم‌افزارهای ENVI و ArcGIS طبقه‌بندی شدند. برای پیش‌بینی تغییرات آبی در افق ۱۴۲۰، از ابزار Scenario Generator بهره‌گیری شد که بر پایه تحلیل تناسب اراضی و با مشارکت کارشناسان محلی، سناریوهای تغییر کاربری را مدل‌سازی می‌کند. در ادامه، مدل SDR برای برآورد نسبت تحویل رسوب پیاده‌سازی گردید. ورودی‌های مدل شامل نقشه‌های کاربری اراضی، ارتفاع، فاکتورهای R، K، LS، C و P و همچنین پارامترهای مربوط به واسنجی مدل بودند. برای محاسبه فاکتورهای اکولوژیکی از روش‌هایی نظیر شاخص NDVI و ماتریس‌های AHP استفاده شد. نتایج مدل‌سازی شامل نقشه‌های هدررفت خاک، انتقال رسوب، توان نگهداشت خاک و تحلیل فضایی خدمات بوم‌سازگانی بود که به‌صورت مکانی در سطح پیکسل در کل حوزه تهیه شد.

**نتایج و بحث:** نتایج نشان داد که کاربری‌های انسانی مانند کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و مناطق مسکونی روند افزایشی داشته‌اند، در حالی که پوشش‌های طبیعی نظیر جنگل‌های متراکم و مراتع متراکم کاهش یافته‌اند. بیشترین افزایش مربوط به کشاورزی دیم و مناطق مسکونی به مقدار ۲۵/۹ و ۶۳/۰۷ درصد در سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۸۰ و در ادامه به مقدار ۲۱،۷ و ۲۰،۹۱ درصد برای دوره ۱۴۰۰ تا ۱۴۲۰ پیش‌بینی گردید. بیشترین کاهش مربوط به جنگل‌های متراکم و مراتع متراکم به ترتیب ۷/۵۳- و ۹/۰۷- درصد در سال ۱۳۸۰-۱۴۰۰ بوده است. نتایج مدل SDR نشان داد مقادیر پتانسیل هدررفت خاک، صادرات رسوب و رسوب ته‌نشین شده تحت اثر تغییر کاربری اراضی به ترتیب ۰،۵۶، ۱،۰۱ و ۰،۱۶ درصد نسبت به شرایط فعلی حوزه افزایش خواهد یافت. این نتایج حاکی از آن است که ادامه روند گسترش کاربری‌های انسانی می‌تواند در بلندمدت منجر به کاهش توان بوم‌سازگان در کنترل فرسایش و رسوب شود. یافته‌های مطالعه با نتایج پژوهش‌های مشابه همخوانی دارد و اهمیت مدیریت پایدار کاربری اراضی را برجسته می‌سازد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش پوشش‌های گیاهی، به‌ویژه جنگل‌ها و مراتع، عملکرد خدمات بوم‌سازگانی در تنظیم فرسایش و رسوب را تضعیف می‌کند. تحلیل مبتنی بر مدل SDR در چارچوب InVEST بیانگر آن است که تغییرات کاربری زمین نقشی تعیین‌کننده در افزایش یا کاهش کارایی تنظیمی بوم‌سازگان دارند؛ بنابراین، اتخاذ سیاست‌های مبتنی بر حفاظت از پوشش‌های طبیعی و بهره‌گیری از ابزارهای مدل‌سازی فضایی برای برنامه‌ریزی مدیریت پایدار منابع طبیعی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

**واژه‌های کلیدی:** خدمات بوم‌سازگانی، مدل InVEST، سناریوسازی و فرسایش خاک

**استناد:** رحمتی، م.، دخانی، س.، قضاوی، ر.، دانشی، ع. و نوری، ح. (۱۴۰۵). ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر نگهداشت خاک با استفاده از مدل InVEST. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۶(۱)، ۱۶۳-۱۴۷.

### حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به‌صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

## مقدمه

خدماتی که به صورت مستقیم و غیرمستقیم از محیط طبیعی به ساکنان زیست‌بوم ارائه می‌گردد، خدمات بوم‌سازگان گفته می‌شود. به طور کلی این خدمات در چهار گروه تنظیمی، فراهم‌سازی، فرهنگی و حمایتی دسته‌بندی می‌شوند (Fu et al., 2017). برخی از این خدمات ملموس و برخی نیز ناملموس و غیرقابل اندازه‌گیری می‌باشند. لذا کمی‌سازی و تعیین خدمات ملموس و قابل اندازه‌گیری بوم‌سازگان از فاکتورهای مهم و کلیدی در مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز به شمار می‌رود. نگهداشت رسوب یکی از خدمات کلیدی بوم‌سازگان است که عوامل متعددی مانند تغییر کاربری اراضی بر آن اثر می‌گذارند. کاربری اراضی نحوه استفاده از زمین توسط انسان است که جهت تولید محصولات و سودآوری استفاده می‌شود. در دهه‌های اخیر با توجه به تغییرات آب و هوایی، افزایش جمعیت، تامین امنیت غذایی و گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، رشد و توسعه شهرنشینی اراضی در نقاط مختلف دستخوش تغییرات شده است (Lang et al., 2017) که باعث تغییر در مؤلفه‌ها و اجزای بوم‌سازگان در حوزه‌های آبخیز گردیده است. از این تغییرات می‌توان به تغییر در میزان فرسایش و رسوب حوزه اشاره کرد. با توجه به موارد گفته شده بررسی تغییرات کاربری اراضی و اثرات آن بر خدمات بوم‌سازگان جهت مشخص شدن اثرات دخل و تصرف‌های انسان در بوم‌سازگان و نیز مدیریت صحیح منابع طبیعی حوزه‌های آبخیز جهت برقراری توسعه پایدار این منابع حائز اهمیت است. تاکنون روش‌های مختلفی برای محاسبه خدمات بوم‌سازگان توسعه داده شده است، اما با توجه به پیچیدگی روابط بین اجزا بوم‌سازگان‌های طبیعی، استفاده از مدل‌های ساده در شبیه‌سازی فرایندهای طبیعی با داده‌های کم و قابل دسترس متداول‌تر است (Vigerstol & Aukema, 2011). مدل InVEST<sup>۱</sup>

یکی از این مدل‌ها است که پرکاربردترین مدل در بحث ارزیابی خدمات بوم‌سازگان می‌باشد (Ochoa & Cardona, 2017) که به منظور فهم بیشتر ارزش اجزاء طبیعت و خدمات تولید شده در بوم‌سازگان، جهت ارزش‌گذاری و کمی‌سازی کالاها و خدمات بوم‌سازگان با میزان دقت بالایی طراحی شده است. از مزایای این نرم‌افزار می‌توان به تعداد بالای مدل‌ها برای برآورد و کمی‌سازی خدمات بوم‌سازگان، خروجی واضح مدل به صورت مکانی و فضایی، امکان ارزیابی کمی و کیفی با توجه به خروجی مدل، توانایی ارزش‌گذاری اقتصادی خدمات بوم‌سازگان به صورت مستقیم، در دسترس قرار دادن آنلاین برخی داده‌ها، امکان طراحی سناریو و قابلیت استفاده از GIS در تهیه ورودی‌های مدل و تجزیه و تحلیل خروجی‌ها اشاره کرد (Vogl et al., 2016) که به دلیل اهمیت موضوع در این زمینه تحقیقاتی انجام شده است.

Barzali و همکاران (۲۰۲۲) خدمات زیست‌بوم مرتعی حوزه آبخیز اترک را از لحاظ قابلیت نگهداشت رسوب با استفاده از نرم‌افزار InVEST مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد در بین کاربری‌های مورد مطالعه پوشش جنگلی با مقدار ۱۴۱۸ تن بر کیلومتر مربع و مراتع خوب با مقدار ۱۲۱۷ تن بر کیلومتر مربع بیشترین قابلیت را در نگهداشت رسوب دارا هستند. Zabihi و همکاران (۲۰۲۱) اولویت‌بندی زیرحوزه‌های حوزه آبخیز تالار از لحاظ هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب را با مدل InVEST مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که از جنوب به شمال، تغییرات نگهداشت بیشتر است. در تحقیقی دیگر، Asadolahi و Norozi (۲۰۲۰) کنترل فرسایش خاک تحت اثر تغییر اقلیم در حوزه آبخیز گرگانرود را با استفاده از مدل SWAT<sup>۲</sup> کمی‌سازی کردند. مقادیر آماره نش-ساتکلیف ۰/۷ و ۰/۶۴ به ترتیب در واسنجی جریان و رسوب ماهانه حاکی از عملکرد مناسب مدل در

بوم‌سازگان و افزایش خدمات عملکرد آب در ارتباط با توسعه فضای شهری بود. Bogdan و همکاران (۲۰۱۶) طی مطالعه خدمت بوم‌سازگان نگهداشت رسوب برای حوزه‌ای در رومانی با کاربرد مدل InVEST نشان دادند، بیشترین کاهش و افزایش در نگهداشت رسوب مربوط به سناریوهای توسعه و حفاظت بوده است. Kusi و همکاران (۲۰۲۳) اثرات تغییر کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی را با استفاده از مدل های InVEST و SWAT بر خدمت بوم‌سازگانی تولید آب را در مراکش مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که اثر تغییر اقلیم بر تولید آب بیشتر بوده است. Shalaby و Tateish (۲۰۱۷) در تحقیقی قابلیت تصاویر TM سنجنده لندست را به منظور بررسی تغییرات کاربری اراضی طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۰ در منطقه‌ای در شمال غربی مصر را مورد ارزیابی قرار دادند و با استفاده از الگوریتم حداکثر احتمال، به ترتیب صحت کلی ۹۱ درصد و ۹۲/۳ برای کاربری اراضی به دست آوردند. Singh و Khandur (۲۰۱۱) با استفاده از داده‌های سنجش از دور و GIS به آشکارسازی تغییرات کاربری اراضی در پنجاب هند بین سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۶ پرداختند. ایشان از داده‌های سنجنده TM و ETM+ از ماهواره لندست و IRS استفاده نمودند. بعد از انجام طبقه‌بندی آشکارسازی تغییرات انجام گرفت. سپس مساحت کاربری‌های موردنظر را محاسبه کرده و با یکدیگر مقایسه کردند. بررسی منابع نشان می‌دهد تاکنون مطالعه‌ای با موضوع خدمات بوم‌سازگان تحت اثر تغییر کاربری اراضی برای حوزه بازفت صورت نگرفته است. بنابراین مطالعه وضعیت خدمت بوم‌سازگان نگهداشت رسوب تحت اثر تغییر کاربری اراضی با توجه به اهمیت حوزه آبخیز بازفت از نظر موقعیت جغرافیایی و قرارگرفتن در بالادست سد کارون ۴ از لحاظ توزیع مکانی و تولید و نگهداشت رسوب برای اولین بار توسط مدل نسبت تحویل رسوب موجود در نرم‌افزار InVEST در دوره ۱۳۸۰-۱۴۲۰ در دستور کار این پژوهش قرار

شبهه‌سازی جریان و رسوب حوزه بوده است. همچنین نتایج بیانگر این است که خدمت بوم‌سازگان به شدت تحت تاثیر تغییر اقلیم بوده و با تغییرات بارش دچار تغییرات بیشتر می‌گردد. در تحقیقی دیگر، Mohammadyari (۲۰۲۳) در تحقیقی با عنوان ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر خدمات بوم‌سازگان با مدل InVEST ارزیابی کمی ظرفیت ذخیره کربن و کیفیت زیستگاه آن را برای استان چهارمحال و بختیاری در دستور کار قرار دادند. نتایج این تحقیق موید آن بود که بیشترین مقدار ذخیره کربن در مناطق جنگلی با بالاترین کیفیت زیستگاه بوده و مکان‌هایی که انسان در آن دخل و تصرف داشته از کیفیت زیستگاه آن کاهش یافته است. Haghddadi و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی خدمات بوم‌سازگان تولید آب با استفاده از مدل InVEST برای حوزه آبخیز دلیچای پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین مقدار تولید رواناب مربوط به کاربری بایر با مقدار ۲۹۲۳/۹۹ مترمکعب در هکتار و کمترین مقدار مربوط به ذخیره‌گاه ارس با مقدار ۴۵۹/۰۴ مترمکعب در هکتار بوده است. Zarandian و همکاران (۲۰۲۳) به مقایسه عملکرد مدل‌های LCM و InVEST در پیش‌بینی تغییرات کاربری اراضی و پوشش حوزه کرج پرداختند. نتایج کاهش پوشش طبیعی و چمنزارها را به مقدار ۷ درصد نشان داد. همچنین مشخص شد کارایی مدل InVEST به دلیل لحاظ دیدگاه ذی‌نفعان و سیاست‌ها و برنامه‌های توسعه‌ای بهتر بوده است. در تحقیقی دیگر، Bai و همکاران (۲۰۱۹) اثر تغییر اقلیم و کاربری اراضی را بر نگهداشت رسوب در منطقه کنتوک ایالات متحده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاکی از اثر بیشتر تغییرات کاربری اراضی بر خدمت بوم‌سازگان نگهداشت رسوب می‌باشد. Wang و همکاران (۲۰۲۲) پویایی خدمات بوم‌سازگان را در مقیاس مکانی و زمانی در پاسخ به گسترش شهرنشینی و توسعه شهری با استفاده از مدل InVEST بررسی کردند. نتایج حاکی از کاهش تعادل

### تهیه نقشه‌های کاربری اراضی

به‌منظور پایش تغییرات کاربری اراضی در بازه زمانی گذشته تا حال و پیش‌بینی روندهای آتی در بازه زمانی سال‌های ۱۴۲۰-۱۳۸۰، از تصاویر ماهواره‌ای لندست بهره گرفته شد. تصاویر سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷ مربوط به ماه می ۲۰۰۱ و تصاویر سنجنده OLI ماهواره لندست ۸ مربوط به ماه می ۲۰۲۱، به‌عنوان منابع داده مورد استفاده قرار گرفتند. پردازش تصاویر و استخراج نقشه‌های کاربری با استفاده از نرم‌افزارهای ENVI 5.3 و ArcGIS 10.3 صورت گرفت (Sahle et al., 2019).

پیش از اعمال روش‌های طبقه‌بندی، تصاویر خام تحت تصحیحات هندسی و اتمسفری قرار گرفتند. تصحیح هندسی بر پایه مدل چندجمله‌ای ناپارامتری و با حذف نقاط نامناسب، با استفاده از ۵۰ نقطه کنترل زمینی انجام شد و خطای RMSE به ۰/۲۸ پیکسل کاهش یافت. نمونه‌گیری مجدد پیکسل‌ها به روش نزدیک‌ترین همسایه انجام شد (Al-Ahmadi & Hames, 2009). در راستای طبقه‌بندی تصاویر، از الگوریتم حداکثر احتمال به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده استفاده گردید. این الگوریتم با محاسبه احتمال تعلق هر پیکسل به کلاس‌های آموزشی تعریف شده، آن را به کلاسی با بیشترین احتمال اختصاص می‌دهد. در مواردی که این احتمال از آستانه تعیین‌شده کمتر باشد، پیکسل در گروه طبقه‌بندی‌نشده قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر کاربری‌های کشاورزی دیم، جنگل متراکم، جنگل کم تراکم، کشاورزی آبی، مرتع متراکم، مرتع کم تراکم، مناطق مسکونی و سد انتخاب و سپس نمونه‌های آموزشی با بهره‌گیری از مشاهدات میدانی و ثبت نقاط با GPS، همچنین تحلیل تصاویر در Google Earth گردآوری شدند. برای ارزیابی دقت طبقه‌بندی، از شاخص‌های دقت کلی<sup>۱</sup> و ضریب کاپا<sup>۲</sup> استفاده شد.

دارد. بنابراین تحقیق حاضر در پی یافتن پاسخ برای سوالات ذیل است. طی دوره ۱۳۸۰-۱۴۲۰، تغییرات کاربری اراضی در حوزه بازفت در کدام دهه بیشتر بوده است؟ تغییرات کاربری اراضی منجر به چه مقدار تغییرات در عرضه خدمات بوم‌سازگانی مرتبط با رسوب شده است؟

### مواد و روش‌ها

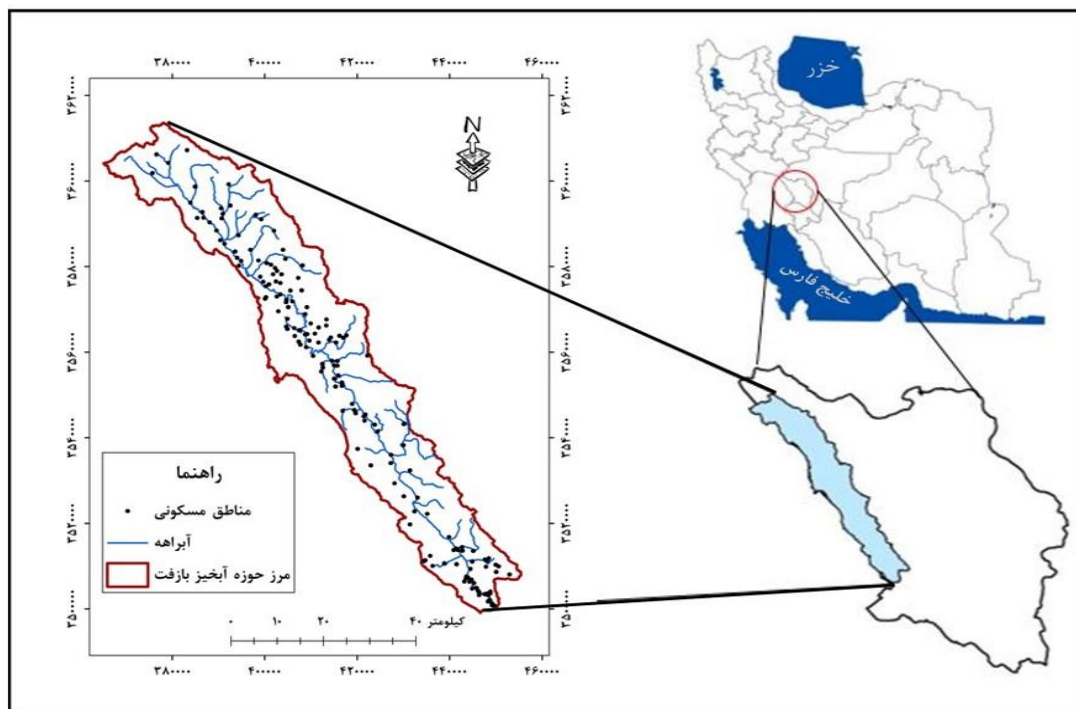
#### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش حوزه آبخیز بازفت در بخش بالادست حوزه آبخیز کارون شمالی و سد کارون ۴ قرار دارد. این حوزه دارای متوسط دمای سالانه ۱۰/۴ درجه سانتی‌گراد، میانگین بارندگی سالانه ۷۶۶ میلی‌متر و دبی ۵۷/۸ مترمکعب در ثانیه ثبت شده است. منطقه مورد مطالعه بین طول جغرافیایی ۳۳° ۵' تا ۴۹° ۳۰' ۲۹" شرقی و عرض جغرافیایی ۳۱° ۳۷' تا ۳۲° ۳۹' ۱۶" شمالی واقع شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع حوزه به‌ترتیب برابر با ۸۴۴ متر در خروجی و ۴۱۳۵ متر در ارتفاعات زردکوه بختیاری است. منطقه مورد مطالعه عمدتاً کوهستانی و شیب متوسط حوزه حدود ۴۵ درصد می‌باشد. کاربری غالب حوزه مرتع بوده و کاربری‌های جنگل و اراضی کشاورزی نیز از کاربری‌های عمده این حوزه است. از نظر خاکشناسی، بافت‌های غالب حوزه شامل بافت سیلتی-لومی و رسی-لومی بوده و بافت‌های دیگر نظیر رسی، لومی و شنی-لومی نیز در این حوزه مشاهده می‌شود. بررسی زمین‌شناسی نشان می‌دهد که از مساحت ۲۱۷۵۸۲ هکتار کل حوزه، ۱۲/۵۰ درصد آن مربوط به دوران اول، ۲۶/۱۸ درصد مربوط به دوران دوم، ۵۸/۸۸ کیلومتر مربع مربوط به دوران سوم و ۲/۴۲ کیلومتر مربع به دوران چهارم زمین‌شناسی است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

#### روش تحقیق

قرار داشته باشند (Mather, 1999; Jensen, 2005; Deng et al., 2019; Zhang et al., 2019). مقادیر دقت کلی و ضریب کاپا در پژوهش حاضر به ترتیب ۹۱ درصد و ۰/۸۹ به دست آمد که نشان دهنده دقت بالای طبقه‌بندی می‌باشد.

دقت کلی نشان‌دهنده نسبت پیکسل‌های به درستی طبقه‌بندی شده است، در حالی که ضریب کاپا میزان تطابق طبقه‌بندی با واقعیت را با در نظر گرفتن توافق تصادفی نشان می‌دهد. بیشترین اعتبار طبقه‌بندی زمانی حاصل می‌شود که هر دو شاخص در سطوح بالا



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of the study area

است تغییرات احتمالی آینده را به صورت نقشه‌های فضایی بازنمایی کند. برای اجرای مدل، داده‌های متنوعی مورد نیاز است که شامل موارد زیر می‌باشد: نقشه پایه کاربری اراضی (سال ۱۴۰۰)، لایه‌های محدودیت مکانی مانند مناطق حفاظت شده، مقادیر پیش‌بینی‌شده تغییرات در انواع کاربری، ماتریس احتمال انتقال کاربری‌ها، فاکتورهای مؤثر بر استعداد زمین برای تغییر، ماتریس اولویت تغییرات کاربری، نقشه ابطال تغییرات و وزندهی به فاکتورهای مؤثر در مدل. در این پژوهش، از نقشه کاربری اراضی سال

### پیش‌بینی تغییرات کاربری

به منظور شبیه‌سازی نقشه کاربری اراضی در افق سال ۱۴۲۰، از ابزار Scenario Generator از مجموعه نرم‌افزاری InVEST استفاده شد. این ابزار بر پایه مدل‌سازی مبتنی بر قابلیت تناسب اراضی عمل می‌کند و فرض بر این است که تغییرات کاربری عمدتاً در مناطقی رخ می‌دهد که از نظر ویژگی‌های طبیعی و محیطی، استعداد بالاتری برای تغییر دارند. این مدل با بهره‌گیری از ترکیب روش‌های GIS<sup>۱</sup>، MCA<sup>۲</sup> و استفاده از دانش بومی و تخصصی کارشناسان، قادر

تحقیق مدل SDR در نرم‌افزار InVEST جهت تخمین نسبت و میزان تحویل رسوب در منطقه مورد مطالعه به کار گرفته می‌شود. این مدل به وسیله Borselli و همکاران (۲۰۰۸)، معرفی و بکار گرفته شده و طی سالیان گذشته بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (Sougnez et al., 2011; Lopez-vicente et al., 2013; Cavalli et al., 2013). این مدل بر مبنای میزان قدرت تفکیک مکانی لایه مدل رقومی ارتفاع عمل می‌کند، به نحوی که ابتدا برای هر پیکسل میزان رسوب حاصل از فرسایش را محاسبه و سپس مقدار رسوبی که به خروجی حوزه می‌رسد را تحت عنوان SDR برآورد می‌کند.

به منظور آماده‌سازی ورودی‌های مدل SDR، مدل رقومی ارتفاعی از سازمان نقشه‌برداری کشور تهیه شد. عامل فرسایش‌دهی باران با استفاده از رابطه ۱ و با احتساب آمار و اطلاعات ۳۰ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی در داخل و اطراف منطقه مورد مطالعه محاسبه شد، همچنین میزان عامل فرسایش‌پذیری خاک نیز بر اساس رابطه (۲) محاسبه شد.

این مدل، معادله جهانی فرسایش اصلاح شده (RUSLE)<sup>۳</sup> را جهت محاسبه خاک از دست رفته به صورت سالانه برای هر سلول بکار می‌گیرد (Sharp et al., 2014; Sharp et al., 2018) که از رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$SDR(1-CP) SR = R \cdot K \cdot LS \quad (1)$$

که SDR بیانگر میزان هدررفت خاک با استفاده از کاربری اراضی موجود در مقایسه با خاک لخت است که به وسیله مدل SDR در نرم‌افزار InVEST محاسبه می‌شود (Sharp et al., 2014).

۱۴۰۰ به‌عنوان مبنای مدل‌سازی استفاده شد. داده‌های مربوط به روند تغییرات کاربری اراضی بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ مبنای برآورد تغییرات آینده قرار گرفت. فاکتورهای استعداد زمین برای هر نوع کاربری به‌صورت مقادیر عددی بین صفر تا یک تعریف شدند، به‌گونه‌ای که مقدار صفر بیانگر عدم تناسب برای تغییر و مقدار یک نمایانگر بیشترین پتانسیل برای تغییر به سایر کاربری‌هاست. ماتریس انتقال و اولویت تغییرات کاربری نیز با بهره‌گیری از نظر خبرگان و ذی‌نفعان تدوین گردید. در ماتریس انتقال، احتمال تغییر هر کاربری در مقیاس ۰ تا ۱۰ سنجیده شد؛ به‌طوری‌که عدد صفر به معنای عدم تغییر و عدد ۱۰ نشان‌دهنده بالاترین احتمال تغییر است. تهیه ماتریس اولویت با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)<sup>۱</sup> و مقایسه‌های زوجی انجام گرفت. برای گردآوری داده‌های لازم، پرسش‌نامه‌ای طراحی و میان ۳۰ نفر از کارشناسان سازمان‌های ذی‌ربط از جمله اداره‌های امور آب، حفاظت از محیط زیست، منابع طبیعی و آبخیزداری شهرستان‌های تابعه استان چهارمحال و بختیاری توزیع شد. در مجموع، ۲۳ پرسش‌نامه تکمیل و بازگردانده شد (نرخ بازگشت ۷۷ درصد) و داده‌های حاصل در مدل‌سازی آینده‌نگر مورد استفاده قرار گرفت.

#### مدل نسبت تحویل رسوب (SDR)<sup>۲</sup>

ارزیابی و تخمین مقدار رسوب تولید شده در حوزه و برنامه‌ریزی برای حفاظت و مدیریت آن به وسیله اجزاء مختلف حوزه آبخیز می‌بایست یکی از مهمترین اولویت‌ها برای مدیران باشد. به همین دلیل در این

3- Revised Universal Soil Loss Equation

1- Analytical Hierarchy Process

2 - Sediment Delivery Ratio

## داده‌های مورد نیاز

با توجه نقشه تهیه شده فاکتور C محاسبه می‌گردد (Asadolahi *et al.*, 2015).

ج) فاکتور عملیات حفاظتی (P): نسبت مقدار خاک فرسایش یافته در شرایط حفاظتی به همین مقدار در شرایط استاندارد Renard و همکاران (۱۹۹۷) بنابراین، در تحقیق حاضر، مقدار فاکتور P با توجه به کاربری اراضی منطقه و بر اساس جدول پیشنهادی Deore (۲۰۰۵)، بین صفر تا ۱ تعیین شد.

۷- شاخص جریان تجمعی آستانه: میزان سلول‌های بالادست در حوزه که باید به یک سلول در پایین دست جریان یابد. این شاخص به منظور طبقه‌بندی جریان در نقشه ارتفاع بکار گرفته می‌شود.

۸- پارامترهای  $K_b$  و  $IC_0$ : دو پارامتر برای واسنجی می‌باشند که ارتباط بین اتصال هیدرولوژیکی و نسبت تحویل رسوب را مشخص می‌کنند.

۹-  $SDR_{max}$ : حداکثر مقدار SDR می‌باشد که یک سلول می‌تواند به آن برسد که به بافت خاک ربط دارد و به آن بخش از ذرات شن و ماسه سطحی خاک گفته می‌شود در حدود اندازه ۱۰۰۰ میکرومتر گفته می‌شود (Vigiak *et al.*, 2012).

۱۰- نقشه زهکشی (اختیاری): به صورت یک نقشه رستری با مقادیر ۰ و ۱ است که ارزش ۱ برای سلول‌هایی مثل جاده‌ها، لوله‌های سطحی فاضلاب و غیره که به شکل مصنوعی به جریان وصل می‌شوند، لحاظ می‌گردد.

بعد از تهیه و آماده‌سازی اطلاعات و داده‌های مورد نیاز و وارد کردن آن‌ها، مدل SDR در نرم‌افزار نقشه‌های ذیل نقشه هدررفت خاک در هر خاک به صورت سالانه در هر پیکسل، نقشه هدررفت خاک محاسبه شده توسط مدل USLE در هر پیکسل، میزان کل رسوب هر پیکسل که وارد جریان می‌گردد، نقشه توان نگهداشت خاک به عنوان یک خدمت بوم‌سازگانی برای

۱- کاربری اراضی با فرمت رستری

۲- نقشه رقومی ارتفاع (DEM)

۳- فاکتور R یا فرساینده‌گی باران که حاصل ضرب انرژی جنبشی باران (E) در حداکثر شدت بارش ۳۰ دقیقه‌ای ( $I_{30}$ ) که طبق معادله (۲) محاسبه می‌گردد:

$$R = E \cdot I_{30} = (210 + \log I_{30}) * I_{30} \quad (2)$$

در این پژوهش، برای تهیه نقشه فرساینده‌گی باران، از مطالعه (Nikkami & Mahdian 2015) استفاده شده است.

۴- فاکتور (K) یا فرسایش‌پذیری خاک: پتانسیل تفکیک‌پذیری ذرات خاک یا حمل توسط رواناب. برای تهیه نقشه فرسایش‌پذیری خاک، بعد از نمونه‌برداری نقاطی در داخل منطقه مورد مطالعه و تعیین بافت خاک در آزمایشگاه و برای برآورد عامل K از جدول ارائه شده توسط Roose (۱۹۹۶)، استفاده شد.

۵- نقشه حوزه آبخیز و زیرحوزه‌ها به صورت نقشه وکتوری

۶- اطلاعات بیوفیزیکی در قالب یک جدول اکسل با فرمت CSV. به شرح ذیل: الف) کد و اسامی تمام کاربری‌ها (ب) کاربری اراضی و پوشش گیاهی (C): این فاکتور اثر اقدامات مدیریتی کشاورزی و اثر پوشش گیاهی و درختی روی کاهش فرسایش خاک را نشان می‌دهد (Asadolahi *et al.*, 2015). برای مشخص کردن این فاکتور شاخص تفاضل پوشش گیاهی استاندارد (NDVI) بکار گرفته می‌شود (Lin, 1997). فاکتور C طبق رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

$$C = (1 - NDVI) / 2 \quad (3)$$

لذا در این پژوهش، ابتدا با محاسبه شاخص NDVI و تهیه نقشه آن در حوزه مورد مطالعه تهیه و در نهایت

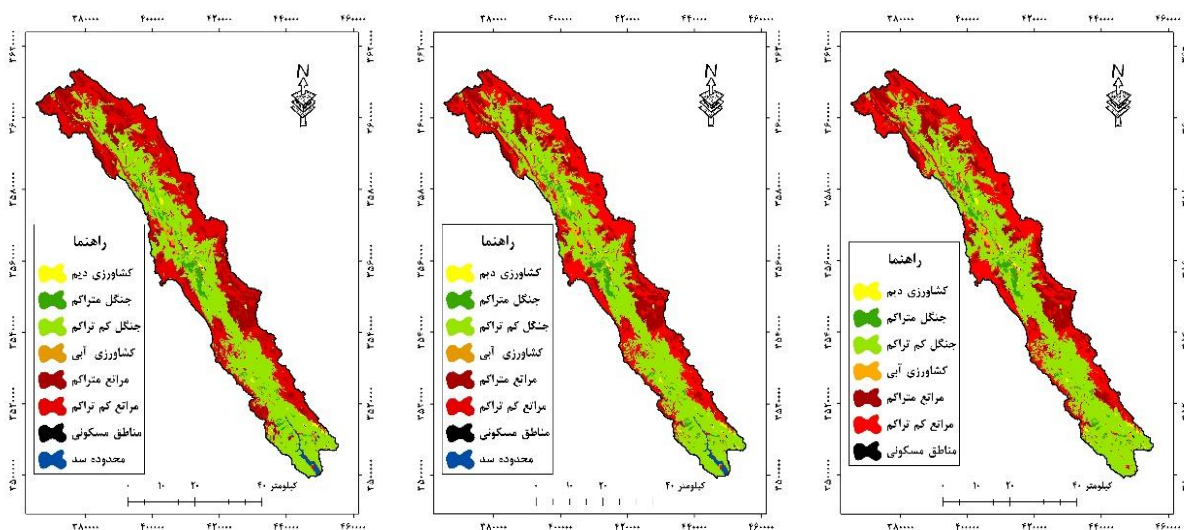
سطح داشته است که حاکی از توسعه مناطق مسکونی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. از طرفی دیگر نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های مدل در منطقه مورد مطالعه بیانگر کاهش پوشش جنگلی حوزه بازفت در طول سال های ۱۴۲۰-۱۴۰۰ به میزان ۱۳/۰۴ درصد خواهد بود که نشان دهنده فشار روزافزون بر منابع طبیعی منطقه مورد مطالعه می‌باشد. طبق بررسی‌های صورت گرفته مطالعاتی که در خصوص پیش‌بینی وضعیت برخی از حوزه‌های آبخیز کشور تحت اثرات تغییر کاربری اراضی انجام شده است، نتایج پژوهش حاضر را تایید می‌نمایند. به طوریکه در مطالعه Afifi (۲۰۲۰) که تغییر کاربری اراضی شهر شیراز را مورد بررسی قرار داده است افزایش سطح اراضی کشاورزی و مسکونی و کاهش مناطق مرتعی و جنگلی به ثبت رسیده است. همچنین در پژوهشی دیگر Falahatkar و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل LCM تغییرات کاربری اراضی دیلمان را مطالعه و نتیجه گرفتند که مساحت اراضی جنگلی و مرتعی در ۴۰ سال آینده به ترتیب ۹ و ۲۳ درصد کاهش خواهد یافت.

تمام منطقه مورد مطالعه، نقشه نگهداشت رسوب با هدف شناسایی پهنه‌های با توان نگهداشت خاک، نقشه تولید و انتقال رسوب از حوزه و مقدار خاک از دست رفته در شرایط فعلی و پیش‌بینی برای آینده استخراج شد.

## نتایج

### تغییرات کاربری اراضی

نتایج مربوط به تغییرات کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج، در دوره زمانی مورد مطالعه سطح پوشش اراضی دیم طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۸۰ مقدار ۲۵/۹ درصد افزایش یافته و این در حالی است که مقدار افزایش سطح پوشش اراضی دیم پیش‌بینی‌شده توسط مدل برای سال‌های ۱۴۲۰-۱۴۰۰ افزایش ۲۱/۷ درصدی را نشان می‌دهد. این در خصوص مناطق مسکونی نیز صادق است به نحوی که در حد فاصل سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۸۰ حدود ۶۳/۰۷ درصد افزایش



نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در سال

۱۴۲۰

نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در

سال ۱۴۰۰

نقشه کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در

سال ۱۳۸۰

شکل ۲- روند تغییرات کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه

Figure 2- Lnad use change trend in study arae

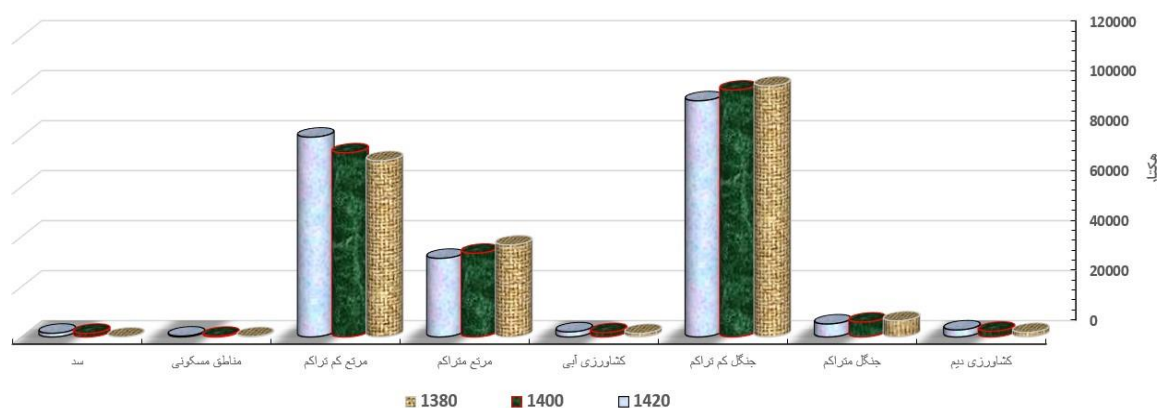
جدول ۱- مقدار تغییر در کاربری اراضی مختلف

Table 1- The amount of changes of various land uses

درصد تغییر مساحت در کل محدوده		درصد تغییر مساحت هر کاربری		مساحت (هکتار)			نوع کاربری
1400-1420	1380-1400	1400-1420	1380-1400	1420	1400	1380	
0.23	0.22	21.7	25.9	2804	2304	1830	کشاورزی دیم
-0.36	-0.22	-13.04	-7.53	5182	5959	6444	جنگل متراکم
-1.97	-0.76	-4.34	-1.65	94441	98730	100387	جنگل کم تراکم
0.12	0.14	15.53	22.12	2009	1739	1424	کشاورزی آبی
-0.93	-1.53	-6.06	-9.07	31443	33472	36811	مرتع متراکم
2.88	1.43	8.51	4.42	79901	73636	70517	مرتع کم تراکم
0.03	0.05	20.91	63.07	347	287	176	مناطق مسکونی
0	0.67	0	-	1462	1462	0	سد
				217589	217589	217589	مجموع

مورد مطالعه مساحت کاربری‌های جنگل کم تراکم و مراتع کم تراکم افزایش یافته است. از این رو با ادامه تغییر کاربری انتظار بر این است که در آینده نه‌چندان دور کاربری‌های با کیفیت پایین‌تر جای کاربری‌های کیفیت بالا را از نظر مساحتی بگیرند.

شکل ۳ نمودار تغییرات مساحت کاربری‌های موجود در منطقه مورد مطالعه را برای سال‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد به علت تخریب‌ها و تغییر کاربری‌های اراضی طبیعی، در هر سه سال مورد بررسی از مساحت جنگل متراکم و مراتع کم تراکم کاسته شده است، در حالی که در طول دوره



شکل ۳- نمودار مقایسه‌ای تغییرات مساحت کاربری‌های مختلف در دوره زمانی مورد مطالعه

Figure 3- Comparative graph of changes in the area of different land uses during the study period

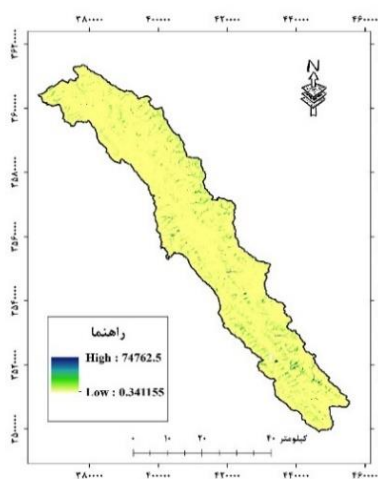
انتقال رسوب تأثیرگذار است. در سناریوهای مختلف کاربری، سطوحی که پوشش گیاهی طبیعی کاهش یافته و به اراضی کشاورزی، باغی یا ساخت‌وساز تبدیل

### نتایج مدل نسبت تحویل رسوب

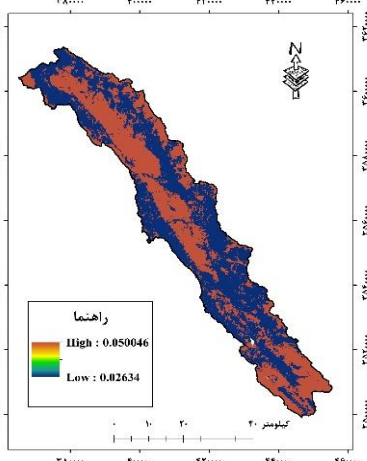
مدل‌سازی با استفاده از ماژول SDR در نرم‌افزار InVEST نشان داد که تغییر کاربری زمین در حوزه آبخیز به‌طور معنی‌داری بر الگوهای فرسایش خاک و

شده‌اند، شاهد افزایش میزان فرسایش پتانسیل، بار رسوب و انتقال مؤثر رسوب به مجاری بوده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل مقادیر پتانسیل هدرروی خاک، صادرات رسوب، رسوب ته‌نشین شده، پیشگیری از فرسایش و پیشگیری از صادرات رسوب در شرایط فعلی به ترتیب برابر با ۳۹/۳۹، ۸/۷۷، ۲۹/۴۴، ۱۴۹/۴۲ و ۵۲۰/۲۴ تن در هکتار محاسبه شد. این در حالی است که این مقادیر برای شرایط آینده و سال ۱۴۲۰ به ترتیب برابر با ۳۹/۶۱، ۸/۸۶، ۲۹/۴۹، ۱۵۰/۳۷ و ۵۲۰/۰۱ تن در پیکسل به دست آمد (شکل ۴ و جدول ۲).

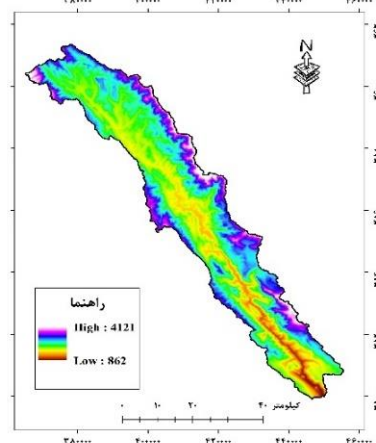
شده‌اند، شاهد افزایش میزان فرسایش پتانسیل، بار رسوب و انتقال مؤثر رسوب به مجاری بوده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده از مدل مقادیر پتانسیل هدرروی خاک، صادرات رسوب، رسوب ته‌نشین شده، پیشگیری از فرسایش و پیشگیری از صادرات رسوب در شرایط فعلی به ترتیب برابر با ۳۹/۳۹، ۸/۷۷، ۲۹/۴۴، ۱۴۹/۴۲ و ۵۲۰/۲۴ تن در هکتار محاسبه شد. این در حالی است که این مقادیر برای شرایط آینده و سال ۱۴۲۰ به ترتیب برابر با ۳۹/۶۱، ۸/۸۶، ۲۹/۴۹، ۱۵۰/۳۷ و ۵۲۰/۰۱ تن در پیکسل به دست آمد (شکل ۴ و جدول ۲).



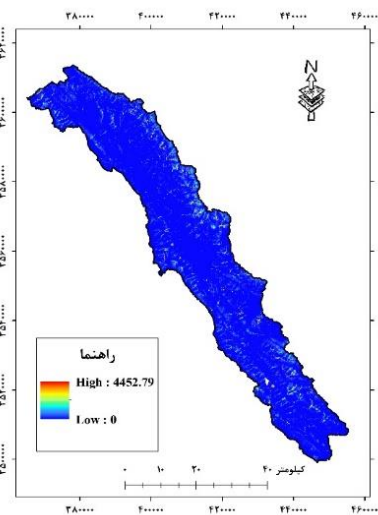
نقشه میزان فعلی RLKS



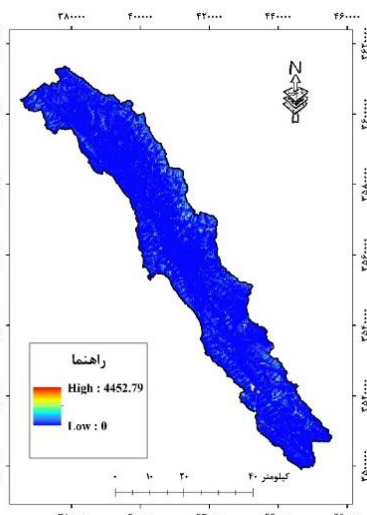
نقشه مدل رقم ارتفاعی منطقه مورد مطالعه



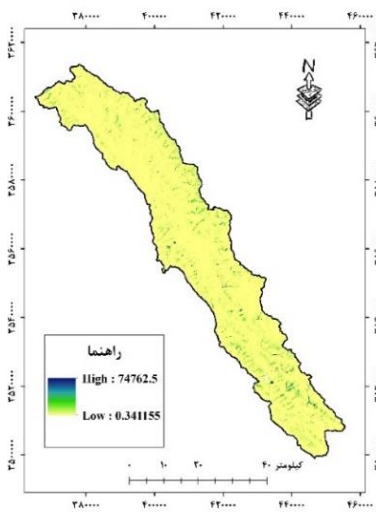
نقشه عامل فرسایش پذیری خاک (K) در منطقه مورد مطالعه



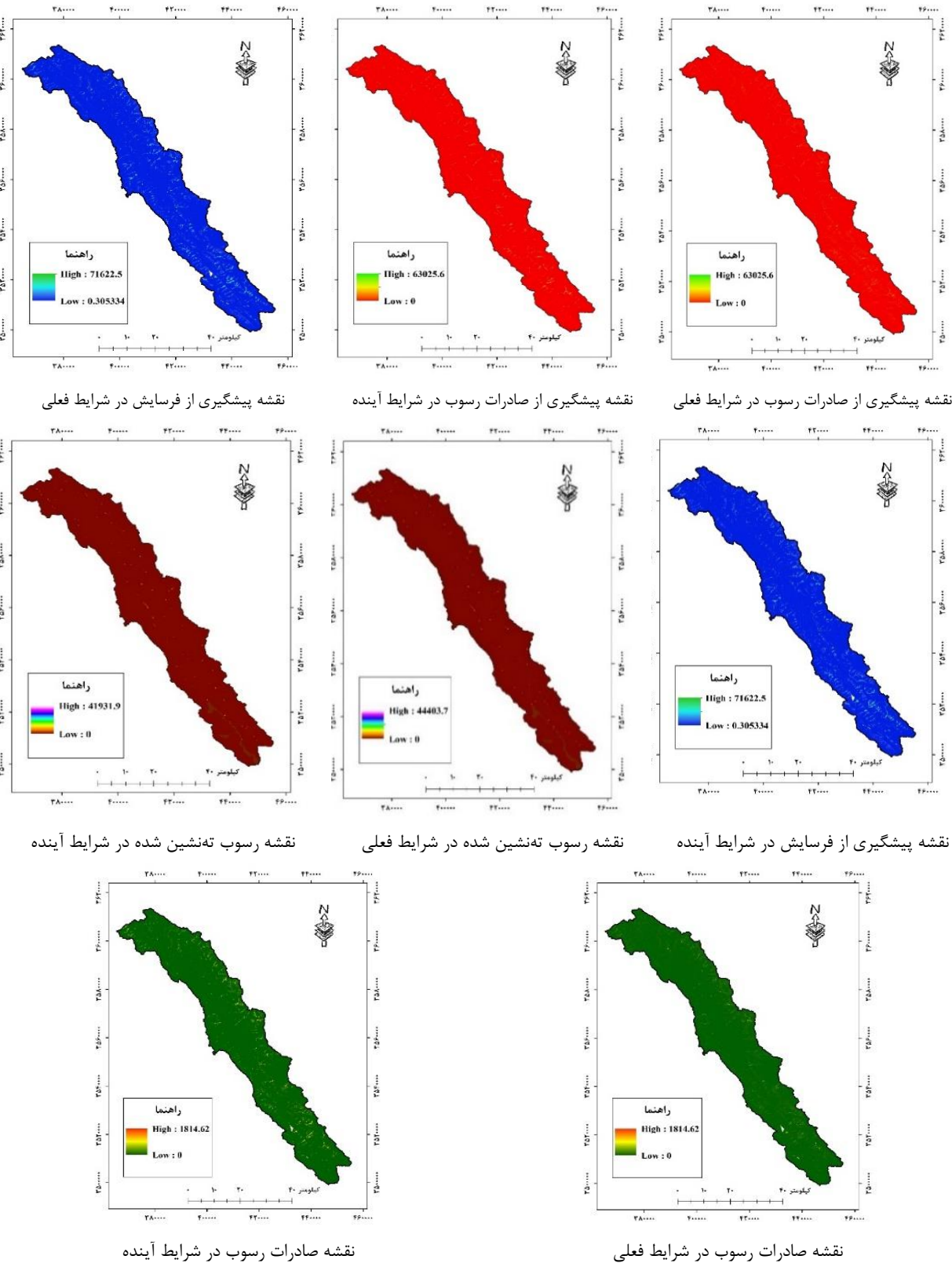
نقشه میزان آینده USLE



نقشه میزان فعلی USLE



نقشه میزان آتی RLKS



نقشه پیشگیری از فرسایش در شرایط فعلی

نقشه پیشگیری از صادرات رسوب در شرایط آینده

نقشه پیشگیری از صادرات رسوب در شرایط فعلی

نقشه رسوب ته‌نشین شده در شرایط آینده

نقشه رسوب ته‌نشین شده در شرایط فعلی

نقشه پیشگیری از فرسایش در شرایط آینده

نقشه صادرات رسوب در شرایط آینده

نقشه صادرات رسوب در شرایط فعلی

شکل ۴- روند تغییرات مقادیر پتانسیل هدرروی خاک، صادرات رسوب، رسوب ته‌نشین شده، پیشگیری از فرسایش و پیشگیری از صادرات رسوب

Figure 4- Trends in changes of soil loss potential, sediment export, deposited sediment, erosion prevention, and sediment export prevention

جدول ۲- مقادیر پتانسیل هدرروی خاک، صادرات رسوب، رسوب ته‌نشین شده، پیشگیری از فرسایش و پیشگیری از صادرات رسوب

Table 2- Values of soil loss potential, sediment export, deposited sediment, erosion prevention, and sediment export prevention

وضعیت تولید رسوب	پتانسیل هدرروی خاک	صادرات رسوب	رسوب ته نشین شده	پیشگیری از صادرات رسوب	پیشگیری از فرسایش
شرایط فعلی	39.39	8.77	29.44	149.42	520.24
شرایط آینده	39.61	8.86	29.49	150.37	520.01

راهنما: کلیه اعداد جدول فوق بر حسب تن بر هکتار می باشد.

### بحث

۱۴۲۰ به ترتیب به ۳۹/۶۱، ۸/۸۶ و ۲۹/۴۹ تن در هکتار افزایش یافته‌اند. همچنین شاخص‌های خدمات بوم-سازگانی شامل پیشگیری از فرسایش از ۱۴۹/۴۲ به ۱۵۰/۳۷ تن در هر پیکسل و پیشگیری از صادرات رسوب از ۵۲۰/۲۴ به ۵۲۰/۰۱ تن در هر هکتار نیز تغییرات اندکی داشته‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که با وجود تغییرات چشمگیر در کاربری اراضی، شاخص‌های رسوب و فرسایش تغییرات ملایمی را تجربه کرده‌اند، اما تداوم روند کنونی می‌تواند منجر به کاهش بیشتر توان بوم‌سازگان در کنترل فرسایش و رسوب در آینده شود. Zabihی و همکاران (۲۰۲۱) نیز به نتایج مشابهی برای حوزه آبخیز تالار دست یافتند و نشان دادند که روند رسوب‌گذاری از جنوب به شمال حوزه دارای روندی افزایشی می‌باشد. تحلیل انجام‌شده با استفاده از مدل SDR در نرم‌افزار InVEST نشان داد که تغییرات کاربری زمین تأثیرات قابل توجهی بر خدمات بوم‌سازگان تنظیمی مرتبط با خاک و رسوب دارد. افزایش سطوح کاربری‌های ناپایدار می‌تواند منجر به تشدید فرسایش و رسوب‌زایی شود، در حالی که حفظ یا احیای پوشش‌های گیاهی طبیعی می‌تواند عملکرد تنظیمی بوم‌سازگان را ارتقاء بخشد که با نتایج تحقیق Barzali و همکاران (۲۰۲۲) همخوانی دارد. نتایج این تحقیق تفاوت میزان نگهداشت رسوب در هر یک از

نتایج حاصل از تحلیل تغییرات کاربری اراضی در حوزه آبخیز بازفت طی دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۲۰ بیانگر روند روبه‌رشد کاربری‌های انسانی به‌ویژه کشاورزی دیم، کشاورزی آبی و مناطق مسکونی بوده و کاهش پوشش‌های طبیعی شامل جنگل‌های متراکم، جنگل‌های کم‌تراکم و مراتع متراکم است. بیشترین افزایش سطح مربوط به کاربری‌های کشاورزی دیم (از ۱۸۳۰ به ۲۸۰۴ هکتار)، کشاورزی آبی از ۱۴۲۴ به ۲۰۰۹ هکتار و مناطق مسکونی از ۱۷۶ به ۳۴۷ هکتار بوده است، در حالی که جنگل‌های متراکم از ۶۴۴۴ به ۵۱۸۲ هکتار و مراتع متراکم از ۳۶۸۱۱ به ۳۱۴۴۳ هکتار کاهش یافته‌اند. همانند نتایج مطالعه Daneshi و همکاران (۲۰۲۰) این تغییرات، با درصد رشد سالانه متفاوت، نشان‌دهنده تبدیل تدریجی کاربری‌های طبیعی به کاربری‌های انسانی در نتیجه افزایش جمعیت، گسترش شهرنشینی و تغییرات اقلیمی است. مدل‌سازی شاخص‌های مرتبط با فرسایش و رسوب با استفاده از ماژول SDR در نرم‌افزار InVEST نیز روندی مشابه را تأیید می‌کند. مقادیر پتانسیل هدررفت خاک، صادرات رسوب و رسوب ته‌نشین شده به ترتیب در سال پایه ۱۳۸۰ برابر با ۳۹/۳۹، ۸/۷۷ و ۲۹/۴۴ تن در هر هکتار بوده و در سناریوی پیش‌بینی شده برای سال

برنامه‌های توسعه پایدار بیش از پیش احساس می‌شود. بهره‌گیری از ابزارهای تصمیم‌یار مانند مدل InVEST می‌تواند در پیش‌بینی اثرات تغییرات کاربری و ارائه راهکارهای مدیریتی نقش مؤثری ایفا کند.

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده که حاکی از آن است که کاربری زمین و شیوه مدیریت آن یکی از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در کارایی خدمات بوم‌سازگان مرتبط با تنظیم فرسایش و رسوب است. این یافته‌ها با مطالعات مشابه در سایر مناطق کشور و جهان سازگار است، که نشان داده‌اند تغییرات انسانی در کاربری اراضی، به‌ویژه تبدیل اراضی طبیعی به کشاورزی، سبب تشدید فرسایش خاک و تهدید خدمات تنظیمی بوم‌سازگان می‌شود.

استفاده از ابزارهای مدل‌سازی فضایی مانند InVEST، می‌تواند دیدی علمی و داده‌محور با لحاظ دیدگاه ذی‌نفعان، سیاست‌ها و برنامه‌های توسعه‌ای آینده خدمات بوم‌سازگان فراهم آورد و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه‌تر در حوزه مدیریت منابع طبیعی باشد؛ بنابراین پیشنهاد می‌گردد جهت مدیریت یکپارچه حوزه تمام خدمات بوم‌سازگان نظیر تولید آب، ترسیب کربن و خدمات تفرجگاهی تحت اثر توامان کاربری اراضی و تغییر اقلیم مطالعه شود.

کاربری‌های اراضی مختلف را ارائه می‌دهد. بنابراین، با توجه به اهمیت نگهداشت خاک در بالادست سطح حوزه آبخیز و در راستای مدیریت پایدار منابع طبیعی، توصیه می‌شود که برنامه‌ریزان و مدیران حوزه آبخیز، سیاست‌هایی مبتنی بر حفظ کاربری‌های پایدار و اعمال شیوه‌های حفاظت خاک و کنترل رسوب را در دستور کار قرار دهند. در این راستا اجرای عملیات آبخیزداری در حوزه‌های با میزان تخریب و فرسایش بیش از حد مجاز جهت حفاظت خاک و تثبیت شرایط هیدرولوژیکی حوزه از جمله راهکارهای اجرایی و مدیریتی می‌باشد. از لحاظ مطالعاتی نیز همانطور که در پژوهش Zarandian و همکاران (۲۰۲۳) نیز اثبات شد.

به‌طور کلی، به دلایل مختلف از جمله افزایش جمعیت، رشد و توسعه شهرسازی، توسعه اقتصادی و معیشتی، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و همچنین تخریب مراتع و جنگل‌ها، شاهد افزایش چشمگیر اراضی کشاورزی دیم، اراضی کشاورزی آبی و مناطق مسکونی و کاهش سطح جنگل‌ها و مراتع در حوزه آبخیز بازفت هستیم. کاهش پوشش‌های گیاهی به‌ویژه جنگل‌ها و مراتع موجب تضعیف عملکردهای طبیعی حوزه آبخیز در مهار فرسایش و حفظ کیفیت خاک شده است. بنابراین، لزوم بازنگری در سیاست‌های کاربری اراضی، حفاظت و احیای پوشش‌های طبیعی و اجرای

### References

Afifi M E. (2020). Modeling land use changes using Markov chain model and LCM model. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 20(56), 141-158. <https://doi.org/10.29252/jgs.20.56.141>

Al-Ahmadi, F.S., & A.S. Hames. (2009). Comparison of four classification methods to extract land use and land cover from raw satellite images for some remote arid areas. *Kingdom of Saudi Arabia. Earth*

*Science*, 20, 167-191. <https://doi.org/10.4197/Ear.20-1.9>

Asadolahi, Z., & Norozi nazar, M. (2020). Quantification of the ecosystem service of erosion control under the influence of climate change in the Gorgan Rud watershed. *Environmental research*, 11(21), 3-16. <https://doi.org/20.1001.1.20089597.1399.11.21.2.1> (In Persian)

- Asadolahi, Z., Salmanmahiny, A., & Mirkarimi, H. (2015). Modeling the supply of sediment retention ecosystem service (Case study: eastern part of Gorgan-rud watershed). *Environmental Erosion Research Journal*, 5(3), 961-75. <https://doi.org/20.1001.1.22517812.1394.5.3.6.6> (In Persian)
- Bai, Y., Ochuodho, T. O., & Yang, J. (2019). Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA. *Ecological Indicators*, 102, 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.079>
- Barzali, M., Azimi, M., Abdolhoseini, M., & Lotfi, A., (2022). Evaluating rangeland ecosystem services from the perspective of sediment retention potential using the InVEST software package (Case study: Atrak watershed). *Iranian Rangeland and Desert Research*, 29(1), 133-144. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2022.126019> (In Persian)
- Bogdan, S. M., Pătru-Stupariu, I., & Zaharia, L. (2016). The assessment of regulatory ecosystem services: the case of the sediment retention service in a mountain landscape in the southern Romanian Carpathians. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 12-27. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.008>
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75, 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F., & Marchi, L. (2013). Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments. *Geomorphology*, 188, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.007>
- Daneshi, A., Najafinezhad, A., Panahi, M., & Zarandian, A. (2020). Predicting land use change effects on habitat quality of Narmada Dam Basin in Golestan Province. *Journal of Degradation and Rehabilitation of Natural Land*, 1(1), 120-130. (In Persian)
- Deng, Z., Zhu, X., He, Q., & Tang, L. (2019). Land use/land cover classification using time series Landsat 8 images in a heavily urbanized area. *Advances in Space Research*, 63, 2144-2154. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.005>
- Deore, M.S.J. (2005). Prioritization of Micro-watershed of Upper Bhama Basin on the Basis of Soil Erosion Risk Remote Sensing and GIS Technology. *Doctoral Dissertation, University of Pune Pune*.
- Falahatkar, S., Hosseini, S.M., Salman Mahiny, A.R., & Ayoubi, S. (2016). Prediction of land use/cover change by using LCM model (Case study in Iran). *Environmental Researches*, 7(13), 163-174. (In Persian)
- Fu, Q., Li, B., Hou, Y., Bi, X., & Zhang, X. (2017). Effects of land use and climate change on ecosystem services in central Asia's arid regions: a case study in Altay Prefecture, China. *Science of the Total Environment*, 607, 633-646. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.241>
- Haghdadi, M., Heshmati, GH. A., & Azimi, M.S. (2018). Assessment of water yield service on the basis of InVEST tool (Case study: Delichai watershed). *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(4), 275-290. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.14361.2910>
- Jensen, J. (2005). *Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (3rd.ed)*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 526 pp.
- Kusi, K. K., Khattabi, A., & Mhammdi, N. (2023). Evaluating the impacts of land use and climate changes on water ecosystem services in the Souss watershed, Morocco. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(2), 126. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11206-6>
- Lang, Y., Song, W., & Zhang, Y. (2017). Responses of the water-yield ecosystem service to climate and land use change in Sancha River Basin, China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 101, 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.06.003>
- Lopez-vicente, M., Poesen, J., Navas, A., & Gaspar, L. (2013). Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees. *Catena*, 102, 62-

73.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.01>
- Mather, A. S., 1999. Land Use and Cover Change, *Land Use Policy*, 16, 143.
- Mohammadyari, F. (2023). Evaluation the effects of land use changes on ecosystem services based on the InVEST model (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Town and Country Planning*, 15 (2), 327-342.  
<https://doi.org/10.22059/jtcp.2023.365685.670408> (In Persian).
- Nikkami, D. and Mahdian, M. H. (2015). Rainfall erosivity mapping in Iran. *Watershed Engineering and Management*, 6(4), 364-376.  
<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.100819> (In Persian).
- Ochoa, V., & Urbina-Cardona, N. (2017). Tools for spatially modeling ecosystem services: publication trends, conceptual reflections and future challenges. *Ecosystem Services*, 26, 155-169.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.011>
- 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)*. Washington, DC: United State Department of Agriculture.
- Roose, E. (1996). *Land Husbandry Components and Strategy*. Rom. FAO.
- Sahle, M., Saito, O., Fürst, C., & Yeshitela, K. (2019). Quantifying and mapping of water-related ecosystem services for enhancing the security of the food-water-energy nexus in tropical data-sparse catchment. *Science of the Total Environment*, 646, 573-586.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.347>
- Shalaby, A., & Tateishi, R. (2007). Remote Sensing and GIS for mapping and monitoring land cover and land use changes in the Northwestern coastal zone of Egypt. *Applied Geography*, 27 (2007), 28-41.  
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2006.09.004>
- Sharp, R., H.T. Tallis, T. Ricketts, A.D. Guerry, S.A. Wood, R. Chaplin-Kramer, E. Nelson, D. Ennaanay, S. Wolny, N. Olwero, K. Vigerstol, D. Pennington, G. Mendoza, J. Aukema, J. Foster, J. Forrest, D. Cameron, K. Arkema, E. Lonsdorf, C. Kennedy, G. Verutes, C.K. Kim, G. Guannel, M. Papenfus, J. Toft, M. Marsik, J. Bernhardt, R. Griffin, K. Glowinski, N. Chaumont, A. Perelman, M. Lacayo, L. Mandle, P. Hamel and A.L. Vogl. (2018). *InVEST User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford, 307 pp.
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M., Mandle, L., Hamel, P. and Vogl, A.L. (2014). *InVEST User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford.
- Singh, P., & Khanduri, K. (2011). Land use and land cover change detection through Remote Sensing & GIS technology: case study of pathankot and dhar kalan tehsils, Punjab. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 4, 839-846.
- Sougnéz, N., Wesemael, B., & Vanacker, V. (2011). Low erosion rates measured for steep sparsely vegetated catchments in southeast Spain. *Catena*, 84, 1-11.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.010>
- Vigerstol, K. L., & J. E. Aukema., (2011). A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 92(10), 2403-2409.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.040>
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., & Roberts, A.M. (2012). Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138, 74-88.  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
- Vogl, A., Tallis, H., Douglass, J., Sharp, R., Wolny, S., Veiga, F., Benitez, S., León, J., Game, E., Petry, P., Guimerães, J., Lozano, J.S. (2016). *Resource Investment*

- Optimization System (RIOS), Introduction and Theoretical Documentation*. United Nations, Stanford (CA).
- Wang, S., Hu, M., Wang, Y., & Xia, B. (2022). Dynamics of ecosystem services in response to urbanization across temporal and spatial scales in a mega metropolitan area. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103561. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103561>
- Xie, Z., Li, X., Chi, Y., Jiang, D., Zhang, Y., Ma, Y., & Chen, S. (2021). Ecosystem service value decreases more rapidly under the dual pressures of land use change and ecological vulnerability: A case study in Zhujiajian Island. *Ocean & Coastal Management*, 201, 105493. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105493>
- Zabihi, M., Moradi, H., Khaledi Darvishan, A., & Gholamalifard, M. (2021). Application of InVEST ecosystem services model to prioritize sub-watersheds of Talar in term of soil erosion, sediment retention and yield. *Environment and Water Engineering*, 7(2), 293-303. <https://doi.org/10.22034/jewe.2020.257980.1470>
- Zarandian, A., Mohammadyari, F., Mirsanjari, M. M., & Visockiene, J. S. (2023). Scenario modeling to predict changes in land use/cover using Land Change Modeler and InVEST model: a case study of Karaj Metropolis, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 195(2), 273. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10740-2>
- Zhang, X., F. Zhang, Y. Qi, L. Deng, X. Wang & S. Yang. (2019). New research methods for vegetation information extraction based on visible light remote sensing images from an unmanned aerial vehicle (UAV). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 78, 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.001>