Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 16, Issue 2, 2025 p: 114-126

OPEN ACCESS

Research Paper

Quantitative Assessment of the Ecosystem Service of Sediment Retention using the InVEST-SDR Model and Its Economic Valuation

Sharif Joorabian Shooshtari[1], Fatemeh Jahanishakib[2] and Tahereh Ardakani[3]

1- Department of Nature Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran
2- Department of Environmental Sciences, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran, (Corresponding author: Jahanishakib@birjand.ac.ir)
3- Department of Environmental Sciences & Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran

Received:08 February, 2025 Revised:08 April, 2025 Accepted: 17 May, 2025

Extended Abstract

Background: At a global level, land degradation is a serious challenge to the productive capacity of water and land resources. Soil erosion, water loss, vegetation cover reduction, biodiversity loss, and nutrient depletion are all signs of land degradation. The most significant indicator of land degradation is soil erosion, which, due to the water and nutrient loss, is one of the most important indicators of soil degradation. Soil erosion and sediment production are influenced by the interplay of climate, land cover, and land use. Due to this complexity, models are often used to support soil and water management, such as the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) and the Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST). In the present study, the InVEST Sediment Delivery Ratio model was used for sediment modeling. Research on sediment modeling and soil retention in South Khorasan Province is essential due to the region's arid and semi-arid climate, which poses serious challenges of soil erosion and land degradation. Conducting these studies can help identify critical areas and provide effective management strategies to preserve natural resources and improve the region's environmental sustainability.
Estimating the economic value of functions and services of natural resources is a challenging and complex task, but essential for economic management. In recent years, the necessity of determining the value of ecosystem services and biological resources has been firmly established worldwide, and efforts have been made in this regard as well. The present study aims to quantitatively assess the ecosystem service of sediment retention using the InVEST-SDR model and its economic valuation in the watersheds of the eastern border regions of the country, located in South Khorasan Province. No research in the study area has utilized the InVEST model, highlighting a significant research gap.

Methods: The study area includes 10 watersheds in the eastern region of South Khorasan Province, covering an area of 2,008,357 hectares. Soil erosion and sediment yield modeling were initially conducted in this study. The InVEST Sediment Delivery Ratio (SDR) model, a spatial model operating at the resolution of the digital elevation model (30 m), was used to estimate soil erosion, retention, and sediment yield annually in the northeastern part of South Khorasan Province. The model first calculates the annual soil loss using the soil loss algorithm, then determines the SDR as a function of the hydrological connectivity of the basin, and finally performs the economic valuation. The cost replacement or restoration method was employed for the economic valuation of sediment retention. In this research, therefore, the economic value of preserving soil fertility was defined based on three elements: nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K). Surface soil is the first part susceptible to soil erosion, and the nutrient content of the soil at this level decreases significantly. This decrease results in a reduction in organic nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), and other elements.

Results: The most substantial sediment retention is observed in dense forests, with dense pastures ranking second within the region. This aligns with the conclusions drawn in similar research. The Esfadan and Shahrokht watersheds showed the highest sediment production with more than 13 and 12 million tons, respectively, among other basins. The highest sediment retention rate was in the Esfadan watershed, with 22626499.4 tons, and the lowest was in the Khaf salt marsh watershed, with 1316208.6 tons. The soil retention rate at the pixel level was also obtained in the range of 0-1058.3 tons. The lowest and highest soil loss rates were also obtained from 4845857.7

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

Copyright ©2025 Joorabian Shooshtari et al. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License which allows users to read, copy, distribute and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

to 63854710.6 tons for the Khaf and Esfadan salt marsh basins, respectively. The range of 0-1489 tons per pixel was calculated for soil loss. On the other hand, areas without vegetation cover (especially built-up areas) have the lowest sediment retention capacity and the highest sediment export. The results of economic valuation in the present study indicate that the average value of sediment retention service per pixel (900 m^2) is equivalent to 2731.48 Iranian Rials, which amounts to 30349.77 Iranian Rials per hectare.

Conclusion: The Esfadan and Shahrakht Watersheds, with over 13 and 12 million tons, respectively, had the highest sediment production among the other watersheds. The Namakzar Khaf Watershed showed the lowest sediment amount, with 737504 tons. The average slope in the Namakzar Khaf Watershed is 1.6%, which has the lowest sediment production and the lowest slope among the other watersheds. In contrast, the average slope in the Esfadan Watershed, which has the highest sediment production, is 14.7%, and it has the second-highest slope after the Ghaen Watershed. At the pixel level, sediment amounts in the eastern border watershed of the country ranged from 0 to 747.6 tons. The highest sediment retention was observed in the Esfadan Watershed, with 22626499 tons, and the lowest in the Namakzar Khaf Watershed, with 1316208.6 tons. The minimum and maximum soil loss rates were obtained for the Namakzar Khaf and Esfadan Watersheds, respectively, ranging from 4845857 to 6385471 tons.

Keywords: Erosion, Mollenig, Replacement cost, Soil fertility, South Khorasan

How to Cite This Article: Joorabian Shooshtari, Sh., Jahanishakib, F., & Ardakani, T. (2025). Quantitative Assessment of the Ecosystem Service of Sediment Retention using the InVEST-SDR Model and Its Economic Valuation. *J Watershed Manage Res,* 16(2), 114-126. DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

OPEN ACCESS

مقاله پژوهشی

ارزیابی کمی خدمت اکوسیستمی نگه‌داشت رسوب با استفاده از مدل InVEST-SDR و ارزش‌گذاری اقتصادی آن

شریف جورابیان شوشتری[۱]، فاطمه جهانی شکیب[۲] و طاهره اردکانی[۳]

۱- استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاثانی، ایران
۲- استادیار، گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران، (نویسنده مسوول: Jahanishakib@birjand.ac.ir)
۳- استادیار، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰ تاریخ ویرایش:۱۴۰۴/۰۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷
صفحه: ۱۱۴ تا ۱۲۶

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: در سطح جهانی، تخریب زمین یک چالش جدی برای ظرفیت تولیدی منابع آب و زمین است. هدررفت خاک، آب، پوشش گیاهی، تنوع زیستی و همچنین کاهش مواد مغذی، همگی از نشانه‌های تخریب زمین هستند. مهم‌ترین نشانه تخریب زمین، تخریب خاک است. فرسایش خاک بر اثر آب و کاهش عناصر غذایی از مهم‌ترین شاخص‌های تخریب خاک است. فرسایش خاک و تولید رسوب تحت تأثیر روابط متقابل بین اقلیم، پوشش زمین و بهره‌برداری از زمین است. با توجه به این پیچیدگی، مدل‌هایی اغلب جهت پشتیبانی از مدیریت خاک و آب مانند ابزار ارزیابی آب و خاک و InVEST استفاده می‌شوند. در پژوهش حاضر، از مدل نسبت تحویل رسوب InVEST جهت مدل‌سازی رسوب استفاده شد. تحقیق در زمینه مدل‌سازی رسوب و نگه‌داشت خاک در استان خراسان جنوبی ضروری است زیرا این منطقه به‌دلیل شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، با چالش‌های جدی فرسایش خاک و کاهش کیفیت زمین مواجه است. انجام این تحقیقات می‌تواند به شناسایی مناطق بحرانی و ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر برای حفظ منابع طبیعی و بهبود پایداری محیط زیست منطقه کمک کند. برآورد ارزش اقتصادی کارکردها و خدمات منابع طبیعی کار مشکل و پیچیده‌ای است اما برای مدیریت اقتصادی ضروری است. لزوم تعیین ارزش خدمات اکوسیستمی و منابع زیستی در سال‌های اخیر در جهان به قطعیت رسیده است و در این‌خصوص نیز تلاش‌هایی شده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کمی خدمت اکوسیستمی نگه‌داشت رسوب با استفاده از مدل InVEST-SDR و ارزش‌گذاری اقتصادی آن در حوزه‌های آبخیز مرز شرقی کشور واقع در استان خراسان جنوبی انجام شده است. هیچ تحقیقی در منطقه مورد مطالعه از مدل نسبت تحویل رسوب InVEST استفاده نکرده است که نشان‌دهنده یک شکاف تحقیقاتی قابل‌توجه است.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه شامل ۱۰ حوزه آبخیز در شرق استان خراسان جنوبی با مساحت ۳۵۷ /۰۰۸ /۲ هکتار است. در این مطالعه، ابتدا از مدل‌سازی هدررفت خاک و تولید رسوب استفاده گردید. مدل نسبت تحویل رسوب InVEST یک مدل مکانی است که در اندازه سلول مدل رقومی ارتفاع (۳۰ متر) کار می‌کند و برای تخمین هدررفت خاک، نگه‌داشت و تولید رسوب سالانه در شمال‌شرقی استان خراسان جنوبی به‌کار برده شد. مدل ابتدا هدررفت سالانه خاک را با استفاده از الگوریتم هدررفت خاک محاسبه می‌کند، سپس SDR را به‌عنوان تابعی از اتصال هیدرولوژیکی حوضه تعیین می‌کند و در نهایت ارزش‌گذاری اقتصادی انجام می‌شود. به‌منظور ارزش‌گذاری اقتصادی نگه‌داشت رسوب، از روش هزینه جایگزین یا بازسازی استفاده شده است. به این‌ترتیب در این پژوهش، ارزش اقتصادی حفظ حاصل‌خیزی خاک سطحی مبتنی‌بر سه عنصر ازت، فسفر و پتاسیم تعریف گردید. خاک سطحی، نخستین بخشی است که در معرض فرسایش خاک قرار دارد و میزان مواد غذایی خاک در این سطح به‌شدت کاهش می‌یابد. این کاهش موجب کم‌شدن مواد آلی ازت (N)، فسفر (P)، پتاسیم (K) و سایر عناصر می‌شود.

یافته‌ها: بیشترین میزان نگه‌داشت رسوب در کاربری جنگل پرتراکم و پس از آن مرتع پرتراکم در منطقه بود. حوزه‌های آبخیز اسفدان و شاهرخت بیشترین میزان تولید رسوب را به‌ترتیب با بیش از ۱۳ و ۱۲ میلیون تن در بین سایر حوضه‌ها نشان دادند. بیشترین میزان نگه‌داشت رسوب در حوزه آبخیز اسفدان با ۲۲۶۲۶۴۹۹/۴ تن و کمترین میزان را حوزه آبخیز نمک‌زار خواف با ۱۳۱۶۲۰۸/۶ تن نشان داد. میزان نگه‌داشت خاک در سطح پیکسل در دامنه ۰ تا ۱۰۵۸/۳ تن به‌دست‌آمد. کمترین و بیشترین میزان هدررفت خاک از ۴۸۴۵۸۵۷/۷ تا ۶۳۸۵۴۷۱۰/۶ تن به‌ترتیب برای حوضه‌های نمک‌زار خواف و اسفدان به‌دست آمدند. دامنه ۰ تا ۱۴۸۹ تن بر پیکسل برای هدررفت خاک محاسبه شد. از سوی دیگر، مناطق بدون پوشش گیاهی (به‌ویژه مناطق ساخته‌شده) کمترین ظرفیت نگهداری رسوب و بیشترین بار رسوب را فراهم می‌کنند. نتایج ارزش‌گذاری اقتصادی در پژوهش حاضر نشان دادند که میانگین ارزش خدمت نگه‌داشت رسوب در هر پیکسل (به مساحت ۹۰۰ مترمربع)، معادل ۲۷۳۱/۴۸ ریال بود که مقدار آن در هر هکتار، معادل ۳۰۳۴۹/۷۷ ریال محاسبه گردید.

نتیجه‌گیری: حوزه‌های آبخیز اسفدان و شاهرخت به‌ترتیب با بیش از ۱۳ و ۱۲ میلیون تن، بیشترین میزان تولید رسوب را در میان سایر حوزه‌ها داشتند. حوزه آبخیز نمک‌زار خواف با ۷۳۷۵۰۴ تن، کمترین میزان رسوب را نشان داد. میانگین شیب در حوضه آبخیز نمک‌زار خواف ۱/۶ درصد است که این حوضه کمترین میزان تولید رسوب و کمترین شیب را در میان سایر حوضه‌ها دارد. در مقابل، میانگین شیب در حوضه اسفدان که بیشترین میزان تولید رسوب را دارد، ۱۴/۷ درصد است و پس از حوضه قائن، بالاترین میزان شیب را به خود اختصاص داده است. در سطح پیکسل، میزان رسوب در حوزه مرزی شرق کشور از ۰ تا ۷۴۷/۶ تن متغیر بود. بیشترین میزان نگه‌داشت رسوب در حوزه آبخیز اسفدان با ۲۲۶۲۶۴۹۹ تن و کمترین میزان در حوزه آبخیز نمک‌زار خواف با ۱۳۱۶۲۰۸/۶ تن مشاهده شدند. کمترین و بیشترین میزان هدررفت خاک به‌ترتیب برای حوضه‌های نمک‌زار خواف و اسفدان به‌ترتیب از ۴۸۴۵۸۵۷ تا ۶۳۸۵۴۷۱ تن به‌دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: حاصل‌خیزی خاک، خراسان جنوبی، فرسایش، مدل‌سازی، هزینه جایگزین

مقدمه

در سطح جهانی، تخریب زمین یک چالش جدی برای ظرفیت تولیدی منابع آب و زمین است. هدررفت خاک، آب، پوشش گیاهی، تنوع زیستی و همچنین کاهش مواد مغذی، همگی از نشانه‌های تخریب زمین هستند. مهم‌ترین نشانه تخریب زمین، تخریب خاک است. فرسایش خاک بر اثر آب و کاهش عناصر غذایی از مهم‌ترین شاخص‌های تخریب خاک است (Debie & Awoke, 2023). تولید رسوب اضافی باعث

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

کاهش حاصل‌خیزی خاک، ظرفیت نگهداری آب و مواد مغذی و افزایش مواد جامد معلق در آب می‌شود. این‌ها سلامت اکوسیستم را تهدید، خطر رسوب‌گذاری مخزن را افزایش، عملکرد مخزن را کاهش و هزینه‌ها را افزایش می‌دهند (Eyvazi *et al*., 2023). تولید رسوب، میزان رسوبی که به خروجی حوضه می‌رسد را توصیف می‌کند. این مقدار توسط فرسایش خاک از سطح زمین به‌وسیله بارش–رواناب و همچنین فرآیندهای انتقال رسوب بر اساس اتصال زمین تعیین می‌شود (Zhou *et al*., 2019).

فرسایش خاک و تولید رسوب تحت تأثیر روابط متقابل بین اقلیم، پوشش زمین و بهره‌برداری از زمین است. با توجه به این پیچیدگی، مدل‌هایی اغلب جهت پشتیبانی از مدیریت خاک و آب مانند ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) و (InVEST) استفاده می‌شوند (Mani & Hannachi, 2019). در پژوهش حاضر، از مدل نسبت تحویل رسوب InVEST جهت مدل‌سازی رسوب استفاده شد. این مدل به‌عنوان بخشی از پروژه سرمایه طبیعی یک مشارکت بین حفاظت از طبیعت و صندوق جهانی حیات وحش (WWF) است که در دانشگاه استنفورد و مینه‌سوتا توسعه یافته است.

در حوزه آبخیز کروزِ فیلیپین، مقدار رسوبات واردشده به نهرها و نگه‌داشت‌شده در منطقه براساس نوع پوشش زمین و مدل InVEST-SDR برآورد شد (Ureta *et al*., 2022). نتایج مطالعه آن‌ها اهمیت مدیریت استراتژیک کیفیت آب و در نظر گرفتن تغییرات خدمات اکوسیستم را هنگام تبدیل زمین از یک نوع پوشش زمین به نوع دیگر نشان دادند. لذا، یک فرصت قابل‌توجه برای بهبود خدمات اکوسیستمی به کیفیت آب از طریق حفاظت از خاک و شیوه‌های کشاورزی پایدار می‌تواند در مناطق زراعی اجرا شود (Ureta *et al*., 2022).

فرسایش و تنظیم رسوب در حوضه آبخیز ریو گراند در بیوم سرادو برزیل با استفاده از دو مدل InVEST و ARIES مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت (Brazão *et al*., 2022). مدل InVEST خدمات تحویل و نگهداری رسوب را نقشه‌سازی و کمی‌سازی می‌کند، درحالی‌که برنامه ARIES تنظیم رسوب را از طریق محاسبات خدمات اکوسیستم مدل‌سازی می‌نماید. این مطالعه تخمین‌هایی را از حفظ رسوب در وضع موجود ارائه و محدودیت‌های مدل‌های مورد استفاده را برجسته می‌کند. مدل InVEST میانگین اثرات سالانه را تحت شرایط حالت پایدار ارائه می‌کند، ولی مدل ARIES تلفات و حفظ خاک را با استفاده از معادله جهانی اصلاح شده فرسایش خاک محاسبه می‌نماید (Brazão *et al*., 2022).

همچنین، مدل InVEST-SDR برای تخمین هدررفت خاک و بار رسوب در مناطقی مانند حوزه آبای در اتیوپی که با کمبود داده مواجه هستند مورد استفاده قرار گرفت. پیش‌بینی‌های مدل، الگوها و نرخ‌های متفاوت از هدررفت خالص خاک و تولید رسوب را در حوزه‌های آبخیز مختلف نشان دادند. نتایج آن‌ها حاکی از کاربرد نتایج مدل اجراشده در شناسایی نقاط با پتانسیل فرسایش زیاد و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز برای برنامه‌ریزی حفاظت از خاک و آب در مناطق با داده کم و ارتفاعات بالادست نیل بود (Gashaw *et al*., 2021).

تجزیه و تحلیل کنترل رسوب مبتنی بر داده‌های کامل‌تر، با استفاده از مدل ابزار ارزیابی خاک و آب SWAT در حوضه آبخیز سیپوناگارا در اندونزی نیز انجام گرفت. این مطالعه با هدف ارزیابی تاثیر فرسایش و رسوب بر حوزه آبخیز و ارائه توصیه‌هایی برای اقدامات مؤثر کنترل رسوب اجرا شد (Fitriyana *et al*., 2020). یافته‌های این مطالعه برای هدایت استراتژی‌های مدیریت آبخیز و اجرای اقدامات کنترل رسوب هدفمند برای کاهش اثرات نامطلوب فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز مورد مطالعه قابل استفاده هستند.

در ایران، برزعلی و همکاران (Barzali *et al.,* 2022)، قابلیت نگه‌داشت رسوب را در حوزه آبخیز اترک بر اساس کارکرد کاهش میزان از دست‌رفتن اراضی و حفظ حاصل‌خیزی خاک با استفاده مدل SDR در بسته نرم‌افزاری InVEST برآورد نمودند. ذبیحی و همکاران (Zabihi *et al*., 2021)، اولویت‌بندی زیرآبخیزهای تالار در استان مازندران را با استفاده از مدل InVEST از نظر هدررفت خاک، نگه‌داشت و تولید رسوب مورد بررسی قرار دادند.

برآورد ارزش اقتصادی کارکردها و خدمات منابع طبیعی کار مشکل و پیچیده‌ای است اما برای مدیریت اقتصادی ضروری است. به‌دست‌آوردن ارقام کمی از ارزش‌های منابع طبیعی باتوجه به مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده ارزش کل اقتصادی بسیار مشکل است (Chahouki & Sanaei, 2018). همچنین، اگر ارزش‌گذاری این خدمات برحسب واحدهای غیر قابل مقایسه با سایر کالاها باشد، افراد غالباً جز مجانی بودن تصور دیگری از کالاها و خدمات منابع طبیعی نخواهند داشت. از این‌رو، عدم توجه به قیمت آن‌ها در سطح تصمیم‌گیری منجر به اتخاذ سیاست‌های ناپایدار می‌شود (Saleh & Poorasghar, 2014). برآورد ارزش اقتصادی به‌تنهایی کمکی به حفظ محیط زیست و منابع طبیعی نخواهد کرد؛ بنا بر این، ارزش‌گذاری ابزاری است که باید برای یک هدف مشخص به‌کار گرفته شود (Jafari *et al*., 2021)؛ در غیر این صورت، صرفاً اعداد و ارقامی است که به‌تنهایی فاقد ارزش هستند. همواره یکی از موضوعات محوری و یا یکی از دغدغه‌های مهم در اقتصاد محیط زیست، یافتن راه‌هایی برای تخصیص ارزش‌های مناسب به کالاها و خدمات محیط زیستی بوده است. در سال ۲۰۱۶، لزوم تعیین ارزش خدمات اکوسیستمی و منابع زیستی در جهان به قطعیت رسید (Ninan & Kontoleon, 2016) و در این‌خصوص نیز تلاش‌هایی شده است.

ساندن و کینگ (Sanden & King, 1998) روش هدانیک را برای به‌دست آوردن ارزش حفاظت خاک در بازار کشت‌وکار در بخش مانیلا استرالیا به‌کار گرفتند. یافته‌های رگرسیون قیمت بازاری هدانیک نشان دادند که شرایط خاک (مثلا عمق خاک) قیمت ضمنی ۲/۲۸ دلار در هکتار را دارا بود.

ابراهیمی (Ebrahimi, 2013) به‌منظور کمی‌سازی کارکرد حفظ خاک از روش MPSIAC استفاده نمود. سپس برای برآورد ارزش اقتصادی کارکرد حفظ خاک، روش هزینه

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

جایگزینی را براساس هزینه‌های احداث سازه‌های مصنوعی نظیر سد گابیونی برای به تله‌اندازی رسوبات به‌کار برد.

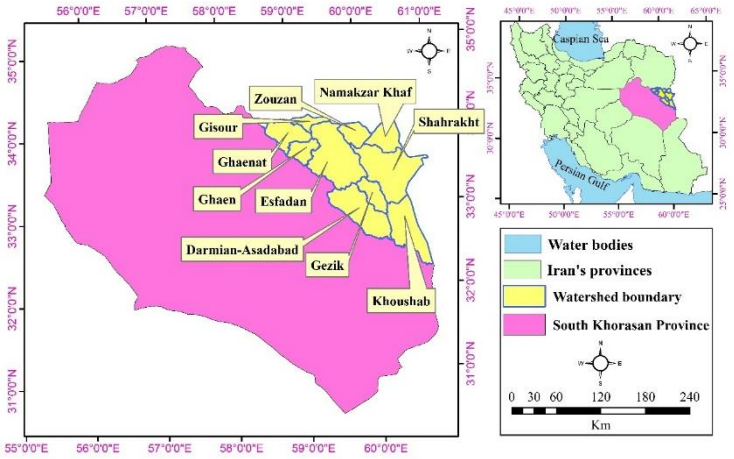
قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al.*, 2016) با استفاده از روش جایگزینی مواد مغذی، ارزش اقتصادی حفظ حاصل‌خیزی خاک در مراتع احیاشده ناشی از پروژه ترسیب کربن در حسین آباد غیناب را طی سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۳ تعیین کردند. برای نشان دادن نقش افزایش پوشش گیاهی بر ارزش حفظ حاصل‌خیزی خاک، مراتع تخریب‌یافته هم‌جوار به‌عنوان شاهد در نظر گرفته شدند. اطلاعات مربوط به هدررفت خاک و مقادیر عناصر غذایی خاک (NPK) حفظشده بر اثر فعالیت‌های احیایی از گزارشات پروژه ترسیب کربن استخراج شد. برای سال ۱۳۹۳، میزان فرسایش بادی با مدل اریفر (IRIFR) برآورد شد و هزینه‌های جایگزینی عناصر حفظشده خاک با کودهای شیمیایی برای تعیین ارزش اقتصادی خاک محاسبه گردیدند.

هانارخلیلیانی (Hanare Khaliani, 2015) به‌منظور کمی‌سازی میزان فرسایش و رسوب با روش MPSIAC، منطقه را به واحدهای همگن تقسیم نمود. سپس ارزش سالانه‌ی کارکرد کنترل رسوبات را در حوزه سروآباد کردستان با رویکرد هزینه فرصت برآورد نمود. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کمی خدمت اکوسیستمی نگه‌داشت رسوب با استفاده از مدل InVEST-SDR و ارزش‌گذاری اقتصادی آن در حوزه‌های آبخیز مرز شرقی کشور واقع در استان خراسان جنوبی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقهٔ مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل ۱۰ حوزه آبخیز در شرق استان خراسان جنوبی با مساحت ۳۵۷ /۰۰۸ /۲ هکتار است (شکل ۱). دامنه ارتفاعی از ۵۷۸ تا ۲۸۵۵ متر متغیر است (شکل ۲a). میانگین سالانه بارش ۱۹۰/۴۹ میلی‌متر و میانگین سالانه دما ۱۶/۲۵ درجه سانتی‌گراد هستند. مرتع پرتراکم بیشترین میزان کاربری اراضی/پوشش را در حوضه با ۴۵/۵۴ درصد به‌خود اختصاص داده است (شکل ۲b).



شکل ۱- موقعیت حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه در مرز شرقی ایران
Figure 1. The location of the studied watersheds in the eastern border of Iran

مدل‌سازی هدررفت خاک و تولید رسوب

مدل نسبت تحویل رسوب InVEST یک مدل مکانی است که در اندازه سلول مدل رقومی ارتفاع کار می‌کند و برای تخمین هدررفت خاک، نگه‌داشت و تولید رسوب سالانه در شمال‌شرقی استان خراسان جنوبی به‌کار برده شد. مدل ابتدا هدررفت سالانه خاک را با استفاده از الگوریتم هدررفت خاک و سپس SDR را به‌عنوان تابعی از اتصال هیدرولوژیکی یک حوضه محاسبه می‌کند (Gashaw *et al.*, 2021).

مدل نگهداری رسوب InVEST خروجی‌های مکانی را در مقیاس زمانی متوسط سالانه تولید می‌کند. این مدل مقدار کل رسوب تولیدشده را با تخمین میانگین رسوب سالانه تولیدشده توسط هر قطعه زمین با استفاده از معادله جهانی هدررفت خاک (USLE) در مقیاس پیکسل (۳۰ متر) محاسبه می‌کند (Sánchez-Canales *et al.*, 2015). هدف مدل انتقال رسوب InVEST نقشه‌سازی و کمی‌سازی خدمات انتقال و نگه‌داشت رسوب در اکوسیستم است. این مدل بر پایه GIS است و ورودی‌های آن لایه‌های رستری اقلیم، خاک، توپوگرافی و کاربری اراضی هستند. خروجی‌ها میانگین رسوب سالیانه منتقل‌شده و نگه‌داشت‌شده در هر زیرحوزه و به‌علاوه نقشه ارائه دهنده سهم هر پیکسل در بار رسوب را نشان می‌دهند. میانگین سالانه هدررفت خاک در پیکسل i، $USLE_i$ (تن بر هکتار بر سال)، توسط رابطه جهانی هدررفت خاک اصلاح‌شده (RUSLE) به‌دست می‌آید (رابطه ۱):

$$USLE_i = (R * K * LS * C * P)_i \qquad \text{رابطه ۱}$$

که در آن R عامل فرسایندگی باران (مگاژول میلی‌متر بر هکتار بر ساعت)، K فاکتور فرسایش‌پذیری خاک (تن هکتار ساعت بر مگاژول بر هکتار بر میلی‌متر)، LS فاکتور گرادیان طول شیب، C فاکتور نوع پوشش و کاربری اراضی، و P عامل اقدامات مدیریتی هستند (Hamel *et al.*, 2015).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

نسبت تحویل رسوب (SDR) در پیکسل i به‌طور مستقیم از شاخص IC با استفاده از تابع سیگموئیدی به‌دست می‌آید (رابطه ۲):

$$SDR_i = \frac{SDR_{Max}}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC_i}{k_b}\right)}$$ رابطه ۲

که در آن، SDR_{Max} حداکثر نسبت تحویل رسوب تئوری است که به‌عنوان حداکثر نسبت رسوب ریز تعریف می‌شود که می‌تواند به‌سمت جریان حرکت کند و در صورت عدم وجود اطلاعات دقیق خاک، مقدار پیش‌فرض آن ۰/۸ است. IC_0 و k_b نیز پارامترهای کالیبراسیون هستند که به‌ترتیب مقادیر ۰/۵ و ۲ در نظر گرفته شدند (Vigiak *et al*., 2012).

سپس، بار رسوب از پیکسل i (sed_export) (تن بر هکتار بر سال) تابع مستقیم هدررفت خاک و فاکتور SDR است (رابطه ۳):

$$sed_export_i = USLE_i * SDR_i$$ رابطه ۳

در نهایت، کل رسوب حوضه از مجموع رسوب تمام پیکسل‌ها محاسبه شد. شاخص نگه‌داشت رسوب توسط مدل به‌صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Vigiak *et al*., 2012):

$$R * K * LS(1 - CP) * SDR_i$$ رابطه ۴

که نشان‌دهنده جلوگیری از فرسایش خاک توسط کاربری اراضی فعلی در مقایسه با خاک لخت است و با عامل SDR وزن‌دهی می‌شود.

نقشه‌های پایه مورد نیاز مدل شامل مدل رقومی ارتفاع، کاربری اراضی، فرسایندگی باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی هستند.

شاخص فرسایندگی باران (R)

شاخص فرسایش بارندگی نشان‌دهنده تأثیر شدت بارش بر فرسایش خاک است و محاسبه آن مستلزم داده‌های دقیق و پیوسته بارش است. این شاخص براساس حجم، شدت و توزیع بارندگی تعیین می‌شود و شدت مهم‌ترین ویژگی بارندگی است که درجه فرسایش را تعیین می‌کند (Debie & Awoke, 2023). جهت تولید لایه فرسایندگی باران، ابتدا نقشه میانگین سالانه بارش برای ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و اطراف حوضه تولید و سپس با استفاده از رابطه‌های (۴ و ۵) شاخص فرسایندگی باران محاسبه گردید (Sadeghi & Tavangar, 2015).

$$R_R = [0.5 + 0.05P^*]$$ رابطه ۴

$$R_{WS} = 6.5\, R_R + 1.52$$ رابطه ۵

که در آن، R_R شاخص مدل Roose، P^* میانگین سالانه بارش و R_{WS} شاخص فرسایندگی باران سالانه هستند.

شاخص فرسایش‌پذیری خاک (K)

فرسایش‌پذیری خاک خصوصیات بیوفیزیکی و شیمیایی خاک است که نشان‌دهنده حساسیت خاک به فرسایش است. فاکتور K نشان‌دهنده میزان آسانی حذف خاک توسط پاشش و جریان سطحی است. همچنین، بیانگر تأثیر خواص خاک بر هدررفت خاک و حساسیت خاک به فرسایش است (Degife *et al*., 2021). فاکتور K تحت تأثیر بافت خاک، ماده آلی، ساختار خاک و نفوذپذیری نیمرخ خاک است (Thapa, 2020). این شاخص میزان آمادگی یا قابلیت ذرات خاک برای تفکیک یا انتقال توسط باران و رواناب را نشان می‌دهد که به شکل لایه‌ای رستری با ارزش فرسایش‌پذیری خاک برای هر سلول نشان داده می‌شود. این شاخص به‌صورت لایه رستری از رابطه (۶) تولید گردید.

$$K = \left\{0.2 + 0.3 \exp\left[-0.0256\, S_d\left(1 - \frac{S_i}{100}\right)\right]\right\} * \left(\frac{S_i}{Cl + S_i}\right)^{0.3} * \left[1.0 - \frac{0.25\, C}{C + exp(3.72 - 2.95C)}\right] * \left[1.0 - \frac{0.7\, SN}{SN + \exp(-5.51 + 22.9SN)}\right]$$ رابطه۶

که در آن S_d، S_i، Cl و C درصد مقتدیر شن، سیلت، رس و کربن آلی هستند که از پایگاه داده ISRIC (Soilgrids.org) به‌دست آمدند. SN برابر است با $1\text{-}S_d/100$.

کاربری اراضی/پوشش سرزمین

لایه کاربری اراضی/پوشش سرزمین به‌صورت رستری بر پایه نقشه پردازش‌شده کاربری اراضی/پوشش زمین موجود در سایت Esri تهیه شد (Karra *et al*., 2021). نقشه پایه از طریق الگوریتم یادگیری عمیق طبقه‌بندی شد (Karra *et al*., 2021). به‌منظور تدقیق این نقشه که حاصل تفسیر تصاویر ماهواره‌ای سنتیل ۲ با درجه تفکیک ۱۰ متر و با دقت بالاتر از ۸۵٪ مربوط به سال ۲۰۲۰ است، مجموعه اقداماتی صورت گرفت. به‌طوری‌که طبقات جنگل و مرتع براساس آماره میانه شاخص پوشش گیاهی ($NDVI^{10}$) مستخرج از تصاویر مادیس ۱۱ سپتامبر ۲۰۲۰ به دو طبقه کم‌تراکم و پرتراکم در مناطق خشک و نیمه‌خشک تفکیک گردیدند. لذا، به‌کمک تطبیق تصاویر موجود در سازمان حفاظت محیط زیست، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، نقشه‌های رقومی توپوگرافی سازمان نقشه‌برداری کشور و گوگل‌ارث، از صحت بالای آن برای منطقه مورد مطالعه اطمینان حاصل گردید. در نهایت، پس از تبدیل اندازه سلول دو لایه به ۳۰ متر، هشت طبقه از جمله پلایا (شامل دق و بدنه آبی)، مناطق مسکونی، اراضی کشاورزی، اراضی بایر، جنگل‌های پرتراکم، جنگل‌های کم‌تراکم، مراتع پرتراکم و مراتع کم‌تراکم به‌دست آمدند.

عامل پوشش گیاهی و کاربری اراضی (C)

اهمیت پوشش گیاهی در جلوگیری از فرسایش آبی توسط شاخص C محاسبه می‌شود. فرسایش خاک توسط آب در مکان‌هایی که پوشش گیاهی کم است، رایج‌تر است. در مقابل، فرسایش خاک در زمین‌های دارای پوشش گیاهی به‌دلیل محافظت بیشتر پوشش گیاهی از سطح خاک در برابر فرسایش کمتر است. در نتیجه، تبدیل انواع پوشش سرزمین به اراضی با پوشش گیاهی بیشتر می‌تواند به جلوگیری از فرسایش خاک کمک کند (Debie & Awoke, 2023). یکی از پرکاربردترین

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

ابزارها برای تعیین پارامتر C، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) است. در این روش، داده‌های NDVI تولیدشده توسط ماهواره Landsat با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر برای شناسایی پارامتر C و نشان‌دادن چگونگی تأثیر تغییرات پوشش گیاهی بر فرسایش خاک مورد استفاده قرار گرفتند. برای محاسبه شاخص NDVI، از اختلاف بین باند مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز (RED) تقسیم بر مجموع این دو باند استفاده شد. شاخص C نیز از رابطه (۷) تعیین گردید (Zabihi *et al*., 2021).

رابطه ۷
$$C = \frac{-NDVI + 1}{2}$$

عامل عملیات حفاظتی (P)

عامل P نشان دهنده نقش تلاش‌های حفاظتی برای کاهش فرسایش است. دامنه مقادیر برای عامل P بین ۰ تا ۱ است. به‌طور معمول، یک به مناطق بدون اقدامات حفاظتی اختصاص داده می‌شود، اما حداقل مقدار نزدیک به صفر در مناطق با اقدامات حفاظتی خوب انتظار می‌رود. برای این پژوهش، از مقادیر P استفاده‌شده در مطالعات قبلی استفاده گردید (Kumar & Kushwaha, 2013).

ارزش‌گذاری اقتصادی

به‌منظور ارزش‌گذاری اقتصادی نگه‌داشت رسوب، از روش هزینه جایگزین یا بازسازی[1] استفاده شد. وقتی محاسبه ارزش برحسب تغییر در تولید یا بهره‌وری ناممکن باشد، می‌توان از روش هزینه جایگزین دارایی زیان‌دیده بر اثر تغییرات محیطی استفاده‌کرد (Behjou *et al*., 2016). این هزینه نوعاً بعد از این‌که آسیب محیط زیستی رخ داد مد نظر قرار می‌گیرد. برای اندازه‌گیری ارزش مواد مغذی خاک که در اثر فرسایش از بین رفته است، می‌توان هزینه‌ای را که برای جایگزینی یا بازسازی این خاک صرف می‌شود، به‌عنوان حداقل ارزش سود به‌دست آمده از جلوگیری فرسایش خاک تلقی کرد. برآورد چنین هزینه‌هایی و فرض این که این هزینه‌ها می‌توانند معادل منافع هزینه‌های محیط زیستی تلقی شوند، کاذب خواهد بود. اما می‌توان فرض نمود که این مخارج، بیانگر ارزش حداقل منافع هزینه‌های محیط زیستی است. باید در نظر داشت که هنگامی که امکان استفاده از اندازه‌گیری مستقیم فراهم نیست این روش جانشین مناسبی است (Ghorbani & Firoz Zare, 2010).

به این ترتیب در این پژوهش، ارزش اقتصادی حفظ حاصل‌خیزی خاک سطحی مبتنی‌بر سه عنصر ازت، فسفر و پتاسیم تعریف گردید (Ghasemi Arian *et al*., 2015). خاک سطحی، نخستین بخشی است که در معرض فرسایش خاک قرار دارد و میزان مواد غذایی خاک در این سطح به‌شدت کاهش می‌یابد. این کاهش موجب کم‌شدن مواد آلی ازت (N)، فسفر (P)، پتاسیم (K) و سایر عناصر می‌شود. کاهش مواد آلی با کاهش حاصل‌خیزی خاک همراه است. ازت، فسفر و پتاسیم عناصر اصلی و ضروری برای رشد گیاهان هستند؛ علاوه بر این سه عنصر، مقدار عناصر کمیاب از جمله کلسیم و منیزیم نیز با افزایش فرسایش خاک کاهش می‌یابد (Amirnjad & Atai, 2018). لذا، ارزش‌گذاری مکانی این خدمت اکوسیستمی به پراکنش میزان عناصر یا مواد مغذی اصلی در استان نیاز دارد. در این پژوهش، بر اساس اطلاعات دریافت‌شده از اداره باغبانی سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان مبنی‌بر آزمایشاتی که کشاورزان در راستای مشاوره در استفاده از نوع کود داشتند، میزان مواد مغذی خاک در هر شهرستان به‌صورت نقشه‌ای تهیه گردید. بعد از تهیه نقشه پراکنش و تکمیل پایگاه داده مورد نیاز، با توجه به مقدار رسوبی که در طول سال نگه‌داشت شده است، مقدار عناصری که به‌واسطه نگه‌داشت رسوب حفظ گردیده بود، برآورد گردید (Ghasemi Arian *et al*., 2015). در نهایت، قیمت عناصر بر مبنای اطلاعات دریافت‌شده از سازمان جهاد کشاورزی برای هر بخش در میلیون (میلی‌گرم بر کیلوگرم) به‌صورت (جدول ۱) محاسبه گردید.

جدول ۱- مشخصات کودها بر اساس نرخ تنظیمی جهاد کشاورزی استان در سال ۱۴۰۰
Table 1. Specifications of fertilizers based on the regulatory rate of agricultural Jihad of the province in 2020

کودFertilizer	درصد عناصر در هر کیلو کود (٪) Percentage of elements per kilogram of fertilizer	قیمت هر تن کود در سال 2020 (دلار) Price per ton of fertilizer in 2020 (dollars)	قیمت هر کیلو کود در سال 2020 (ریال) The price of each kilogram of fertilizer in 2020 (Rials)	قیمت هر PPM عناصر (ریال) Price per PPM elements (Rials)
اوره (N) Urea	0.46 ازت Nitrogen	483.2	115968	0.252
سنگ فسفات (P) Phosphate rock	0.20 فسفر Phosphorus	123.2	29568	0.147
کلرید پتاسیم (K) Potassium chloride	0.50 پتاس Potass	210.2	50448	0.1

در نهایت، ارزش عناصری که به‌واسطه خدمت نگه‌داشت رسوب حفظ‌شده بودند، به‌صورت جداگانه با ضرب در قیمت هر قسمت در میلیون از عنصر مورد نظر به‌دست آمد. سپس ارزش خدمت نگه‌داشت رسوب از تجمیع ارزش‌های عناصر به‌کمک رابطه (۸) در محدوده مورد مطالعه برحسب ریال برآورد گردید که در آن N_ppm، نقشه‌ی پراکنش مقادیر ازت است. P_ppm و K_ppm به‌ترتیب نقشه‌های پراکنش مقادیر فسفر و پتاس هستند.

رابطه ۸

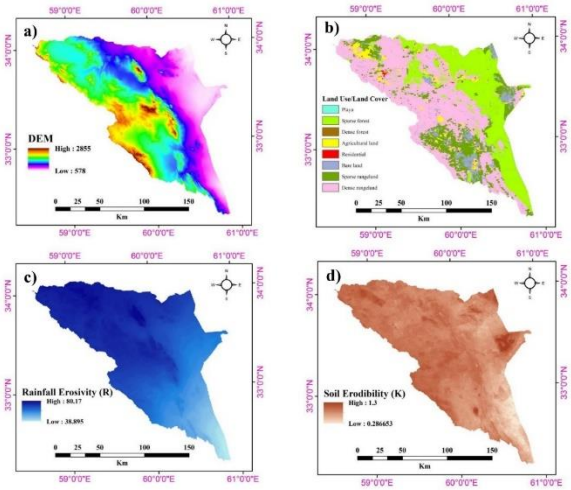
```
(("N_ppm" * 0.252) + ("P_ppm" * 0.147) + ("K_ppm" * 0.1)) / 1000000
(("Nitrat" * "sed_retention_sed.tif" * 0.252) + ("Phosphor" * "sed_retention_sed.tif" * 0.147) + ("Potasiom" * "sed_retention_sed.tif" * 0.1))
```

1 Replacement repair/expenditure

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تهیه نقشه‌های ورودی مدل نسبت تحویل رسوب InVEST در شکل (۲) ارائه شده‌اند. میزان فرسایندگی باران در دامنه ۳۸/۹ تا ۸۰/۲ مگاژول میلی‌متر بر هکتار بر ساعت محاسبه گردید (شکل ۲c). نقشه فرسایش‌پذیری خاک نیز از ۰/۲۸ تا ۱/۳ تن هکتار ساعت بر مگاژول بر هکتار بر میلی‌متر در شکل (۲d) نشان داده شده است.



شکل ۲- داده‌های تهیه‌شده جهت ورود به مدل نسبت تحویل رسوب InVEST (a) مدل رقومی ارتفاعی، (b) نقشه کاربری اراضی/پوشش سرزمین، (c) فرسایندگی باران، (d) فرسایش‌پذیری خاک

Figure 2. Data prepared to enter the InVEST sediment delivery ratio model (a) DEM, (b) land use/ land cover map, (c) rainfall erosivity, (d) soil erodibility

حوزه‌های آبخیز اسفدان و شاهرخت بیشترین میزان تولید رسوب را به‌ترتیب با بیش از ۱۳ و ۱۲ میلیون تن در بین سایر حوضه‌ها نشان دادند (جدول ۲). کمترین میزان رسوب را حوزه آبخیز نمک‌زار خواف با ۷۳۷/۵۰۴ تن نشان داد. در سطح پیکسل، میزان رسوب از ۰ تا ۷۴۷/۶ تن در حوزه مرزی شرق کشور متغیر بود (شکل ۳). بیشترین میزان نگه‌داشت رسوب در حوزه آبخیز اسفدان با ۲۲.۶۲۶.۴۹۹/۴ تن و کمترین میزان را حوزه آبخیز نمک‌زار خواف با ۱.۳۱۶.۲۰۸/۶ تن نشان دادند. میزان نگه‌داشت خاک در سطح پیکسل در دامنه ۰ تا ۱۰۵۸/۳ تن به‌دست آمد. کمترین و بیشترین میزان هدررفت خاک نیز از ۴.۸۴۵.۸۵۷/۷ تا ۶۳.۸۵۴.۷۱۰/۶ تن به‌ترتیب برای حوضه‌های نمک‌زار خواف و اسفدان به‌دست آمدند. دامنه ۰ تا ۱.۴۸۹ تن بر پیکسل برای هدررفت خاک محاسبه شد.

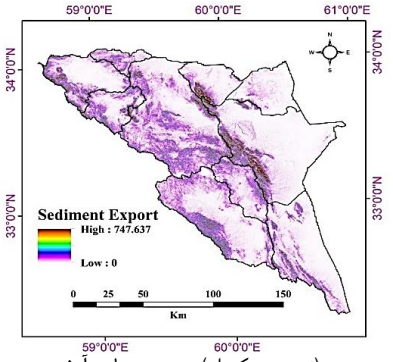
جدول ۲- میزان هدررفت خاک، تولید و نگه‌داشت رسوب در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه (واحد: تن در حوضه)

Table 2. The amount of soil loss, sediment yield, and retention in the studied watersheds (unit: tons per basin)

Basin name نام حوضه	Sediment yield تولید رسوب	Soil loss هدررفت خاک	Sediment retention نگه‌داشت رسوب
Ghaenat قائنات	4982895.7	23661553.9	8645917.3
Gisour گیسور	1219134.5	6238920.1	2127268.8
Zouzan زوزن	3449285.3	15354574.4	5852737.8
Khava salt marsh نمکزار خواف	737504.8	4845857.7	1316208.6
Ghaen قائن	3143250.7	15285793.8	5478328.9
Esfadan اسفدان	13028571.6	63854710.6	22626499.4
Shahrakht شاهرخت	12556567.4	51653417.2	21121905.6
Khoushab خوشاب	4004862.4	20670768.8	6975784.8
Gezik گزیک	2607210.6	12947402.9	4511168.9
Darmian-Asadabad درمیان-اسدآباد	6823200.04	32558513.3	11742676.1

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]



شکل ۳- نقشه تولید رسوب (تن بر پیکسل) در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه
Figure 3. The sediment yield map (tons per pixel) in the studied watersheds

نتایج اعمال شکست‌های طبیعی در نقشه تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز مختلف نشان دادند که حوضه‌های قائنات و گزیک بیشترین درصد و حوضه نمک‌زار خواف کمترین درصد در طبقه زیاد را داشتند (جدول ۳).

جدول ۳- نتایج شکست‌های طبیعی در لایه تولید رسوب (برحسب درصد) در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه
Table 3. The results of natural failures in the sediment yield layer (in terms of percentage) in the studied watersheds

نام حوضه Basin Name	کم Low	متوسط Medium	زیاد High
قائنات Ghaenat	91.14	8.16	0.69
گیسور Gysor	89.24	10.18	0.56
زوزن Zozen	96.5	3.16	0.32
نمکزار خواف Namakzar Khaf	98.85	1.07	0.07
قائن Caen	89.28	10.17	0.54
اسفدان Esfadan	87.83	11.77	0.38
شاهرخت Shahrekht	95.36	4.27	0.36
خوشاب Khoshab	94.49	5.26	0.23
گزیک Gazik	88.78	10.52	0.69
درمیان-اسدآباد Darmean-Asadabad	۹۰/۸۶	۸/۴۸	۰/۶۴

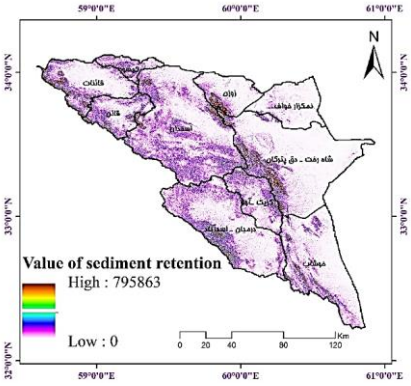
بیشترین میزان نگه‌داشت رسوب در کاربری جنگل پرتراکم با میزان ۳۳۱/۴ تن در هکتار در سال و کاربری کشاورزی با ۴/۹۴ تن در هکتار در سال، کمترین میزان را نشان داد (جدول ۴).

جدول ۴- مساحت و میزان نگه‌داشت رسوب در کاربری‌های مختلف منطقه مورد مطالعه
Table 4. The area and amount of sediment retention in different uses of the study area

کاربری اراضی Land use	مساحت (هکتار) Area (ha)	نگه‌داشت رسوب (تن) Sediment retention (tons)	نگه‌داشت رسوب (تن در هکتار در سال) Sediment retention (tons per hectare per year)
پلایا Playa	401.4	4745.2	11.8
جنگل کم‌تراکم Low density forest	580584.79	11327544.8	19.5
جنگل پرتراکم Dense forest	930.42	308398.2	331.4
کشاورزی Agriculture	65428.65	323242.5	4.94
مسکونی Residential	11094.66	196196.9	17.6
بایر Bare land	140696.55	2254629.03	16.02
مرتع کم‌تراکم Low-density pasture	288020.34	5355520.9	18.59
مرتع پرتراکم Dense pasture	925642.44	70628209.4	76.3

نقشه موجود در شکل (۴) بیانگر ارزش اقتصادی خدمت نگه‌داشت رسوب در هر پیکسل (برحسب ریال) است که از روش هزینه جایگزین به‌دست آمده است. مقادیر ارزش اقتصادی این خدمت در حوزه مرزی شرق کشور از صفر تا ۷۹۵.۸۶۳ ریال متغیر است. مطابق با جدول (۵)، بیشترین میزان ارزش اقتصادی به‌تبع ناشی از میزان نگه‌داشت رسوب است که در حوزه آبخیز اسفدان با ۱۴.۴۰۵.۵۴۹.۵۹۸/۴۹ ریال (معادل ۱/۴ هزار میلیارد تومان) بالاترین مجموع ارزش اقتصادی را دارد و کمترین مجموع ارزش اقتصادی خدمت نگه‌داشت رسوب واقع در حوزه آبخیز نمک‌زار خواف با ۶۹۷.۴۳۱.۷۸۴/۰۳ ریال است. از طرفی، بالاترین و کمترین میانگین خدمت نگه‌داشت رسوب به‌ترتیب در حوزه قائن و نمک‌زار خواف با ارزش معادل ۴۱۸۰/۷۳ و ۵۲۰/۵۵ ریال وجود دارند. با این وجود، کمترین میزان تغییرپذیری نسبت به میانگین در حوزه نمک‌زار خواف قابل مشاهده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]



شکل ۴- ارزش اقتصادی خدمت نگه‌داشت رسوب در هر پیکسل برحسب ریال
Figure 4. The economic value of the sediment maintenance service per pixel in Rials

جدول ۵- بررسی آماری ارزش اقتصادی خدمت نگه‌داشت رسوب در حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه (بر حسب ریال)
Table 5. Statistical analysis of the economic value of the sediment retention service in the area of the studied watersheds (in Rials)

نام حوضه Basin Name	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	دامنه Range	میانگین Mean	انحراف معیار Standard Deviation	مجموع Sum
درمیان–اسدآباد Darmean-Asadabad	0	415111.69	415111.69	2670.65	6310.96	9055459321.42
گزیک Gazik	0	402715.75	402715.75	3067.30	6612.56	3472204106.71
شاهرخت Shahrekht	0	546030.81	546030.81	2634.26	9962.66	11842006098.15
نمکزار خواف Khava salt marsh	0	217405.42	217405.42	520.55	2482.95	697431784.03
اسفدان Esfadan	0	795863.13	795863.13	3003.04	7251.08	14405549598.49
زوزن Zozen	0	560763.63	560763.63	3310.99	13894.49	3361260185.66
گیسور Gysor	0	398229.22	398229.22	3665.08	7499.20	1663143388.26
قائنات Ghaenat	0	481405.50	481405.50	3995.12	10235.60	6704785071.86
قائن Caen	0	476252.75	476252.75	4180.73	9152.89	4295737717.88
خوشاب Khoshab	0	342084.06	342084.06	1827.53	5613.08	5456603334.83

ارزیابی فرآیندهای فرسایش خاک و شناسایی دقیق محرک‌های فرسایش برای کنترل مؤثر و استراتژی‌های حفاظتی حیاتی است. مطالعه حاضر به مدل‌سازی خدمات اکوسیستمی با استفاده از مدل نسبت تحویل رسوب InVEST از منظر هدررفت خاک، تولید و نگه‌داشت رسوب در مرز شرقی استان خراسان جنوبی پرداخت. پاسخ فرسایش به انواع مختلف پوشش سرزمین برای حفظ خاک و آب، تنظیم ساختار کاربری اراضی و احیای پوشش گیاهی مهم است. عوامل توپوگرافی و پوشش گیاهی از مهم‌ترین عوامل موثر بر هدررفت خاک در حوزه‌های آبخیز کوهستانی هستند (Kumar & Kushwaha, 2013). جلوگیری از قطرات باران توسط پوشش گیاهی متراکم‌تر، سرعت قطرات باران را کاهش می‌دهد و از تاثیر مستقیم آن‌ها بر ذرات سطح خاک جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، پوشش گیاهی متراکم‌تر جریان آب را کند می‌کند و سیستم ریشه درختان و درختچه‌ها با بهبود ویژگی‌های خاک، نقش مهمی را در کاهش رواناب ایفا می‌کنند (Sun *et al*., 2014). الشیخ (۲۰۰۶) بیان کرد که میزان تلفات خاک در زمین‌های زیر کشت در مقایسه با پوشش گیاهی طبیعی به‌دلیل از بین رفتن پوشش گیاهی و جداشدن ذرات خاک بیشتر است (Al-Seikh, 2006). نتایج مطالعه حاضر نشان داد که بیشترین میزان نگه‌داشت رسوب در کاربری جنگل پرتراکم و پس از آن مرتع پرتراکم در منطقه است که محققان دیگری نیز به نتایج مشابه دست یافتند. اسدالهی و همکاران (Asadollahi *et al*., 2014) بیان کردند که زیرحوضه‌های با پوشش غالب جنگل بیشترین نقش را در نگه‌داشت خاک در بخش شرقی حوزه آبخیز گرگانرود، استان گلستان داشتند. ذبیحی و همکاران (Zabihi *et al*., 2021) کمترین میزان هدررفت خاک را در زیرحوضه فلورد نسبت به سایر زیرآبخیزها از حوزه آبخیز تالار استان مازندران به‌علت پوشش غالب جنگلی و عامل فرسایش‌پذیری خاک اندک بیان کردند. بیشترین میزان ارائه خدمت اکوسیستمی نگه‌داشت سالانه خاک در مناطق جنگلی با تراکم بالا و کمترین میزان آن در اراضی کشاورزی و اراضی ساخته‌شده در حوزه‌های آبخیز لاهیجان چابکسر و آستانه کوچصفهان استان گیلان ثبت شدند. در مطالعه کومار و کوشواها (Kumar & Kushwaha, 2013)، بیشترین میزان نرخ فرسایش (۱۳۴/۹ تن در هکتار در سال) در کاربری جنگل باز در زیرآبخیز Pathri Rao گزارش شد که علت را افزایش رواناب سطحی و به‌دنبال آن افزایش فرسایش خاک در پوشش گیاهی بسیار کم‌تراکم این کاربری بیان کردند. همچنین، نتایج مطالعات فیلیپین نشان داده‌اند که از نظر ارائه بهترین خدمات اکوسیستمی در هکتار، مناطق دارای پوشش گیاهی (به‌ویژه زمین‌های جنگلی) بیشترین ظرفیت نگهداری رسوب و کمترین بار رسوب را فراهم می‌کنند (Ureta *et al*., 2022). از سوی دیگر، مناطق بدون پوشش گیاهی (به‌ویژه مناطق ساخته شده) کمترین ظرفیت نگه‌داشت رسوب و بیشترین بار رسوب را فراهم می‌کنند.

فاکتور C بر اساس پارامترهای مختلفی نظیر پوشش بیولوژیکی پوسته خاک است که مقاومت سطح خاک در برابر

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

نیروهای فرسایشی در اکوسیستم های خشک است. پوشش بیولوژیکی پوسته خاک نقش اکولوژیکی مهمی در Plateau Loess چین در سال ۱۹۹۹ در کنترل فرسایش خاک و افزایش منابع غذایی داشت و احتمالاً یکی از دلایل کاهش فرسایش خاک در مناطق تپه‌ای و خندقی پس از اجرای پروژه اکولوژیکی بود (Sun *et al*., 2014). همچنین، در این مطالعه بیان کردند که مناطق تپه‌ای و خندقی با مقادیر گرادیان طول شیب بالاتر از نظر توپوگرافی مستعد فرسایش بودند و تا حد زیادی رابطه بین از دست‌دادن خاک و کاربری اراضی و توزیع نقاط سرد و نقاط داغ هدررفت خاک را بیان می‌کردند (Sun *et al*., 2014).

میانگین شیب در حوضه آبخیز نمک‌زار خواف ۶/۱ درصد به‌دست آمد و این حوضه کمترین میزان تولید رسوب و کمترین میزان شیب را در بین سایر حوضه‌ها نشان داد. میانگین شیب در حوضه اسفدان با بیشترین میزان تولید رسوب نسبت به سایر حوضه‌ها ۱۴/۷ درصد بود و این حوضه پس از حوضه قائن بالاترین میزان شیب را به‌خود اختصاص داد. نرخ فرسایش در مناطق کوهستانی نظیر نپال نیز با افزایش شیب افزایش یافت (Assouline & Ben-Hur, 2006). میانگین شیب زیاد و حساسیت نسبتاً بالای خاک به فرسایش در زیرآبخیز قدمگاه از دلایل بیشینه بودن هدررفت خاک نسبت به سایر زیرآبخیزها در حوزه آبخیز تالار گزارش شد (Zabihi *et al*., 2021).

فرآیند ته‌نشینی توسط مدل نگه‌داشت رسوب InVEST ساده‌سازی شده است؛ با این وجود، این مدل همه فرآیندهای رسوبی را در نظر نمی‌گیرد. به‌عنوان نمونه، جوی‌ها، خندق‌ها و فرسایش کناره‌ای یا فرآیندهای ته‌نشست را در نظر نمی‌گیرد. علاوه بر این، به‌دست‌آوردن سرعت فیلتراسیون انواع کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه دشوار است. بنا بر این، به مقادیر در مطالعات دیگر اشاره می‌شود که بر صحت مدل تأثیر منفی خواهد گذاشت (Han *et al*., 2020). تغییرات آینده کاربری اراضی/پوشش سرزمین و اقلیم بر خدمات اکوسیستم به‌روشی متفاوت بسته به مقیاس مکانی دقیق تأثیر می‌گذارد. بنا بر این، مقایسه تفاوت‌ها تحت تأثیر تغییرات کاربری اراضی و اقلیم بر خدمات اکوسیستم، رویکرد مهمی برای مطالعه آینده در حوزه‌های مرز شرقی کشور است.

نتایج ارزش‌گذاری اقتصادی در پژوهش حاضر نشان دادند که میانگین ارزش خدمت نگه‌داشت رسوب در هر پیکسل (به مساحت ۹۰۰ مترمربع)، معادل ۲۷۳۱/۴۸ ریال بود که مقدار آن در هر هکتار، معادل ۳۰.۳۴۹/۷۷ ریال محاسبه گردید که به مطالعه هانرخلیلیان (Hanare Khaliani, 2015) که ارزش سالانه‌ی کارکرد کنترل رسوبات را معادل ۲۳۱۵۸/۷ ریال در هکتار برآورد نمود، نزدیک است. همچنین، نتایج قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al*., 2014) نشان دادند که ارزش منافع حاصل از کارکرد حفظ حاصل‌خیزی خاک در نتیجه افزایش پوشش گیاهی با احتساب ارزش آتی برای سال پایه ۱۳۹۳، ۱.۹۴ میلیارد ریال بود. بنا بر این، ارزش اقتصادی هر هکتار مرتع در منطقه مذکور بر اساس این کارکرد در طول سال‌های پس از اجرای پروژه، ۳۶۷.۲۴۴/۵ ریال بود. مطالعه ابراهیمی (Ebrahimi, 2013) نیز نشان داد که هر هکتار از اراضی در حوضه آبخیز سد گلپایگان قادر بود حدود ۰/۱۶ مترمکعب رسوبات فرسایش یافته را در خود نگه‌دارد و از هدررفت آن جلوگیری نماید که کارکرد حفظ خاک آن، ارزشی معادل ۳۰۰۴ ریال بود. اگرچه مقادیر به‌دست‌آمده در مطالعات مختلف، که از طرق گوناگون در سال‌های مختلف به‌دست آمده‌اند، با هم به‌صورت منطقی قابل‌قیاس نیستند، اما همگی بیانگر ارزش اقتصادی هستند و مادامی‌که محاسبه و برآورد نشوند، از منظر استفاده‌کنندگان سرزمین، هیچ پنداشته می‌شوند.

باید توجه داشت که ممکن است همه ارزش‌های مرتبط با خدمات اکوسیستم مدل‌سازی شده به‌صورت ۱۰۰٪ واقعی برآورد نشده باشند. یعنی گاهی روش کوچک‌نمایی اجرا می‌شود، گاهی دیدگاه یا رهیافت ارزش‌گذاری جامع نیست و تمامی ابعاد را مورد مطالعه قرار نمی‌دهد. حتی گاهی چارچوب تعریف شده در مدل و برخی محدودیت‌های آن باعث می‌شود که برخی خدمات اکوسیستم مهم در منطقه مغفول واقع شود. به‌طور مثال، در پژوهش حاضر ارزش خدمت نگه‌داشت خاک ناشی از فرسایش آبی مورد پژوهش قرار گرفته است، ولی استان خراسان جنوبی در منطقه خشک و کویری است و رژیم بارشی آن کمتر موجب فرسایش آبی می‌شود؛ این امر در مقابل فرسایش بادی دارای اختلاف فاحشی است. لذا، ارزش‌گذاری خدمت نگه‌داشت خاک ناشی از آب مقادیر بسیار اندکی را به‌خود اختصاص داده است. همچنین، برخی متخصصین معتقدند که فقط مواد غذایی خاک نیستند که ترکیبات و عناصر ضروری موجود در خاک محسوب می‌شوند، بلکه سایر ویژگی‌ها مانند ساختار فیزیکی، ظرفیت نگهداری آب در خاک، محتوی مواد آلی و ابعاد کمی و کیفی موجودات زنده موجود در خاک و غیره هم در ارزش خاک موثر هستند که در این‌صورت ارزش خاک، رقمی بسیار بزرگتر از یک روش به‌دست می‌آید (Ghasemi Arian, 2014). به این ترتیب، سکوتی‌اسکوی و بشارتی (۲۰۲۲) پیشنهاد کردند که ارزش‌گذاری اقتصادی منابع خاکی، به‌عنوان یکی از ارکان اصلی تشکیل دهنده محیط زیست، در قالب چارچوب خدمات اکوسیستم و چارچوب ارزش اقتصادیِ کل مد نظر قرار گیرد. به‌عبارتی، یکایک ارزش‌های خاک چه مستقیم و چه غیر مستقیم، می‌تواند تحت عنوان ارزش اقتصادی کل محاسبه شود (Sekoti-Eskoi & Besharati, 2022).

نتیجه‌گیری کلی

در ادامه، لازم به‌ذکر است که باید تلاش‌های مستمر برای به‌دست‌آوردن فرآیند منطقی ارتباط بین کیفیت خدمات اکوسیستم و ارزش‌گذاری مکان‌مند ادامه یابد. لذا، ضروری است که افراد از محدودیت‌های ارزشیابی و تجزیه و تحلیل منابع طبیعی با خبر باشند. منابع طبیعی محیط پیچیده و انتزاعی هستند و می‌تواند با دامنه وسیعی از سودمندی‌ها به جامعه انسانی، که اغلب آن‌ها هنوز کمتر دیده شده‌اند، همراه باشد. به‌طور کلی، ارزش منابع طبیعی را می‌توان از نظر اثر آن بر تدارک نهادها در فرآیندهای تولید، برای رفاه انسانی و در نظم‌دهی به عملکردهای اکولوژیکی ارزیابی کرد. درک کامل از موارد ذکر شده و پیوسته کردن آنها در بررسی‌های چندبخشی، هماورد بزرگی را برای پژوهش‌های آینده معین می‌کند که در آن اقتصاد دانان، اکولوژیست‌ها و دیگران باید

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

به‌طور نزدیک با هم کار کنند. تنها آن زمان است که می‌توان انتظار پیش‌بینی‌های کاملاً سودمند را داشت.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از گام‌های سوم و چهارم طرح پژوهشی ملی با عنوان ارزش‌گذاری اقتصادی منابع پایه استان خراسان جنوبی با رویکرد تهیه نقشه خدمات اکوسیستمی است که با مشاوره دانشگاه بیرجند در اداره کل حفاظت محیط زیست استان خراسان جنوبی به شماره ۱۴۰۰/۱۰/۱/۲۴۲۴ منعقد شده است. به این وسیله، از دانشگاه بیرجند و مسئولان سازمان حفاظت محیط زیست صمیمانه قدردانی می‌شود.

References

Al-Seikh, S.H. (2006). The Effect of Different Water Harvesting Techniques on Runoff, Sedimentation, and Soil Characteristics. University College.

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,* 5(3), 61-75. [In Persian]

Assouline, S., & Ben-Hur, M. (2006). Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing. *Catena,* 66(3), 211–220. https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.02.005

Barzali, M., Azimi, M., Abdul Hosseini, M., & Lotfi, A. (2022). Evaluation of rangeland ecosystem services from the perspective of sediment retention potential using InVEST software package (case study of Etrak watershed - Golestan province). *Pasture and Desert Research of Iran*, 29(1), 133-144. doi: 10.22092/ijrdr.2022.126019. [In Persian]

Behjou, F. K., Hashemian, A., Panahi, M., & Hassanzadeh, E. (2016). Economic Valuation of Soil Nutrients in Shimbars Forest Protected Area Using Replacement Cost. *Environmental Sciences*, *14*(1), 137-146. [In Persian]

Brazão, C., Villela, R., Fernandes, N. F., & Cassara, L. (2022). Analysis of sediment production through InVEst and Aries modeling in the Brazilian Cerrado (No. ICG2022-623). *Copernicus Meetings.* https://doi.org/10.5194/icg2022-623

Carpenter, R., Dixon, J., Fallon Skora, L., & Sherman, P. (2005). Economic analysis of environmental consequences. Translators: Pourasghar Sangachin, F., Saleh, A. Country Management and Planning Organization, Vice-Chancellor of Administrative, Financial and Human Resources Affairs, Center for Scientific Documents. 324 pp. [In Persian]

Chahouki, Z., & Sanaei, A. (2018). Analysis of Natural Ecosystems Functional Value. *Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, *3*(1), 1-12. doi:10.22047/SRJASNR.2018.110629 [in persian]

Debie, E., & Awoke, Z. (2023). Assessment of the effects of land use/cover changes on soil loss and sediment export in the Tul Watershed, Northwest Ethiopia using the RUSLE and InVEST models, *International Journal of River Basin Management*, 1-16. https://doi.org/10.1080/15715124.2023.2187399

Degife, A., Worku, H., & Gizaw, S. (2021). Environmental implications of soil erosion and sediment yield in Lake Hawassa watershed, south-central Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 10, 1-24. https://doi.org/10.1186/s40068-021-00232-6

Eyvazi, M., Alaei, N., & Mostafazadeh, R. (2022). Temporal changes in runoff and sediment of rivers in Sabalan mountain. *Journal of Watershed Management Research*, *13*(26), 43-57. doi: 10.52547/jwmr.13.26.43. [In Persian]

Fitriyana, E. N., Supratman, O., & Mardiani, M. (2020, April). Sediment control analysis due to erosion and sediment in Cipunagara watershed, Indonesia, using SWAT model. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 830, No. 2, p. 022029). IOP Publishing.

Gashaw, T., Bantider, A., Zeleke, G., Alamirew, T., Jemberu, W., Worqlul, A. W., ... & Addisu, S. (2021). Evaluating InVEST model for estimating soil loss and sediment export in data scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin: Implications for land managers. *Environmental Challenges*, *5*, 100381. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100381

Gashaw, T., Bantider, A., Zeleke, G., Alamirew, T., Jemberu, W., Worqlul, A. W., ... & Addisu, S. (2021). Evaluating InVEST model for estimating soil loss and sediment export in data scarce regions of the Abbay (Upper Blue Nile) Basin: Implications for land managers. *Environmental Challenges*, *5*, 100381. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100381

Ghasemi Arian, Y., Azarnivand, H., & Kayanirad, A. (2015). Economic evaluation of the function of maintaining soil fertility in restored pasture ecosystems of dry areas (case study: South Khorasan international carbon sequestration project). *Pasture and Watershed journals (Natural Resources of Iran*, 69(4), 1031-1042. doi: 10.22059/jrwm.2017.61095. [In Persian]

Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S., Mueller, C. (2015). A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA. *Science of the Total Environment,* 524-525, 166-177. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.027

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]

Han, H., Yang, J., Ma, G., Liu, Y., Zhang, L., Chen, S., & Ma, S. (2020). Effects of land-use and climate change on sediment and nutrient retention in Guizhou, China. *Ecosystem Health and Sustainability*, 6(1), 1-13. https://doi.org/10.1080/20964129.2020.1810592

Henareh Khalyani, J. (2017). Spatial valuation of Zagros forests ecosystem services and estimating of changes through Scenario Planning. PhD Dissertation. Faculty of Natural Resources, Department of Forestry and Forest Economics, University of Tehran. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/9d086fbe1a405cb7d2e37d5405db0383 [In Persian]

Jafari, M., Ekhtesasi, M. R., & Fatahi Ardakani, A. (2020). Economic prioritization of watershed management projects based on the impact on water, soil and plant resources. *Journal of Watershed Management Research*, *11*(22), 132-141. doi: 10.52547/jwmr.11.22.132. [In Persian]

King, D.A., & Sinden, J.A. (1988). Influence of Soil Conservation on Farm Land Values. Land Economics, 64(3), 242-255. https://doi.org/10.2307/3146248.

Kumar, S., & Kushwaha, S. P. S. (2013). Modelling soil erosion risk based on RUSLE-3D using GIS in a Shivalik sub-watershed. *Journal of Earth System Science*, *122*, 389-398. https://doi.org/10.1007/s12040-013-0276-0.

Mani, F., & Hannachi, C. (2019). An analysis of sediment production and control in Rmel river basin using InVEST Sediment Retention model. *Journal of New Sciences*, 66(4), 4170-4181.

Ninan, K. N., & Kontoleon, A. (2016). Valuing forest ecosystem services and disservices–Case study of a protected area in India. *Ecosystem Services*, *20*, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.05.001

Sadat, M., Salehi, A., & Amiri, M.J. (2022). Quantitative modeling of temporal-spatial changes of soil maintenance and erosion potential and sediment production (the studied area of Lahijan-Chabaksar and Astana Kochsefahan watersheds). *Environment*, 48(4), 577-596. https://doi.org/10.22059/jes.2023.348202.1008357 [In Persian]

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

Sánchez-Canales, M., López-Benito, A., Acuña, V., Ziv, G., Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., & Elorza, F. J. (2015). Sensitivity analysis of a sediment dynamics model applied in a Mediterranean river basin: Global change and management implications. *Science of the Total Environment*, 502(1), 602-610. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.074

Sekoti Eskoi, R. & Basharti, H. (2022). An overview of the economic valuation of soil. *Land Management*, 10(1), 1-16. doi: 10.22092/lmj.2019.123225.149. [In Persian]

Sun, W., Shao, Q., Liu, J., & Zhai, J.(2014). Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China. *Catena*, 121(1), 151–163. https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.05.009

Thapa, P. (2020). Spatial estimation of soil erosion using RUSLE modeling: a case study of Dolakha district, Nepal. *Environmental Systems Research*, *9*(1), 1-10. https://doi.org/10.1186/s40068-020-00177-2

Ureta, J. C., Trespalacio, G. M., Anastacio, N. J. C., Sapugay, A. F., & Ureta, J. U. (2022). Estimating Sediment Export and Retention Capacity of Existing Land Cover in Balanac and Sta. Cruz Watersheds, Philippines Using InVEST-SDR Model. *Philippine Journal of Science*, 151(5), 1963-1978

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(1), 74–88. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026

Zabihi, M., Moradi, H., Khalidi-Darvishan, A., & Gholam Alifard, M. (2021). Application of InVEST eco-services model in prioritizing Talar subwatersheds in terms of soil loss, retention and sediment production. *Environment and Water Engineering*, 7(2), 293-303. doi:10.22034/jewe.2020.257980.1470. [In Persian]

Zhou, Q., Chen, L., Singh, V. P., Zhou, J., Chen, X., & Xiong, L. (2019). Rainfall-runoff simulation in karst dominated areas based on a coupled conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology*. *573*, 524-533. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.099

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOI: 10.61882/jwmr.2025.1278]