

Research Paper

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

Sharif Joorabian Shoostari¹, Fatemeh Jahanishakib²  and Tahereh Ardakani³

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



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 m²) 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



مقاله پژوهشی

ارزیابی کمی خدمت اکوسیستمی نگاهداشت رسوب با استفاده از مدل InVEST-SDR و ارزش گذاری اقتصادی آن

شریف جوراییان شوشتری^۱، فاطمه جهانی شکیب^۲ ID و طاهره اردکانی^۳

۱- استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، 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 پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۱
صفحه: ۱۱۴ تا ۱۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۰

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 نگاهداشت خاک در استان خراسان جنوبی ضروری است زیرا این منطقه به دلیل 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 این خصوص نیز تلاش‌هایی شده است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کمی خدمت اکوسیستمی نگاهداشت رسوب با استفاده از مدل InVEST-SDR و ارزش گذاری 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 قابل توجه 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 رقمی ارتفاع (۳۰ متر) کار می‌کند و برای تخمین هدررفت خاک، نگاهداشت و تولید رسوب سالانه در شمال شرقی استان خراسان جنوبی به کار برده شد. مدل ابتدا هدررفت سالانه خاک را با استفاده از الگوریتم هدررفت خاک محاسبه می‌کند، سپس SDR را به عنوان تابعی از اتصال هیدرولوژیکی حوضه تعیین می‌کند و در نهایت ارزش گذاری اقتصادی انجام می‌شود. به منظور ارزش گذاری اقتصادی نگاهداشت رسوب، از روش هزینه جایگزین یا بازسازی استفاده شده است. به این ترتیب در این پژوهش، ارزش اقتصادی حفظ حاصل خیزی خاک سطحی مبتنی بر 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 به شدت کاهش می‌یابد. این کاهش موجب کم شدن مواد آلی ازت (N)، فسفر (P)، پتاسیم (K) و سایر عناصر می‌شود.

یافته‌ها: بیشترین میزان نگاهداشت رسوب در کاربری جنگل پرتراکم و پس از آن مرتع پرتراکم در منطقه بود. حوزه‌های آبخیز اسفدان و شاهرخت بیشترین میزان تولید رسوب را به ترتیب با بیش از ۱۳ و ۱۲ میلیون تن در بین سایر حوضه‌ها نشان دادند. بیشترین میزان نگاهداشت رسوب در حوزه آبخیز اسفدان با ۲۲۶۲۶۴۹۹/۴ تن و کمترین میزان را حوزه آبخیز نمک‌زار خواف با ۱۳۱۶۲۰۸/۶ تن نشان داد. میزان نگاهداشت خاک در سطح پیکسل در دامنه ۰ تا ۱۰۵۸/۳ تن به دست آمد. کمترین و بیشترین میزان هدررفت خاک از ۴۸۴۵۸۵۷/۷ تا ۶۳۸۵۴۷۱/۰۶ تن به ترتیب برای حوضه‌های نمک‌زار خواف و اسفدان به دست آمدند. دامنه ۰ تا ۱۴۸۹ تن بر پیکسل برای هدررفت خاک محاسبه شد. از سوی دیگر، مناطق بدون پوشش گیاهی (به ویژه مناطق ساخته شده) کمترین ظرفیت نگهداری رسوب و بیشترین بار رسوب را فراهم می‌کنند. نتایج ارزش گذاری اقتصادی در پژوهش حاضر نشان دادند که میانگین ارزش خدمت نگاهداشت 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.

نتیجه گیری: حوزه‌های آبخیز اسفدان و شاهرخت به ترتیب 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 نگاهداشت 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 به ترتیب برای حوضه‌های نمک‌زار خواف و اسفدان به ترتیب از ۴۸۴۵۸۵۷ تا ۶۳۸۵۴۷۱ تن به دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: حاصل خیزی خاک، خراسان جنوبی، فرسایش، مدل‌سازی، هزینه جایگزین

مقدمه

همگی از نشانه‌های تخریب زمین هستند. مهم‌ترین نشانه تخریب زمین، تخریب خاک است. فرسایش خاک در اثر آب و کاهش عناصر غذایی از مهم‌ترین شاخص‌های تخریب خاک است (Debie & Awoke, 2023). تولید رسوب اضافی باعث

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،

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 تأثیر 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 این خصوص 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 رگرسون قیمت بازاری هدانیک نشان دادند که شرایط خاک (مثلاً 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

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 کروز 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 گرانده 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).

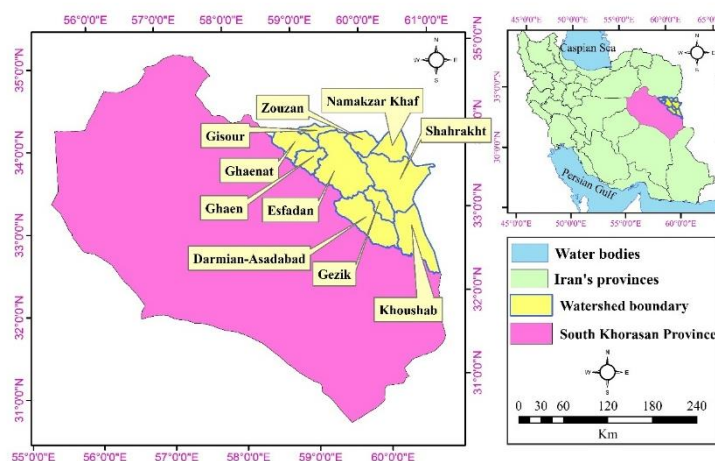
همچنین، مدل InVEST-SDR برای تخمین هدررفت خاک و بار رسوب در مناطقی مانند حوزه آبی در اتیوپی که با کمبود داده مواجه هستند مورد استفاده قرار گرفت. پیش‌بینی‌های مدل، الگوها و نرخ‌های متفاوت از هدررفت خالص خاک و تولید رسوب را در حوزه‌های آبخیز مختلف نشان دادند. نتایج آن‌ها حاکی از کاربرد نتایج مدل اجرایشده در شناسایی نقاط با پتانسیل فرسایش زیاد و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز برای برنامه‌ریزی حفاظت از خاک و آب

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 منطقه 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 به خود اختصاص داده است (شکل ۲b).

جایگزینی را براساس هزینه‌های احداث سازه‌های مصنوعی نظیر سد گابیونی برای به تله‌اندازی رسوبات به کار برد. قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al.*, 2016) با استفاده از روش جایگزینی مواد مغذی، ارزش اقتصادی حفظ حاصل‌خیزی خاک در مراتع احیاء شده 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. هانارخلیلانی (Hanare Khaliani, 2015) به‌منظور کمی‌سازی میزان فرسایش و رسوب با روش MPSIAC



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

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 منتقل شده و نگه‌داشت شده در هر زیرحوضه 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):

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

که در آن R عامل فرسایش 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).

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 شمال شرقی استان خراسان جنوبی به کار 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

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 نيمرخ 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 لایه‌های رستری با ارزش فرسایش‌پذیری خاک برای هر سلول نشان داده می‌شود. این شاخص به صورت لایه رستری از رابطه (۶) تولید گردید.

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 S_d \left(1 - \frac{S_i}{100} \right) \right] \right\} * \left(\frac{S_i}{CI + S_i} \right)^{0.3} * \left[1.0 - \frac{0.25 C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right] * \left[1.0 - \frac{0.7 SN}{SN + \exp(-5.51 + 22.95SN)} \right] \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن S_d ، S_i ، CI و C درصد مقتدر شن، سیلت، رس و کربن آلی هستند که از پایگاه داده ISRIC (Soilgrids.org) به دست آمدند. SN برابر است با $1 - S_d/100$.

کاربری اراضی/پوشش سرزمین

لایه کاربری اراضی/پوشش سرزمین به صورت رستری بر پایه نقشه پردازش شده 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). به منظور 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. به طوری که 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، به کمک تطبیق تصاویر موجود در سازمان حفاظت محیط زیست، سازمان طبیعی و آبخیزداری کشور، نقشه‌های رقوم 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 باير، جنگل‌های پرتراکم، جنگل‌های کم‌تراکم، مراتع پرتراکم و مراتع کم‌تراکم به دست 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 به دلیل 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

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

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

که در آن، SDR_{Max} حداکثر نسبت تحویل رسوب تئوری است که به عنوان حداکثر نسبت رسوب ریز تعریف می‌شود که می‌تواند به سمت جریان حرکت کند و در صورت عدم وجود اطلاعات دقیق خاک، مقدار پیش فرض آن 0.8 است. IC_0 و k_b نیز پارامترهای کالیبراسیون هستند که به ترتیب مقادیر 0.5 و 2 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):

$$sed_export_i = USLE_i * SDR_i \quad \text{رابطه ۳}$$

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

$$R * K * LS(1 - CP) * SDR_i \quad \text{رابطه ۴}$$

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 رقوم ارتفاع، کاربری اراضی، فرساینده‌گی باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی هستند.

شاخص فرساینده‌گی 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 فرساینده‌گی باران، ابتدا نقشه میانگین سالانه بارش برای ایستگاه‌های باران‌سنجی داخل و اطراف حوضه تولید و سپس با استفاده از رابطه‌های (۴ و ۵) شاخص فرساینده‌گی باران محاسبه گردید (Sadeghi & Tavangar, 2015).

$$R_R = [0.5 + 0.05P^*] \quad \text{رابطه ۴}$$

$$R_{WS} = 6.5 R_R + 1.52 \quad \text{رابطه ۵}$$

که در آن، R_R شاخص مدل P^* ، میانگین سالانه بارش و R_{WS} شاخص فرساینده‌گی 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

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 مبتنی بر 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 به شدت 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 (Amimjad & 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 مبنی بر آزمایشاتی که کشاورزان در راستای مشاوره در استفاده از نوع کود داشتند، میزان مواد مغذی خاک در هر شهرستان به صورت 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 عنصری که به واسطه 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) به صورت (جدول ۱) محاسبه گردید.

ابزارها برای تعیین پارامتر C، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (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).

$$C = \frac{-NDVI + 1}{2} \quad \text{رابطه ۷}$$

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. به طور 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

به منظور ارزش‌گذاری اقتصادی نگه‌داشت رسوب، از روش هزینه جایگزین یا بازسازی^۱ استفاده شد. وقتی محاسبه ارزش برحسب تغییر در تولید یا بهره‌وری ناممکن باشد، می‌توان از روش هزینه جایگزین دارای زیان‌دیده بر اثر تغییرات محیطی استفاده کرد (Behjou *et al.*, 2016). این هزینه نوعاً بعد از این که 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، به عنوان حداقل ارزش سود به دست آمده از جلوگیری فرسایش خاک تلقی کرد. برآورد چنین

جدول ۱- مشخصات کودها بر اساس نرخ تنظیمی جهاد کشاورزی استان در سال ۱۴۰۰

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

P_ppm و K_ppm به ترتیب نقشه‌های پراکنش مقادیر فسفر و پتاس هستند.
رابطه ۸

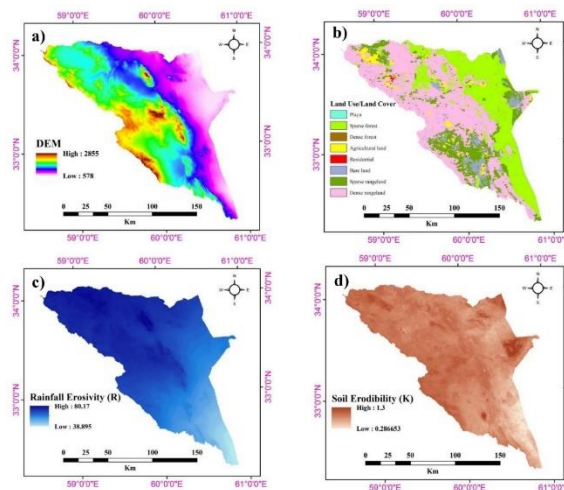
$$\begin{aligned} & ((\text{"N_ppm"} * 0.252) + (\text{"P_ppm"} * 0.147) + \\ & (\text{"K_ppm"} * 0.1)) / 1000000 \\ & ((\text{"Nitrat"} * \text{"sed_retention_sed.tif"} * 0.252) \\ & + (\text{"Phosphor"} * \text{"sed_retention_sed.tif"} * \\ & 0.147) + (\text{"Potasium"} \\ & \text{"sed_retention_sed.tif"} * 0.1)) \end{aligned}$$

در نهایت، ارزش عنصری که به واسطه خدمت نگه‌داشت رسوب حفظ‌شده بودند، به صورت جداگانه با ضرب در قیمت هر قسمت در میلیون از عنصر مورد نظر به دست آمد. سپس ارزش خدمت نگه‌داشت رسوب از تجمیع ارزش‌های عناصر به کمک رابطه (۸) در محدوده مورد مطالعه برحسب ریال برآورد گردید که در آن N_ppm، نقشه‌ی پراکنش مقادیر ازت است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تهیه نقشه‌های ورودی مدل نسبت تحویل رسوب InVEST در شکل (۲) ارائه شده‌اند. میزان فرساینده‌گی

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 رقمی ارتفاعی، (b) نقشه کاربری اراضی/پوشش سرزمین، (c) فرساینده‌گی باران، (d) فرسایش‌پذیری خاک

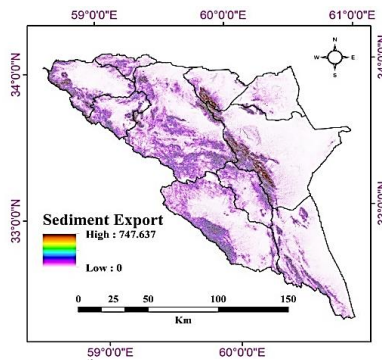
Figure 2. Data prepared to enter the InVEST sediment delivery ratio model (a) DEM, (b) land use/ land cover map, (c) rainfall erosivity, (d) soil erodibility

حوزه آبخیز نمکزار خواف با $۱.۳۱۶.۲۰۸/۶$ تن نشان دادند. میزان نگاهداشت 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 حوضه-های نمکزار خواف و اسفدان به‌دست آمدند. دامنه ۰ تا ۱.۴۸۹ تن بر پیکسل برای هدررفت خاک محاسبه شد.

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 حوضه آبخیز نمکزار خواف با $۷۳۷/۵۰۴$ تن نشان داد. در سطح پیکسل، میزان رسوب از ۰ تا $۷۴۷/۶$ تن در حوضه مرزی شرق کشور متغیر بود (شکل ۳). بیشترین میزان نگاهداشت رسوب در حوضه آبخیز اسفدان با $۲۲.۶۲۶.۴۹۹/۴$ تن و کمترین میزان را

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

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



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 گزیک بیشترین درصد و حوضه نمکزار خواف کمترین درصد حوزه‌های آبخیز مختلف نشان دادند که حوضه‌های قائنات و 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

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

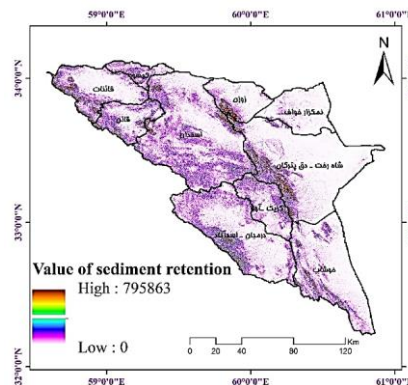
بیشترین میزان نگهداشت رسوب در کاربری جنگل پرتراکم با میزان ۳۳۱/۴ تن در هکتار در سال و کاربری کشاورزی با ۴/۹۴ تن در هکتار در سال، کمترین میزان را نشان داد (جدول ۴).

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

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

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 به ترتیب 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.

نقشه موجود در شکل (۴) بیانگر ارزش اقتصادی خدمت نگهداشت رسوب در هر پیکسل (برحسب ریال) است که از روش هزینه جایگزین به دست 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 به تبع 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



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-آسدآباد 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

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 به علت 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 ساخته شده 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 به دنبال آن افزایش فرسایش خاک در پوشش گیاهی بسیار کم تراکم 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

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 مؤثر 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 به دلیل از بین رفتن پوشش گیاهی و جدا شدن 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

مترمکعب رسوبات فرسایش یافته را در خود نگاهدارد و از هدررفت آن جلوگیری نماید که کارکرد حفظ خاک آن، ارزشی معادل ۳۰۰۴ ریال بود. اگرچه مقادیر به دست آمده در مطالعات مختلف، که از طرق گوناگون در سال‌های مختلف به دست آمده‌اند، با هم به صورت منطقی قابل قیاس نیستند، اما همگی بیانگر ارزش اقتصادی هستند و مادامی که 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 به صورت 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 نگاهداشت 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 نگاهداشت خاک ناشی از آب مقادیر بسیار اندکی را به خود 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 این صورت ارزش خاک، رقمی بسیار بزرگتر از یک روش به دست می‌آید (Ghasemi, 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 اقتصادی 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

نیروهای فرسایشی در اکوسیستم‌های 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 اسفندان با بیشترین میزان تولید رسوب نسبت به سایر حوضه‌ها ۱۴/۷ درصد بود و این حوضه پس از حوضه قائن بالاترین میزان شیب را به خود 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 حوضه آبخیز تالار گزارش شد (Zabihi *et al.*, 2021). فرآیند ته‌نشینی توسط مدل نگاهداشت رسوب InVEST ساده‌سازی شده است؛ با این وجود، این مدل همه فرآیندهای رسوبی را در نظر نمی‌گیرد. به‌عنوان نمونه، جوی‌ها، خندقی‌ها 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 نگاهداشت 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، ۱۹۴ 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

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.

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

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>

- 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/9d086fbc1a405cb7d2e37d5405db0383> [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 stationnal 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>