




Quantifying Avoided Soil Erosion and Sediment Export and Deriving Managerial Insights

Majid Ramezani Mehrian^a, Ardavan Zarandian^b, Sayedeh Alemohammad^{c*} , and Jalil Badam Firouz^d

^a Department of Environmental Studies, Institute of Research and Development in the Humanities (SAMT), Tehran, Iran.

^b Department of Environmental Assessment and Risks, Research Center of Environment and Sustainable Development, Tehran, Iran.

^c Department of Innovation and Sustainability, Faculty of Governance, University of Tehran, Tehran, Iran.

^d Department of Environmental Economics, Research Center of Environment and Sustainable Development, Tehran, Iran.

Article Info

Article Type
Research Article

Received
December 9, 2025

Revised
December 28, 2025

Accepted
March 7, 2026

Published online
March 16, 2026

Keywords
Ecosystem Service,
Soil Erosion,
Sediment Delivery Ratio,
Sediment Export,
Zanjan Province

***Corresponding author's email**
Sh.alemohammad@ut.ac.ir

Extended Abstract

Background and Objectives: The primary objectives of this research were: 1) To conduct a spatial assessment and mapping of the sediment retention ecosystem service in the watersheds of Zanjan Province by quantifying avoided soil erosion and avoided sediment export. 2) To identify and delineate priority management areas at the watershed level and provide spatial strategies for enhancing the sediment retention service. The overarching goal was to bridge the gap between detailed biophysical evaluations and practical, location-specific decision-making for sustainable watershed management.

Materials and Methods: The methodological core of this study was the Sediment Delivery Ratio (SDR) model implemented in the InVEST software suite. The process began with estimating soil erosion potential for each pixel using the RUSLE, which synthesizes data layers for rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), the topographic length-slope factor (LS) derived from a 30m Digital Elevation Model (DEM), land cover (C), and conservation practices (P). Subsequently, the SDR for each pixel was calculated based on a hydrological connectivity index, balancing upslope resistance and downslope flow path factors. The sediment export from each pixel was then derived as the product of its USLE erosion potential and its SDR. Finally, the ecosystem services of "avoided erosion" (soil loss prevented at source by vegetation) and "avoided sediment export" (sediment prevented from entering streams) were quantified. All spatial data, including land use/land cover from Landsat 8 imagery, were standardized within a GIS environment to a consistent coordinate system and raster resolution for model execution.

Results: The application of the model across Zanjan Province revealed a highly heterogeneous spatial pattern of erosion and sediment dynamics. The total annual soil erosion potential and sediment export for the province were estimated, confirming the severity of the process. More importantly, the existing vegetative cover was quantified as providing a crucial ecosystem service by preventing a vastly greater amount of soil loss and sediment delivery to watercourses annually. Spatial aggregation of pixel-level results to the watershed scale enabled clear prioritization. Watershed 1 was identified as "Critical," contributing the dominant share to both total erosion potential and sediment export. watersheds 7 and 5 were categorized as "High Priority," while the remaining watersheds (2, 3, 4, 6) were classified as "Moderate to Low Priority". This stratification effectively pinpoints areas where management interventions would yield the highest return in terms of reducing sediment loads to vital water reservoirs.

Conclusion: This study successfully moved beyond conventional erosion modeling by translating complex biophysical assessments into operational, priority-ranked maps at a management-relevant scale. By integrating the RUSLE and SDR models within the InVEST framework, it provided a scientifically robust and spatially explicit basis for optimizing the allocation of limited conservation resources. The proposed spatial prioritization enables a shift from uniform, dispersed management approaches to a targeted, evidence-based strategy focused on critical intervention areas. The methodology and findings not only offer a direct and practical tool for watershed managers in Zanjan Province but also establish a replicable framework for adaptive and intelligent decision-making in other watersheds across Iran. Ultimately, this approach supports the development of a dynamic, integrated spatial information system for the national-scale protection of fundamental soil and water resources.

Cite this article: Ramezani Mehrian, M., Zarandian, A., Alemohammad, S., Badam Firouz, J., 2026. Quantifying Avoided Soil Erosion and Sediment Export and Deriving Managerial Insights. Research Article, *Journal of Soil Research*, 39 (4), pp 485-492.



DOI: <https://doi.org/10.22092/ijsr.2026.371627.804>

Publisher: Soil Science Society of Iran



ارزیابی میزان اجتناب از دو فرایند فرسایش خاک و رسوب‌دهی و ارائه بینش‌های مدیریتی

مجید رضانی مهربان^۱، اردوان زرندیان^۲، سیده آل محمد^{۳*} و جلیل بادام فیروز^۴

^۱ گروه مطالعات محیطی، پژوهشکده تحقیق و توسعه علوم انسانی، تهران، ایران

^۲ گروه ارزیابی و مخاطرات محیط زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، تهران، ایران

^۳ گروه نوآوری و پایداری، دانشکده حکمرانی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۴ گروه اقتصاد محیط‌زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

فرسایش خاک و تولید رسوب به‌عنوان یکی از مخاطرات اصلی، پایداری اکوسیستم‌ها و توسعه پایدار در حوضه‌های استان زنجان را تهدید می‌کند. این پژوهش، با هدف ارزیابی کمی خدمات اکوسیستمی نگهداشت رسوب انجام شد. برای دستیابی به این هدف، از چهارچوب مدل نسبت تحویل رسوب در نرم‌افزار InVEST استفاده شد. در گام اول، پتانسیل فرسایش خاک با به‌کارگیری معادله اصلاح‌شده جهانی هدررفت خاک (RUSLE)، برآورد شد که عوامل فرساینده باران، فرسایش‌پذیری خاک، توپوگرافی، پوشش اراضی و اقدامات حفاظتی را تلفیق می‌کند. در مراحل بعد، رسوب‌گذاری و رسوب‌دهی نهایی در پیکسل‌ها، بر حسب نسبت تحویل رسوب و شاخص اتصال هیدرولوژیکی، محاسبه شد و سپس این مقادیر در سطح حوضه‌ها تجمیع شد. نتایج، توزیع مکانی ناهمگون و تمرکز قابل‌توجه فرسایش و تولید رسوب را در برخی حوضه‌ها آشکار ساخت. ارائه بینش‌های مدیریتی در حوضه‌ها، بر اساس مقایسه منطقی دو معیار فرسایش و رسوب‌دهی، در سه سطح اولویت، صورت پذیرفت. این پژوهش با کمی‌سازی نقش بازدارنده پوشش گیاهی موجود در جلوگیری از فرسایش خاک و ورود رسوب به شبکه‌های آبی، بر ارزش خدمات اکوسیستمی تأکید می‌نماید. نوآوری مطالعه حاضر، گذار از ارزیابی‌های صرفاً کمی به سمت ارائه بینش‌های مدیریتی مکان‌محور در مقیاس حوضه‌ها است. این نتایج برای تخصیص بهینه منابع و هدایت هدفمند طرح‌های حفاظتی و آبخیزداری به سوی پهنه‌های بحرانی، کارآمد است. تکرار و پیگیری چنین مطالعاتی در کشور، می‌تواند به تکمیل یک سامانه اطلاعات جغرافیایی پشتیبان و قابل اتکا برای اتخاذ شیوه‌های مدیریت انطباقی در راستای حفاظت از منابع پایه خاک و آب بینجامد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

واژه‌های کلیدی

استان زنجان،
خدمات اکوسیستمی،
رسوب‌دهی،
فرسایش خاک،
نسبت تحویل رسوب

* ایمیل نویسنده مسئول

Sh.alemohammad@ut.ac.ir

استناد: رضانی مهربان، م.، زرندیان، ا.، آل محمد، س.، بادام فیروز، ج.، ۱۴۰۴. ارزیابی میزان اجتناب از دو فرایند فرسایش خاک و رسوب‌دهی و ارائه

بینش‌های مدیریتی. مقاله پژوهشی، نشریه پژوهش‌های خاک، (۴) ۳۹، ص ۴۸۵-۴۹۲.

DOI: <https://doi.org/10.22092/ijssr.2026.371627.804>



مقدمه

کم‌بازده و همچنین توسعه فعالیت‌های عمرانی بدون ملاحظات محیط‌زیستی، احتمال تشدید نرخ فرسایش و افزایش بار رسوبی ورودی به این مخازن را افزایش داده و سرمایه‌گذاری‌های کلان در بخش آب را با تهدید مواجه ساخته است (Hosseini, Mofrad et al., 2023). در این میان، استان زنجان با قرارگیری در منطقه‌ای کوهستانی، از جمله مناطق مستعد فرسایش در کشور محسوب می‌شود. وجود منابع آبی حیاتی تغذیه‌کننده سدهای تالوار، سفیدرود و دیگر مخازن مهم در این استان، لزوم توجه جدی به مقوله کنترل فرسایش و رسوب را دوچندان می‌کند.

در این راستا، رویکردهای مدل‌سازی فضایی با یکپارچه‌سازی داده‌های مختلف و شبیه‌سازی فرایندهای هیدروژئومورفولوژیکی، ابزاری کارآمد و قدرتمند در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان قرار داده است (Vigiak et al., 2012; Redhead et al., 2016). در میان این رویکردها، ارزیابی خدمات اکوسیستمی جایگاه ویژه‌ای دارد. خدمات اکوسیستمی به مزایا و منافع اطلاق می‌شوند که انسان‌ها مستقیم یا غیرمستقیم از اکوسیستم‌ها به دست می‌آورند. این خدمات در چهار دسته کلی تأمین، تنظیمی، فرهنگی و پشتیبانی دسته‌بندی می‌شوند. خدمت مورد توجه این پژوهش، خدمت تنظیمی نگهداشت رسوب است که بیانگر توانایی طبیعی اکوسیستم (به ویژه پوشش گیاهی) در کنترل فرسایش خاک و جلوگیری از انتقال رسوب به منابع آبی است (IPBES, 2018). کمی‌سازی این خدمت، ارزش عملکردی طبیعت را در حفظ سرمایه‌های طبیعی خاک و آب، به زبانی ملموس برای مدیریت و تصمیم‌گیری تبدیل می‌کند.

مدل نسبت تحویل رسوب^۱ (SDR) که در چهارچوب معتبر ارزیابی یکپارچه خدمات اکوسیستمی^۲ (InVEST) توسعه یافته است، با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته و داده‌های قابل دسترس، قادر است به صورت کمی، نرخ فرسایش خاک، مسیرهای انتقال، مناطق تمرکز و نگهداشت رسوب و در نهایت میزان بار رسوبی صادر شده به خروجی حوضه (رسوب‌دهی) را برآورد نماید (Sharp et al., 2020). یکی از برجسته‌ترین قابلیت‌های این مدل، کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی نگهداشت رسوب به صورت مقدار کل فرسایش خاک اجتناب شده^۳ و مقدار کل رسوب‌دهی اجتناب شده^۴ است که حفظ خاک و جلوگیری از ورود رسوب به منابع آبی را توسط پوشش گیاهی نشان می‌دهد (Hamel et al., 2020; Matomela et al., 2022).

فرسایش خاک و تولید رسوب به‌عنوان یکی از مخاطرات اصلی محیط‌زیستی در سطح جهانی، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی، پایداری اکوسیستم‌ها و توسعه اقتصادی پایدار به شمار می‌رود (IPBES, 2018; Borrelli et al., 2021). این پدیده‌های طبیعی که بر غلظت رسوب در جریان‌های آبی اثر می‌گذارند، عمدتاً توسط اقلیم (به‌ویژه شدت بارش)، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی تعیین می‌شوند. بر اساس برآوردهای اخیر، سالانه میلیاردها تن خاک در اثر فرسایش در سراسر جهان از دست می‌رود (Panagos et al., 2022; Qurishi, 2024). تغییر کاربری اراضی و شیوه‌های مدیریتی نادرست، این روند طبیعی را تشدید کرده و نه تنها منجر به کاهش حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی می‌شود، بلکه با انتقال رسوبات به شبکه‌های آبی، پیامدهای گسترده‌ای به همراه دارد (Alewell et al., 2020; Aneseyee et al., 2020).

درک این پیامدها مستلزم ارزیابی رسوبات خارج شده از حوضه‌ها است که تحت تاثیر منابع تولید رسوب و مخازن نگهداشت رسوب است. رسوبات، ناشی از فرسایش سطحی زمین (شامل ذرات خاک جدا شده توسط باران و رواناب)، فرسایش خندقی (در کانال‌هایی که جریان را متمرکز می‌کنند) و فرسایش کناره‌ای (در کناره رودخانه‌ها) هستند. در مقابل، مخازن نشست رسوب، شامل عوارضی مانند شیب‌ها، دشت‌های سیلابی، بستر رودخانه و مخازن سدها هستند که رسوبات در آن‌ها ته‌نشین می‌شوند. از جمله پیامدهای منتج از این روند می‌توان به چنین مواردی اشاره نمود (Ji et al., 2024; Poesen, 2021): کاهش کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب شرب و آب کشاورزی، افزایش کدورت و اختلال در حیات آبزیان، کاهش چشمگیر ظرفیت ذخیره‌سازی و عمر مفید سدها، افزایش هزینه‌های لایروبی و در نهایت تحمیل خسارات اقتصادی کلان. همچنین تغییرات در بار رسوب می‌تواند بر آبیاری پایین‌دست، تصفیه آب، فعالیت‌های تفریحی و تفرجی تأثیر بگذارد.

مسئله فرسایش خاک و تولید رسوب، در ایران نیز به دلیل شرایط اقلیمی نیمه‌خشک، توپوگرافی پر شیب، تغییر کاربری اراضی، تخریب پوشش گیاهی، از حساسیت و شدت بالایی برخوردار است. برخی برآوردها، حاکی از آن است که میزان فرسایش خاک در ایران به طور متوسط بیش از میانگین جهانی است (Mohammadi et al., 2018; Sadeghi et al., 2017; Sadeghi et al., 2018). در چنین شرایطی، مدیریت پایدار حوضه‌ها و حفاظت از منابع آب و خاک، نیازمند توجه بیشتر است. تغییر کاربری اراضی مرتعی و جنگلی به اراضی دیم

¹Sediment Delivery Ratio

²Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs

³Avoided Soil Erosion

⁴Avoided Sediment Export

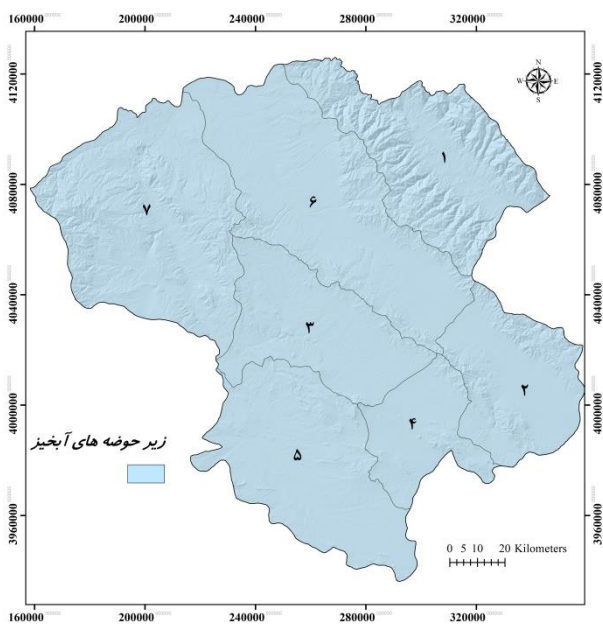
بینش‌های مدیریتی ایجاد کند. اهداف این پژوهش را می‌توان در دو محور زیر تبیین نمود: (۱) نقشه‌سازی خدمت اکوسیستمی نگهداشت رسوب در حوضه‌های استان زنجان با کمی‌سازی میزان فرسایش خاک اجتناب شده و میزان رسوب‌دهی اجتناب‌شده و (۲) ارائه بینش‌های مدیریتی مکان‌محور برای تقویت خدمت اکوسیستمی نگهداشت رسوب.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

استان زنجان با وسعت ۲۲،۱۶۴ کیلومتر مربع در شمال غرب ایران واقع است. این استان، دارای اقلیم نیمه‌خشک، توپوگرافی متنوع (متشکل از ارتفاعات، دشت‌ها و دره‌های متعدد) و الگوی پیچیده‌ای از پوشش گیاهی و کاربری اراضی است. دامنه میانگین بارش سالانه در این استان بین ۳۰۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر در نوسان است که توزیع مکانی و زمانی نامنظمی دارد. استان زنجان بر اساس شاخص‌های هیدرولوژیکی و توپوگرافی، دارای هفت حوضه درجه ۳، است (شکل ۱).

مطالعات متعددی در سطح جهان به فرسایش خاک و تولید رسوب پرداخته‌اند. پژوهش‌های جدیدتر به برآورد کمی فرسایش و رسوب اکتفا نکرده و به تعیین پهنه‌های حساس و مداخله شیوه‌های مدیریتی در مناطق بحرانی، متمایل شده‌اند (Bayatikhatabi, M. and ali, 2025; Mahmood et al., 2026; Panagos et al., 2022; Nasir and Selvakumar, 2018; Borrelli et al., 2021; Haregeweyn et al., 2017; Ganasri & Ramesh, 2016). مطالعات مربوط به جغرافیای کشور ایران، بیشتر به برآورد نرخ فرسایش و رسوب در حوضه‌های مختلف ایران پرداخته‌اند. تمرکز بسیاری از این مطالعات بر ارائه نقشه طبقه‌بندی خطر فرسایش و شدت رسوبگذاری بوده است (Ebrahimzadeh et al, 2024; Motamedirad et al., 2023; Jafari et al., 2022; Hosseinalizadeh et al., 2019; Sadeghi et al., 2018; Mohammadi et al., 2018). در کشور به ترسیم نقشه‌سازی خدمات اکوسیستمی نگهداشت رسوب و ارائه بینش‌های مدیریتی در مقیاس استان و حوضه‌های آن، به اندازه کافی پرداخته نشده است. این شکاف، لزوم انجام پژوهش‌هایی را نمایان می‌سازد که بتوانند پلی بین ارزیابی‌های بیوفیزیکی و



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و حوضه‌های آن
Figure 1- The study area and its watersheds

شبیه‌سازی نماید. در ادامه سه مرحله به کارگیری این مدل به تفصیل بیان شده است:
(۱) برآورد پتانسیل فرسایش خاک: پتانسیل فرسایش خاک در هر پیکسل (i)، بر حسب تن در هکتار در سال، با استفاده از استاندارد چهارچوب معادله اصلاح‌شده جهانی فرسایش خاک

روش پژوهش

چهارچوب اصلی این پژوهش، مدل نسبت تحویل رسوب در نرم‌افزار InVEST بوده است. این مدل مکان‌محور، با تلفیق داده‌های هیدروژئومورفولوژیک، قادر است فرایندهای تولید، انتقال، رسوب‌گذاری و در نهایت رسوب‌دهی حوضه (یعنی صدور رسوب به خروجی حوضه) را در مقیاس پیکسل^۵ (RUSLE) مطابق رابطه (۱)، برآورد شد. این معادله عوامل

^۵Revised Universal Soil Loss Equation

وجود پوشش گیاهی) و همچنین رسوب‌دهی اجتناب‌شده (یعنی میزان ممانعت از ورود رسوب به شبکه آبی)، به معنی کمی‌سازی خدمت تنظیمی نگهداشت رسوب^۹ محسوب می‌شوند. این دو شاخص، به‌طور مستقیم و عملیاتی، کارکرد ارزشمند اکوسیستم را در حفظ کیفیت خاک و آب اندازه‌گیری می‌کنند و در چهارچوب‌های معتبری مانند مدل InVEST به‌عنوان شاخص‌های جانشین کمی این خدمت اکوسیستمی پذیرفته شده‌اند (Hamel et al., 2015; Sharp et al., 2020).

تهیه داده‌های ورودی

برای اجرای مدل در استان زنجان، داده‌های ورودی لازم تهیه و با در نظر گرفتن شرایط خاص منطقه مطالعه، آماده‌سازی شد. کلیه داده‌های مکانی مورد نیاز برای اجرای مدل از منابع معتبر استخراج و در سامانه اطلاعات جغرافیایی آماده‌سازی شدند. مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، از داده‌های مأموریت شاتل رادار توپوگرافی^{۱۰} (SRTM) تهیه شد. شاخص فرساینده‌گی باران (R) و فرسایش‌پذیری خاک (K) از پایگاه داده‌های مرجع اتحادیه اروپا (ESDAC)^{۱۱} استخراج گردید و به‌منظور افزایش قابلیت اتکا، با داده‌های موجود استانی، تطبیق داده شد. لازم به ذکر است که این مطالعه شامل نمونه‌برداری میدانی خاک نبوده و بنابراین اطلاعات مستقل نقاط نمونه‌برداری در استان در دسترس نیست. محاسبه این دو عامل بر اساس روابط و شرایط استاندارد چهارچوب RUSLE صورت گرفته است (Panagos et al., 2014; Renard et al., 1997). لایه کاربری اراضی/پوشش زمین از پردازش تصاویر ماهواره‌ای سنجنده OLI لندست ۸ در سال ۲۰۲۰ میلادی با روش طبقه‌بندی نظارت‌شده به‌دست آمده است. ضرایب C و P (که به ترتیب بیانگر اثر پوشش گیاهی و روش‌های حفاظتی زمین بر کاهش فرسایش هستند)، برای هر رده پوشش / کاربری اراضی، از مطالعات مشابه (Zarandian et al., 2024) اقتباس شد (مطابق جدول ۱). مقادیر عددی این ضرایب بین ۰ تا ۱ قرار دارد. مقدار ۰، نشان دهنده پوشش گیاهی یا اقدامات حفاظتی کامل و در نتیجه کاهش حداکثری فرسایش است. مقدار ۱، بیانگر زمین برهنه یا عدم وجود حفاظت و در نتیجه بیشترین میزان فرسایش بالقوه است. تمامی لایه‌ها در یک سیستم مختصات یکسان (WGS 1984 UTM Zone 39N) بازنمایی و به رستر با اندازه پیکسل یکسان تبدیل شدند.

اصلی کنترل‌کننده فرسایش را یکپارچه می‌سازد و اجزای آن چنین است: R، شاخص فرساینده‌گی باران (انرژی فرساینده‌گی بارش‌های منطقه بر حسب $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ است). K، عامل فرسایش‌پذیری خاک (میزان مقاومت خاک در برابر فرسایش بر حسب $\text{t}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ است). عامل ترکیبی طول مسیر و درصد شیب^{۱۲} (LS)، یعنی گرادیان طول شیب برای هر پیکسل با مدل رقومی ارتفاع^{۱۳} (DEM) و بر اساس الگوریتم سطوح با توپوگرافی پیچیده به کار گرفته شد (Desmet & Govers, 1996). C، عامل پوشش گیاهی است. P، عامل اقدامات حفاظتی و مدیریتی است. در این پژوهش، پتانسیل کل اتلاف خاک در هر پیکسل (i) با رابطه (۱)، محاسبه شد و سپس با تجمیع مقادیر پیکسل‌های هر حوضه، برای آن حوضه محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۱)} \quad USLE_i = R_i \cdot K_i \cdot LS_i \cdot C_i \cdot P_i$$

۲) برآورد بار رسوبی صادر شده از هر پیکسل: از آنجا که تنها بخشی از خاک فرسایش یافته به شبکه آبی اصلی می‌رسد، مدل برای هر پیکسل، نسبت تحویل رسوب را محاسبه می‌کند. این نسبت از طریق یک شاخص اتصال هیدرولوژیکی^{۱۴} (HIC) که توازن بین مقاومت مسیر بالادست (متأثر از پوشش و شیب) و مقاومت مسیر جریان پایین‌دست را کمی می‌کند، برآورد می‌شود. مطابق رابطه (۲)، معادله نسبت تحویل رسوب، با یک تابع اتصال هیدرولوژیکی تعریف شده و با پارامترهای IC_0 و k کالیبره می‌گردد که بر اساس پیش‌فرض نرم‌افزار، به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۲ در نظر گرفته شده‌اند (Vigiak et al., 2012). SDR_{max} حداکثر نسبت تحویل رسوب است و 0.8 در نظر گرفته می‌شود.

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

بار رسوبی صادر شده (رسوب‌دهی) از هر پیکسل (E_i) (از حاصلضرب پتانسیل فرسایش خاک و نسبت تحویل رسوب مطابق رابطه (۳))، به دست آمده است. در این پژوهش، این مقدار در هر پیکسل و سپس با تجمیع مقادیر رسوب‌دهی پیکسل‌های موجود در هر حوضه، برای هر حوضه محاسبه شد.

$$\text{رابطه (۳)} \quad E_i = USLE_i \cdot SDR_i$$

۳) کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی: کمی‌سازی فرسایش خاک اجتناب‌شده (یعنی میزان کاهش فرسایش خاک در مبدأ ناشی از

^۹Sediment Retention Service

^{۱۰} Shuttle Radar Topography Mission

^{۱۱} European Soil Data Centre

^{۱۲}Length-Slope factor

^{۱۳}Digital Elevation Model

^{۱۴}Hydrological Connectivity Index

جدول ۱- رده‌بندی پوشش / کاربری اراضی و ضرایب C و P متناظر با آنها

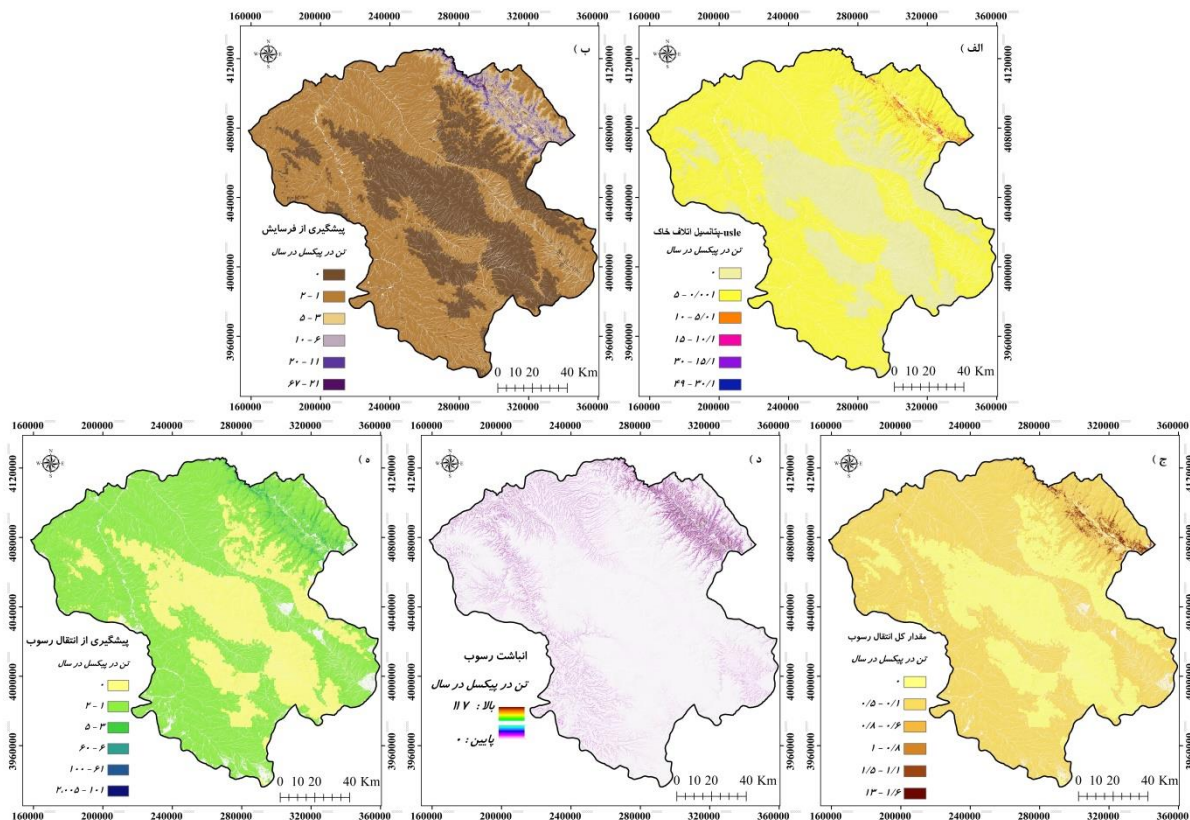
Table 1. Land cover/land use classification and their corresponding C and P factors

نوع پوشش / کاربری اراضی Land use/ Land Cover Type	lucode	usle_c	usle_p
Urban and rural areas and installations	1	1	1
Forest with 10-25 percent canopy cover	4	0.04	0.9
Shrub-lands with more than 10 percent canopy cover	5	0.04	0.9
Plantation forests	6	0.1	0.7
Rangelands with more than 50 percent canopy cover	7	0.15	0.9
Rangelands with 25-50 percent canopy cover	8	0.24	0.8
Rangelands with 5-25 percent canopy cover	9	0.45	1
Irrigated farming and orchards	10	0.5	0.65
Dry farming	11	0.7	0.7
Kavir (low desert lands without canopy cover)	12	1	1
Different types of sand dune	13	1	1
Smooth sand surfaces	14	0.9	1
Smooth clay surfaces in the margins of Kavir	15	1	1
Salty lands	16	1	1
Marsh lands with high level surfaces water	17	0	1
Rangelands with less than 5 percent canopy cover and out crop	18	0.45	1
Lakes and water reservoirs	19	1	1
Large river beds	20	1	1
Forest with 5-10 percent canopy cover	23	0.01	0.7
Forest with 1-5 percent canopy cover	24	0.01	0.7

نتایج

تن در پیکسل در سال نشان می‌دهد (مطابق شکل ۲- b). به علاوه، مقدار کل رسوب صادر شده بر حسب تن در پیکسل در سال (مطابق شکل ۲- c)، مقدار کل رسوب انباشت شده یا به دام افتاده روی سطح بر حسب تن در پیکسل در سال (شکل ۲- d) و مقدار اجتناب از انتقال رسوب به دلیل نقش پوشش گیاهی در جلوگیری از ورود رسوب به رودخانه بر حسب تن در پیکسل در سال (شکل ۲- e) نمایش داده شده است.

پتانسیل فرسایش خاک بر حسب تن در پیکسل در سال در شرایط واقعی محاسبه شده است. شایان ذکر است که در این مطالعه، محاسبات در واحد پیکسل بوده است و سپس برای هر حوضه مقادیر پیکسل‌های آن، تجمیع شده است (مطابق شکل ۲- a). میزان فرسایش اجتناب شده، نقش پوشش گیاهی و اقدامات مدیریتی در جلوگیری از فرسایش خاک را بر حسب



شکل ۲- (a) پتانسیل فرسایش خاک، (b) فرسایش اجتناب شده، (c) کل رسوب صادر شده، (d) کل رسوب انباشت شده و (e) اجتناب از انتقال رسوب

Figure 1. a) Soil erosion potential, b) Avoided erosion, c) Total sediment exported, d) Total sediment deposited, and e) Sediment delivery avoidance

نقش حفاظتی پوشش و مدیریت فعلی زمین است، نه خطای مدل.

پس از تجمیع مقادیر پیکسل‌ها، هر یک از نقشه‌های بالا برای حوضه‌ها نیز تهیه شده است. در نتیجه اجرای مدل در محدوده مورد مطالعه، خروجی‌های کمی دقیقی (مطابق جدول ۲)، برای هر یک از هفت حوضه تولید شد. لازم به ذکر است که شاخص‌های «فرسایش اجتناب‌شده» و «انتقال رسوب اجتناب‌شده»، کمیت‌های مقایسه‌ای هستند که اختلاف بین سناریوی فعلی و یک سناریوی مرجع تخریب‌یافته را نشان می‌دهند. همچنین، سناریوی خاک لخت بدون پوشش گیاهی^{۱۲} (RKLS) نیز محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی زیرحوضه‌ها، مقادیر RKLS به‌طور معنی‌داری بزرگ‌تر از مقادیر فرسایش و انتقال رسوب اجتناب‌شده هستند. این موضوع تأیید می‌کند که مقادیر اجتناب‌شده در محدوده‌ی منطقی قرار داشته و از پتانسیل حداکثری فرسایش، فراتر نرفته‌اند. بنابراین نیاز به توضیح است که بزرگ‌تر بودن مقادیر اجتناب‌شده نسبت به USLE فعلی، ناشی از ماهیت سناریومحور مدل بوده و بیانگر

¹² Rainfall erosivity – K soil erodibility² – L slope length – S slope steepness

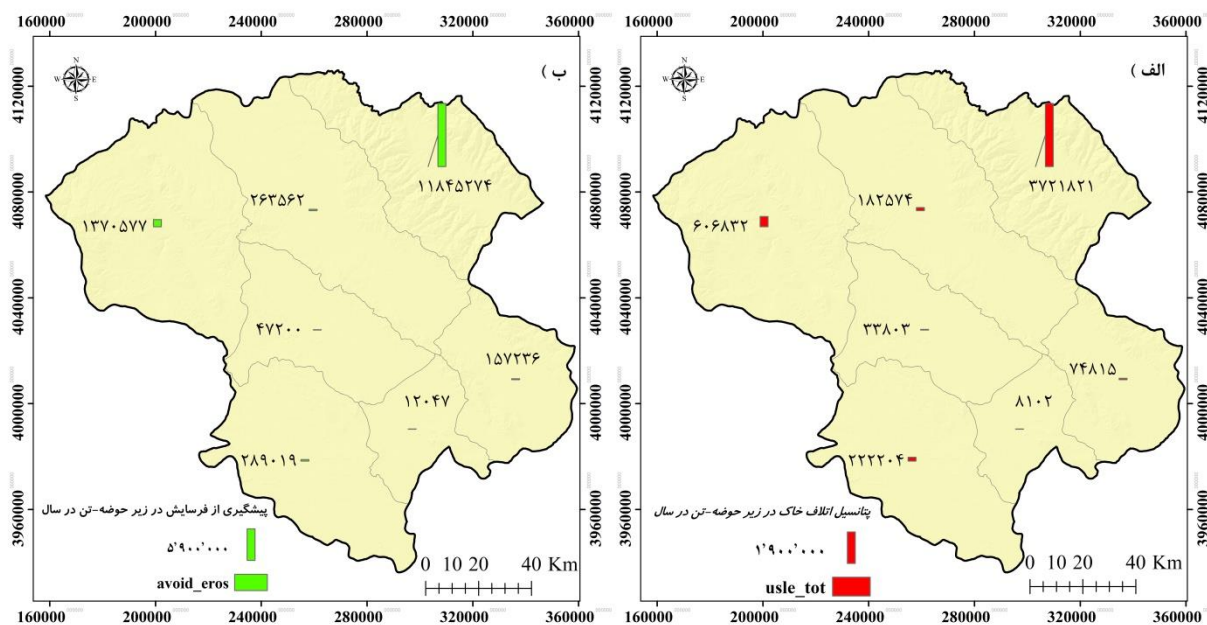
جدول ۲- نتایج نهایی مدل در هریک از حوضه‌ها و کل استان زنجان (تن در سال)

Table 2. Final model results for each watershed within the study area and for Zanjan Province as a whole

کد حوضه Watershed code	پتانسیل فرسایش خاک با وجود پوشش گیاهی Soil erosion potential in USLE Framework	پتانسیل فرسایش خاک با برهنه بودن خاک Soil erosion potential in RKLS Framework	رسوب‌دهی Sediment Export	انباشت رسوب Sediment Deposition	رسوب‌دهی اجتناب شده Avoided Sediment export	فرسایش خاک اجتناب شده Avoided Soil Erosion
1	3721821/15	15567559.8	733109/56	2553060/79	4279831/89	11845274/29
2	74815/28	232094.42	12207/69	49794/97	66383/44	157235/79
3	33802/99	81005.32	6097/61	27113/10	31215/13	47199/76
4	8102/10	20153.36	1278/41	5549/08	6329/99	12046/62
5	222204/01	511246.92	35869/50	158645/87	181179/18	289019/50
6	182574/48	446140.82	29621/46	145457/79	162055/30	263562/36
7	606831/77	1977509.87	115130/39	442553/77	624204/85	1370576/59
Total	4850151/78	18835710.51	933314/61	3382175/37	5351199/78	13984914/91

پیکسل) را کمی می‌کند. پوشش گیاهی موجود در استان زنجان از فرسایش ۱۳,۹۸۴,۹۱۴,۹۱ تن خاک در سال جلوگیری می‌کند. در صورت نبود پوشش گیاهی، میزان کل اتلاف خاک سالانه استان به جای ۴,۸۵ میلیون تن، به حدود ۱۸,۸۳ میلیون تن افزایش می‌یافت که نشان‌دهنده افزایش حدود ۲۸۸ درصدی یا ۳,۹ برابر نرخ فرسایش خاک است. حوضه شماره ۱ با ۱۱,۸۴۵,۲۷۴,۲۹ تن، بیشترین سهم را در خدمت اکوسیستمی جلوگیری از فرسایش خاک دارد. شکل ۳ (a و b)، به ترتیب میزان پتانسیل فرسایش خاک و میزان فرسایش خاک اجتناب شده در هر حوضه را بر اساس تن در سال نشان می‌دهد.

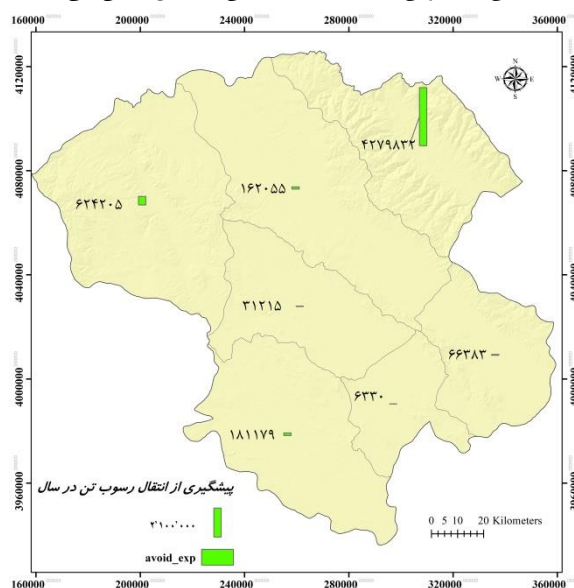
پتانسیل فرسایش خاک در هر حوضه با در نظر گرفتن اثرات کاهش‌دهنده پوشش گیاهی و اقدامات مدیریتی یا حفاظتی موجود بوده است. بر این اساس، کل پتانسیل اتلاف خاک در استان زنجان در شرایط فعلی، ۴,۸۵۰,۱۵۱,۷۸ تن در سال برآورد می‌شود. بیشترین سهم در این مقدار مربوط به حوضه شماره ۱ با ۳,۷۲۱,۸۲۱,۱۵ تن و کمترین سهم مربوط به حوضه شماره ۴ با ۸۱,۰۲ تن در سال است. این اختلاف چشمگیر، نشان‌دهنده تفاوت‌های عمده در ویژگی‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، پوشش زمین و کاربری اراضی بین حوضه‌ها است. اجتناب از فرسایش خاک، خدمت اکوسیستمی پوشش گیاهی در جلوگیری از وقوع فرسایش در مبدأ (خود



شکل ۳- (a) پتانسیل فرسایش خاک در هر حوضه و (b) فرسایش اجتناب شده در هر حوضه
Figure 2. a) Soil erosion potential per watershed, and b) Avoided erosion in the watershed

رسوبگذاری را به خود اختصاص داده‌اند. اجتناب از رسوبدهی، مستقیم‌ترین معیار برای ارزش‌گذاری خدمت نگهداشت رسوب و میزان ممانعت پوشش گیاهی از ورود رسوب به شبکه‌های آبی است. پوشش‌های طبیعی استان از ورود ۵,۳۵۱,۱۹۹,۷۸ تن رسوب به رودخانه‌ها و مخازن آبی در سال جلوگیری می‌کنند. در سناریوی فقدان پوشش گیاهی، بار رسوبی صادر شده به خروجی حوضه‌ها، می‌توانست به ۶,۲۸۴,۵۱۴,۳۹ تن در سال برسد که حدود ۶,۷ برابر مقدار فعلی است. حوضه شماره ۱ با ۴,۲۷۹,۸۳۱,۸۹ تن، بیشترین نقش را در این زمینه ایفا می‌کند. شکل ۴، میزان رسوبات ته‌نشین شده روی سطح هر حوضه که وارد جریان آبی نمی‌شود را در حوزه آبخیز بر حسب تن در سال نشان می‌دهد.

کل رسوبدهی از همه حوضه‌ها به خروجی آن‌ها (مانند رودخانه‌های اصلی یا مخازن سدها) یا همان کل بار رسوبی تحویل داده شده از استان زنجان، ۹۳۳,۳۱۴,۶۱ تن در سال محاسبه شده است. حوضه شماره ۱ با ۷۳۳,۱۰۹,۵۶ تن در سال، سهم غالب (حدود ۷۸,۵ درصد) را در تولید بار رسوبی کل استان دارد. پس از آن، حوضه‌های ۷ و ۶ با مقادیر ۱۱۵,۱۳۰,۳۹ و ۲۹,۶۲۱,۴۶ تن در سال قرار دارند. انباشت رسوب در طول مسیر و قبل از رسیدن به مجاری خروجی (به صورت ته‌نشینی در دامنه‌ها و دشت‌های سیلابی) یا همان کل رسوب ته‌نشین شده در سطح استان ۳,۳۸۲,۱۷۵,۳۷ تن در سال برآورد شد. حوضه شماره ۱ با ۲,۵۵۳,۰۶۰,۷۹ تن، بیشترین و حوضه شماره ۴ با ۵,۵۴۹,۰۸ تن، کمترین مقدار



شکل ۴- رسوبدهی اجتناب شده در حوزه آبخیز

Figure 4. Avoided sediment export in the watershed

خاک» و «اجتناب از رسوبدهی» به خود اختصاص داده است. این ارقام، حاکی از حساسیت فوق‌العاده بالا و نقش تعیین‌کننده این پهنه‌ها در هیدرولوژی و کیفیت رسوبی استان است. هرگونه اقدام مدیریتی یا تخریب در این حوضه، پیامدهای مستقیم و شدیدی بر کاهش عمر مفید مخازن سدهای پایین‌دست و کیفیت منابع آبی خواهد داشت. بنابراین، این حوضه باید در اولویت نخست برای اجرای طرح‌های حفاظتی و آبخیزداری، قرار گیرد. شیوه‌های مدیریتی در این پهنه‌ها، باید بر حفاظت و احیای شدید پوشش گیاهی، اجرای عملیات مکانیکی و بیومکانیکی با شدت بالا برای کنترل فرسایش و کنترل سختگیرانه تغییر کاربری اراضی و هر گونه فعالیت عمرانی متمرکز باشد. (۲) حوضه‌های با اولویت بالا (بحران): در حوضه‌های ۷ و ۶ اگرچه مقادیر فرسایش و رسوب در مقایسه با حوضه شماره ۱ کمتر است، اما سهم آن‌ها در تولید رسوب و تشدید بار رسوبی

بحث

بینش‌های مدیریتی

داده‌ها نشان می‌دهد که توزیع مکانی فرسایش خاک، تولید و انتقال رسوب و همچنین خدمات اکوسیستمی ارائه شده توسط پوشش گیاهی در حوضه‌ها، یکنواخت نبوده و تمرکز قابل توجهی در برخی پهنه‌ها است. ارائه بینش‌های مدیریتی در حوضه‌ها، بر اساس مقایسه منطقی دو معیار فرسایش و رسوبدهی، در سه سطح «فوق بحرانی»، «بحرانی» و «متوسط تا پایین» صورت پذیرفت. به این ترتیب، حوضه‌ها در سه دسته کلی بر اساس سه بینش مدیریتی قرار می‌گیرند:

(۱) حوضه‌های با اولویت بسیار بالا (فوق بحرانی): حوضه ۱ که به تنهایی مسئول بخش عمده‌ای از کل فرسایش خاک استان است و بیشترین سهم را در تولید بار رسوبی صادر شده دارد. همچنین، بیشترین سهم را در خدمات اکوسیستمی «اجتناب از فرسایش

طراحی نقشه‌های تصمیم‌ساز با تجمیع مقادیر داده‌های پیکسلی در حوضه‌ها

تبدیل دانش به عمل مستلزم ارائه خروجی‌ها در مقیاس‌های مدیریتی متناسب با واحدهای تصمیم‌گیری واقعی است (Cvitanovic et al., 2021). خروجی بسیاری از مدل‌ها در مقیاس پیکسل باقی می‌ماند یا صرفاً به میانگین‌های حوضه‌ای تقلیل می‌یابد. نوآوری کلیدی این پژوهش، تجمیع داده‌های پیکسلی در واحدهای همگن مدیریتی حوضه‌ها است. این گذار از «پیکسل» به «پهنه مدیریتی»، زبان مشترکی بین تحلیل‌های علمی پیچیده و نیازهای اجرایی مدیران ایجاد می‌کند. به این ترتیب، نهادهای متولی متوجه می‌شوند دقیقاً در کدام پهنه سرزمین و با چه درجه‌ای از فوریت باید وارد عمل شوند، که این خود اساس مدیریت مکان‌محور و کارآمد را تشکیل می‌دهد.

پایگاه دانش پویا برای مدیریت انطباقی

مدیریت پایدار منابع طبیعی در برابر عدم قطعیت‌ها، نیازمند چهارچوب‌های یادگیرنده و توانمند در شبیه‌سازی‌های بعدی است (Iacona et al., 2023; William and Brown, 2016). این مطالعه صرفاً یک ارزیابی مقطعی ارائه نمی‌دهد، بلکه چهارچوب و پایگاه داده جغرافیایی ایجاد کرده که قابلیت به‌روزرسانی پویا را دارا است. مدیران می‌توانند با قالب همین پژوهش، اثرات تغییرات آبی در کاربری اراضی، اجرای پروژه‌های آبخیزداری یا حتی تغییرات اقلیمی را بر روند فرسایش و رسوب، پیش از اجرا، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و ارزیابی کنند و حتی برای آینده سناریوسازی کنند. این قابلیت، پژوهش را از یک گزارش ایستا به یک سامانه پشتیبانی تصمیم‌گیری فعال تبدیل می‌نماید که می‌تواند به صورت مستمر همراه و راهنمای برنامه‌ریزی و پیش در بلندمدت باشد. این رویکرد، در قلب مدیریت انطباقی قرار دارد که بر یادگیری از طریق پیش و بازنگری مداوم تأکید می‌کند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با به‌کارگیری مدل نسبت تحویل رسوب در چهارچوب InVEST، ضمن کمی‌سازی دقیق نقش خدمات اکوسیستمی پوشش‌های گیاهی (در کنترل فرسایش خاک و کاهش رسوب‌دهی) در مقیاس پیکسل مبنای تجمیع اطلاعات در حوضه‌های استان زنجان، گامی مؤثر از مرحله ارزیابی و تشخیص به سوی ارائه راهکارهای عملی و تجویز برداشته است. مهم‌ترین دستاورد این مطالعه، تبدیل داده‌های پیچیده بیوفیزیکی به نقشه‌هایی در مقیاس قابل مدیریت حوضه‌ها است. این خروجی، یک پایه علمی شفاف و مکان‌محور برای تخصیص

شبکه‌ها آبی کل استان، قابل توجه است. شیوه‌های مدیریتی در این پهنه‌ها باید ترکیبی از مدیریت جامع پوشش گیاهی (احیای مراتع و جنگل‌ها)، تغییر الگوی کشت و بهینه‌سازی مدیریت اراضی کشاورزی در مناطق مستعد و اجرای طرح‌های آبخیزداری با تراکم متوسط باشد.

حوضه‌های با اولویت متوسط تا پایین: حوضه‌های ۲، ۳، ۴ و ۶ سهم بسیار کمتری در تولید کل رسوب استان دارند. با این حال، نقش آن‌ها در ارائه خدمات اکوسیستمی «اجتناب از فرسایش خاک» و «اجتناب از رسوب‌دهی»، اهمیت دارد. تمرکز اصلی در این پهنه‌ها می‌تواند بر حفاظت از وضع موجود، پیش مستمر برای جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی و تغییر کاربری و همچنین اجرای اقدامات مدیریتی سبک مانند کنترل چرا و کشت گیاهان مرتعی کم‌نیاز به آب، متمرکز باشد.

به طور خلاصه، بینش‌های مدیریتی مکان‌محور ارائه شده، مدیران و برنامه‌ریزان را قادر می‌سازد تا منابع محدود مالی و انسانی را به صورت کارآمد و مؤثر در پهنه‌هایی متمرکز کنند که بیشترین بازده را در کاهش کل بار رسوبی ورودی به منابع آبی حیاتی استان داشته باشند. این بینش، حرکت از مدیریت یکنواخت و پراکنده را به سمت مدیریت مبتنی بر شواهد کمی، هدایت می‌کند.

ارزش افزوده نسبت به مطالعات گذشته

پژوهش حاضر، گامی فراتر از بسیاری از مطالعات موجود در حوزه فرسایش و رسوب برداشته است. ارزش افزوده این تحقیق را می‌توان در محورهای نوآورانه زیر تبیین نمود:

معیار دوگانه و یکپارچه

به‌کارگیری همزمان معیارهای مکمل در تصمیم‌گیری‌های محیط‌زبستی، کلید مواجهه مؤثر با سیستم‌های پیچیده و چندبعدی است (Bozali, 2020). در حالی که رویکردهای مرسوم معمولاً تنها بر «میزان فرسایش» یا «رسوب خروجی» به صورت مجزا تمرکز می‌کنند، این مطالعه با ارائه چهارچوب تلفیقی همزمان، هم پتانسیل فرسایش در مبدأ و هم روند انتقال رسوب به شبکه آبی را به عنوان معیارهای مکمل، به کار گرفته است. این نگاه دو وجهی، نقاط بحرانی تولید رسوب و مسیرهای حساس انتقال را آشکار می‌سازد و راه را برای طراحی اقدامات ترکیبی (کنش در مبدأ و مداخله در مسیر) هموار می‌نماید. این رویکرد، احتمال موفقیت آبخیزداری را با توجه به مکانیسم واقعی تولید و انتقال رسوب، به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

یک سامانه اطلاعاتی یکپارچه و پویا بینجامد. چنین سامانه‌ای می‌تواند به عنوان پشتیبان استراتژیک در سطح ملی، از برنامه‌های حفاظت از منابع پایه سرزمین (خاک و آب)، حمایت نماید.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام میدارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در رابطه با انتشار این مقاله وجود ندارد.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از حمایت مالی اداره محیط زیست استان زنجان، سپاسگزاری می‌شود.

بهینه منابع محدود مالی و انسانی فراهم می‌سازد. رویکرد ترکیبی به‌کار رفته، که تلفیقی از مدل‌سازی کمی و تحلیل‌های مکانی است، چهارچوبی عملیاتی را در اختیار مدیران و برنامه‌ریزان قرار می‌دهد. این چهارچوب به آنان امکان می‌دهد تا به جای اتخاذ رویکردهای یکنواخت و پراکنده، مداخلات حفاظتی و آبخیزداری را بر روی پهنه‌های بحرانی و با بیشترین بازده تمرکز کنند.

در نهایت، این مطالعه فراتر از ارائه ارقام و توصیه‌های کلی، یک الگوی کاربردی برای تصمیم‌گیری هوشمند و انطباقی در مدیریت یکپارچه حوضه‌ها ارائه می‌نماید. این رویکرد با پر کردن شکاف میان ارزیابی‌های علمی و نیازهای اجرایی، نه تنها برای استان زنجان کاربرد دارد، بلکه می‌تواند با توسعه و تکرار در دیگر حوضه‌های کشور، به تشکیل

References

1. Alewell, C., Ringeval, B., Ballabio, C., Robinson, D.A., Panagos, P. and Borrelli, P., 2020. Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature Communications*, 11(1), p.4546. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18326-7>
2. Andualem, T. G., Hewa, G. A., Myers, B. R., Peters, S. and Boland, J., 2023. Erosion and sediment transport modeling: a systematic review. *Land*, 12(7), p. 1396. <https://doi.org/10.3390/land12071396>
3. Aneseyee, A. B., Elias, E., Soromessa, T. and Feyisa, G. L., 2020. Land use/land cover change effect on soil erosion and sediment delivery in the Winike watershed, Omo Gibe Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 728, p. 138776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138776>
4. Bayatikhatibi, M. and ali, I., 2025. Soil erosion spatial mapping with RUSLE model; A case study of Quetta Sub-basin (Pakistan). *Journal of Hydrogeomorphology*, 11(41), PP. 86-67. https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_18214.html
5. Borrelli, P., Robinson, D.A., Panagos, P., Lugato, E., Yang, J.E. and Alewell, C., 2021. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36), pp. 21994-22001. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001403117>
6. Bozali, N., 2020. Assessment of the soil protection function of forest ecosystems using GIS-based Multi-Criteria Decision Analysis: A case study in Adiyaman, Turkey. *Global Ecology and Conservation*, 24, p. 01271. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01271>
7. Cvitanovic, C., Shellock, R. J., Mackay, M., van Putten, E. I., Karcher, D. B., Dickey-Collas, M. and Ballesteros, M., 2021. Strategies for building and managing 'trust' to enable knowledge exchange at the interface of environmental science and policy. *Environmental Science & Policy*, 123, 179-189. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.020>
8. Desmet, P. J. J. and Govers, G., 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), pp. 427-433. <https://doi.org/10.1080/00224561.1996.12457102>
9. Ebrahimzadeh, S. , Argany, M. and Mirdar Harijani, F., 2024. Modeling the rate of soil erosion and sediment yield using the RUSLE / SDR model in the Dizgaran watershed. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(39), 1-24. <http://doi.org/10.22111/jneh.2024.39109.1823>
10. Ganasri, B.P. and Ramesh, H., 2016. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, 7(6), pp. 953-961. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>

11. Hamel, P., Chaplin-Kramer, R., Sim, S. and 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, pp. 166-177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.027>
12. Haregeweyn, N., Tsunekawa, A., Nyssen, J., Poesen, J., Tsubo, M. and Tsegaye Meshesha, D., 2017. Comprehensive assessment of soil erosion risk for better land use planning in river basins: Case study of the Upper Blue Nile River. *Science of the Total Environment*, 574, pp. 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.019>
13. Hosseinalizadeh, M., Alinejad, M., Mohammadian Behbahani, A., Khormali, F., Kariminejad, N., Pourghasemi, H.R. (2020). A Review on the Gully Erosion and Land Degradation in Iran. In: Shit, P., Pourghasemi, H., Bhunia, G. (eds) *Gully Erosion Studies from India and Surrounding Regions. Advances in Science, Technology & Innovation*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23243-6_26
14. Hosseini Mofrad, S. M. R. , Ahmadi, H. , Mehrabi, A. A. and Motamedvaziri, B., 2023. Investigating the effect of the construction of the new Hashtgerd - Taleghan road in Alborz province on the amount of erosion and sediment production using the WARSEM model. *Journal of Range and Watershed Management*, 76(3), 237-251. <http://doi.org/10.22059/jrwm.2023.354414.1694>
15. Iacona, G. D., Sutherland, W. J., Mappin, B., Adams, V. M., Armsworth, P. R., Coleshaw, T. and Possingham, H. P., 2023. Standardized reporting of the costs of management interventions for biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 32(5), 979-988. <https://doi.org/10.1111/cobi.13195>
16. IPBES, 2018. The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. <https://www.ipbes.net/assessment-reports/ldr>
17. Jafari, M., Tahmoures, M., Ehteram, M., Ghorbani, M. and Panahi, F., 2022. *Soil erosion control in drylands* (pp. 649-700). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-04859-3>
18. Ji, C., Cao, Y., Li, X., Pei, X., Sun, B., Yang, X. and Zhou, W., 2024. A review of the satellite remote sensing techniques for assessment of runoff and sediment in soil erosion. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 72(2), pp. 252-267. <https://doi.org/10.2478/johh-2024-0009>
19. Mahmood, S., Naeem, N., Ahamad, M. I., Tariq, Z. and Song, J., 2024. Spatial modeling of soil erosion potential in the Panjkora Basin, Eastern Hindu Kush: integrated RUSLE and geospatial approaches. *Environment, Development and Sustainability*, pp. 1-22. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05709-9>
20. Matomela, N., Li, T., Ikhumhen, H. O., Raimundo Lopes, N. D. and Meng, L., 2022. Soil erosion spatio-temporal exploration and Geodetection of driving factors using InVEST-sediment delivery ratio and Geodetector models in Dongsheng, China. *Geocarto International*, 37(26), pp. 13039-13056. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2076912>
21. Mohammadi, S. , karimzadeh, H. , pourmanafi, S. and Soltani, S., 2018. Spatial and Temporal Evaluation of Soil Erosion using RUSLE model Landsat satellite image time series (Case Study: Menderjan, Isfahan). *Journal of Range and Watershed Management*, 71(3), 759-774. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2018.221162.1073> (In Persian)
22. Motamedirad, M. , Zangane Asadi, M. A. and Ajam, H., 2023. Investigating the rate of soil erosion and sediment production using the RUSLE model and the modified method PSIAC (case study: kal basin of Ismail , Shahrood city, Semnan province). *Quantitative Geomorphological Research*, 11(4), 147-165. <http://doi.org/10.22034/gmpj.2022.360813.1374> (In Persian)
23. Nasir, N. and Selvakumar, R., 2018. Influence of land use changes on spatial erosion pattern, a time series analysis using RUSLE and GIS: the cases of Ambuliyar sub-basin, India. *Acta Geophysica*, 66(5), pp. 1121-1130. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0186-2>
24. Panagos, P., Standardi, G., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L. and Bosello,

- F., 2022. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. *Land Degradation & Development*, 33(3), pp.459-471.
<https://doi.org/10.1002/ldr.2879>
25. Panagos, P., Meusburger, K., Ballabio, C., Borrelli, P., & Alewell, C., 2014. Soil erodibility in Europe: A high-resolution dataset based on LUCAS. *Science of the Total Environment*, 479–480, 189–200.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.010>
26. Poesen, J., 2021. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(1), pp.5-13. <https://doi.org/10.1002/esp.4250>
27. Qurishi, S. M., 2024. Exploring the major watershed basins all around the world: a meta-analysis for basins characteristics. *AUIQ Technical Engineering Science*, 1(2), p. 9.
<https://doi.org/10.70645/3078-3437.1018>
28. Redhead, J. W., Stratford, C., Sharps, K., Jones, L., Ziv, G., Clarke, D. and Bullock, J. M., 2016. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale. *Science of the Total Environment*, 569, pp. 1418-1426.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.227>
29. 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). U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537.
<https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files/201712932574/28651.pdf>
30. Sadeghi, S. H. , Hashemi Ariyan, Z. , Vafakhah, M. and Karimi, Z., 2018. Comparison of Spatial Variations of Soil Erosion at Gonbad Representative and Treated Watersheds in Hamadan Province. *Journal of Range and Watershed Managment*, 71(2), 405-417.
<https://doi.org/10.22059/jrwm.2018.202889.984> (In Persian)
31. Sadeghi, S. H. R., 2017. Soil erosion in Iran: state of the art, tendency and solutions. *Poljoprivreda i Sumarstvo*, 63(3), 33-37.
<http://doi.org/10.17707/AgricultForest.63.3.04>
32. Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., and Wyatt, K., 2020. InVEST User's guide. The natural capital project, Standford university, University of Minnesota, the nature conservancy, and World Wildlife Fund: Standford, CA, USA.
<https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest/3.9.0/userguide/index.html>
33. Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L., McInnes, J. and Roberts, A., 2012. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138 (1), pp. 74- 88.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026>
34. Williams, B. K. Brown, E. D., 2016. Technical challenges in the application of adaptive management. *Biological Conservation*, 195, pp. 255-263.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.01.012>
35. Zarandian, A., Ramezani Mehrian, M., Mohammadyari, F., Mousazadeh, R., Azizi, N., 2024. Assessment and Economic Valuation of Ecosystem Services for Soil Erosion Prevention and Sediment Retention in the Khorkhoran International Mangrove Wetland. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 13 (4), pp. 1-20. <http://ijae.iut.ac.ir/article-1-1251-fa.html>