

Application of the Modified PSIAC Model for Quantitative and Qualitative Evaluation of Erosion and Sediment Yield in the Pelasjan Watershed, a Sub-Basin of the Zayandehrud River

Hamid Hoseinkhani*, Elham Ghanbari Adivi, Rouhollah Fattahi Nafchi and Ali Raeisi¹

(Received: June 28-2025 ; Revised: November 22-2025 ; Accepted: December 1-2025)

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

*: Corresponding author, Email: hosseinkhani.hamid@gmail.com

Abstract

Soil erosion and sediment transport are among the key challenges in the management of water and soil resources in Iran. In this study, the Modified PSIAC (MPSIAC) empirical model was applied to estimate sediment yield and evaluate the erosion status in the Pelasjan watershed. The model is based on the assessment of nine influencing factors, including geological characteristics, soil properties, climatic conditions, runoff, land slope, vegetation cover, land use, surface erosion, and channel erosion. By assigning scores to each factor and integrating the spatial layers, the sediment yield intensity of each sub-watershed was quantified both qualitatively and quantitatively. The required base data were prepared and analyzed using the Geographic Information System (GIS). Subsequently, the final erosion index for each sub-watershed was calculated, and erosion hazard classes were determined according to the model's standard tables. The total annual sediment production in the watershed was estimated at 803,301 tons, and the Sediment Delivery Ratio (SDR) was calculated as 14.48%, indicating considerable sediment deposition along the transport paths. The results showed that most sub-watersheds fall within the "moderate" erosion class, while insufficient vegetation cover, steep slopes, and land-use changes were identified as the main contributing factors to increased sediment yield. Based on these findings, identifying critical areas, implementing erosion control measures, and utilizing remote sensing and sediment monitoring technologies are strongly recommended. This study provides a scientific basis for improving watershed management and mitigating erosion-related risks in similar basins.

Keywords: Sediment yield estimation, MPSIAC, Pelasjan, Soil erosion

How to cite this article: Hoseinkhani, H., Ghanbari Adivi, E., Fattahi Nafchi, R. and Raeisi, A. 2025. Application of the Modified PSIAC Model for Quantitative and Qualitative Evaluation of Erosion and Sediment Yield in the Pelasjan Watershed, a Sub-Basin of the Zayandehrud River. *J. Water and Soil Sci.* 29(4): 164-176. DOI: [10.47176/jwss.29.4.71601](https://doi.org/10.47176/jwss.29.4.71601)

Copyright © 2025 Hoseinkhani et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

کاربرد مدل اصلاح شده MPSIAC در ارزیابی کمی و کیفی فرسایش حوضه آبریز پلاسجان به عنوان یکی از زیرحوضه های زاینده رود

حمید حسینخانی^{*id}، الهام قنبری عدیوی، روح الله فتاحی نافچی و علی رئیسی^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۹/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۰)

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hosseinkhani.hamid@gmail.com

چکیده

فرسایش خاک و انتقال رسوبات از چالش های اساسی در مدیریت منابع آب و خاک کشور به شمار می رود. در این پژوهش، با هدف تخمین حجم تولید رسوب و بررسی وضعیت فرسایش در حوضه آبریز پلاسجان، از مدل تجربی اصلاح شده پسیان (Modified PSIAC) استفاده شد. این مدل بر پایه ارزیابی نه عامل مؤثر شامل ویژگی های زمین شناسی، خصوصیات خاک، شرایط اقلیمی، میزان رواناب، شیب زمین، وضعیت پوشش گیاهی، نوع کاربری اراضی، فرسایش سطحی و فرسایش جریان های آبی طراحی شده و از طریق امتیازدهی و ترکیب لایه های اطلاعاتی، شدت رسوب زایی در هر زیرحوضه به صورت کمی و کیفی تعیین می شود. در این پژوهش، ابتدا داده های پایه با بهره گیری از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) آماده سازی و تحلیل شد. سپس امتیاز نهایی شاخص فرسایش برای هر زیرحوضه محاسبه و بر اساس جداول استاندارد مدل، سطوح خطر فرسایش در طبقات مختلف تعیین شد. مقدار کل رسوب تولیدی در حوضه حدود ۸۰۳،۳۰۱ تن در سال برآورد شد و نسبت تحویل رسوب (SDR) برابر با ۱۴/۴۸ درصد محاسبه شد که بیانگر رسوب گذاری چشمگیر در مسیرهای انتقال است. نتایج نشان داد که بیشتر زیرحوضه ها در طبقه فرسایش متوسط قرار دارند و پوشش گیاهی ناکافی، شیب زیاد و تغییرات کاربری اراضی از مهم ترین عوامل افزایش رسوب محسوب می شوند. بر اساس یافته ها، تمرکز بر شناسایی مناطق بحرانی، اجرای طرح های کنترل فرسایش و بهره گیری از فناوری های سنجش از دور و سیستم های پایش رسوب ضروری به نظر می رسد. این مطالعه می تواند پایه ای علمی برای تصمیم گیری مدیریتی در حوضه های مشابه و کاهش خطرات ناشی از فرسایش فراهم کند.

واژه های کلیدی: برآورد رسوب، MPSIAC، پلاسجان، فرسایش خاک

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت

شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

پدیده فرسایش و رسوب گذاری از چالش های اساسی در مدیریت منابع آب و خاک در بسیاری از حوضه های آبریز کشور به شمار می آید. خشکسالی های متوالی، وقوع مقادیر حدی بارش و سیلاب، تغییر در مشخصه های کاربری اراضی در حوضه آبریز، ورود به حریم رودخانه ها و ایجاد تأسیسات کنترل برای بهره گیری از منابع رودخانه ای از جمله عوامل مؤثر در پدیده فرسایش و رسوب به شمار می آیند. از طرفی هریک از سه فرایند فرسایش، انتقال و رسوب گذاری این توانایی را دارند تا چالش هایی را ایجاد کنند. به عنوان نمونه، فرسایش سبب بی ثباتی رودخانه ها، تخریب زمین های کشاورزی، نابودی تأسیسات مجاور رودخانه ها، از بین رفتن پل ها و سایر سازه های موجود، پر شدن سدها و تأسیسات موجود روی رودخانه، عمیق تر شدن بستر رودخانه ها، اثر منفی بر آبخوان ها و سطح آب زیرزمینی و... می شود (۶). همچنین، در زمان حاضر، فرایند فرسایش خاک از جمله مشکلات بزرگ محیط زیستی در ابعاد جهانی به شمار می رود؛ به طوری که برخی پژوهشگران فرسایش خاک را سرطان زمین نامیده اند (۱۴). هدررفت خاک مهم ترین مشکلات محیطی شناخته شده ای است که در اثر رواناب و فرسایش رخ می دهد (۱۳).

یکی از مهم ترین پیامدهای فرسایش، تولید و انتقال رسوب به درون شبکه های آبی است که در نهایت موجب کاهش ظرفیت مخازن سدها و عملکرد تأسیسات آبی می شود. از اهم مشکلاتی که ترسیب مواد رسوبی به بار می آورند، می توان به پدید آمدن جزیره هایی در رودخانه ها و در نتیجه کاهش گنجایش انتقال جریان های سیلابی، ترسیب در مخازن سدها و در نتیجه محدود شدن چشمگیر ظرفیت ذخیره مخزن و در نهایت خارج شدن سدها از مدار بهره برداری، ترسیب در مسیل رودخانه ها و در نهایت کم عمق شدن رودخانه اشاره کرد (۶).

در این میان، رودخانه زاینده رود به عنوان یکی از حیاتی ترین رودخانه های دائمی در فلات مرکزی ایران نقش بسزایی در تأمین منابع آبی شرب، کشاورزی و صنعت دارد. مخزن سد

زاینده رود، تنها محل ذخیره سازی این رودخانه، به وسیله رواناب های حاصل از بارش های فصلی تغذیه می شود. یکی از شاخه های مهم ورودی به این مخزن، رودخانه پلاسجان است که متأسفانه تاکنون مطالعه جامعی درباره میزان رسوب انتقالی آن انجام نشده است.

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی فرسایش و تولید رسوب در حوضه پلاسجان با استفاده از مدل MPSIAC اصلاح شده انجام می شود. این مدل که توسعه یافته مدل PSIAC است، با بهره گیری از ۹ عامل مؤثر، امکان تخمین دقیق تری از میزان فرسایش را فراهم می کند. مدل MPSIAC به دلیل ماهیت نیمه تجربی و ساختار چند عاملی خود، با شرایط خاکی و اقلیمی ایران سازگاری بیشتری نسبت به مدل های دیگر مانند EPM، RUSLE و FSM دارد. این مدل علاوه بر در نظر گرفتن نه عامل مؤثر بر فرسایش، امکان استفاده از داده های محدود و متغیر مکانی را فراهم می کند و به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک کشور، نتایج دقیق تر و واقع بینانه تری ارائه می دهد. کاربرد گسترده آن در مطالعات داخلی نیز کارایی زیاد مدل را در تخمین کمی و کیفی رسوب در خاک های ایران تأیید کرده است. در ارزیابی شدت فرسایش حوضه آبریز پلاسجان با استفاده از مدل MPSIAC اصلاح شده، یافته های مطالعات پیشین به خوبی کارایی این مدل را در تخمین فرسایش و تولید رسوب نشان داده اند. برای نمونه، در پژوهشی که در سال ۲۰۱۹ در حوضه بیشه زرد انجام شد، مدل های PSIAC و MPSIAC مقایسه شده و نتایج نشان داد با توجه به شرایط حوضه، MPSIAC دقت بیشتری در تحلیل رسوب داشته است (۱۵). همچنین، پژوهشگران دیگری در سال ۲۰۲۲ با استفاده از این مدل در حوضه های منتهی به تالاب انزلی، به شناسایی زیر حوضه های بحرانی با تولید رسوب زیاد پرداختند و رابطه معنادار بین پوشش گیاهی ضعیف و نرخ زیاد فرسایش را تأیید کردند (۱۲). از سوی دیگر، در پژوهشی در سال ۲۰۲۴ با تقسیم بندی حوضه آرازچای و بهره گیری از هر دو مدل PSIAC و MPSIAC، نتایج نشان داد که مدل MPSIAC

از این رو، نوآوری این پژوهش در به کارگیری ترکیب مدل یادشده با تحلیل مکانی GIS برای ارزیابی کمی و کیفی رسوب در یکی از زیرحوضه‌های کلیدی زاینده‌رود است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش حوضه بالادست رودخانه پلاسجان (از حدفاصل ایستگاه هیدرومتری اسکندری تا بالادست سرشاخه‌ها) است که در مختصات جغرافیایی $32^{\circ}46'33''$ تا $33^{\circ}11'10''$ عرض شمالی و $50^{\circ}23'$ تا $50^{\circ}40'20''$ طول شرقی واقع شده و مساحتی بالغ بر ۱۶۳۳ کیلومترمربع را به خود اختصاص می‌دهد. از لحاظ موقعیت سیاسی نیز تمامی این محدوده در استان اصفهان واقع شده و شامل شهرستان‌های فریدن، فریدون‌شهر، تیران - کرون، خوانسار و بویین - میاندشت است. همچنین این محدوده در محدوده‌های مطالعاتی بویین - میاندشت، دامنه داران و چهل‌خانه واقع شده است؛ به طوری که شمال منطقه در محدوده مطالعاتی چهل‌خانه، قسمت غربی در محدوده بویین - میاندشت و قسمت شرقی منطقه در محدوده مطالعاتی دامنه - داران قرار گرفته است (مطابق شکل ۱).

از نظر زمین‌شناسی، حوضه پلاسجان بخشی از زون سنندج - سیرجان محسوب می‌شود و شامل واحدهای سنگی آهکی، مارنی، شیل، و ماسه‌سنگی است که هرکدام رفتار متفاوتی در برابر فرسایش دارند. سازندهای مارنی و شیل به دلیل بافت نرم و نفوذپذیری کم، بیشترین فرسایش‌پذیری را دارند و نقش اصلی را در تولید رسوب ایفا می‌کنند؛ درحالی‌که واحدهای آهکی و سنگ‌های مقاوم‌تر، نسبت به فرسایش کمتر حساس‌اند. این تنوع زمین‌شناسی، ضرورت استفاده از مدل‌هایی مانند MPSIAC را دوچندان می‌کند؛ زیرا این مدل قادر است با امتیازدهی مجزا به ویژگی‌های زمین‌شناسی، تأثیر تفاوت سازندها را در برآورد نهایی فرسایش لحاظ کند. شکل ۲، نقشه سازندهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

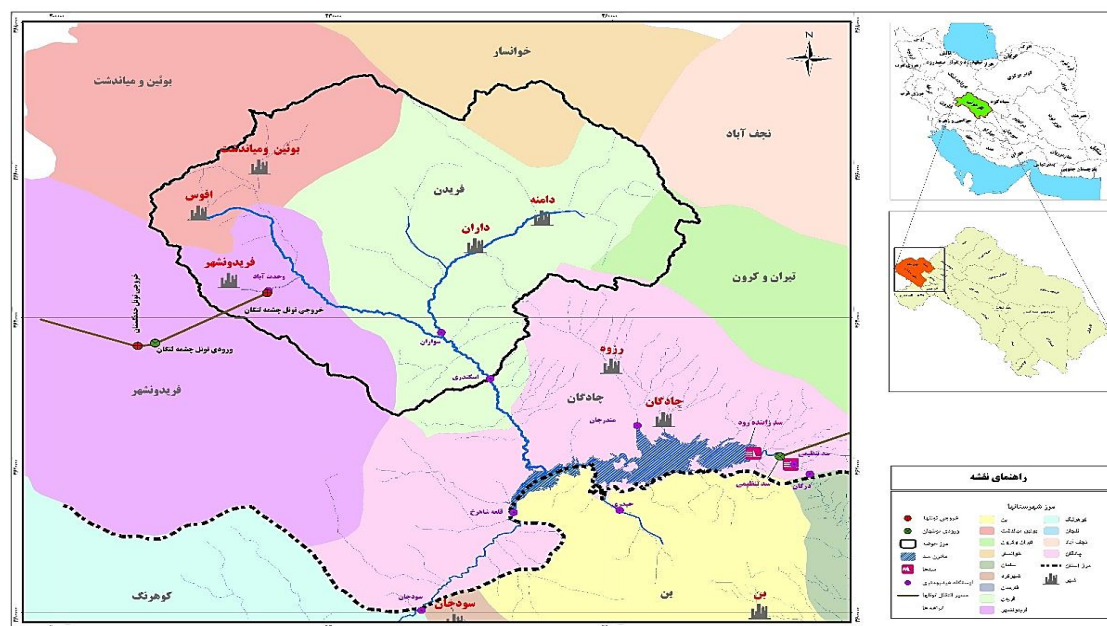
ارزیابی دقیق‌تری از شدت رسوب‌دهی ارائه می‌دهد؛ به‌ویژه در زیرحوضه‌هایی که تغییرات کاربری اراضی بیشتر به چشم می‌خورد (۸).

در مطالعه‌ای دیگر میزان فرسایش و رسوب در حوضه آبخیز رودخانه شور (یکی از زیر حوضه‌های فرعی کارون بزرگ) تعیین شد و روش مناسب برای کنترل فرسایش در این حوضه پیشنهاد شد. بر اساس نتایج این پژوهش، روش پسیاک یک روش متداول برآورد استعداد رسوب‌زدایی و تخمین تلفات خاک در حوضه است (۷).

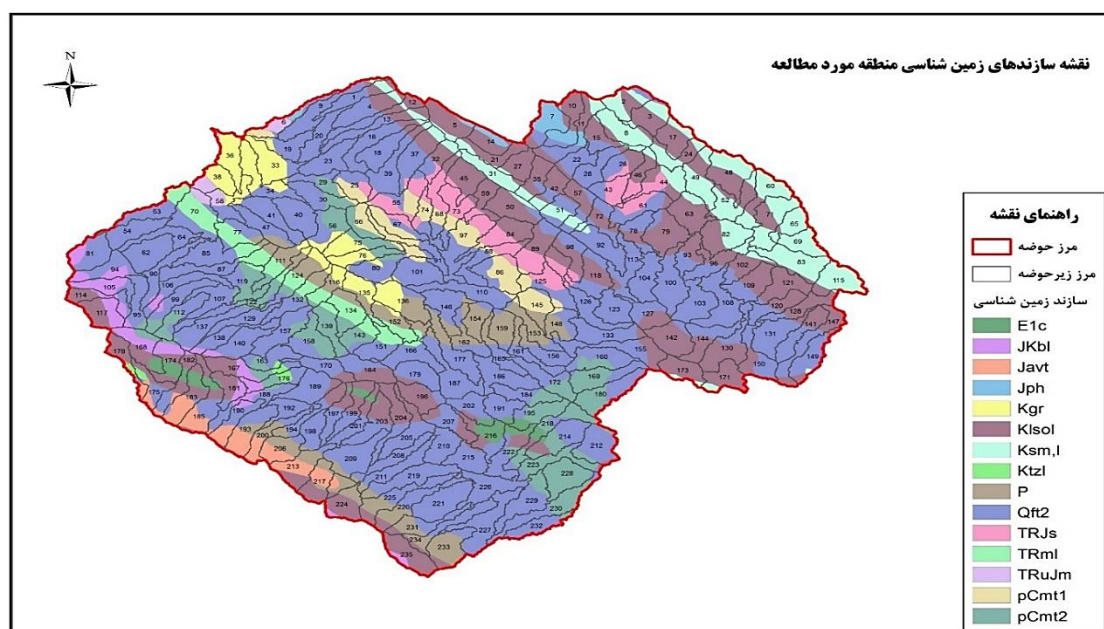
در همین راستا، عملکرد مدل MPSIAC در حوضه فیروزکوه بررسی شد و با ضریب تعیین 0.62 ، این مدل در برآورد بار رسوب مؤثرتر از مدل FSM ارزیابی شد (۹). نتایج مشابهی از دیگر پژوهش‌ها به دست آمد و تأکید شد که در حوضه‌های کوچک، MPSIAC دقت و عملکرد قابل قبول‌تری نسبت به FSM و حتی PSIAC دارد (۱۱). همچنین در منطقه لالی خوزستان، با تحلیل میدانی عوامل مؤثر بر فرسایش، بر اهمیت مساحت بدون سنگ‌فرش و اراضی با فرسایش زیاد در تعیین میزان رسوب مورد توجه قرار گرفت (۱۰). در مجموع، یافته‌های این پژوهش‌ها مؤید آن است که مدل MPSIAC، به‌ویژه نسخه اصلاح‌شده آن، ابزاری کارآمد و دقیق در ارزیابی فرسایش در حوضه‌های مختلف از جمله حوضه پلاسجان خواهد بود.

با توجه به نبود مطالعات پیشین در زمینه برآورد نسبت رسوب انتقالی از آبراهه پلاسجان به مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از مدل MPSIAC، این پژوهش در تلاش است تا با مدل‌سازی مکانی فرسایش و محاسبه نسبت رسوب‌دهی (SDR) در این حوضه، زمینه بهبود مدیریت رسوب و بهره‌وری سد را فراهم آورد. درنهایت، یافته‌های این پژوهش می‌تواند نقش مهمی در سیاست‌گذاری منابع آب و خاک در منطقه ایفا کنند.

تاکنون در ایران پژوهشی با هدف تخمین نسبت تحویل رسوب (SDR) از آبراهه پلاسجان به مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از مدل اصلاح‌شده MPSIAC انجام نشده است.



شکل ۱. موقعیت کلی محدوده مورد مطالعه



شکل ۲. نقشه سازندهای زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

بررسی اقلیم و ویژگی های فیزیوگرافی منطقه نشان می دهد که میانگین دمای سالانه در سطح حوضه تغییرات اندکی دارد (۹/۵ تا ۱۱/۲ درجه سانتی گراد)، اما بارندگی سالانه در ایستگاه های مختلف بین ۲۳۴ تا ۵۶۲ میلی متر متغیر است. داده های بارش از ایستگاه های فریدن (داران)، فریدون شهر، بویین میاندشت،

خوانسار، دامنه، مورچه خورت، سامان، کوهرنگ و الیگودرز گردآوری و پس از کنترل و تلفیق در محیط GIS، برای محاسبه شاخص اقلیم مدل MPSIAC استفاده شد. بر این اساس، اقلیم منطقه طبق طبقه بندی دومارتن در دو گروه نیمه خشک و مدیترانه ای طبقه بندی می شود. به دلیل کوهستانی بودن بیش از

۱، طبقه‌بندی فرسایش با روش MPSIAC نشان داده شده است. همچنین جدول ۲، عوامل ۹ گانه مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در روش MPSIAC را نشان می‌دهد.

در روش MPSIAC، پس از امتیازدهی به عوامل مؤثر بر فرسایش مانند اقلیم، شیب، پوشش گیاهی و کاربری اراضی، مجموع امتیازات به‌عنوان شاخص رسوب‌زایی محاسبه می‌شود. این شاخص که عددی بدون واحد است، با استفاده از جداول یا معادلات تجربی به مقدار رسوب سالانه (تن در هکتار یا مترمکعب در کیلومتر مربع) تبدیل می‌شود. معادله تجربی مورد استفاده در این مطالعه، رابطه‌ای نمایی بین شاخص رسوب‌زایی و مقدار رسوب تولیدی برقرار می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده، امکان تحلیل شدت فرسایش، شناسایی مناطق حساس و طراحی اقدامات حفاظتی در مدیریت بهینه حوضه را فراهم می‌کند.

نسبت تحویل رسوب (SDR)

پس از برآورد تولید رسوب با مدل MPSIAC، برای ارزیابی میزان رسوب واقعی منتقل‌شده به خروجی حوضه از شاخص نسبت تحویل رسوب (SDR) استفاده شد. این شاخص نشان‌دهنده سهم رسوبی است که از کل رسوب تولیدشده در حوضه، به خروجی منتقل می‌شود و به‌صورت معادله ۱ تعریف می‌شود.

$$SDR = Q_{s-out} / Q_{s-total} \quad (1)$$

Q_{s-out} = میزان رسوبی است که از حوضه یا زیرحوضه به خارج منتقل می‌شود (میزان رسوب در خروجی).

$Q_{s-total}$ = میزان کل رسوب تولیدشده در حوضه یا زیرحوضه است (مجموع رسوب تولیدی در مناطق مختلف حوضه).

SDR = نسبت تحویل رسوب

برای محاسبه Q_{s-out} ، از داده‌های ایستگاه هیدرومتری و معادله تجربی ۲ استفاده شد.

$$Q_s = 0.0864 * Q_w * C_m \quad (2)$$

Q_s = وزن رسوب عبوری با واحد (تن / روز)

Q_w = دبی آب (مترمکعب / ثانیه)

C_m = غلظت رسوب یا مواد معلق با واحد (میلی گرم / لیتر)

نیمی از سطح حوضه، اراضی بیشتر به مراتع با پوشش کم و اراضی کشاورزی اختصاص یافته‌اند که نقش محدودی در کاهش رواناب ایفا می‌کنند. کاربری اراضی در حوضه پلاسجان بیشتر شامل اراضی زراعی با کشت‌های فصلی (گندم، جو، چغندر قند و سیب‌زمینی)، مراتع با پوشش متوسط تا ضعیف، و در برخی نواحی محدود، باغات میوه مانند سیب و گردو است. سهم زیاد اراضی دیم و مراتع فقیر در مناطق شیب‌دار، یکی از عوامل اصلی افزایش فرسایش و تولید رسوب در این حوضه به شمار می‌رود. با اینکه در بخش‌های بالادست به‌واسطه نفوذپذیری نسبتاً مناسب خاک و بستر شکاف‌دار، بخشی از بارش نفوذ می‌کند، اما شیب زیاد و پوشش گیاهی ضعیف همچنان خطر وقوع سیلاب را تقویت می‌کند.

رودخانه پلاسجان و شاخه‌های فرعی آن، با توجه به شیب ملایم، بیشتر دارای رسوبات ریزدانه (سیلت، رس، ماسه و شن) هستند که ضخامت آنها معمولاً از ۲ میلی‌متر فراتر نمی‌رود. این موضوعی است که در تحلیل دبی رسوب و بررسی تأثیر آن بر کاهش ظرفیت مخزن سد زاینده‌رود اهمیت دارد.

روش MPSIAC

روش MPSIAC یکی از شیوه‌های معتبر و سازگار با شرایط اقلیمی ایران برای برآورد کمی و کیفی تلفات خاک و ارزیابی پتانسیل رسوب‌زایی حوضه‌های آبریز است. این روش ابتدا در سال ۱۹۶۸ برای مناطق خشک و نیمه‌خشک جنوب غرب آمریکا طراحی و در سال ۱۹۸۲ به‌روزرسانی شد. MPSIAC با در نظر گرفتن ۹ عامل مؤثر شامل شیب، پوشش گیاهی، خاک، بارندگی، هیدرولوژی و عوامل انسانی، امکان ارزیابی جامع فرسایش و رسوب را حتی در شرایط محدودیت اطلاعات فراهم می‌کند. در این روش، پس از امتیازدهی به عوامل مختلف، مجموع امتیازات به‌عنوان شاخص شدت رسوب‌زایی در پنج کلاس مختلف طبقه‌بندی می‌شود. به دلیل دقت زیاد و جامع‌نگری، MPSIAC ابزار مناسبی برای مدیریت و کنترل رسوب و حفاظت منابع آب و خاک محسوب می‌شود. در جدول

جدول ۱. طبقه‌بندی فرسایش با روش MPSIAC (۱)

کلاس فرسایش	طبقه‌بندی کیفی فرسایش	حاصل جمع اعداد به‌دست‌آمده از ۹ عامل مؤثر در فرسایش (درجه رسوب‌دهی)	تولید رسوب m^3/km^2	T/km^2
۱	خیلی زیاد	$100 <$	$1450 <$	$2500 <$
۲	زیاد	$75-100$	$450-1450$	$1500-2500$
۳	متوسط	$50-75$	$250-450$	$500-1500$
۴	کم	$25-50$	$95-250$	$200-500$
۵	ناچیز	$0-25$	<95	<200

جدول ۲. عوامل ۹ گانه مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در روش MPSIAC (۱)

ردیف	عوامل فرسایش خاک	امتیاز	معادله اصلاح شده	توضیحات
۱	زمین‌شناسی سطحی	0-10	$Y1=X1$	فرسایش پذیری سنگ ها $X1$
۲	خاک	0-10	$Y2=16.67K$	فرسایش پذیری خاک K
۳	آب و هوا	0-10	$Y3=0.2P2$	بارندگی ۶ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال $P2$
۴	رواناب	0-10	$Y4=0.006R+10QP$	ارتفاع رواناب R دبی ویژه QP
۵	پستی و بلندی	0-20	$Y5=0.33S$	شیب متوسط به درصد S
۶	پوشش زمین	-10-10	$Y6=0.2Pb$	اراضی لخت به درصد Pb
۷	کاربری اراضی	-10-10	$Y7=20-0.2Pc$	تاج پوشش به درصد Pc
۸	وضعیت فعلی فرسایش	0-25	$Y8=0.25SSF$	فرسایش سطحی خاک SSF
۹	فرسایش رودخانه‌ای	0-25	$Y9=1.67SSFg$	فرسایش خندقی خاک $SSFg$

مقدار Q_{stotal} از خروجی مدل MPSIAC استخراج شد. سپس با استفاده از فرمول SDR، نسبت تحویل رسوب برای کل حوضه و به تفکیک زیرحوضه‌ها محاسبه شد. برای زیرحوضه‌ها، علاوه بر روش مستقیم، از مدل‌های تجربی بر پایه عوامل مؤثر مانند مساحت، شیب، پوشش گیاهی و فاصله تا خروجی استفاده شد.

نتایج و بحث

در این مطالعه، مدل MPSIAC برای ارزیابی فرسایش و رسوب‌زایی در حوضه پلاسجان به کار گرفته شد. این مدل با

استفاده از امتیازدهی به ۹ عامل مؤثر شامل زمین‌شناسی، خاک، اقلیم، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، توپوگرافی، فرسایش سطحی، فرسایش آبراهه‌ای و وضعیت رسوب‌زایی، میزان پتانسیل تولید رسوب را در هر واحد ارزیابی می‌کند. در این روش، هر یک از ۹ عامل مؤثر بر فرسایش امتیازدهی شده و مجموع این امتیازات برای هر زیرحوضه محاسبه می‌شود. این مقدار به‌عنوان ضریب رسوب‌گذاری شناخته شده و مبنای تعیین شدت فرسایش قرار می‌گیرد. تقسیم‌بندی حوضه پلاسجان به زیرحوضه‌ها با استفاده از مدل رقومی ارتفاع

(DEM) با دقت ۱۲/۵ متر و به کمک ابزار SWAT در محیط ArcGIS انجام شد. در این فرایند، مرزهای زیرحوضه‌ها به صورت خودکار بر اساس ساختار طبیعی زهکشی و موقعیت خروجی حوضه تعیین شد. با توجه به ویژگی‌های فیزیوگرافی منطقه و نیاز به هم‌ترازی مقیاس تحلیل با دقت مدل، مساحت زیرحوضه‌ها در بازه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتار انتخاب شد. با استفاده از جدول استاندارد مدل پسیاک، بازه‌های عددی این ضریب مشخص شده و بر اساس آن، شدت تولید رسوب در طبقات کیفی مختلفی مانند بسیار کم، کم، متوسط، زیاد و بسیار زیاد دسته‌بندی می‌شود. به این ترتیب، هر زیرحوضه با توجه به امتیاز نهایی خود در یکی از این طبقات قرار می‌گیرد.

پس از تعیین طبقه‌بندی کیفی، مقدار سالانه تولید رسوب نیز با استفاده از ضرایب استاندارد مرتبط با هر طبقه محاسبه می‌شود. این مقدار برحسب تن در کیلومترمربع در سال بیان شده و می‌تواند برای هر زیرحوضه به صورت جداگانه محاسبه شود. سپس با تجمع مقادیر به دست آمده، میزان کل تولید رسوب در سطح حوضه برآورد می‌شود. این فرایند نه تنها امکان شناسایی مناطق حساس به فرسایش را فراهم می‌کند، بلکه به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد تا با تمرکز بر نقاط بحرانی، اقدامات مدیریتی مناسبی مانند تثبیت خاک، کنترل رواناب، افزایش پوشش گیاهی و اصلاح کاربری اراضی را اجرا کنند. در نهایت، نتایج این تحلیل به عنوان ابزاری کلیدی در برنامه‌ریزی‌های منابع آب و کاهش آثار مخرب فرسایش در منطقه مورد مطالعه قابل استفاده خواهد بود.

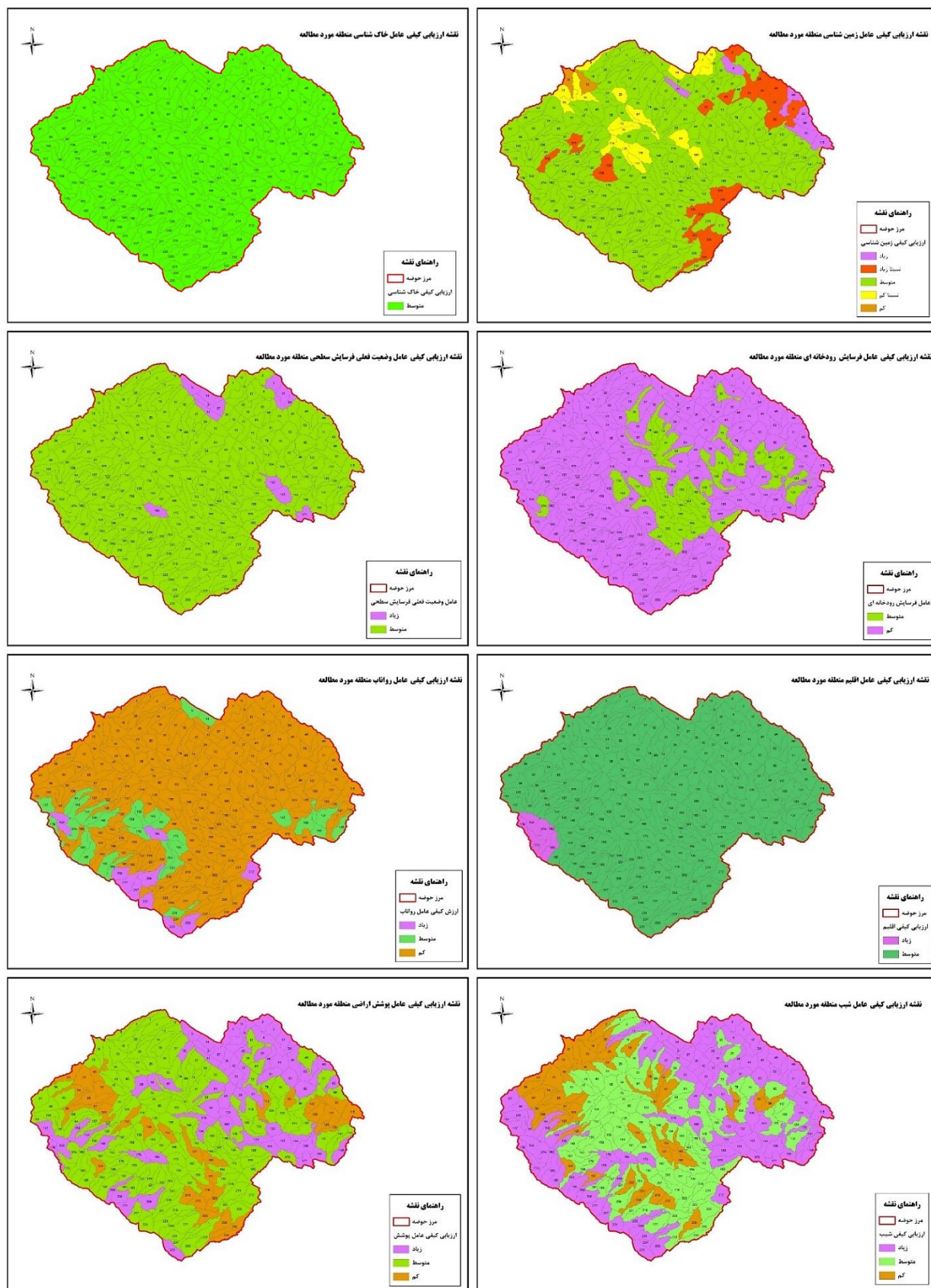
در مجموعه تصاویر موجود در شکل ۳، عوامل کلیدی که بر موضوع مورد بررسی تأثیرگذار هستند، به صورت مجزا نمایش داده شده‌اند. امتیازدهی به نه عامل مؤثر مدل MPSIAC شامل زمین‌شناسی، خاک، اقلیم، رواناب، شیب، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، فرسایش سطحی و فرسایش رودخانه‌ای بر اساس دستورالعمل اصلی مدل و با استفاده از داده‌های مکانی و اقلیمی منطقه انجام شد. به منظور اختصار، جزئیات محاسبه هر عامل در اینجا آورده نشده است. هر یک از این عوامل نقش مهمی در

شکل‌دهی به نتایج نهایی دارند و بررسی دقیق آنها به ما کمک می‌کند تا بهتر بتوانیم روندها، نقاط قوت و ضعف، و فرصت‌های بهبود را شناسایی کنیم. این عوامل به صورت ترکیبی و تعاملی بر وضعیت کلی اثر می‌گذارند و توجه به آنها برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک و عملی ضروری است. تحلیل نتایج نشان داد که توپوگرافی (شیب‌های تند) و کاربری اراضی نامناسب (مانند اراضی کشاورزی در شیب زیاد یا مراتع فقیر) بیشترین سهم را در افزایش فرسایش داشته‌اند. در مقابل، مناطقی با پوشش گیاهی متراکم و سنگ‌نگاری مقاوم‌تر، پتانسیل کمتری برای رسوب‌زایی نشان دادند.

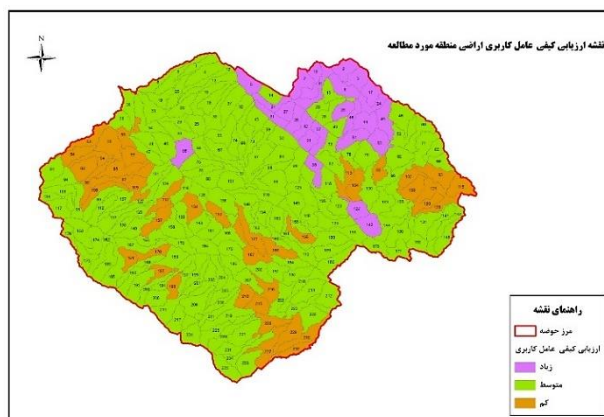
در نقشه‌ای که برای ارزیابی شدت تولید رسوب تهیه شده است (شکل ۴)، همه زیرحوضه‌ها در بازه "متوسط" قرار دارند؛ به استثنای یک زیرحوضه که تولید رسوب بیشتری را نشان می‌دهد. این مورد خاص ممکن است به دلیل موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های خاص منطقه‌ای آن زیرحوضه باشد. یکی از دلایل احتمالی تولید بیشتر رسوب در این زیرحوضه که در قسمت انتهایی حوضه قرار دارد، می‌تواند مربوط به تجمع رسوب در این بخش باشد. در مناطقی که در پایین دست حوضه قرار دارند، به علت کاهش سرعت جریان آب و تغییرات در شیب، رسوب‌های جمع شده از بخش‌های بالادست (جایی که جریان آب سریع‌تر است) به این نواحی منتقل می‌شود؛ بنابراین، این زیرحوضه ممکن است به دلیل تجمع رسوب‌ها از مناطق بالادست و یا فرسایش‌های شدیدتر در این منطقه، تولید رسوب بیشتری داشته باشد.

همچنین، این زیرحوضه می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند تغییرات در پوشش گیاهی، نوع خاک و یا فعالیت‌های انسانی در منطقه باشد که باعث افزایش میزان فرسایش سطحی و رسوب‌زایی در این ناحیه می‌شود. با توجه به اینکه در قسمت انتهایی حوضه هستیم، امکان جمع شدن رسوبات از سایر مناطق بالادست و انباشت آنها در این بخش وجود دارد که این موضوع می‌تواند شدت تولید رسوب را افزایش دهد.

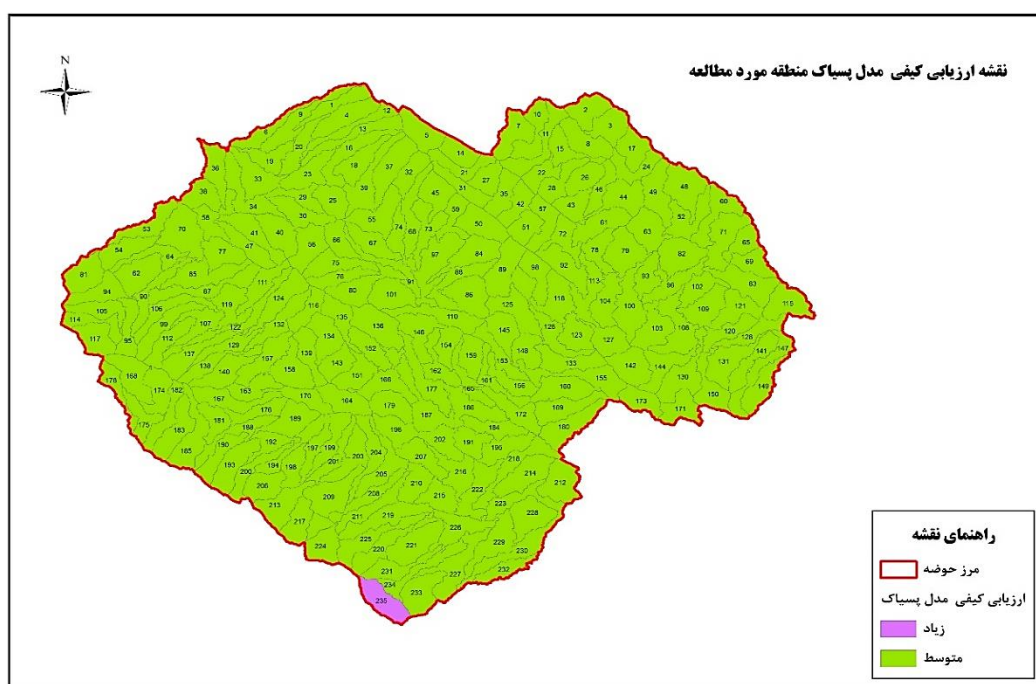
به منظور محاسبه میزان رسوب‌دهی برحسب تن در کیلومترمربع، دانسیته ظاهری خاک مقدار ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب برآورد شد. مقدار رسوب برآوردی با روش MPSIAC



شکل ۳. نقشه ارزیابی کیفی عوامل ۹ گانه برای ارزیابی منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. نقشه ارزیابی کیفی عوامل ۹ گانه برای ارزیابی منطقه مورد مطالعه (ادامه شکل ۳)



شکل ۴. نقشه ارزیابی کیفی مدل پسیاک منطقه مورد مطالعه

(MPSIAC) و تعیین دبی رسوب خروجی از حوضه، نسبت تحویل رسوب (SDR) برای کل حوضه و هر یک از زیرحوضه‌ها محاسبه شد. در این مرحله، ابتدا مقدار دبی رسوب خروجی از حوضه با استفاده از داده‌های ایستگاه هیدرومتری و رابطه تجربی محاسبه شد و سپس با مقدار رسوب تولیدشده در سطح حوضه مقایسه شد. نتایج محاسبات در جدول ۳ ارائه شده است.

برای هر زیرحوضه محاسبه شد و مقدار تجمعی آن برای کل حوضه مورد مطالعه به دست آمد. بر این اساس، مقدار رسوب کل برای یک سال در این حوضه ۸۰۳۳۰۱ تن در سال برآورد شد که نشان‌دهنده میزان زیاد رسوب‌گذاری در منطقه است.

نسبت تحویل رسوب

پس از انجام محاسبات تولید رسوب با استفاده از مدل پسیاک

جدول ۳. روند و نتیجه محاسبه دبی رسوب در ایستگاه هیدرومتری

فصل	ماه	متوسط رسوب روزانه (ton/day)	متوسط رسوب ماهانه (ton/month)	متوسط رسوب فصلی (ton/season)
بهار	فروردین	۱/۲۳۴	۳۸/۵۳۳	۹۷/۹۹۹
	اردیبهشت	۱/۸۹۶	۵۸/۷۶۹	
	خرداد	۲۲	۶۹۷	
تابستان	تیر	۶	۱۹۳	۷۴۶
	مرداد	۸	۲۴۱	
	شهریور	۱۰	۳۱۲	
پاییز	مهر	۲۱	۶۶۴	۱۱/۲۹۰
	آبان	۲۱۱	۶/۵۴۶	
	آذر	۱۳۲	۴/۰۸۱	
زمستان	دی	۴۷	۱/۴۴۳	۱۱/۲۷۷
	بهمن	۶۷	۲/۰۶۲	
	اسفند	۲۵۱	۷/۷۷۳	
جمع رسوب سالانه		۱۲۱/۳۱۳		

نتایج حاصل از این پژوهش، میزان رسوب سالیانه را معادل ۱۲۱/۳۱۳ تن در سال برآورد کرده است. به منظور ارزیابی دقت و اعتبار این برآورد، مقایسه‌ای تطبیقی با مطالعات مشابه انجام شده در سایر حوضه‌های آبریز کشور صورت پذیرفت. در مطالعه‌ای که در حوضه آبخیز سیج و آل مشهد با همین روش انجام شده بود، میزان رسوب سالانه ۳۹ تن برآورد شده که اختلاف معناداری با مقدار حاصل در حوضه پلاسجان دارد. این تفاوت بیشتر ناشی از تمایز در شرایط فیزیوگرافیک، وسعت حوضه، شیب اراضی، الگوی کاربری زمین و میانگین بارندگی سالانه است (۴). پژوهش دیگری در حوضه شهرستان گتوند که با روش پسیاک انجام شده، مقدار رسوب سالیانه را ۵۴۰۲۸ مترمکعب گزارش کرده است. با اعمال ضریب تبدیل چگالی متوسط رسوب (۱/۳ تن بر مترمکعب)، مقدار معادل ۷۰۲۳۶

تن در سال حاصل می‌شود که به مقدار برآوردی حوضه پلاسجان نزدیک‌تر بوده و حاکی از تشابه نسبی شرایط این دو حوضه از نظر عوامل مؤثر در تولید رسوب است (۵).

مطالعه‌ای دیگر در زیرحوضه دهنمک حبله‌رود، نرخ رسوب‌زایی را ۵/۸۴ تن در هکتار در سال نشان داده است. با احتساب مساحت ۲۴۳۲۵ هکتاری این حوضه، حجم کل رسوب سالانه به ۱۴۲۰۹۶ تن بالغ می‌شود که مقداری فراتر از برآورد حوضه پلاسجان است. این تفاوت می‌تواند ناشی از شدت بیشتر فرسایش، شرایط اقلیمی خاص و الگوی متفاوت کاربری اراضی باشد (۲). در مقابل، پژوهشی در حوضه خورخوره کردستان، مقدار ناچیز ۳ تن رسوب سالانه را گزارش کرده که به مراتب کمتر از مقدار حاصل در حوضه پلاسجان است. این اختلاف فاحش را می‌توان به عواملی همچون پوشش

گیاهی مطلوب‌تر، شیب ملایم‌تر، بارندگی کمتر و احتمالاً دقت کمتر داده‌های ورودی نسبت داد (۳).

یکی از نتایج کلیدی این پژوهش، محاسبه نسبت تحویل رسوب (SDR) معادل ۱۴/۴۸ درصد بود. مقدار نسبت تحویل رسوب (SDR) معادل ۱۴/۴۸ درصد با ویژگی‌های زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه همخوانی دارد. شیب‌های زیاد بالادست، تراس‌های آبرفتی میان‌دست و کاهش انرژی جریان در پایین‌دست، موجب ته‌نشینی بخش عمده‌ای از رسوبات در مسیر انتقال و کاهش مقدار SDR در خروجی حوضه می‌شود. از نظر مدیریتی، این موضوع تأکید می‌کند که کنترل فرسایش و رسوب نباید فقط بر نقاط خروجی حوضه متمرکز باشد؛ بلکه باید اقدامات پیشگیرانه در مناطق بالادست و میان‌دست، به‌خصوص زیرحوضه‌های حساس نیز در اولویت قرار گیرد.

نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه داخلی و خارجی همخوانی دارد. برای نمونه، خلیلی و همکاران (۱۱) در حوضه‌های منتهی به تالاب انزلی و عابدینی و همکاران (۱) در حوضه آرازچای، مقادیر نسبت تحویل رسوب (SDR) را در بازه ۱۲ تا ۱۶ درصد گزارش کرده‌اند که با مقدار محاسبه‌شده در حوضه پلاسجان (۱۴/۴۸ درصد) مطابقت دارد. همچنین، علوی‌نیا و متقیان (۴) در مناطق نیمه‌مرطوب شمال ایران و بروشکه و همکاران (۸) در نواحی خشک جنوب کشور، عملکرد مدل MPSIAC را دقیق‌تر از مدل‌های FSM و EPM معرفی کرده‌اند. در سطح بین‌المللی نیز مطالعاتی مانند لی و همکاران (۱۲) در چین و چیانگ‌گوو (۱۳) در مناطق خشک گس‌پلیتوی شرق آسیا، بر اهمیت نقش شیب و پوشش گیاهی در کنترل میزان SDR تأکید داشته‌اند. این همخوانی نتایج نشان می‌دهد که مدل MPSIAC نه تنها در شرایط اقلیمی ایران، بلکه در محیط‌های مشابه جهانی نیز قابلیت اعتماد زیادی در برآورد فرسایش و تولید رسوب دارد.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج حاصل از مدل‌سازی رسوب با استفاده از مدل MPSIAC

در حوضه پلاسجان، نشان می‌دهد که مقادیر برآوردشده در محدوده‌ای منطقی و قابل قبول قرار دارند. این نتایج نه تنها با مشاهدات میدانی همخوانی نسبی دارند، بلکه در مقایسه با مطالعات مشابه انجام‌شده در سایر حوضه‌های ایران، بیانگر صحت نسبی رویکرد انتخاب‌شده هستند. با این حال، تفاوت‌های مشاهده‌شده در مقادیر رسوب و امتیازدهی عوامل مؤثر، نشان‌دهنده آن است که مدل‌های تجربی مانند پسیاک، به‌شدت تحت تأثیر کیفیت، دقت و نحوه برآورد عوامل ورودی هستند. از جمله این عوامل می‌توان به بارش، شیب، کاربری اراضی و نوع خاک اشاره کرد که هرکدام با روش‌های گوناگون قابل محاسبه‌اند؛ بنابراین، به‌منظور افزایش دقت مدل، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی روش‌های مختلف محاسبه و وزن‌دهی به این عوامل بررسی و مقایسه شوند؛ به‌ویژه با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین مانند تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های سنجش از دور.

در همین راستا، شناسایی و مدیریت نقاط بحرانی تولید رسوب اهمیت ویژه‌ای دارد. این مناطق با امتیازهای زیاد در پارامترهای حساس مانند کاربری نامناسب، شیب تند و پوشش گیاهی ضعیف، بیشترین نقش را در تولید رسوب دارند. در این نواحی، اقدامات مؤثری مانند تثبیت دامنه‌ها، افزایش تراکم پوشش گیاهی، کنترل رواناب و بهبود شیوه‌های کشت می‌تواند نتایج ملموسی در کاهش فرسایش ایجاد کند.

همچنین، تأسیس شبکه‌های پایش دائمی شامل ایستگاه‌های رسوب‌سنجی و هیدرومتری، می‌تواند به تأمین داده‌های دقیق و مستمر برای اعتبارسنجی مدل‌ها کمک کرده و زمینه‌ساز بهبود تصمیم‌گیری‌های مدیریتی شود. این داده‌ها در کنار فناوری‌های پیشرفته سنجش از دور، امکان شبیه‌سازی دینامیک رسوب در بازه‌های زمانی مختلف را فراهم می‌آورد و در پیش‌بینی تغییرات آتی نیز کارآمد خواهد بود.

درنهایت، مدیریت مؤثر منابع آب و خاک از جمله بهره‌گیری از شیوه‌های نوین آبیاری مانند آبیاری قطره‌ای، حفاظت فیزیکی خاک در شیب‌ها و اصلاح الگوهای بهره‌برداری از اراضی، از

ارائه راهکارهای اجرایی، می‌تواند در تدوین برنامه‌های جامع مدیریتی در مقیاس منطقه‌ای نقش مؤثری ایفا کند.

جمله راهکارهای عملیاتی برای کاهش رسوب‌زایی در این حوضه به شمار می‌رود. از این رو، نتایج این پژوهش نه تنها مبنای علمی مناسبی برای تحلیل شرایط موجود فراهم می‌کند، بلکه با

References

منابع مورد استفاده

1. Abedini, M., F. Esfandiari Darabad, P. Afshin and E. Pourghasemi. 2024. Soil Erosion Zoning in Alazar Chay Watershed Using PSIAC Model. *Journal of Environmental Science Studies* 9(1):8022–8030.
2. Ahmadi H. Applied Geomorphology. Vol. 1: Water Erosion. 2006. University of Tehran Press, Tehran (in Farsi).
3. Ahmadi, H. and AA. Mohammaf. 2010. Evaluation of Sediment Estimation of EPM and PSIAC Models Using Geomorphology Method (case study: Dehnamak Watershed), *Iranian Journal of Range and Desert Research* 17(3): 339-352 (in Farsi).
4. Alavinia, SH. and M. Motaghian. 2024. Comparative Assessment of FSM and MPSIAC Models in Quantifying Soil Sedimentation Rates in the Semi-humid and Alpine Regions of Northern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 196(9):792.
5. Alijani, AR., A. Alijani, N. Kohansal Ghadimvand and M. Aleali. 2017. Analyzing Factors Affecting Erosion and Sedimentary Deposits Using the Empirical Method of PSIAC. *Open Journal of Geology* 7(8):998–1010. [doi:10.4236/ojg.2017.78072](https://doi.org/10.4236/ojg.2017.78072)
6. Amini, A., M. Karami Moghadam, MH. Sedri and S. Kazemi. 2023. Determining the Erosion and Sedimentation Using MPSIAC Model and GIS System in Khorkhoreh Watershed, Kurdistan, Iran *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS* 14(4): 87-102 (in Farsi).
7. Baghban Haghighi, M. 2013. Estimation of Sij and Al Watershed Sediment With PSIAC Method. Master thesis, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (In Farsi).
8. Brooshkeh, E., R. Sokouti, MA. Khedri and SNP. Lashkarian. 2018. Comparative Efficacy of Some Empirical Models to Estimate Sediment Yield in Small Catchments. *Poljoprivreda i Sumarstvo* 64(2):163–173.
9. Faraji Tbar, M., K. Esmaceli and AR. Farid Hosseini. 2014. Study and Estimation of Sediment in River by Using HEC-RAS 4.0 Model (case study: Chalus River). Master thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (in Farsi).
10. Ghanbari Adivi, E. 2019. Determination of Erodibility and Sedimentation in the Watershed of Shoor River and the Proposed Method for Erosion Control. In: 11th International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University Ahvaz, Iran (in Farsi).
11. Khalili Vavdareh, S., A. Shahnazari and A. Sarraf. 2022. Investigating Anzali Wetland Sediment Estimation Using the MPSIAC Model. *Frontiers in Earth Science* 10:736125.
12. Lie, TW., QW. Zhang, LJ. Yan, J. Zhao and YH. Pan. 2008. A Rational Method for Estimating Erodibility and Critical Shear Stress of an Eroding Rill. *Geoderma* 144(3–4):628–633.
13. Qiangguo, C. 2002. The Relationships Between Soil Erosion and Human Activities on the Loess Plateau. In: 12th ISCO Conference, Beijing.
14. Rangzan, K., AR. Zarasvandi and A. Heydari. 2007. Comparison of EPM and MPSIAC Models in GIS & RS for Erosion and Sediment Yield Assessment of the Pegah-Sorkh Basin, Gotvand Area, Khuzestan Province, Iran. *Physical Geography Research* 0(63): 1000252 (in Farsi).
15. Zarei, AR., M. Mokarram and A. Shabani. 2019. Evaluation of Sediment Yield (Qs) in Bishezard Watershed located Southwest of Iran, Using PSIAC and MPSIAC Models. *International Journal of Global Environmental Issues* 18(1): 1-23.