

Spatiotemporal dynamics of soil erosion, sediment retention, and yield within the ecosystem services framework in a mountainous region of northern Iran

Mohsen Zabihi^{1*}, Hamidreza Moradi¹, Abdulvahed Khaledi Darvishan¹, Mehdi Gholamalifard²

1. Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

2. Department of the Environment, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

*Corresponding author Email: mohsen_zabihi69@yahoo.com

(Received: 20 July 2025

Revised: 14 September 2025

Accepted: 19 September 2025)

Extended Abstract

Introduction: Soil loss and sediment yield are among the main challenges in watershed management, especially in mountainous areas, which, in addition to reducing soil fertility and ecosystem functioning, also threaten water quality and the sustainability of hydrological services. In this context, watershed hydrological services, such as sediment retention, are of high importance because they control soil erosion and reduce downstream sediment transport, thereby improving water quality. The topographic, climatic, and human conditions of mountainous regions in northern Iran, especially the Hyrcanian forests, make these areas particularly susceptible to soil degradation, increasing the need for monitoring ecosystem services and analyzing the spatiotemporal dynamics of sediment retention to assess changes in ecosystem functioning and the effectiveness of management measures. In this regard, the InVEST model, with a simple structure, limited input requirements, and high interpretability, is an effective tool for analyzing these services at the watershed scale. This model, using sediment delivery ratio equations and spatial data, allows examination of the spatiotemporal changes in soil erosion, sediment yield, and sediment retention. Given the need for comprehensive studies in Iran, especially in the Hyrcanian forests, the present study aims to investigate the spatiotemporal changes of soil loss, sediment retention, and sediment yield over a 25-year period in the Talar mountainous watershed. Additionally, sensitivity analysis of model input factors was conducted to identify the most influential variables affecting sediment delivery ratio results.

Materials and methods: The study area is the Talar watershed (Mazandaran Province), spanning over 1,700 km² on the northern slopes of the Alborz mountain range, with an elevation range from 216 to 3,983 meters. The SDR model from the InVEST toolkit was applied to estimate annual soil loss, sediment retention, and sediment yield. Average soil loss was calculated using the InVEST soil erosion equation based on key factors including rainfall erosivity, soil erodibility, vegetation cover, land management, and topography across three study periods. Additional parameters such as the sediment connectivity index, K factor, and maximum sediment delivery ratio were defined based on regional characteristics and expert knowledge. A sensitivity analysis of the model input factors was also conducted to identify the most influential variables affecting the sediment delivery ratio outcomes.

Results and Discussion: According to the results, over the 25-year study period, soil loss decreased from 896,535 to 758,981 ton, sediment retention from 1.297 to 0.757 million ton, and sediment yield from 113,643 to 57,426 ton. The main cause of this reduction was a 28.8 % decrease in rainfall erosivity during the study period. The analysis showed that pasture land had the highest sediment retention capacity (415,978 ton), whereas orchards had the lowest (3,676 t). Meanwhile, the highest sediment yield occurred in rainfed agriculture and pasture, while forests and orchards had the lowest amounts. Sensitivity analysis indicated that rainfall erosivity, with a relative sensitivity coefficient of 0.99, was the most important factor affecting soil loss, sediment retention, and sediment yield, explaining more than 47 % of model output variations. The K parameter also influenced sediment retention and yield, though it had no direct effect on soil loss. Overall, the InVEST model is more sensitive to natural parameters such as rainfall than to management variables, highlighting the necessity of integrating climatic data with human interventions in management.

Conclusion: The findings indicate that the InVEST model, with high spatiotemporal analysis capability, is a suitable tool for assessing watershed hydrological services, especially in mountainous regions. The observed reduction in soil loss, sediment retention, and sediment yield over the study period was mainly due to decreased rainfall erosivity and climatic changes. Dense vegetation cover, such as forests and pastures, played a key role in sediment retention and soil erosion reduction, while human land uses such as agriculture contributed more to sediment yield. Sensitivity analysis emphasized the importance of natural factors, particularly rainfall, in watershed management. The findings can be applied to identify critical areas for conservation, prioritize sensitive land uses, design monitoring systems, and develop future management scenarios. It is recommended that future studies utilize long-term data, complementary models, and scenario-based analyses under climate change to enhance the accuracy of assessments and the applicability of results in ecosystem management decisions.

Keywords: Hyrcanian forests, Hydrological services, InVEST model, Sediment delivery ratio, Talar watershed

Citation: Zabihi, M., Moradi, H., Khaledi Darvishan, A., & Gholamalifard, M. (2026). Spatiotemporal dynamics of soil erosion, sediment retention, and yield within the ecosystem services framework in a mountainous region of northern Iran. *Integrated Watershed Management*, 6(2), 47-63. doi = 10.22034/iwm.2025.2066256.1237

Copyrights:

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



پویایی زمانی-مکانی هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب در چارچوب مدل خدمات

اکوسیستمی در یک منطقه کوهستانی شمال ایران

محسن ذبیحی^{۱*}، حمیدرضا مرادی^۱، عبدالواحد خالدی درویشان^۱، مهدی غلامعلی فرد^۲

۱. گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۲. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

*نویسنده مسئول: mohesen_zabihi69@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

چکیده مبسوط

مقدمه: هدررفت خاک و تولید رسوب به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی مدیریت آبخیزها، به‌ویژه در مناطق کوهستانی، علاوه بر کاهش حاصلخیزی و عملکرد اکوسیستم، کیفیت منابع آب و پایداری خدمات هیدرولوژیک را نیز تهدید می‌کند. در این میان، خدمات هیدرولوژیک آبخیزها مانند نگهداشت رسوب از اهمیت بالایی برخوردارند، زیرا با کنترل فرسایش خاک و کاهش انتقال رسوب به پایین‌دست، در ارتقای کیفیت منابع آبی مؤثرند. شرایط توپوگرافی، اقلیمی و انسانی مناطق کوهستانی شمال ایران، به‌ویژه جنگل‌های هیرکانی، این نواحی را مستعد تخریب منابع خاکی کرده و ضرورت پایش خدمات اکوسیستمی و تحلیل پویایی زمانی-مکانی نگهداشت رسوب برای ارزیابی تغییرات عملکرد اکوسیستم و اثربخشی اقدامات مدیریتی را افزایش داده است. در این راستا، مدل InVEST با ساختاری ساده، نیاز ورودی محدود و قابلیت تفسیر بالا ابزاری مؤثر برای تحلیل این خدمات در سطح حوزه‌های آبخیز است. این مدل با بهره‌گیری از نسبت تحویل رسوب و داده‌های مکانی، امکان بررسی تغییرات زمانی-مکانی فرسایش، تولید و نگهداشت رسوب را فراهم می‌آورد. با توجه به نیاز به مطالعات جامع در ایران، به‌ویژه جنگل‌های هیرکانی، پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی-مکانی سه مؤلفه هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب طی یک دوره ۲۵ ساله در آبخیز کوهستانی تالار انجام شده است. همچنین تحلیل حساسیت عوامل ورودی برای شناسایی مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر نتایج نسبت تحویل رسوب مدنظر قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، مدل SDR از مجموعه ابزارهای InVEST برای محاسبه سالانه هدررفت خاک، نگهداشت رسوب و تولید رسوب به‌کار گرفته شد. میانگین هدررفت خاک با استفاده از معادله برآورد فرسایش خاک در مدل InVEST و بر مبنای عوامل اصلی شامل فرسایش باران، فرسایش‌پذیری خاک، پوشش گیاهی، مدیریت اراضی و توپوگرافی در سه دوره مطالعاتی محاسبه شد. سایر پارامترهای موردنیاز مانند شاخص اتصال رسوبی (ICo)، پارامتر K و حداکثر نسبت تحویل رسوب بر اساس اطلاعات و شناخت از ویژگی‌های منطقه‌ای تعیین شد. در ادامه، به‌منظور شناسایی متغیرهای کلیدی تأثیرگذار بر مدل نسبت تحویل رسوب، تحلیل حساسیت به روش تغییر هر متغیر در هر بار اجرای مدل بر پایه ضریب حساسیت نسبی انجام گرفت.

نتایج و بحث: براساس نتایج پژوهش، طی دوره ۲۵ ساله، هدررفت خاک از ۸۹۶۵۳۵ به ۷۵۸۹۸۱ تن، نگهداشت رسوب از ۱/۲۹۷ به ۰/۷۵۷ میلیون تن و تولید رسوب از ۱۱۳۶۴۳ به ۵۷۴۲۶ تن کاهش یافته است که عامل اصلی آن، افت ۲۸/۸ درصدی فرسایش باران بوده است. بیشترین ظرفیت نگهداشت رسوب در کاربری‌های اراضی مربوط به مرتع (۴۱۵۹۷۸ تن) و کمترین مربوط به باغ (۳۶۷۶ تن) است. بیشترین تولید رسوب در کشاورزی دیم و مرتع و کمترین در جنگل و باغ مشاهده شد. نتایج تحلیل حساسیت نشان داد فرسایش باران با ضریب حساسیت نسبی ۰/۹۹، مهم‌ترین پارامتر مدل و مسئول بیش از ۴۷ درصد تغییرات خروجی است، براساس نتایج، در حالی که پارامتر K بر نگهداشت و تولید رسوب اثر دارد ولی بر هدررفت خاک تأثیر مستقیم ندارد. مدل InVEST نسبت به عوامل طبیعی مانند بارش حساس‌تر از متغیرهای مدیریتی است، که ضرورت تلفیق اطلاعات اقلیمی و مداخلات انسانی را در مدیریت نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری: یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهد مدل InVEST با قابلیت تحلیل مکانی و زمانی بالا، ابزاری مناسب برای ارزیابی خدمات هیدرولوژیک آبخیزها، به‌ویژه در مناطق کوهستانی است. کاهش هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب طی دوره مطالعه عمدتاً ناشی از کاهش فرسایش باران و تغییرات اقلیمی بوده است. پوشش گیاهی متراکم مانند جنگل و مرتع نقش کلیدی در حفظ رسوبات و کاهش فرسایش داشته، در حالی که کاربری‌های انسانی مانند کشاورزی سهم بیشتری در تولید رسوب دارند. تحلیل حساسیت مدل نشان داد توجه به عوامل طبیعی، به‌ویژه بارندگی، در مدیریت حوضه ضروری است. یافته‌ها می‌تواند برای شناسایی مناطق بحرانی، اولویت‌بندی کاربری‌های حساس، طراحی نظام پایش و تدوین سناریوهای مدیریت منابع خاک کاربرد داشته باشند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آتی با داده‌های بلندمدت، مدل‌های مکمل و تحلیل سناریویی در چارچوب تغییر اقلیم انجام شود.

واژه‌های کلیدی: جنگل‌های هیرکانی، خدمات هیدرولوژیک، مدل InVEST، نسبت تحویل رسوب، آبخیز تالار

استناد: ذبیحی، م.، مرادی، ح.، خالدی درویشان، ع.؛ و غلامعلی فرد، م. (۱۴۰۵). پویایی زمانی-مکانی هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب در چارچوب مدل خدمات اکوسیستمی در یک منطقه کوهستانی شمال ایران. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۴۷-۶۳، (۲)، ۶.

حق چاپ:



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

مقدمه

فرسایش خاک و تجمع رسوب از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت حوزه‌های آبخیز در مناطق کوهستانی به‌شمار می‌رود که پیامدهایی همچون کاهش حاصلخیزی خاک، افت کارایی اکوسیستم و تهدید کیفیت منابع آب را به همراه دارد (Rehman et al., 2022). تحلیل پویایی زمانی-مکانی این فرآیندها در چارچوب خدمات اکوسیستمی، به‌ویژه با تمرکز بر خدمت نگهداشت رسوب^۱، می‌تواند درک بهتری از عملکرد اکوسیستم و اثربخشی اقدامات مدیریتی فراهم آورد. آبخیز یک واحد فیزیکی، اکولوژیک، هیدرولوژیک و اقتصادی-اجتماعی و همچنین واحدی قابل برنامه‌ریزی و مدیریت طبیعی است که به‌عنوان محور اصلی برنامه‌ریزی‌ها برای توسعه پایدار مطرح است (He & James, 2021). مدیریت جامع آبخیز راهی برای دستیابی به توسعه پایدار و ایجاد تعادل بین کلیه منابع موجود در اکوسیستم و در نهایت پایداری آن است. با این وجود، روند تخریبی حوزه‌های آبخیزها و فشارهای موجود بر اکوسیستم‌های طبیعی به‌دلیل تغییر اقلیم، افزایش جمعیت و همچنین توسعه در ابعاد مختلف از جمله مسائل و چالش‌های مهم مدیریتی کشورها (Tiwari & Joshi, 2012; Mperejekumana et al., 2024) و به‌ویژه کشورهای در حال توسعه محسوب می‌شود. ادامه تخریب منابع طبیعی منجر به شناخت و درک اهمیت خدمات آبخیزها و تأثیر آن بر سلامت و رفاه انسان به‌عنوان هدف نهایی مدیریت منابع طبیعی می‌شود (Wang et al., 2016; Luo et al., 2024; Sayed et al., 2025). خدمات آبخیز^۲ به مجموعه‌ای از منافع مستقیم و غیرمستقیم اطلاق می‌شود که آبخیزها برای جوامع انسانی فراهم می‌کنند. در میان انواع این خدمات، خدمات هیدرولوژیک نقش محوری در تنظیم و مدیریت چرخه آب ایفا کرده و زیربنای بسیاری از دیگر خدمات زیست‌محیطی به‌شمار می‌روند (Xue et al.,

2024; Juan-Diego et al., 2025). این دسته از خدمات شامل فرآیندها و کارکردهای طبیعی مرتبط با آب، مانند تنظیم جریان، تصفیه آب، تغذیه آب‌های زیرزمینی، کنترل سیلاب و نگهداشت رسوب هستند که نقشی اساسی در حفظ عملکرد اکوسیستم و تأمین منافع انسانی دارند. در این میان، نگهداشت رسوب به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی خدمات هیدرولوژیک، نشان‌دهنده ظرفیت طبیعی چشم‌انداز برای جلوگیری از جابجایی و انتقال رسوبات به مناطق پایین‌دست است (Gwal et al., 2024). ارزیابی این خدمت، به‌ویژه در مناطق کوهستانی که مستعد فرسایش و از دست رفتن خاک هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های ساده، داده‌محور و کاربرپسند که به داده‌های ورودی محدودتری نیاز دارند و از نظر کاربرد و تفسیر نتایج نیز از سهولت بالایی برخوردارند، به‌عنوان رویکردی کارآمد برای ارزیابی خدماتی همچون نگهداشت رسوب مطرح می‌شود (Vigerstol & Aukema, 2011). مدل InVEST^۳ از جمله ابزارهای پیشرو در این زمینه است که برای ارزیابی خدمات اکوسیستمی توسعه یافته و بر اساس مطالعات مختلف (Sharp et al., 2018; Marques et al., 2021)، به‌عنوان یکی از پراستفاده‌ترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی خدمات اکوسیستم شناخته می‌شود. این مدل با بهره‌گیری از داده‌های در دسترس و ساختار ساده، امکان شناسایی مناطق بحرانی از نظر فرسایش خاک و تحلیل فضایی الگوهای نگهداشت رسوب را فراهم می‌کند و می‌تواند ابزاری مؤثر برای پشتیبانی از مدیریت پایدار منابع طبیعی در مقیاس آبخیز باشد (Kantharajan et al., 2023).

بررسی پویایی زمانی و مکانی خدمت اکوسیستمی نگهداشت رسوب نقش به‌سزایی در درک فرآیندهای فرسایشی، عملکرد اکوسیستم و مدیریت پایدار منابع

طبیعی دارد. این خدمت بیان‌گر توان طبیعی یک چشم‌انداز در کاهش انتقال رسوب و حفظ پایداری خاک در برابر عوامل فرسایشی است (Gwal et al., 2024). تغییرات کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی و نوسانات اقلیمی از مهمترین عواملی هستند که موجب تغییر در فرسایش خاک و ظرفیت نگهداشت رسوب طی زمان و در سطح مکان می‌شوند (Talebikhiavi et al., 2017). تحلیل این پویایی‌ها با استفاده از مدل‌های مکان‌محور، امکان شناسایی مناطق بحرانی، تحلیل روندهای تغییر و ارزیابی اثربخشی مداخلات مدیریتی را فراهم می‌سازد. شناسایی مناطق با کاهش توان نگهداشت رسوب می‌تواند به‌عنوان هشدار اولیه برای برنامه‌ریزی‌های حفاظتی به‌کار رود (Roba et al., 2021). بررسی تغییرات زمانی و مکانی این خدمت همچنین به تبیین تعاملات پیچیده بین انسان و اکوسیستم کمک کرده و پایه‌ای برای تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر خدمات اکوسیستمی فراهم می‌سازد. از این رو، ارزیابی مستمر این خدمت در دوره‌های زمانی مختلف، ابزاری مؤثر برای مدیریت تطبیقی و تقویت تاب‌آوری اکوسیستم‌های حساس محسوب می‌شود (Turner et al., 2022).

پژوهش‌های متعددی در خصوص تحلیل مکانی و زمانی خدمت اکوسیستمی نگهداشت رسوب با استفاده از مدل InVEST صورت گرفته است. در این راستا، Hamel و همکاران (۲۰۱۵) حساس‌ترین عوامل مؤثر در شبیه‌سازی نگهداشت رسوب در کارولینای شمالی آمریکا را فرساینده‌گی باران معرفی کردند و قابلیت مدل InVEST را با وجود محدودیت داده‌ها تأیید نمودند. Bouguerra و Jebari (۲۰۱۷) در بررسی زیرحوضه‌های رودخانه Rmel تونس، بیش از ۶۰ درصد مناطق را دارای هدررفت خاک بیش از ۵ تن در هکتار در سال گزارش کردند که افزایش شیب، به‌ویژه در اراضی کشاورزی، علت اصلی آن بوده است. Cerretelli و همکاران (۲۰۱۸) بر لزوم استفاده از داده‌های محلی به جای داده‌های جهانی در مدل‌سازی‌های منطقه‌ای تأکید کردند. Bai و همکاران (۲۰۱۹) در ایالت

Kentucky آمریکا نشان دادند که تغییر کاربری اراضی اثر بیشتری بر نگهداشت رسوب نسبت به تغییر اقلیم دارد. Chen و همکاران (۲۰۱۹) در چین ارتباط معکوسی بین شدت خدمات اکوسیستمی و توسعه شهری گزارش کردند. Chauhan و همکاران (۲۰۲۴) در آبخیز جنوب Shimla واقع در منطقه هیمالیا با استفاده از مدل نسبت تحویل رسوب در چارچوب InVEST، تغییرات مکانی و زمانی نگهداشت رسوب را ارزیابی کرده و کاهش ظرفیت در زیرحوضه‌های شمالی و افزایش آن در نواحی جنوبی را ناشی از تغییرات کاربری اراضی تشخیص دادند. Pérez-Cutillas و همکاران (۲۰۲۵) نیز در ۱۲ حوزه آبخیز در کشور مراکش نشان دادند که افزایش ماده آلی خاک و اقدامات حفاظتی، کاهش انتقال رسوب و بهبود کارایی نگهداشت را در پی داشته است. در ایران، Asadolahi و همکاران (۲۰۱۵) میزان هدررفت خاک را تا ۷۵ تن در سطح پیکسل با ابعاد ۹۰ متری و نگهداشت رسوب را تا حدود ۴۰۰۰ تن در هکتار در آبخیز گرگانرود برآورد کردند. Barzali و همکاران (۲۰۲۲) در حوزه آبخیز اترک، جنگل‌ها و مراتع خوب را دارای بیشترین ظرفیت نگهداشت رسوب دانستند و کاهش پوشش گیاهی را عامل افزایش فرسایش خاک عنوان کردند. در مطالعه‌ای دیگر، Sadat و همکاران (۲۰۲۳) در حوضه‌های لاهیجان چابکسر و آستانه کوچصفهان، تغییرات قابل توجهی در فرسایش خاک و خدمت نگهداشت رسوب طی دو دهه گذشته شناسایی کردند. Zarandian و همکاران (۲۰۲۳) در ارزیابی نقش کاربری اراضی در عرضه خدمت اکوسیستمی نگهداشت خاک در استان سمنان با استفاده از مدل InVEST به این نتیجه دست یافتند که پتانسیل اتلاف خاک و انتقال رسوب به‌ترتیب از صفر تا ۲۴۸/۱۸ و از صفر تا ۵۷/۲۵ تن در پیکسل با ابعاد ۱۰ متری متغیر است. Namazi و همکاران (۲۰۲۵) در شهرستان سرخس با استفاده از مدل InVEST نشان دادند که بیشترین ظرفیت نگهداشت رسوب مربوط به کاربری مرتعی و کم‌ترین آن مربوط به کاربری مسکونی است و تغییر

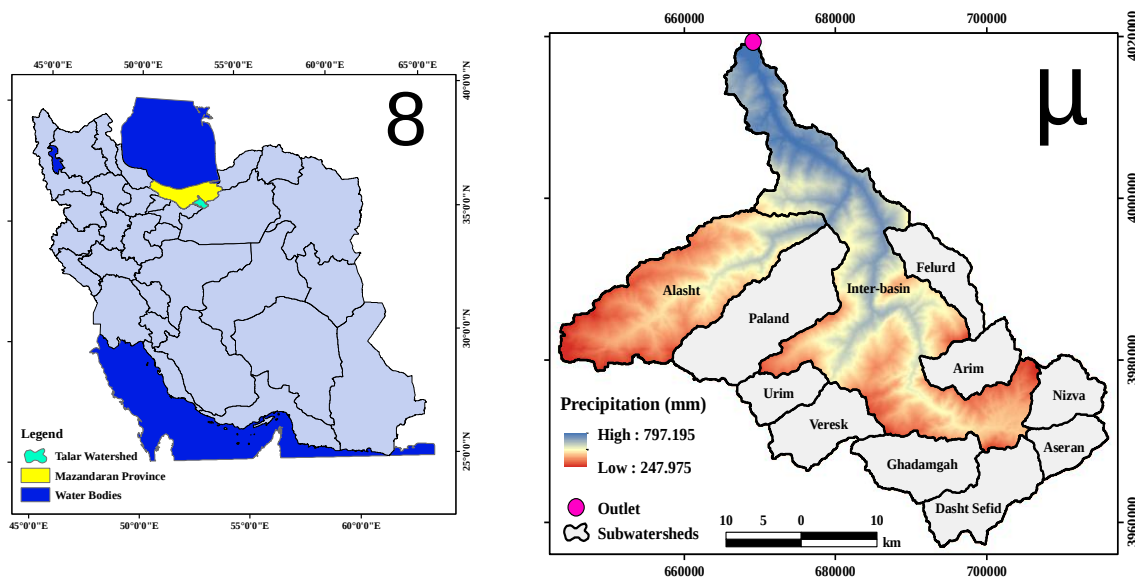
شناسایی مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار، از دیگر اهداف این پژوهش به‌شمار می‌رود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر، آبخیز تالار در استان مازندران با مساحتی بالغ بر ۱۷۰۰ کیلومتر مربع برای مطالعه حاضر انتخاب شده است. این آبخیز در حد واسط $35^{\circ} 22'$ تا $52^{\circ} 34' 23''$ طول شرقی و $36^{\circ} 19' 1''$ عرض شمالی و در دامنه شمالی رشته‌کوه البرز واقع شده و از نظر ارتفاع بین ۲۱۶ تا ۳۹۸۳ متر متغیر است. اقلیم منطقه از نوع شبه مدیترانه‌ای است که براساس طبقه‌بندی دوما رتن جزء اقلیم نیمه‌مرطوب محسوب می‌شود. میانگین بارش و تبخیر نیز به ترتیب برابر با ۵۴۷ و ۴۴۶ میلی‌متر برآورد شده است (Zabihi et al., 2025). رودخانه تالار مهم‌ترین رودخانه آبخیز است که به زهکشی آن به دریای خزر می‌پردازد (Solaimani et al., 2021). کاربری اراضی آبخیز تالار نیز شامل کشاورزی دیم، جنگل، کشاورزی آبی، باغ، مرتع و منطقه مسکونی است که کاربری غالب آن از نوع مرتعی است (Zabihi et al., 2020). ساختار زمین‌شناسی منطقه از دوره پرکامبرین تا زمان حاضر را شامل می‌شود و جهت گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها عمدتاً جنوب‌شرقی-شمال‌غربی است. مواد مادری منطقه عمدتاً ماسه‌سنگ همراه با شیل، مارن و گاهی سنگ آهک بوده و خاک‌های با بافت متوسط تا سبک و نفوذپذیری متوسط را تشکیل می‌دهند (Vahabzadeh & Ahmadi, 2022)، که این ویژگی‌ها بر شدت فرسایش خاک و میزان رسوب‌گذاری در آبخیز تأثیرگذار هستند (Ashtari & Nosrati, 2024). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در استان مازندران نشان می‌دهد.

کاربری و کاهش پوشش گیاهی عامل افزایش فرسایش خاک در نواحی مرکزی و شرقی منطقه بوده است. مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از مدل InVEST برای تحلیل الگوهای مکانی و زمانی فرسایش خاک و نگهداشت رسوب در چارچوب خدمات اکوسیستم در پژوهش‌های بین‌المللی و ملی رو به گسترش است. در این مطالعات، تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی به‌عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پویایی رسوب معرفی و بر نقش داده‌های محلی در افزایش دقت مدل‌سازی تأکید شده است. لازم به ذکر است که بیش‌تر پژوهش‌های انجام شده در ایران، ارزیابی خدمت اکوسیستمی نگهداشت رسوب را به‌صورت ایستا یا مقطعی مورد بررسی قرار داده‌اند. از سوی دیگر، در مناطق کوهستانی شمال ایران، به‌ویژه در ناحیه جنگل‌های هیرکانی که با شرایط توپوگرافی و اقلیمی پیچیده و اکوسیستم‌های حساس شناخته می‌شوند، تحلیل تغییرات زمانی و مکانی نگهداشت رسوب به‌عنوان یکی از خدمات هیدرولوژیک آبخیز، نیازمند توجه و مطالعه‌ای جامع‌تر است. بدین منظور، انجام مطالعاتی با رویکردی یکپارچه که روندهای بلندمدت تغییرات فرسایش خاک، تولید و نگهداشت رسوب را در چارچوب خدمات اکوسیستم بررسی کرده و تعامل میان عوامل اکولوژیکی و مداخلات انسانی در مناطق کوهستانی را مورد توجه قرار دهد، ضروری است. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف تحلیل پویایی زمانی و مکانی هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب با بهره‌گیری از مدل خدمات اکوسیستمی InVEST طی یک دوره ۲۵ ساله در منطقه‌ای کوهستانی از استان مازندران طراحی شده است. تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب در چارچوب مدل مذکور، به‌منظور



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی در ایران و استان مازندران

Figure 1- Geographic location of the study area in Iran and Mazandaran Province

$$SDR = \frac{SDR_{max}}{\left(\frac{IC_0 - IC}{K}\right) \exp + 1} \quad (1)$$

در این رابطه، SDR_{max} بیشینه نسبت تحویل رسوب، IC شاخص اتصال رسوبی، IC_0 مقدار آستانه شاخص اتصال رسوب و k پارامتر شکل منحنی می‌باشد. در ادامه، میانگین بار رسوبی (تن بر هکتار در سال) نیز به صورت حاصلضرب میزان هدررفت خاک در نسبت تحویل رسوب به دست می‌آید (Renard et al., 1997; Gashaw et al., 2021). اکوسیستمی نگهداشت رسوب (تفاوت هدررفت خاک در شرایط کاربری اراضی فعلی و شرایط فرضی زمین بایر) براساس رابطه ترکیبی و تأثیر 1-CP در عوامل هدررفت خاک و نسبت تحویل رسوب محاسبه می‌شود (Hopkins et al., 2018; Marques et al., 2021). اختلاف دو حالت مذکور، نمایانگر ظرفیت اکوسیستم در کاهش فرسایش و حفظ خاک است؛ بنابراین، این شاخص اهمیت نقش خدمات اکوسیستم را در حفظ منابع خاک و ارتقای پایداری اکوسیستم نشان می‌دهد. به منظور اجرای مدل InVEST عوامل ورودی مدل در سال‌های مطالعاتی (۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳) شامل

روش تحقیق

به منظور مدل سازی مؤلفه‌های مرتبط با فرسایش خاک در چارچوب مدل خدمات اکوسیستمی InVEST، ماژول نسبت تحویل رسوب (SDR)^۱ استفاده شد. این ماژول بر پایه رابطه پیشنهادی Borselli و همکاران (۲۰۰۸) و توسعه‌های بعدی توسط Vigiak و همکاران (۲۰۱۲) عمل می‌کند. در ماژول مورد اشاره، ابتدا مقدار هدررفت خاک سالانه با استفاده از معادله جهانی هدررفت خاک (USLE) محاسبه می‌شود. نسبت تحویل رسوب (SDR) برای هر پیکسل بر اساس شاخص اتصال رسوبی (IC)^۲ و به صورت رابطه ۱ محاسبه می‌شود. لازم به توضیح است که در مدل InVEST، انتقال رسوب از لکه‌های فرسایشی به آبراهه تابعی از اتصال هیدرولوژیک است. شاخص اتصال رسوبی میزان ارتباط مکانی بین نقاط فرسایشی و شبکه آبراهه‌ها را کمی سازی می‌کند. بر همین اساس، هرچه شاخص اتصال رسوبی بیشتر باشد، SDR بالاتر شده و سهم بیشتری از خاک فرسایش یافته به مجاری زهکشی منتقل می‌شود.

2 Index of Connectivity, IC

1 Sediment Delivery Ratio, SDR

عامل فرساینده‌گی باران با استفاده از رابطه بارش سالانه و فرساینده‌گی باران (Ghorbanpour, 2004)، عامل فرسایش‌پذیری خاک براساس خصوصیات بافت خاک در هر یک از واحدهای اراضی منطقه مطالعاتی و رابطه ارائه شده در معادله جهانی هدررفت خاک (Wischmeier and Smith, 1978; Rostami & Rabbani, 2023; Haji et al., 2024)، عامل مدیریت زراعی براساس شاخص نرمال شده پوشش گیاهی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های مورد پژوهش (Ayalew et al., 2020)، عامل مدیریت اراضی بر اساس نوع کاربری اراضی و شرایط منطقه تعیین شد (Teh, 2011) که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقدار عامل مدیریت اراضی در هر یک از کاربری‌های اراضی آبخیز تالار

Table 1- Value of the land management factor for each land use type in the Talār Watershed

کاربری اراضی	سال		
	1393	1379	1368
کشاورزی دیم	0.453	0.51	0.5
جنگل	0.104	0.106	0.113
کشاورزی آبی	0.447	0.449	0.452
باغ	0.4	0.4	0.4
مرتع	0.592	0.592	0.598
منطقه مسکونی	0.407	0.404	0.402

کاربری اراضی آبخیز تالار نیز بر اساس روش نظارت شده ماشین بردار پشتیبان در محیط نرم‌افزار ENVI تهیه شد (Zabihi et al., 2020). مدل رقومی ارتفاع با دقت مکانی ۳۰ متر از سازمان نقشه‌برداری کشور اخذ و استفاده شد. آستانه تجمعی جریان پس از بررسی آبراهه‌های رتبه یک در آبخیز تالار و میانگین‌گیری سلول‌های مشارکت‌کننده، برابر با ۱۰۰ تعیین شد. مطابق با توصیه دستورالعمل استفاده از مدل InVEST، شاخص IC و پارامتر K در آبخیز مطالعاتی به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۲ تعیین شد (Vigiak et al., 2011).

2012). لازم به توضیح است که این دو پارامتر واسنجی هستند که شکل رابطه بین اتصال هیدرولوژیک و نسبت تحویل رسوب را تعیین می‌کنند. مقدار بیشینه مقدار نسبت تحویل رسوب با توجه به وضعیت اقلیم و کاربری اراضی منطقه مطالعاتی نیز برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شد (Sharp et al., 2018). پس از اجرای مدل نسبت تحویل رسوب InVEST، به منظور تحلیل حساسیت عوامل ورودی، سال ۱۳۹۳ به عنوان سال پایه در نظر گرفته شد. تحلیل حساسیت عوامل ورودی براساس روش تحلیل حساسیت OAT^۱ (Saltelli et al., 2011; Mouida & Alaa, 2011) و با محاسبه ضریب حساسیت نسبی^۲ (Mostafazadeh et al., 2018) براساس رابطه ۲ صورت پذیرفت. در روش OAT، به عنوان یکی از روش‌های با محاسبه ساده و نیاز کم به داده، هر بار فقط یک متغیر ورودی تغییر داده می‌شود و اثر آن بر خروجی مدل بررسی می‌گردد، در حالی که سایر متغیرها ثابت نگه داشته می‌شوند. با وجود محدودیت در بررسی تعامل متغیرها، این روش قادر به شناسایی حساس‌ترین عوامل منفرد است. لذا رویکرد حاضر به عنوان یک گام اولیه در ارزیابی حساسیت مدل SDR به کار گرفته شد.

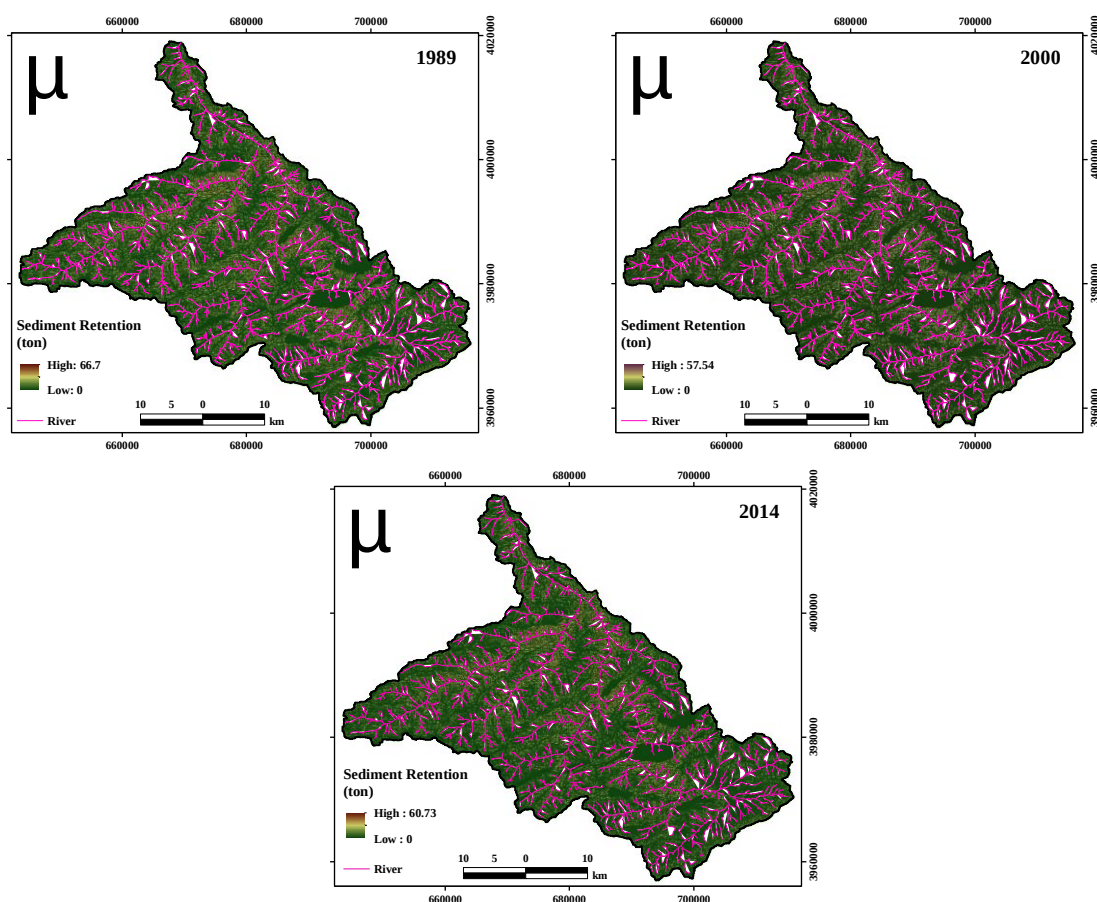
$$S_r = \frac{O_2 - O_1}{P_2 - P_1} \left(\frac{P}{O} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، S_r ضریب حساسیت نسبی، O میانگین مقادیر خروجی مدل و P میانگین مقادیر ورودی مدل هستند. لازم به توضیح است که P_1 و P_2 نشان‌دهنده مقادیر اولیه و تغییر یافته متغیر ورودی مدل هستند. O_1 و O_2 متناظر با میانگین خروجی مدل در همان شرایط هستند. ضریب حساسیت نسبی نیز نشان می‌دهد که چه میزان تغییر در خروجی‌ها به تغییر در ورودی‌ها نسبت داده می‌شود.

نتایج

اکوسیستمی InVEST در شکل ۲ نشان داده شده است.

نتایج نقشه‌های تهیه شده نگهداشت رسوب آبخیز تالار طی سال‌های مطالعاتی با استفاده از مدل خدمات



شکل ۲- الگوی مکانی و زمانی نگهداشت رسوب در سال‌های مطالعاتی در آبخیز تالار

Figure 2- Temporal and spatial patterns of sediment retention during the study years in the Talar Watershed

روند می‌تواند ناشی از تغییرات کاربری اراضی، کاهش پوشش گیاهی، افزایش فرسایش‌پذیری خاک یا تغییر در الگوهای بارندگی باشد. اگرچه الگوی مکانی نگهداشت رسوب نسبتاً ثابت مانده، اما افت در مقادیر مطلق آن ممکن است بیان‌گر کاهش عملکرد اکوسیستم در برابر فرآیندهای فرسایشی و انتقال رسوب باشد که ضرورت بازنگری در اقدامات مدیریتی حوزه را برجسته می‌سازد. مقادیر هدررفت خاک، نگهداشت رسوب و تولید رسوب طی سال‌های ۱۳۶۸، ۱۳۷۹ و ۱۳۹۳ در انواع کاربری‌های اراضی در جدول ۲ ارائه شده است.

بر اساس اطلاعات ارائه‌شده در شکل ۲، الگوی مکانی تغییرات نگهداشت رسوب در حوزه آبخیز تالار طی دوره مطالعه تقریباً مشابه بوده است. با این حال، در بازه زمانی ۲۵ ساله پژوهش، دامنه عددی مقادیر نگهداشت رسوب روندی کاهشی نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که مقدار حداکثر نگهداشت رسوب در سال‌های آغازین و پایانی دوره مطالعه به‌ترتیب برابر با ۶۶/۶۷ و ۶۰/۷۳ تن در حوزه آبخیز تالار برآورد شده است. کاهش مقدار حداکثر نگهداشت رسوب طی دوره ۲۵ ساله، نشان‌دهنده تضعیف تدریجی توان طبیعی حوزه آبخیز تالار در حفظ و ذخیره رسوبات است. این

جدول ۲- مقادیر هدررفت خاک، نگهداشت رسوب و تولید رسوب در انواع کاربری‌های اراضی طی سال‌های مطالعاتی در آبخیز تالار

Table 2- Soil loss, sediment retention, and sediment yield values across land use types during the study years in the Talar watershed

کاربری اراضی	هدررفت خاک (تن)			نگهداشت رسوب (تن)			تولید رسوب (تن)		
	2014	2000	1989	2014	2000	1989	2014	2000	1989
کشاورزی دیم	20712	13588	3816	20520	10116	2467	1464	1039	374
جنگل	21758	27116	38509	284720	291661	537339	1034	1404	3312
کشاورزی آبی	10470	10503	8669	14828	12971	13756	664	670	832
باغ	4079	1481	1080	3676	1049	1046	277	82	84
مرتع	580135	659262	836973	415978	437439	733329	52815	59838	108240
منطقه مسکونی	15528	8601	7120	17866	8959	9690	1172	647	801

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، می‌توان گفت که نوع کاربری اراضی تأثیر قابل توجهی بر فرایندهای فرسایش خاک، نگهداشت و تولید رسوب در حوزه آبخیز تالار دارد. در این میان، کاربری‌های دارای پوشش گیاهی متراکم مانند مرتع و جنگل عملکرد مناسبی در کاهش هدررفت خاک و افزایش نگهداشت رسوب از خود نشان داده‌اند. در مقابل، کاربری‌هایی با پوشش گیاهی ضعیف‌تر یا مداخلات انسانی شدیدتر، مانند مناطق مسکونی و برخی اراضی کشاورزی، مستعد فرسایش بیش‌تر و تولید رسوب بالاتر بوده‌اند. لازم به توضیح است که مقادیر نگهداشت رسوب در این مطالعه و مطابق با مدل InVEST نسبت به وضعیت بایر خاک سنجیده شده است؛ به این معنا که ظرفیت طبیعی اکوسیستم‌ها در حفظ رسوبات در مقایسه با حالتی که خاک فاقد پوشش گیاهی باشد، ارزیابی شده است. علاوه بر این، مساحت هر کاربری نقش تعیین‌کننده‌ای در مقدار مطلق هدررفت و نگهداشت رسوب دارد؛ حتی اگر یک پوشش گیاهی ظرفیت نسبی بالایی داشته باشد، وسعت محدود آن توان محدودی در کاهش رسوب دارد. به همین دلیل، اراضی مرتعی حوزه آبخیز مطالعاتی بیشترین نگهداشت رسوب را نشان می‌دهند و به دلیل وسعت قابل توجه خود، سهم قابل توجهی در کاهش انتقال رسوب به شبکه آبراهه‌ها دارند. نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت تحویل رسوب InVEST نسبت به تغییرات عوامل ورودی شامل فرسایندهایی

باران، فرسایش‌پذیری خاک، مدیریت زراعی و مدیریت اراضی در آبخیز تالار در جدول ۳ نشان داده شده است. در تحلیل حساسیت، تغییرات مثبت و منفی هر متغیر به صورت متقارن اعمال شده است تا اثرات افزایش و کاهش پارامتر بر خروجی‌های مدل به طور همزمان و قابل مقایسه بررسی شود. تغییر مثبت نشان‌دهنده افزایش مقدار متغیر نسبت به مقدار پایه و تغییر منفی نشان‌دهنده کاهش آن است. این رویکرد امکان شناسایی حساس‌ترین پارامترها و ارزیابی پایداری نتایج مدل را فراهم می‌کند و اطمینان می‌دهد که دامنه تغییرات مورد استفاده خارج از محدوده طبیعی و واقع‌بینانه پارامترها نباشد.

براساس یافته‌های پژوهش حاضر و ارائه شده در جدول ۳ در خصوص تحلیل حساسیت مدل نسبت تحویل رسوب نسبت به تغییرات عوامل ورودی در آبخیز تالار می‌توان اظهار داشت که این مدل نسبت به برخی پارامترهای طبیعی، مانند بارندگی و اتصال رسوبی، حساسیت بالایی نشان می‌دهد. به ویژه، پارامتر K که به اتصال رسوبی مرتبط است، نقش مهمی در تعیین میزان رسوب تحویلی ایفا می‌کند. از سوی دیگر، عوامل مدیریتی مانند نوع مدیریت اراضی و شیوه‌های زراعی، اگرچه دارای اثر هستند، اما تأثیر کمتری بر نتایج مدل دارند. این موضوع بر اهمیت توجه به شرایط طبیعی حاکم بر حوزه آبخیز در کنار مداخلات مدیریتی در برنامه‌ریزی برای کنترل فرسایش و تحویل رسوب

تأکید دارد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که موفقیت در مدیریت تحویل رسوب مستلزم تمرکز هم‌زمان بر عوامل طبیعی مؤثر و به‌ویژه تقویت مداخلات مدیریتی مکمل در سطح حوزه آبخیز است.

جدول ۳- نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت تحویل رسوب نسبت به تغییرات عوامل ورودی در آبخیز تالار
Table 3- Sensitivity analysis results of the sediment delivery ratio model to input factor variations in the Talar Watershed

ضریب حساسیت نسبی			مقدار تغییر (درصد)	عامل متغیر
تولید رسوب	نگهداشت رسوب	هدررفت خاک		
0.999	0.999	0.999	14.44%	فرساینده‌گی باران
0.999	0.999	0.999	-14.44%	
1.379	0.682	0	12.44%	پارامتر K
2.203	1.344	0.341	-12.44%	
0.284	0.021	0.169	4.69%	مدیریت زراعی
0.273	0.02	0.163	-4.69%	
0.167	0.012	0.167	1.41%	مدیریت اراضی
0.165	0.012	0.165	-1.41%	

بحث

پویایی زمانی و مکانی هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب طی دوره ۲۵ ساله

تحلیل تغییرات زمانی نگهداشت رسوب، هدررفت خاک و تولید رسوب نقش کلیدی در فهم روندهای فرآیندهای هیدرولوژیکی و بهینه‌سازی راهکارهای کاهش فرسایش و حفظ کیفیت منابع آب دارد. در همین راستا و براساس یافته‌های پژوهش مندرج در شکل ۱ و جدول ۲، مقدار هدررفت خاک از ۸۹۶۵۳۵ به ۷۵۸۹۸۱ تن (معادل ۱۵ درصد)، نگهداشت رسوب از ۱/۲۹۷ به ۰/۷۵۷ میلیون تن (۴۱/۶ درصد) و تولید رسوب از ۱۱۳/۶۴۳ به ۵۷/۴۲۶ تن (۴۹/۴ درصد) طی دوره ۲۵ ساله پژوهش در آبخیز تالار کاهش یافته است. کاهش مقدار عامل فرساینده‌گی باران به میزان ۲۸/۸ درصد طی دوره پژوهش از مهمترین دلایل کاهش متغیرهای هدررفت خاک، نگهداشت رسوب و تولید رسوب در منطقه مطالعاتی است. در همین رابطه Rojan و همکاران (۲۰۲۰) اظهار نمودند که بودجه رسوب عمدتاً به رواناب بستگی دارد که معمولاً از طریق بارندگی کنترل می‌شود و لذا با نتایج تحقیق حاضر هم راستا است. در خصوص خدمت هیدرولوژیک نگهداشت رسوب در آبخیز تالار بایستی اشاره شود که نقش کاربری اراضی گذشته و فعلی در کاهش مقدار تولید رسوب نسبت به شرایط بایر خاک به اندازه ۱/۲۹۷ و

۰/۷۵۷ میلیون تن به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۹۳ بوده است. به‌عبارت دیگر، در صورت بایر بودن خاک در آبخیز مطالعاتی مقادیر ارائه شده فوق به مقدار تولید رسوب افزوده می‌شد. اگرچه مقادیر نگهداشت رسوب در سال‌های مورد پژوهش قابلیت مقایسه با یکدیگر را دارند، سرشت نگهداشت رسوب نیز در مقایسه با شرایط بایر خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد که به‌عنوان یک سود و خدمت هیدرولوژیک اکوسیستم برای آبخیزنشینان مطرح است. علاوه بر این، در صورت عدم وجود کاربری اراضی مناسب و در نتیجه نگهداشت رسوب اندک و تولید رسوب زیاد می‌توان به تأثیر آن بر کیفیت آب در منطقه مطالعاتی نیز اشاره داشت. لازم به توضیح است که کاهش هم‌زمان تولید و نگهداشت رسوب می‌تواند نشانه‌ای از کاهش کلی پویایی رسوبی حوضه باشد که در کوتاه‌مدت مطلوب به‌نظر می‌رسد، اما نیازمند پایش دقیق‌تر در بلندمدت است؛ چراکه افت بیش از حد در تولید رسوب می‌تواند ناشی از تخریب منابع خاکی یا از دست رفتن خاک‌های سطحی نیز باشد؛ بنابراین، تحلیل روندهای زمانی باید هم‌زمان با بررسی کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم انجام گیرد. براساس نتایج مدل‌سازی نسبت تحویل رسوب با مدل InVEST برای کاربری‌های اراضی مختلف و ارائه شده در جدول ۲ می‌توان گفت که کاربری‌های باغ و مرتع به‌ترتیب کمینه و بیشینه مقدار کل هدررفت خاک،

نگهداشت رسوب و تولید رسوب را در آبخیز تالار دارند. در همین ارتباط، کاربری‌های مرتع (۵۸۰۱۳۵ تن)، جنگل، کشاورزی دیم، منطقه مسکونی، کشاورزی آبی و باغ (۴۰۷۹ تن) در رتبه‌های اول تا ششم از نظر مقدار کل هدررفت خاک در آبخیز تالار قرار گرفتند. بیشینه و کمینه مقدار نگهداشت رسوب نیز در کاربری‌های مرتع و باغ با مقادیر به‌ترتیب ۴۱۵۹۷۸ و ۳۶۷۶ تن محاسبه شد. جنگل، کشاورزی آبی، منطقه مسکونی، کشاورزی دیم نیز رتبه‌های دوم تا پنجم مقدار نگهداشت رسوب را در آبخیز تالار به خود اختصاص دادند. مقدار تولید رسوب در کاربری‌های اراضی مختلف نیز حاکی از تولید ۱۴۶۴، ۱۰۳۴، ۶۶۴، ۲۷۷، ۵۲۸۱۵ و ۱۱۷۲ تن رسوب به‌ترتیب در کاربری‌های کشاورزی دیم، جنگل، کشاورزی آبی، باغ، مرتع و منطقه مسکونی است. بررسی بیشتر نتایج مدل‌سازی هدررفت خاک در آبخیز تالار نشان می‌دهد که کاربری اراضی جنگل با ۰/۳۹ تن در هکتار کمینه هدررفت خاک در واحد سطح را دارد. این مقدار برای کاربری‌های مرتع و کشاورزی دیم برابر با ۵/۲۸ و ۴/۵۵ به‌دست آمد. مقدار تولید رسوب ویژه (تولید رسوب در واحد سطح) در کاربری‌های مرتع و جنگل برابر با ۰/۴۹ و ۰/۰۱ تن در هکتار به‌عنوان بیشینه و کمینه تولید رسوب در واحد سطح محاسبه شد. در همین راستا، Ouallali و همکاران (۲۰۲۰) نیز در مطالعه خود در کشور مراکش به پایین بودن هدررفت خاک و تولید رسوب در کاربری‌های با پوشش گیاهی غنی اشاره نمودند. Ahmadi Mirghaed و Sour (۲۰۲۳) نیز بر تولید حداقل رسوب در کاربری اراضی جنگلی با میزان ۰/۹ تن بر هکتار در سال در حوزه آبخیز شور استان خوزستان اشاره نمودند. تفاوت در تراکم پوشش گیاهی جنگلی مناطق مطالعاتی را می‌توان از جمله دلایل تفاوت در مقدار تولید رسوب برشمرد. در خصوص میزان نگهداشت رسوب نیز بایستی اذعان داشت که منطقه مسکونی و باغ به‌ترتیب بیشینه و کمینه مقدار نگهداشت رسوب ویژه در منطقه مورد پژوهش را دارند. از منظر مدیریتی، نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که

افزایش پوشش گیاهی پایدار، به‌ویژه در کاربری‌های شیب‌دار، و مدیریت کاربری‌های انسانی مانند مناطق مسکونی و کشاورزی، می‌تواند به‌طور مؤثری از میزان فرسایش و انتقال رسوب بکاهد. همچنین، اولویت‌بندی کاربری‌ها بر اساس شاخص‌های رسوب‌زایی می‌تواند راهگشای تصمیم‌سازی‌های مبتنی بر خدمات اکوسیستمی در حوزه آبخیز تالار باشد.

تحلیل حساسیت عوامل ورودی مدل نسبت تحویل رسوب InVEST در دوره ۲۵ ساله

تحلیل همزمان یافته‌های مدل‌سازی و تحلیل حساسیت در پژوهش حاضر (جدول ۳) نشان داد که عامل فرساینده‌گی باران به‌عنوان کلیدی‌ترین متغیر ورودی مدل InVEST، نقش غالبی در تعیین رفتار هدررفت خاک، نگهداشت رسوب و تولید رسوب طی دوره مورد پژوهش (۱۳۹۳-۱۳۶۸) در آبخیز تالار دارد. Lafren و Moldenhauer (۲۰۰۳) و Zabihi و همکاران (۲۰۱۵) نیز از عامل فرساینده‌گی باران به‌عنوان یک عامل مهم و مؤثر به‌سبب تغییرپذیری زمانی و مکانی زیاد و همچنین نقش آن به‌عنوان یکی از ورودی‌های مهم و مؤثر در سامانه آبخیز یاد کردند. در این راستا، مقدار تأثیر عامل فرساینده‌گی باران بر هدررفت خاک، نگهداشت رسوب و تولید رسوب طی دوره ۲۵ ساله پژوهش در آبخیز تالار به‌ترتیب برابر با ۴۷/۵، ۴۰/۷ و ۴۸/۲ درصد است. تأثیر بیش از ۴۷ درصدی این عامل بر هدررفت خاک، و بیش از ۴۰ درصدی آن بر نگهداشت رسوب، نه‌تنها بر اهمیت آن در معادلات فرسایش خاک تأکید می‌کند، بلکه نشان‌دهنده‌ی پاسخ‌پذیری بالای سامانه هیدرولوژیکی منطقه نسبت به تغییرات الگو و شدت بارندگی طی بازه ۲۵ ساله مورد مطالعه است. Guesri و همکاران (۲۰۲۰) نیز به تأثیر ۶۸ درصدی عامل فرساینده‌گی باران بر تولید رسوب در آبخیز Wadi K'sob در شمال‌شرقی کشور الجزایر دست یافتند. از سوی دیگر، ضریب حساسیت نسبی ۰/۹۹ برای عامل فرساینده‌گی باران در برآورد هدررفت خاک نشان می‌دهد که

کوچک‌ترین تغییرات در این عامل می‌تواند منجر به تغییرات چشمگیری در خروجی مدل شود. این نتیجه با نتایج گزارش شده توسط Hamel و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد و ضرورت دقت بالا در برآورد این پارامتر در سناریوهای مدیریتی آینده را برجسته می‌سازد. با وجود این که عامل فرساینده‌گی باران یک متغیر اقلیمی و غیرقابل مدیریت است، یافته‌ها نشان داد که عامل فرساینده‌گی باران بیشترین سهم را در تغییرات هدررفت خاک و تولید رسوب حوزه آبخیز مطالعاتی داشته است. این نتیجه بیانگر نقش بارندگی‌های شدید در تشدید فرآیندهای هیدرولوژیک و حساسیت بالای حوزه نسبت به تغییرات اقلیمی است. با این حال، واکنش کاربری‌ها و پوشش‌های مختلف به این عامل یکسان نبوده است؛ به‌طوری که جنگل‌ها و مراتع به‌واسطه‌ی پوشش متراکم توان بیش‌تر در کاهش اثر بارش و افزایش نگهداشت رسوب داشته‌اند، در حالی که اراضی کشاورزی دیم بیشترین سهم در تولید رسوب را به خود اختصاص داده‌اند. این امر نشان می‌دهد که اگرچه عامل اقلیمی و نسبتاً خارج از کنترل مدیریتی است، اما با بهبود پوشش گیاهی و مدیریت کاربری اراضی می‌توان اثرات آن را به‌طور مؤثر تعدیل کرد.

پارامتر K اگرچه به‌طور مستقیم در تعیین هدررفت خاک نقش ندارد، اما بر اساس نتایج تحلیل حساسیت ارائه شده در جدول ۳، اثر کلیدی و غیرمستقیمی بر نگهداشت و تولید رسوب ایفا می‌کند. این اثر از طریق مکانیزم‌های تحویل رسوب، مانند نسبت تحویل رسوب و شاخص اتصال رسوبی که در چارچوب مدل InVEST به خروجی‌های نهایی مرتبط می‌شوند، آشکار می‌شود. به بیان دیگر، ارتباط پارامتر K با نسبت تحویل رسوب و شاخص اتصال رسوبی موجب تبیین دقیق‌تر فرایندهای انتقال رسوب شده است (Hamel et al., 2015) و به همین دلیل، این پارامتر تأثیر مستقیمی بر مقدار هدررفت خاک ندارد. بر اساس یافته‌های تحلیل حساسیت، پارامتر K با میانگین ضریب حساسیت نسبی به‌ترتیب ۱/۰۱ و ۱/۸ به‌عنوان حساس‌ترین عامل در محاسبه نگهداشت و تولید رسوب شناخته شده است.

تغییرات مثبت و منفی پارامتر K باعث افزایش یا کاهش مقادیر SDR و در نتیجه تغییر میزان رسوب تحویلی می‌شود، که نقش کلیدی آن در مدل‌سازی جریان رسوب را نشان می‌دهد. به‌طور مشخص، افزایش K شیب رابطه بین شاخص اتصال و SDR را تندتر کرده و میزان رسوب تحویلی را کاهش می‌دهد، در حالی که کاهش K اثر معکوس دارد و انتقال رسوب را افزایش می‌دهد. این حساسیت بالا با اهمیت اتصال هیدرولوژیک در تعیین مسیر جریان و انتقال رسوب در محیط‌های کوهستانی متناسب است و نشان می‌دهد که دقت برآورد پارامتر K برای ارزیابی صحیح ظرفیت نگهداشت رسوب ضروری است. از سوی دیگر، عوامل مدیریتی مانند نوع مدیریت اراضی اثر کمتری بر نتایج مدل دارند؛ چراکه عوامل طبیعی، به‌ویژه فرساینده‌گی باران و ویژگی‌های توپوگرافی، نقش غالب در تعیین مقدار رسوب تحویلی ایفا می‌کنند. بنابراین، حتی با اعمال مداخلات مدیریتی، اثر آن‌ها در مقایسه با پارامترهای طبیعی محدود است، اگرچه نقش آن‌ها در بهینه‌سازی عملکرد اکوسیستم قابل توجه است. به همین دلیل، برای مدیریت مؤثر رسوب، علاوه بر حفظ و بهبود پوشش گیاهی و شیوه‌های مدیریتی، توجه ویژه به پارامترهای طبیعی و مقادیر بومی شده K ضروری است. بررسی دقیق‌تر نتایج نشان می‌دهد که پس از عامل فرساینده‌گی باران، پارامتر K با وجود تأثیر زیاد بر نگهداشت و تولید رسوب، در تعیین هدررفت خاک در آبخیز تالار طی دوره پژوهش تأثیر قابل توجهی نداشته است. برای توضیح بیش‌تر می‌توان اشاره نمود که تغییرات خروجی مدل عمدتاً با تغییرات عامل فرساینده‌گی باران مرتبط است؛ به عبارت دیگر، سهم این عامل در تغییرات هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب نسبت به سایر عوامل ورودی مدل بیشتر است. با این حال، تحلیل حساسیت مشخص کرد که پارامتر K حساس‌ترین عامل در حوزه آبخیز تالار است، به‌گونه‌ای که تغییر یک واحد در این پارامتر، تأثیر بیش‌تر بر تغییرات خروجی مدل نسبت به تغییر مشابه در سایر عوامل دارد.

مدل‌سازی دقیق‌تر فرایندهای رسوبی برجسته می‌سازد.

بهره‌گیری از مدلی کاربرپسند و کم‌نیاز به داده، دقت بالا در تحلیل حساسیت، و امکان شناسایی مناطق بحرانی را می‌توان از نقاط قوت این پژوهش برشمرد. محدودیت‌هایی مانند وابستگی به دقت نقشه‌های ورودی، نبود داده‌های محلی دقیق و ساده‌سازی در برخی روابط مدل، بر نتایج اثرگذار بوده‌اند. با این حال، دستاوردهای پژوهش قابلیت کاربرد در تدوین سیاست‌های حفاظت خاک، برنامه‌ریزی کاربری اراضی و ارزیابی عملکرد اکوسیستم‌ها را دارد.

برای توسعه آینده پژوهش، پیشنهاد می‌شود تحلیل‌ها با داده‌های اقلیمی آینده‌نگر و داده‌های بلندمدت محلی تکمیل شود. همچنین، به کارگیری مدل‌های مکمل نظیر SWAT، WEPP، WaTEM/SEDEM، و RUSLE در کنار InVEST می‌تواند دقت برآوردها را در سناریوهای مختلف مدیریتی افزایش دهد. از منظر مدیریتی، اجرای اقداماتی چون بهبود الگوهای زراعی، توسعه و حفاظت پوشش جنگلی و مرتعی، احداث ترانس‌بندی و کنتور فاروینگ در اراضی کشاورزی، تثبیت بیولوژیک دامنه‌های حساس با استفاده از گیاهان بومی، کنترل چرای بی‌رویه دام در مراتع و احداث سازه‌های آبخیزداری کوچک‌مقیاس (بندهای سنگی-ملاتی، گابیونی و...) می‌تواند به کاهش فرسایش خاک و تحویل رسوب کمک کند. علاوه بر این، طراحی نظام‌های پایش خدمات هیدرولوژیک و اولویت‌بندی کاربری‌های حساس بر اساس شاخص‌های رسوب‌زایی، زمینه‌ساز مدیریت پایدار و آینده‌نگر آبخیز تالار خواهد بود.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، با هدف تحلیل پویایی زمانی و مکانی هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب در چارچوب خدمات اکوسیستمی، از مدل InVEST در آبخیز کوهستانی تالار در شمال ایران طی یک دوره ۲۵ ساله استفاده شد. هدف اصلی، بررسی روندهای تغییرات رسوبی، شناسایی عوامل مؤثر طبیعی و مدیریتی، و تحلیل حساسیت مدل نسبت به متغیرهای کلیدی برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در سطح حوزه آبخیز است. نتایج نشان داد که میزان هدررفت خاک، نگهداشت و تولید رسوب در بازه زمانی مطالعه کاهش یافته است. این کاهش عمدتاً با کاهش عامل فرساینده‌گی باران مرتبط بوده و از تغییرات اقلیمی منطقه تأثیر پذیرفته است. در عین حال، کاربری‌های با پوشش گیاهی متراکم مانند مرتع و جنگل، بیشترین نقش را در حفظ رسوب و کاهش فرسایش ایفا کرده‌اند، در حالی که کاربری‌های انسانی مانند کشاورزی و مناطق مسکونی بیشترین سهم را در تولید رسوب داشته‌اند.

تحلیل حساسیت مدل InVEST با استفاده از روش OAT نشان داد که فرساینده‌گی باران به‌عنوان مهمترین عامل طبیعی، بیشترین تأثیر را بر متغیرهای رسوبی دارد. پارامتر K نیز به‌عنوان شاخص اتصال رسوبی، بر نگهداشت و تولید رسوب تأثیر قابل توجهی دارد، اما در برآورد مستقیم هدررفت خاک نقشی ندارد. این یافته‌ها اهمیت تلفیق داده‌های اقلیمی، خاک و مدیریتی را در

References

- Ahmadi Mirghaied, F., & Souri, B. (2023). Contribution of land use, soil properties and topographic features for providing of ecosystem services. *Ecological Engineering*, 189, 106898. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106898>

- Asadolahi, Z., Salmanmahiny, A.R., & Mirkarimi, H. (2015). Modeling the Supply of Sediment Retention Ecosystem Service (Case study: Eastern Part of Gorgan-Rud Watershed). *Environmental Erosion Researches*, 5(3), 61-75. (In Persian)
- Ashtari, N., & Nosrati, K. (2024). Identification of erosion-prone areas in connection with ranges of peak ground acceleration using

- fuzzy logic and entropy Shannon models in the Talar Drainage Basin, Mazandaran province. *Quantitative Geomorphological Research*, 13(3), 178-202. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2024.465763.1509> (In Persian)
- Ayalew, D.A., Deumlich, D., Šarapatka, B., & Doktor, D. (2020). Quantifying the sensitivity of NDVI-based C factor estimation and potential soil erosion prediction using Spaceborne earth observation data. *Remote Sensing*, 12(7), 1136. <https://doi.org/10.3390/rs12071136>
- Bai, Y., Ochudho, T.O., & Yang, J. (2019). Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA. *Ecological Indicators*, 102, 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.079>
- Barzali, M., Azimi, M., Abdolhosseini, M. & Lotfi, A. (2022). The Assessment of Rangeland Ecosystem Services in sediment retention via InVEST Model (Atrak Watershed, Golestan Province). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 29(1), 133-144. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2022.126019> (In Persian)
- Borselli, L., Cassi, P., & Torri, D. (2008). Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment. *Catena*, 75(3), 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.006>
- Bouguerra, S., & Jebari, S. (2017). Identification and prioritization of sub-watersheds for land and water management using InVEST SDR model: Rmel River basin, Tunisia. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(15), 348. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3104-z>
- Cerretelli, S., Poggio, L., Gimona, A., Yakob, G., Boke, S., Habte, M., Coull, M., Peressotti, A., & Black, H. (2018). Spatial assessment of land degradation through key ecosystem services: The role of globally available data. *Science of the Total Environment*, 628, 539-555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.085>
- Chauhan, A., Roy, S., & Kundu, A. (2024). Assessing sediment dynamics and retention services in the vulnerable mountain ecosystem of the Indian Himalayas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(10), 928. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13073-4>
- Chen, W., Chi, G., & Li, J. (2019). The spatial association of ecosystem services with land use and land cover change at the county level in China, 1995–2015. *Science of the Total Environment*, 669, 459-470. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.139>
- Fryirs, K. (2013). (Dis) Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(1), 30-46. <https://doi.org/10.1002/esp.3242>
- Gashaw, T., Bantider, A., Zeleke, G., Alamirew, T., Jemberu, W., Worqlul, A.W., Dile, Y., Bewket, W., Meshesha, D., Adem, A., & 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>
- Ghorbanpour, D. (2004). *Study and estimation of the rainfall erosivity factor (R) in Mazandaran Province*. Master's thesis of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
- Guesri, M., Megnounif, A., & Ghenim, A.N. (2020). Rainfall erosivity and sediment yield in Northeast Algeria: K'sob watershed case study. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(7), 299. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5276-1>
- Gwal, S., Sena, D.R., Srivastava, P.K., & Srivastava, S.K. (2024). Identifying conservation priority areas of hydrological ecosystem service using hot and cold spot analysis at watershed scale. *Remote Sensing*, 16(18), 3409. <https://doi.org/10.3390/rs16183409>
- Haji, K., Khaledi Darvishan, A., & Mostafazadeh, R. (2024). Soil erosion and sediment sourcing in the Hyrcanian forests, Northern Iran: An integration approach of the G2loss model and sediment fingerprinting technique. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10(2), 1897-

1914. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01879-z>
- 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, 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.027>
- He, C., & James, L.A. (2021). Watershed science: Linking hydrological science with sustainable management of river basins. *Science China Earth Sciences*, 64(5), 677-690. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9723-4>
- Hopkins, K. G., Noe, G. B., Franco, F., Pindilli, E. J., Gordon, S., Metes, M. J., Claggett, P.R., Gellis, A.C., Hupp, C.R., & Hogan, D. M. (2018). A method to quantify and value floodplain sediment and nutrient retention ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 220, 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.013>
- Juan-Diego, E., Mendoza, A., Arganis-Juárez, M. L., & Berezowsky-Verduzco, M. (2025). Alteration of Catchments and Rivers, and the Effect on Floods: An Overview of Processes and Restoration Actions. *Water*, 17(8), 1177. <https://doi.org/10.3390/w17081177>
- Kantharajan, G., Govindakrishnan, P.M., Singh, R.K., Natalia, E.C., Jones, S.K., Singh, A., Mohindra, V., Kumar, N., Rana, J.C., Jena, J.K., & Lal, K.K. (2022). Quantitative assessment of sediment delivery and retention in four watersheds in the Godavari River Basin, India, using InVEST model—an aquatic ecosystem services perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(11), 30371-30384. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24013-5>
- Lafren, J.M., & Moldenhauer, W.C. (2003). *The USLE story* (Special Publication No. 1). World Association of Soil and Water Conservation (WASWC).
- Luo, M., Cai, J., Zeng, Z., Zheng, Y., & Lin, T. (2024). Development and practices of nature-based solutions in China. *Nature-Based Solutions*, 5, 100109. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2023.100109>
- Marques, S. M., Campos, F.S., David, J., & Cabral, P. (2021). Modelling sediment retention services and soil erosion changes in Portugal: a spatio-temporal approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(4), 262. <https://doi.org/10.3390/ijgi10040262>
- Mostafazadeh, R., Mirzaei, S., Esmali, A. and Zabihi, M. (2018). Sensitivity analysis of the flow hydrograph components due to changes in Clark's time-area model in Mohammad-Abad watershed, Gloestan Province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(1), 91-99. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.221333.667580> (In Persian)
- Mouida, A., & Alaa, N. (2011). Sensitivity analysis of TSEB model by one-factor-at-a-time in irrigated olive orchard. *International Journal of Computer Science Issues (IJCSI)*, 8(3), 369.
- Mperejekumana, P., Shen, L., Zhong, S., Muhirwa, F., Gaballah, M. S., & Nsigayehe, J. M. V. (2024). Integrating climate change adaptation into water-energy-food-environment nexus for sustainable development in East African Community. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140026. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140026>
- Namazi, M., Akbari, M., Memarian, H., Asadolahi, Z., & Parvian, N. (2025). Evaluating the soil retention ecosystem service using the InVEST model in Northeastern Iran. *Water and Soil Management and Modelling*, <https://doi.org/10.22098/mmws.2025.17666.1612> (In Persian)
- Ouallali, A., Aassoumi, H., Moukhchane, M., Moumou, A., Houssni, M., Spalevic, V., & Keesstra, S. (2020). Sediment mobilization study on Cretaceous, Tertiary and Quaternary lithological formations of an external Rif catchment, Morocco. *Hydrological Sciences Journal*, 65(9), 1568-1582. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1755435>
- Pérez-Cutillas, P., Benabdelouahab, S., & Salhi, A. (2025). Mitigating Erosion and Enhancing Sediment Retention: A Modeling Approach to Sustainable Land Management. *Earth Systems and Environment*, 1-20.

- <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00660-9>
- Rehman, A., Farooq, M., Lee, D. J., & Siddique, K. H. (2022). Sustainable agricultural practices for food security and ecosystem services. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(56), 84076-84095. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23635-z>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., & Yoder, D.C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Washington DC: V703.
- Roba, N.T., Kassa, A.K., Geleta, D.Y., & Harka, A.E. (2021). Streamflow and sediment yield estimation, and area prioritization for better conservation planning in the Dawe River watershed of the Wabi Shebelle River Basin, Ethiopia. *Heliyon*, 7(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08509>
- Rojan, E., Dłużewski, M., & Krzemień, K. (2020). Sediment budget of high mountain stream channels in an arid zone (High Atlas mountains, Morocco). *Catena*, 190, 104530. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104530>
- Rostami, N., & Rabbani, M. (2023). Zoning of soil erodibility and determination of affecting factors (Case study: Golan watershed, Ilam). *Integrated Watershed Management*, 3(3), 1-15. <https://doi.org/10.22034/iwm.2023.200473.8.1084> (In Persian)
- Sadat, M., Salehi, E., & Amiri, M.J. (2023). Quantitative Modeling of Spatiotemporal Changes in Soil Erosion and Retention Potential and Sediment Production (Case Study: Lahijan-Chabaksar and Astana-Kochsefhan Watersheds). *Journal of Environmental Studies*, 48(4), 577-596. <https://doi.org/10.22059/jes.2023.348202.1008357> (In Persian)
- Saltelli, A., Ratto, M., Tarantola, S., & Campolongo, F. (2006). Sensitivity analysis practices: Strategies for model-based inference. *Reliability engineering & system safety*, 91(10-11), 1109-1125. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.014>
- Sayed, K., Nazimuddin, R., Syakir, M.I., Yusuff, S., Johar, R., & Yaseen, Z.M. (2025). Shifting paradigm in water resources management: Public willingness to participate in watershed management of Batu Kurau, Perak, Malaysia. *World Development Perspectives*, 39, 100694. <https://doi.org/10.1016/j.wdp.2025.100694>
- Sharp, R., Tallis, H.T., Ricketts, T., Guerry, A.D., Wood, S.A., Chaplin-Kramer, R., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Pennington, D., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D., Arkema, K., Lonsdorf, E., Kennedy, C., Verutes, G., Kim, C.K., Guannel, G., Papenfus, M., Toft, J., Marsik, M., Bernhardt, J., Griffin, R., Glowinski, K., Chaumont, N., Perelman, A., Lacayo, M., Mandle, L., Hamel, P., Vogl, A.L., Rogers, L., Bierbower, W., Denu, D., & Douglass, J. (2018). *INVEST 3.5.0 User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
- Solaimani, K., Shekarian, F., Abdoli, S. & Saberi, A. (2021). Prioritization of Talar watershed flood risk potential in GIS environment. *Journal of Ecohydrology*, 8(3), 749-762. <https://doi.org/10.22059/ije.2021.324244.1509> (In Persian)
- Talebikhiavi, H., Zabihi, M., & Mostafazadeh, R. (2017). Effects of land-use management scenarios on soil erosion rate using GIS and USLE model in Yamchi dam watershed, Ardabil. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 21(2), 221-234. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.2.221>
- Teh, S.H. (2011). Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on Cameron Highlands, Malaysia for hydropower development (Doctoral dissertation).
- Tiwari, P.C., & Joshi, B. (2012). Environmental changes and sustainable development of water resources in the Himalayan headwaters of India. *Water resources management*, 26(4), 883-907. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9825-y>
- Turner, B., Devisscher, T., Chabaneix, N., Woroniecki, S., Messier, C., & Seddon, N. (2022). The role of nature-based solutions in supporting social-ecological resilience for climate change adaptation. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 123-148. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-010017>

- Vahabzadeh, G. and Ahamdi, S. (2022). Evaluating the Effect of Climate on the Weathering Process of Rocks (Case Study: The Telar Watershed). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 11(2), 249-263. <https://doi.org/10.22067/geoh.2021.70604.1064> (In Persian)
- Vigerstol, K.L., & Aukema, J.E. (2011). A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of environmental Management*, 92(10), 2403-2409. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.040>
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., & Roberts, A.M. (2012). Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138(1), 74-88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
- Wang, G., Mang, S., Cai, H., Liu, S., Zhang, Z., Wang, L., & Innes, J. L. (2016). Integrated watershed management: evolution, development and emerging trends. *Journal of Forestry Research*, 27(5), 967-994. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0293-3>
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978). Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, *Agriculture Handbook*. No. 537, pp. 58.
- Xue, Z., Meng, X., & Liu, B. (2024). Spatiotemporal evolution and driving factors of ecosystem services in the upper Fenhe watershed, China. *Ecological Indicators*, 160, 111803. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111803>
- Zabihi, M. , Sadeghi, S.H. & Vafakhah, M. (2015). Spatial analysis of rainfall erosivity index patterns at different time scales in Iran. *Watershed Engineering and Management*, 7(4), 442-457. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.103089> (In Persian)
- Zabihi, M., Moradi, H., Gholamalifard, M., Khaledi Darvishan, A., & Fürst, C. (2020). Landscape management through change processes monitoring in Iran. *Sustainability*, 12(5), 1753. <https://doi.org/10.3390/su12051753>
- Zabihi, M., Moradi, H., Khaledi Darvishan, A., and Gholamalifard, M. (2025). Spatiotemporal variations analysis of water yield ecosystem service in the Hyrcanian region of northern Iran using the InVEST model. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 296-308. <https://doi.org/10.22098/mmws.2025.1767.1614> (In Persian)
- Zarandian, A., Mohammadyari, F., Mousazadeh, R., Ramezani Mehrian, M. & Badamfirooz, J. (2023). Evaluating the Role of Land Use in the Provision of Soil Retention Ecosystem Service (Case Study: Semnan Province). *Environment and Interdisciplinary Development*, 8(81), 107-119. <https://doi.org/10.22034/envj.2024.432019.1331> (In Persian)