Journal of Water and Soil Science
Vol. 30, No. 2, 2026, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.30.2.32203

Evaluation of MPSIAC Model and Effects of Land Use Changes on Soil Erosion/Sediment Load in Goharbaran Subbasin, Chaharmahal va Bakhtiari Province

Mehdi Naderi Khorasgani*[1], Zahra Ghanavati Behbahani[1], Ruhollah Fattahi[2], Hossein Samadi Brojeni[2]

(Received: October 2-2025; Revised: May 16-2026; Accepted: May 25-2026)

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
2. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
*. Corresponding author: Email: khnaderi@yahoo.com

Abstract
Water erosion is a great issue in Iran, and due to a lack of reliable and sufficient data for the recognition of vulnerable areas, using models is inevitable. This study was designed for the evaluation of the MPSIAC model in the subbasin of Goharbaran in Chaharmahal va Bakhtiari province. The sediments of the reservoir were surveyed and measured after exhausting the water. Landsat-8 data were applied to study land use changes on soil erosion. During intensive fieldwork, 37 surficial (0-20 cm) soil samples were collected and, after pretreatment, were used for some soil physical and chemical analyses. For the determination of 9 MPSIAC factors, we used library, field, and laboratory data. Multitemporal analysis showed that the quality of rangelands has increased, and the surface area of orchards was doubled within 20 years (1994-2014). Sensitivity analysis indicated that the MPSIAC model was highly sensitive to the river erosion factor, while the least sensitive factor was soil. The sensitivity of the model to the runoff specific peak and soil silt percentage was also very high. Application of the MPSIAC model showed that 48% of soils were in moderate and 36% of soils were in severe sediment yield rate classes. Results of sediment measurements indicated that the specific sediment yield was 11.76 t.ha-1.y-1 during 26 years (1988-2014), while the forecasted value by the MPSIAC model was 5.97 t.ha-1.y-1 Despite others' findings, a lower estimation of the model revealed the need for MPSIAC model calibration before using it in similar environments.

Keywords: Sediment load, MPSIAC model, Land use change, Goharbaran subbasin, Chaharmahal va Bakhtiari Province

How to cite this article: Naderi Khorasgani, M., Ghanavati Behbahani, Z., Fattahi, R. and Samadi Brojeni, H. 2026. Evaluation of MPSIAC Model and Effects of Land Use Changes on Soil Erosion/Sediment Load in Goharbaran Subbasin, Chaharmahal va Bakhtiari Province. *J. Water and Soil Sci.* 30(2): 165-176. DOI: 10.47176/jwss.30.2.32203

Copyright © 2026 Naderi Khorasgani 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.

نشریه علوم آب و خاک
سال سی‌ام/ شماره دوم / تابستان ۱۴۰۵/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۱۶۵ تا ۱۷۶ 10.47176/jwss.30.2.32203

ارزیابی مدل MPSIAC و اثر تغییر کاربری بر میزان بار رسوب/فرسایش در زیرحوضه گوهرباران، استان چهارمحال‌وبختیاری

مهدی نادری خوراسگانی[1*]، زهرا قنواتی بهبهانی[1]، روح‌الله فتاحی[2] و حسین صمدی‌بروجنی[2]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۷/۱۰ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۴)

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: khnaderi@yahoo.com

چکیده

فرسایش آبی مسئله مهمی در ایران است و به دلیل نبود داده‌های معتبر و کافی برای شناسایی مناطق مستعد فرسایش استفاده از مدل‌ها اجتناب‌ناپذیر است. این پژوهش برای ارزیابی مدل MPSIAC در زیرحوضه گوهرباران واقع در استان چهارمحال‌وبختیاری طراحی شده است. برای تحقق این هدف رسوبات مخزن سد گهرباران پس از تخلیه آب نقشه‌برداری و اندازه‌گیری شد. با استفاده از تصاویر ماهواره Landsat-8 اثر تغییر کاربری سرزمین بر فرسایش بررسی شد. طی فعالیت میدانی ۳۷ نمونه خاک سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) برداشته شد و بعد از تیمارهای اولیه برای تجزیه فیزیکی و شیمیایی استفاده شدند. برای تعیین نه عامل مدل MPSIAC از داده‌های کتابخانه‌ای، میدانی و آزمایشگاهی استفاده شد. مقایسه زمانی نقشه‌های کاربری نشان داد طی ۲۰ سال (۱۳۹۳-۱۳۷۳) کیفیت مراتع بهبود یافته و وسعت باغات دو برابر شده است. آزمون حساسیت آشکار کرد که مدل MPSIAC بیشترین و کمترین حساسیت را به ترتیب به عامل فرسایش رودخانه‌ای و خاک داشت. اندازه‌گیری رسوب مشخص کرد که رسوب‌دهی ویژه در دوره ۲۶ساله (۱۳۹۳-۱۳۶۷) $t.ha^{-1}.y^{-1}$ ۱۱/۶ بود؛ درحالی‌که رسوب‌دهی ویژه پیش‌بینی‌شده مدل $t.ha^{-1}.y^{-1}$ ۵/۹۷ بود. برخلاف دستاورد دیگر پژوهشگران کم‌برآوردی رسوب توسط مدل لزوم کالیبراسیون مدل MPSIAC را قبل از کاربرد آن در محیط‌های مشابه را آشکار می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بار رسوب، مدل MPSIAC، تغییر کاربری سرزمین، زیرحوضه گهرباران، استان چهارمحال و بختیاری

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

ایران از نظر فرسایش رتبه نخست منطقه و رتبه دوم جهان است (۱۲) و بطور متوسط ۲۵ تا ۴۵ تن خاک در هکتار در سال است (۴). به منظور اجرای برنامه‌های حفاظت خاک و اصلاح مدیریت اراضی تخمینی از مقدار فرسایش و رسوب ضروری است (۲۵) و گاهاً بهره‌گیری از مدل‌ها گریزناپذیر است. مدل تجربی MPSIAC (Modified Pacific Southwest Inter-Agency Committee)، اصلاح‌شده مدل PSIAC توسط جانسون و گمبهارت (۱۱) است. مدل مناسب مدلی است که مانند مدل MPSIAC بتوان به کمک داده‌های اندازه‌گیری‌شده آن را ارزیابی، اعتبارسنجی و کالیبره کرد (۲) و بندهای کوچک ابزاری مناسب برای ارزیابی مدل‌ها هستند.

اندازه‌گیری رسوبات به روش ژرفاسنجی (Bathymetric) کاری سنگین است (۶) و رسوب‌سنجی به دلایل مختلف مملو از عدم قطعیت است. مدل‌های فرایند - پایه برای برآورد رسوب مناطقی خاص توسعه یافته‌اند و نیازمند داده‌های متعدد هستند. به همین دلایل برای برآورد فرسایش و رسوب از مدل‌های تجربی استفاده می‌شود (۶ و ۱۷).

مدل‌های PSIAC و MPSIAC (۱۱)، در اسپانیا (۸)، در ایران (۲۲) و در تانزانیا (۲۱) به عنوان مدلی معتبر برای برآورد رسوب و فرسایش شناخته شده‌اند. کازابلا-گونزالس و همکاران (۶) گزارش کردند که مدل MPSIAC کارایی مطلوبی در حوضه‌های آبخیز کوچک دارد. خالدیان و امینی (۱۳) به این نتیجه رسیدند که مدل MPSIAC در حوضه آبخیز دریاچه زریبار کارایی لازم را ندارد. محمدی و همکاران (۱۸) برای برآورد فرسایش به کمک مدل MPSIAC روش شی پایه (Object-based) را توصیه کردند.

اثر تغییر کاربری سرزمین بر فرسایش خاک

زارع و امیری (۲۹) تغییر کاربری حوضه کسیلان را در یک دوره ۳۰ ساله (۲۰۱۱-۱۹۸۱) به کمک مدل و سلول اتوماتیک مارکوف (Markov Cellular Automata) بررسی و گزارش کردند که ۴۵ درصد افزایش فرسایش به دلیل تبدیل جنگل‌ها به مناطق مسکونی بوده است. لی و همکاران (۱۵) گزارش کردند که تغییر جنگل‌ها به اراضی بایر عامل تشدید فرسایش بوده است. بوریلی و همکاران (۵) دلیل افزایش فرسایش قرن در ۲۱ را تغییر کاربری و توسعه کشاورزی در سالهای ۲۰۱۲-۲۰۰۱ دانستند.

سد خاکی گوهرباران در سال ۱۳۶۷ درپست‌ترین نقطه زیرحوضه گوهرباران ساخته شد و ذخیره آب آن برای مصارف کشاورزی اراضی زیردست در شهرستان شهرکرد، استان چهارمحال‌وبختیاری مصرف می‌شود. میزان رسوبات تجمع‌یافته پشت سد کامل حفظ می‌شود و معیاری برای ارزیابی مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب است. اهداف این پژوهش عبارت‌اند از: ۱) اعتبارسنجی مدل با استفاده از میزان رسوب جمع-آوری‌شده پشت بند گهرباران و ۲) بررسی تأثیر تغییر کاربری سرزمین زیرحوضه بر میزان فرسایش و رسوب.

مواد و روش‌ها

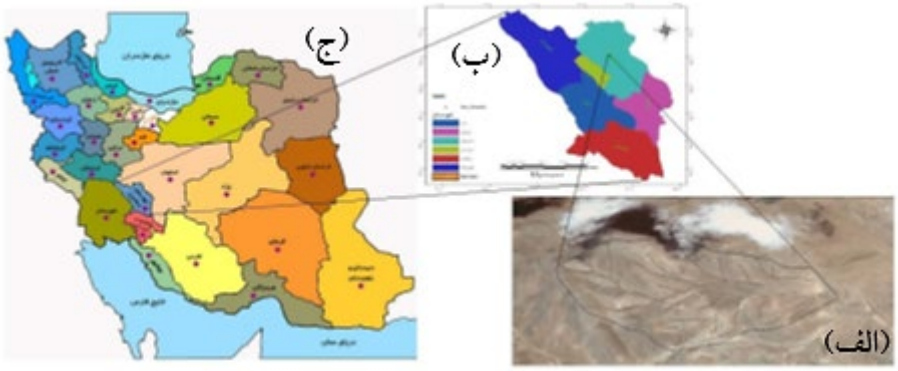
منطقه مورد مطالعه

زیرحوضه آبخیز گهرباران با مساحت ۱۹۳ هکتار از زیرحوضه‌های بهشت‌آباد و متعلق به زیرحوضه شهرکرد از حوضه بزرگ کارون شمالی است. این زیرحوضه در طول جغرافیایی"۲۶ '۴۳ °۵۰ تا "۵۱ '۴۴ °۵۰ شرقی و عرض جغرافیایی "۴۳ '۲۱ °۳۲ تا "۲۸ '۲۲ °۳۲ شمالی در شرق شهرستان شهرکرد در استان چهارمحال‌وبختیاری قرار دارد (شکل ۱). سد خاکی گهرباران در موقعیت طول جغرافیایی '۴۵ ° ۵۰ و عرض جغرافیایی '۲۲ ° ۳۲ قرار دارد. کاربری اراضی زیرحوضه عمدتاً مرتع، باغ، اراضی صخره‌ای و معدن سنگ است. میانگین درازمدت درجه حرارت سالانه و بارش سالانه به ترتیب ۱۱/۲ درجه سانتی‌گراد و ۳۲۷ میلی‌متر است (۲۶).

جمع‌آوری داده‌ها

اندازه‌گیری حجم رسوبات

در پست‌ترین نقطه زیرحوضه گهرباران سدی با بدنه خاکی و



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و شبکه آبراهه‌ای زیرحوضه گهرباران مستخرج از گوگل‌ارث. (الف) در شهرستان شهرکرد، (ب) استان چهارمحال و بختیاری و (ج) کشور

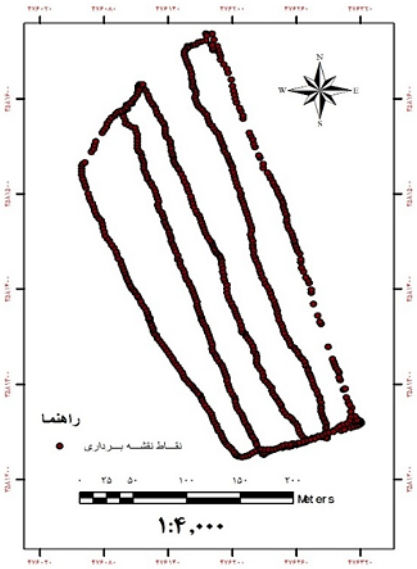
هسته رسی به ارتفاع ۷/۷۵ متر و طول تاج ۴۱۰ متر قرار دارد که کار ذخیره آب را انجام می‌دهد و آب ذخیره‌شده در زمان نیاز از طریق لوله قابل استحصال است. گنجایش سد در سال ۱۳۷۳ از طریق نقشه‌برداری مشخص شده است (۲۶). مجدداً در سال ۱۳۹۳ با تخلیه ذخیره آب بند، گنجایش بند از طریق برداشت ارتفاعی ۱۵۸۸ نقطه با استفاده از GPS دو فرکانسه نقشه‌برداری و اندازه‌گیری شد (شکل ۲) (۱۰). اختلاف ظرفیت ۱۳۷۳ و ۱۳۹۳ گنجایش رسوبات تجمع‌یافته حجمی با ارتفاع متوسط ۱/۲ متر و سطحی برابر ۳۶۲۱۲ مترمربع بود که حجم رسوبات جمع‌شده در یک دوره ۲۰ساله را تشکیل می‌داد.

بررسی تغییر کاربری سرزمین

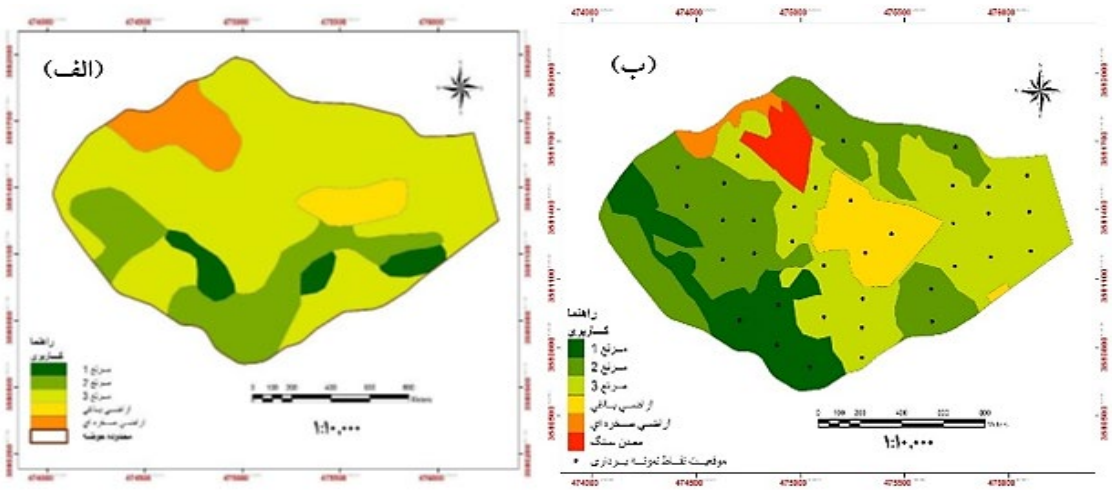
نقشه کاربری اراضی در سال ۱۳۷۳ (۱۹۹۴) (۲۶) و داده‌های Landsat-8 گرفته‌شده در تیرماه ۱۳۹۳ (۲۰۱۴) برای بررسی تغییر کاربری سرزمین استفاده شدند. این تصاویر در مسیر ۱۶۴ و ردیف ۳۸ سامانه مرجع جهانی لندست و شامل ۱۱ باند بودند. برای تهیه ترکیب رنگی مجازی استاندارد Landsat-8 از ترکیب باندهای ۳، ۴ و ۵ استفاده شد. باندهای اطلاعاتی به روش عامل شاخص مطلوب (Optimum Index Factor, OIF) برای طبقه‌بندی نظارت‌شده انتخاب شدند. برای انتخاب محل نمونه‌های آموزشی (Training areas) از ترکیب رنگی مجازی استاندارد، گوگل ارث و بازدید میدانی استفاده شد. تصاویر به کمک طبقه‌بندی‌کننده حداکثر احتمال (Maximumliklihood Classifier) طبقه‌بندی شدند و کلاس‌های کاربری مشخص شدند.

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک

مکان ۳۷ نمونه روی نقشه کاربری سرزمین به نسبت وسعت کاربری‌ها مشخص شد (شکل ۳-الف و جدول ۱) و طی فعالیت‌های میدانی نمونه‌برداری خاک از عمق ۲۰-۰ سانتی‌متر انجام شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مرتبط نمونه‌ها مانند درصد سیلت و شن به روش هیدرومتری (۹)، شن خیلی ریز با استفاده از الک‌های ۰/۰۵ و ۰/۱ میلی‌متر، مواد آلی به روش سوزاندن‌تر با بی‌کربنات پتاسیم در مجاورت اسید سولفوریک غلیظ (۲۸) اندازه‌گیری شدند. نفوذپذیری منطقه توسط صمدی بروجنی (۲۶) به روش استوانه‌های دوگانه اندازه‌گیری شد و مقدار متوسط آن را برای زیرحوضه ۷/۷۲ سانتی‌متر در روز به دست آوردند و در این پژوهش از همان مقدار استفاده شد. ساختمان نمونه‌های خاک طی بازدید میدانی با استفاده از اطلاعات ۳۷ نمونه خاک تعیین شد. برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری رسوبات ۱۰ نقطه داخل دریاچهٔ سد به صورت تصادفی مشخص شد و از رسوبات حدفاصل سطح تا عمق بستر اولیه، با درنظرگرفتن عمق رسوبات ۱، ۲ یا ۳ نمونه خاک به وسیله سیلندر برداشت شد. نمونه‌های در آون تهویه‌دار در درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و متوسط چگالی ظاهری ۱/۳۶ $g.cm^{-3}$ برای رسوبات مشخص شد.



شکل ۲. مکان برداشت ارتفاعی ۱۵۸۸ نقطه طی نقشه‌برداری با GPS دو فرکانسه (۱۰)



شکل ۳. نقشه کاربری سرزمین زیرحوضه گهرباران در سالهای ۱۳۷۳ (الف) و ۱۳۹۳ (ب) همراه با ۳۷ نقطه نمونه‌برداری (مراتع ۱، ۲ و ۳ به ترتیب از نظر پوشش عبارتند از مراتع خوب، متوسط و ضعیف)

عوامل نه‌گانه مدل MPSIAC

مدل MPSIAC بر اساس ۹ عامل مؤثر، امکان برآورد میزان فرسایش ناخالص (E) ($m^3.km^{-2}.y^{-1}$) (معادله ۱) در یک حوضه را با استفاده از مقدار بار رسوب (Qs) ($m^3.km^{-2}.y^{-1}$) (معادله ۲) و نسبت تحویل رسوب (SDR) (معادله ۳) فراهم می‌کند (۲۹).

$$SDR = \frac{Q_s}{E} \quad (۱)$$

بار رسوب از طریق محاسبه R که جمع نمرات ۹ عامل تعیین‌شده مدل MPSIAC است، فراهم شد.

$$Q_s = 18.6e^{0.036R} \quad (۲)$$

$$Log(SDR) = 1.8768 - 0.14191\log(10A) \quad (۳)$$

جدول ۱. دامنه نمرات و معادلات تعیین نمره عوامل مؤثر بر فرسایش خاک و تولید رسوب مدل MPSIAC (۲۵)

شماره	عامل	دامنه نمرات	شماره و اجزای معادله عامل
۱	زمین شناسی سطحی Surface geology	۰–۱۰	X1=Y1 ، Y1 (۴) شاخص فرسایش زمین‌شناسی سطحی است که بر اساس نوع سنگ، سختی، شکستگی و هوازدگی تعیین می‌شود.
۲	خاک Soil	۰–۱۰	X2 = 16.67 K (۵) ، K عامل فرسایش پذیری خاک در فرمول جهانی فرسایش است.
۳	آب و هوا Climate	۰–۱۰	X3 = 0.2 P2 (۶)، P2 مقدار بارندگی ۶ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال بر حسب میلی‌متر است.
۴	روان‌آب Run off	۰–۱۰	X4 = 0.006 R + 10 Qp (۷) ، R ارتفاع رواناب سالانه برحسب میلی‌متر و Qp دبی ویژه پیک برحسب متر مکعب بر ثانیه در کیلومتر مربع است.
۵	پستی و بلندی Topography	۰–۲۰	X5 = 0.33 S (۸)، S شیب متوسط برحسب درصد است.
۶	پوشش زمین Ground cover	۱۰+ تا ۱۰–	X6= 0.2 Pb (۹)، Pb درصد اراضی لخت و فاقد پوشش (Bare ground) است.
۷	کاربری اراضی Land Use	۱۰+ تا ۱۰–	X7 = 20 – 0.2 Pc (۱۰)، Pc مقدار تاج پوشش بر حسب درصد است.
۸	وضعیت فعلی فرسایش در سطح حوضه آبخیز Upland Erosion	۰–۲۵	X8 = 0.25 S.S.F (۱۱)، S.S.F. امتیاز عامل سطحی خاک است که با استفاده از روشی که توسط اداره مدیریت اراضی آمریکا پیشنهاد شده است (روش BLM)، به دست می‌آید.
۹	فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب Channel erosion and sediment transport	۰–۲۵	X9 = 1.67 SSF.g (۱۲)، SSF.g نمره نهایی فرسایش خندقی عامل سطحی خاک در روش BLM است.

در معادله شماره ۳، A مساحت حوضه ($mile^2$) و SDR معرف نسبت تحویل رسوب هستند.

روش محاسبه مقدار عددی هر یک از عوامل مؤثر بر فرسایش در روش اصلاح‌شده PSIAC به شرح جدول ۱ است (۲۵). برای تهیه لایه زمین‌شناسی سطحی از نقشه زمین‌شناسی استان چهارمحال‌وبختیاری با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ استفاده شد. سازند زمین‌شناسی منطقه از نوع کژدمی است و مقدار ۷/۵ برای کل زیرحوضه در نظر گرفته شد. موسوی و همکاران (۲۰) مقدار این عامل را ۵/۱ در نظر گرفتند. به منظور تعیین عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) درصد سیلت و شن ریز، درصد شن، درصد مواد آلی، ساختمان خاک و مقدار نفوذپذیری خاک مرتبط با ۳۷ نمونه خاک مورد استفاده قرار گرفتند. ساختمان خاک عمدتاً دانه‌ای ریز تا متوسط (Granular, fine-medium) و متوسط نفوذپذیری خاک منطقه ۷/۷۲ سانتی‌متر بر ساعت بود. با میان‌یابی (Interpolation) مقدار فرسایش‌پذیری (K) برای ۳۷ نقطه به روش انحنای کمینه (Minimum Curvature) با استفاده از نرم‌افزار Arc View GIS 10.2.2 پهنه‌بندی عامل فرسایش‌پذیری خاک انجام شد. دامنه تغییرات مقادیر فرسایش‌پذیری با توجه به داده‌ها ۰/۴۸–۰/۰۵ بود.

بر اساس طبقه‌بندی‌های اقلیمی دمارتین و کوپن اقلیم منطقه به ترتیب مدیترانه‌ای و استپی مرطوب است (۲۶) و نمره ۵ در نظر گرفته شد. مقدار بارندگی ۶ساعته با دوره بازگشت دو سال در ایستگاه سینوپتیک شهرکرد که نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک به منطقه مطالعاتی می‌باشد، ۲۵ میلی‌متر است (۲۷). موسوی و همکاران (۲۰) مقدار عامل آب‌وهوا را برای منطقه به ترتیب ۴/۳۴ گزارش کردند.

عامل رواناب با استفاده از معادله ۷ (جدول ۱) محاسبه شد. در معادله ۷، R ارتفاع رواناب سالانه (mm) با توجه به ضریب رواناب زیرحوضه و متوسط میزان بارش سالانه (۳۲۴/۶ میلی‌متر) محاسبه شد. برای محاسبه دبی ویژه اوج و ارتفاع رواناب حوضه مطالعاتی از روش استدلالی (Rational) استفاده شد (۱ و ۲۷). Q_p دبی ویژه پیک ($m^3.S^{-1}.km^{-2}$) است که با تقسیم Q_p حاصل از معادله استدلالی، تقسیم بر مساحت زیرحوضه محاسبه شد. مقدار عامل رواناب برای دو بخش زیرحوضه ۶/۱۹ و ۴/۱۲ به دست آمد. با استفاده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ مدل ارتفاعی رقومی منطقه تهیه و نقشهٔ شیب بر حسب درصد از آن استخراج شد. با توجه به شیب متوسط زیرحوضه (S) برحسب درصد و معادله ۸ (جدول ۱) عامل توپوگرافی زیرحوضه برابر ۶/۴ به دست آمد. برای محاسبه پوشش زمین و درصد اراضی عاری از پوشش گیاهی (P_b)، پارامترهای پوشش سطح خاک از جمله درصد تاج پوشش گونه‌های گیاهی، درصد لاشبرگ و درصد سنگ و سنگریزه به روش پلات گذاری (۱×۱ متر) طی فعالیت میدانی در ۳۷ نقطه مشخص شدند. با در نظر گرفتن عامل پوشش کل زیرحوضه و معادله ۶ (جدول ۱) عامل پوشش زیرحوضه برابر ۹/۵۴ به دست آمد.

عامل کاربری اراضی (معادله ۱۰، جدول ۱) برای کل زیرحوضه با درنظرگرفتن میانگین وزنی این عامل برای کاربری‌ها برابر ۱۰/۴۶ بود. امتیاز عامل سطحی خاک (S.S.F) با استفاده از عوامل هفتگانه BLM (۲۵) بر اساس مشاهدات میدانی در حوضه مورد مطالعه به دست آمدند. نمره عامل فرسایش به روش توصیه‌شده مدیریت اراضی آمریکا (BLM) با استفاده از معادله ۱۱ (جدول ۱)، نتایج فعالیت میدانی و پلات‌های نمونه برداری مشخص شد. مقدار وزنی عامل فرسایش برای هرکاربری محاسبه و مقدار کل آن برای زیرحوضه برابر ۱۶/۴۲ شد.

عامل فرسایش رودخانه‌ای با استفاده از معادله ۱۲ جدول ۱ تعیین شد. مقدار S.S.F.g برای معادن و بیرون‌زدگی سنگی، باغات و مراتع به ترتیب صفر، یک و دوازده بود مقدار عامل برای کل زیرحوضه ۲۰ منظور شد. پس از تعیین امتیاز ۹ عامل مدل MPSIAC و با برهم نهادن لایه‌ها (Overlay) جمع نمرات عوامل محاسبه و کلاس رسوب‌دهی با استفاده از جدول ۲ انجام شد (۲۵).

آنالیز حساسیت مدل MPSIAC

از روش لین و فریا (۱۴) برای آنالیز حساسیت مدل استفاده شد. بدین ترتیب که هر لایه از داده‌های ورودی (Pa) یک‌بار ۲۰ درصد افزایش و بار دیگر ۲۰ درصد کاهش یافت و اثر آنها بر درجه رسوب‌دهی (Qs) اندازه‌گیری شد. شاخص حساسیت (SI) برای ۱۴ داده ورودی و ۹ عامل مدل پسیاک به کمک معادله ۱ و ۱۳ (جدول ۱) محاسبه شدند.

$$SI = \frac{\frac{Q_s - Q_{sa}}{Q_{sa}}}{\frac{P - P_a}{P_a}} \qquad (۱۳)$$

نتایج و بحث

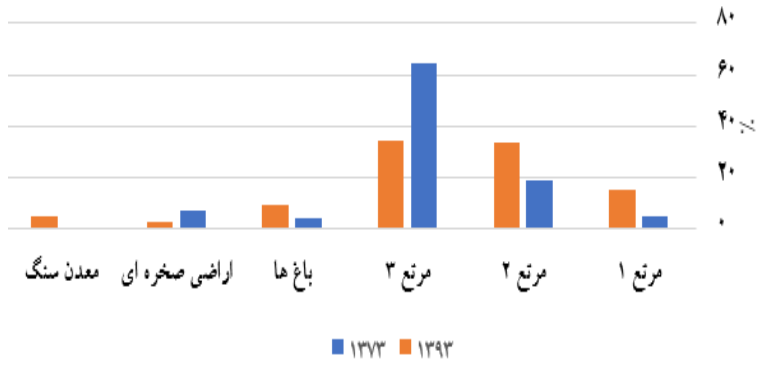
تغییرات کاربری سرزمین

نتایج طبقه‌بندی تصاویر ماهواره Landsat-8 گرفته‌شده در سال ۱۳۹۳ و مقایسه آن با واقعیت‌های زمینی نشان داد که درستی عمومی طبقه‌بندی ۸۱٪ و شاخص کاپا برابر ۷۷٪ بود. مقایسه کاربری سرزمین بین سالهای ۱۳۷۳ و سال ۱۳۹۳ در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

شکل ۴ تغییرات کاربری‌های ۲۰ ساله سرزمین (۱۳۹۳-۱۳۷۳) را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل کیفیت حدود ۶۴٪ از مراتع

جدول ۲. تعیین میزان تولید رسوب سالانه و کلاس رسوب‌دهی اراضی در روش MPSIAC

کلاس رسوب‌دهی	نمره رسوب‌دهی (R)	شدت رسوب‌دهی	تولید رسوب (Qs) ($m^3.km^{-2}.y^{-1}$)
V	>۱۰۰	خیلی زیاد	>۱۴۱۹
IV	۷۵–۱۰۰	زیاد	۴۷۶–۱۴۲۹
III	۵۰–۷۵	متوسط	۲۳۸–۴۷۶
II	۲۵–۵۰	کم	۹۵–۲۳۸
I	۰–۲۵	خیلی کم	<۹۵



شکل ۴. مقایسه درصد تغییرات کاربری سرزمین زیرحوضه گوهرباران در دوره ۲۰ ساله (۱۳۹۳-۱۳۷۳)

درجه ۱ کاهش و به مراتع درجه ۲ و ۳ تبدیل شده‌اند. در مقابل ۴۵٪ مراتع درجه ۲ به مرتع درجه ۱ تبدیل شده است. حدود ۳۹٪ باغ‌های سال ۱۳۷۳ کاسته شده و احتمالاً بدلیل کاهش منابع آب به مرتع درجه ۳ تبدیل شده‌اند. مساحت باغ‌ها طی ۲۰ سال دو برابر شده و احتمالاً مدیریت خاک بهبود یافته است. حدود ۶۳٪ صخره‌ها و برون‌زدگی‌های سنگی به عنوان معدن سنگ مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند.

برآورد فرسایش ویژه با استفاده از مدل MPSIAC

مقایسه نمرات عوامل نه‌گانه مدل MPSIAC نشان داد که عامل فرسایش رودخانه‌ای با نمره ۲۰ موثرترین و عامل خاک با نمره ۴/۸۸ کمترین تأثیر را بر تولید رسوب در زیرحوضه داشتند. سایر عوامل مانند وضعیت فعلی فرسایش، کاربری اراضی، پوشش زمین، زمین‌شناسی، توپوگرافی، رواناب و آب‌وهوا با نمرات ۱۶/۴۲، ۱۳/۴۲، ۹/۵۴، ۷/۳، ۶/۴، ۵/۴۸ و ۵ به ترتیب دومین تا هشتمین میزان تأثیر را نشان دادند. با جمع نمرات عوامل ۹ گانه و به کمک معادله ۲ نقشه رسوب‌دهی ویژه کل منطقه تهیه و بر اساس جدول ۲ کلاس‌های رسوب‌دهی زیرحوضه مشخص شدند (شکل ۵). مقدار متوسط تولید رسوب مقدار رسوب‌دهی ویژه برای کلاس‌های I تا IV با درنظرگرفتن وزن مساحت کلاس‌های مختلف محاسبه شدند (جدول ۳).

کلاس رسوب‌دهی متوسط (III) بیشترین وسعت (ha ۹۲/۳) و پس از آن به ترتیب کلاس‌های I, II , IV بیشترین تا کمترین وسعت را در زیرحوضه دارند. بیشترین و کمترین مقدار رسوب‌دهی ویژه در زیرحوضه به ترتیب $t.ha^{-1}.y^{-1}$ ۷/۳ (کلاس IV) و $t.ha^{-1}.y^{-1}$ ۱/۲۲ (کلاس I) بود. مقایسه نقشه‌های شدت رسوب‌دهی (شکل ۵) و کاربری سرزمین (شکل ۳) نشان می‌دهد که کمترین میزان تولید رسوب در باغات، اراضی

صخره‌ای و معادن و بیشترین رسوب‌دهی در مراتع درجه ۱ و ۲ و رسوب‌دهی متوسط در مراتع درجه ۳ رخ می‌دهد. درنظرگرفتن توپوگرافی، کاربری سرزمین و نقشه شدت رسوب‌دهی (شکل ۵) نشان داد گرچه پوشش مراتع درجه ۱ و ۲ نسبتاً مناسب بودند، ولی شدیدترین شیب‌ها نیز در این مناطق بودند. همچنین عامل خاک در اراضی با کاربری مرتع درجه ۱ و ۲ و بخش‌هایی از مراتع درجه ۳ نمرات زیادی داشتند. به کمک معادله ۱ مقدار متوسط تولید رسوب زیرحوضه محاسبه و برابر ۴۳۹/۴۴ $m^3.km^{-2}.y^{-1}$ بود (جدول ۳) که با احتساب متوسط چگالی ظاهری ۱/۳۶ $t.m^{-3}$، میزان رسوب‌دهی ویژه زیرحوضه برابر ۵/۹۷ $t.ha^{-1}.y^{-1}$ و مقدار کل رسوب‌دهی سالانه ۱۱۵۳/۴۴ تن بود.

تجزیه حساسیت مدل MPSIAC

نتایج حساسیت مدل نشان داد از میان ۹ عامل اصلی مدل، عامل فرسایش رودخانه‌ای و خاک به ترتیب بیشترین و کمترین حساسیت و سایر عوامل (وضعیت فعلی فرسایش، نحوه استفاده از اراضی، پوشش زمین، زمین‌شناسی، توپوگرافی، رواناب و آب‌وهوا) به ترتیب در رتبه دوم تا هشتم قرار داشتند.

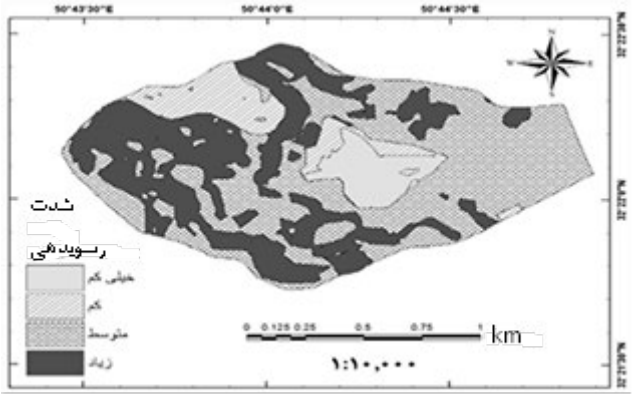
اندازه‌گیری رسوبات مخزن سد از طریق نقشه‌برداری

برای دستیابی به مقدار رسوب مشاهده‌ای، حجم رسوبات پشت سد اندازه‌گیری شد. با توجه به اینکه سد کاملاً از رسوب پر نشده بود، اطمینان حاصل شد که کلیه رسوبات در دوره پس از ساخت سد، پشت سد تجمع یافته‌اند. از تفاضل حجم رسوبات سال ۱۳۷۳ (۲۶) و حجم رسوبات اندازه‌گیری‌شده سال ۱۳۹۳ میزان رسوب‌گذاری در مخزن سد در طول ۲۰ سال مشخص شد (جدول ۴). گفتنی است که تولید رسوب در حوضه‌های آبخیز ممکن است با انقطاع همراه باشد و ترسیب در داخل زیرحوضه هم رخ داده باشد؛ ولی با توجه به پراکنش زیاد، زحمت زیاد اندازه‌گیری و مساحت کم آن، تل‌اندازی در داخل زیرحوضه لحاظ نشد.

جدول ۴ نشان می‌دهد که رسوب‌دهی ویژه در سه دوره زمانی ۶، ۲۰ و ۲۶ساله بسیار نزدیک بهم می‌باشد. اختلاف رسوب‌دهی ویژه ۲۶ساله و ۲۰ ساله برابر ۰/۰۲ $t.ha^{-1}.y^{-1}$ و اختلاف رسوب‌دهی ۶ ساله و ۲۰ ساله، ۰/۰۷ $t.ha^{-1}.y^{-1}$ است. این موضوع نشان داد که تغییرات مدیریت زیرحوضه تأثیر قابل توجهی بر رسوبدهی و فرسایش خاک نداشته است. نقشه‌های تغییرات کاربری سرزمین (شکل ۳) نشان دادند که مساحت باغات از ۴/۴ درصد در سال ۱۳۷۳ به ۹/۳ درصد در سال ۱۳۹۳ افزایش یافته‌اند و مراتع درجه ۱ و ۲ در سال ۱۳۷۳ برابر ۲۳/۸ درصد بوده‌اند و در سال ۱۳۹۳ به ۴۹ درصد افزایش یافته‌اند. این موارد نشان می‌دهند که مدیریت نسبتاً مناسبی در منطقه اعمال شده است.

مقایسه نتایج اندازه‌گیری رسوب و برآورد رسوب ناشی از کاربرد مدل MPSIAC

نتایج اندازه‌گیری رسوب (جدول ۴) نشان داد که میزان رسوب‌دهی ویژه در زیرحوضه گهرباران در یک دوره نسبتاً طولانی ۲۶ساله (۱۳۹۳-۱۳۶۷) برابر ۱۱/۷۸ $t.ha^{-1}.y^{-1}$ است؛ درحالی‌که مقدار رسوب‌دهی برآورد شده با استفاده از مدل MPSIAC برابر ۵/۹۷ $t.ha^{-1}.y^{-1}$ بود. با توجه به اینکه در مدل MPSIAC از مقدار رسوب‌دهی Qs و معادله ۱ برای برآورد فرسایش سالانه استفاده می‌شود، به طور مشخص میزان فرسایش سالانه اندازه‌گیری‌شده با استفاده از مدل MPSIAC تقریباً نصف مقدار فرسایشی است که با استفاده از رسوبات اندازه‌گیری‌شده در پشت سد برآورد شد. همان‌طور که گفته شد میزان رسوب‌گذاری در داخل زیرحوضه در اندازه‌گیری رسوب لحاظ نشد. در غیر اینصورت مقدار اختلاف برآورد فرسایش و رسوب مدل MPSIAC و رسوب اندازه‌گیری‌شده در زیرحوضه بیشتر می‌شد. بنابراین ضرایب و عوامل لحاظ‌شده در این مدل به احتمال زیاد با شرایط زیرحوضه گوهرباران در ایران سازگاری و مطابقت کامل ندارد و نیاز به کالیبراسیون عوامل مؤثر بر مدل ضروریست.



شکل ۵. کلاس‌های شدت رسوب‌دهی در زیرحوضه گهرباران بر اساس مدل MPSIAC

جدول ۳. ویژگی‌های کلاس‌های رسوب‌دهی و رسوب‌دهی کل زیرحوضه گهرباران

کلاس رسوب‌دهی	مساحت (ha)	متوسط تولید رسوب (Qs) ($m^3.km^{-2}.y^{-1}$)	رسوب‌دهی ویژه ($t.ha^{-1}.y^{-1}$)
IV	۶۸/۹	۵۳۷/۴۴	۷/۳
III	۹۲/۳	۴۱۳/۵۳	۵/۶۲
II	۱۹/۳	۱۶۲/۶۳	۲/۲۱
I	۱۲/۵	۸۹/۶۴	۱/۲۲
کل زیرحوضه (II)	۱۹۳/۰	۴۳۹/۴۴	۵/۹۷

جدول ۴. نتایج اندازه‌گیری رسوبات تجمع‌یافته در پشت بند گهرباران و رسوب ویژه در دوره‌های زمانی مختلف

سال اندازه‌گیری رسوب	دوره زمانی	مقدار	واحد
۱۳۹۳	۲۶ ساله (۱۳۶۷–۱۳۹۳)	۴۳۴۵۴/۲۸	m^3
۱۳۷۳	۶ ساله (۱۳۶۷–۱۳۷۳)	۱۰۰۷۵/۰۰	m^3
۱۳۹۳	۲۰ ساله (۱۳۷۳–۱۳۹۳)	۳۳۳۷۹/۲۸	m^3
۱۳۹۳	۲۶ ساله (۱۳۶۷–۱۳۷۳)	۵۹۰۹۷/۸۲*	Tone
رسوب‌دهی ویژه ۱۳۹۳	۲۶ ساله (۱۳۶۷–۱۳۹۳)	۱۱/۷۸	$t.ha^{-1}.y^{-1}$
رسوب‌دهی ویژه ۱۳۷۳	۶ ساله (۱۳۶۷–۱۳۷۳)	۱۱/۸۳	$t.ha^{-1}.y^{-1}$
رسوب‌دهی ویژه ۱۳۹۳	۲۰ ساله (۱۳۷۳–۱۳۹۳)	۱۱/۷۶	$t.ha^{-1}.y^{-1}$

داوری و همکاران (۷) نیز گزارش کردند که امتیازات سازندهای زمین‌شناسی مدل MPSIAC پاسخگوی نیازها در ایران نیست. پاره‌کار و همکاران (۲۳) پس از بررسی مدل MPSIAC برای پیش‌بینی بار رسوب در ایران نتیجه‌گیری کردند که در حوضه‌های با رسوب سالانه بیشتر از ۲/۲ تن در هکتار مدل باید با دقت بیشتری به کار برده شود؛ زیرا مدل در این وضعیت به قدری حساس است که ممکن است بیش از ۵۰ درصد خطا رخ دهد. داوری و همکاران (۷) در حوضه آبخیز

نوژیان خرّم‌آباد، محمدیها و همکاران (۱۹) در حوضه آبخیز ایوانکی و ارجمندی (۳) در حوضه آبخیز رکعت (دهدز) و زارعی و همکاران (۳۰) در حوضه کسیلان از مدل تجربی MPSIAC استفاده کردند و برخلاف نتایج ما گزارش کردند که مقدار رسوب برآوردی مدل MPSIAC ۲۰۰ تا بیش از ۳۰۰ درصد از مقادیر اندازه‌گیری‌شده رسوب بیشتر بوده است. این موارد ضرورت کالیبراسیون مدل MPSIAC را در حوضه‌های آبخیز مناطق مختلف اقلیمی ایران نشان می‌دهند.

نتیجه‌گیری کلی

با توجه به اینکه برای مدیریت در حوضه‌های آبخیز اندازه‌گیری فرسایش و رسوب پارسل‌ها نقش عمده‌ای ایفا می‌کند، ضرویست مدل‌های برآورد فرسایش از قابلیت و کارایی مناسبی برخوردار باشند. مدل تجربی MPSIAC سال‌هاست در ایران و سایر کشورها به کار می‌رود. بعضی پژوهشگران نتایج کاربرد این مدل را موفقیت‌آمیز (۶) و تعدادی (۱۳، ۱۶ و ۲۳) خطای مدل را زیاد گزارش کرده‌اند. اندازه‌گیری رسوبات در دریاچه سدها امکان آزمون کارایی مدل‌ها مانند مدل MPSIAC را فراهم می‌کند. در این پژوهش برآورد رسوب مدل تقریباً ۵۰٪ رسوبات اندازه‌گیری بود؛ ازاین‌رو کالیبراسیون مدل MPSIAC برای استفاده در شرایط اقلیمی مختلف کشور ضروریست. آزمون حساسیت مدل MPSIAC نشان داد که دقت زیادی برای اندازه‌گیری درصد سیلت، دبی پیک ویژه، فرم آبراهه‌ها و فرسایش رودخانه‌ای نیاز است. همچنین تغییر کاربری سرزمین در یک دوره ۲۶ساله تأثیر معنی‌داری بر فرسایش منطقه نداشته است.

منابع مورد استفاده

References

1. Alizadeh, A. 1989. Principal of Applied Hydrology, Astane Ghods Razavi Press, Mashhad.
2. Andualem, T. G., G. A. Hewa, B. R. Myers, S. Peters and J. Biland. 2023. Erosion and sediment transport modelling, A systematic review. *Land* 12(1395): 1-20
3. Arjmandi, H. 2006. Recognition of the sources of sediment yield and estimation of the volume of transferred sediments using remote sensing and MPSIAC model (case study: Rakat sub-basin). Master thesis, Shahid Chamran University, Iran.
4. Bayat, R. 2010. Comparing MPS IAC and EPM models for estimation of erosion and sediment yield of Upper Zayanderod catchment (Tange Gazi). Master thesis, Shahrekord University, Iran.
5. Borrelli, P., D. A. Robinson, L. R. Fleischer, E. Lugato, C. Ballabio, C. Alewell, K. Meusburger, S. Modugno, B. Schütt, V. Ferro, V. Bagarello, K. Van Oost, L. Montanarella and P. Panagos. 2013. An assessment of the global impact of 21st century, land use change on soil erosion. *Nature Communication* 8(1): 1-13.
6. Casabella-Gonzalez, M. J., L. Borselli and J. V. Garcia-Meza. 2023. Improved MPSIAC model for soil erosion rate assessment in semiarid zones. *Journal of Arid Environments* 212: 104946
7. Davari, M., H. A. Bahrami and J. Ghodossi. 2005. Study the results of estimated sediments using modified PSIAC (case study: Nojian watershed). *Pajouhesh va Sazandegi* 18: 88-103 (in Farsi).
8. De Vente, J., J. Poesen, J. Verstrataeten, G. Govers, G. Vanmaercke, M. Van Rompaey. 2013. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? *Earth-Science Reviews* 127: 16-29.
9. Gee, G. W. and Bauder J. W. 1986. Particle size analysis. PP. 385-411. *In:* Klute A. (Eds), Method of Soil Analysis, Part 1. 2nd Ed., Physical and Mineralogical Methods, Soil Science Society of America, Madison, USA.
10. Ghanavati Behbahani, Z. 2016. Estimation of soil erosion and sediment yield of Gohabaran basin (Chaharmahal va Bakhtiari province) using MPSIAC model. Master thesis, Shahrekord University, Iran.
11. Johnson, C. W. and K. A. Gebhardt. 1982. Prediction of sediment yield from sagebrush rangelands. *In*: Proceeding of workshop on estimation erosion and sediment yield on rangelands, Tucson, Arizona, USA.
12. Kavyan, A. and A. Safari. 2013. Selection of the suitable model for sediment load estimation using statistical methods. Case study: Watershed of Babolrood. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences* 13:111-130.
13. Khaledian, H. and A. Amini. 2021. Evaluation the efficiency of MPSIAC model for sediment load estimation in Zaribar watershed. *Environment and Engineering* 7(4):567-578 (in farsi).

14. Lane, J. W. and V. A. Ferria. 1982. Sensitivity analysis. PP. 113-158. *In:* W. G. Knisel and A.Vol. (Eds.). CREAM, A field scale model for chemical, run off and erosion from Agricultural Management System, Vol. A, Model Documentation. USDA, Conservative Research Report , Washington, USA.
15. Li, L., Y. Wang and C. Liu. 2014. Effects of land use changes on soil erosion in a fast-developing area. *International Journal of Environmental Science Technology* 11: 1549-1562.
16. Madanchi, P., M. Arabkhedri and M. Habibnejad Roshan. 2019. Determination of best sediment estimation model in semi-arid rangelands by using small reservoirs dams' sedimentation (Case study: Daremorid Watershed, Kermanshah, Iran). *Journal of Watershed Management Research*10(18): 233-240.
17. Mahmoodabadi, M. 2011. Sediment yield estimation using a semi-quatitative model and GIS and remote sensing data. *International Agrophysics* 25(3): 241-247
18. Mohammadi, P., A. Ahmadi, B. Fezizadeh, A. A. Jafarzadeh and M. Rahmati. 2023. Utilizing the conventional, object-oriented and pixel-based techniques to estimate erosion and sediment yield by MPSIAC model. *Journal of Soil Science Society of Iran* 1(1): 113-124.
19. Mohammadiha, S., H. R. Payrovan, R. Mosavi Harami, S. V. Faiznia and R. Bayat. 2011. Study of soil erosion and sediment yield in Ivanaki watershed using FSM and MPSIAC model and sample point data. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Research* 27:1-22
20. Mosavi, F., A. Jalalian and H. Samadi Brojeni. 1997. Evaluation the efficiency of sedimentation in reservoirs of small soil dams in Chaharmahal va Bakhtiari province. *Journal of Water and Soil Science* 1: 13-28 (in Farsi)
21. Ndomba, P. M. 2013. Validation of PSIAC model for sediment yields estimation in ungauged catchments of Tanzania. *International Journal of Geoscience* 4(7): 1101-1115.
22. Noori, H., M. Siadatmosavi and B. Majidi. 2016. Assessment of sediment yield using RS and GIS at two sub-basins of Dez Watershed, Iran. *International Journal of Soil and Water Conservation Research* 4:190-206
23. Parekar, A., N. Behnam and M. Shokrabadi. 2013. An investigation survey on MPSIAC model to predict sediment yield in Iran. *Research Journal of Environmental Science* 5(5):342-349.
24. PSIAC.1968. Factors affecting sediment yield and selection and evaluation of measures for the reduction of erosion and sediment yield. Pacific Southwest Inter-Agency Committee (PSIAC) report of the water management subcommittee, 27 pp.
25. Refahi, H. G. 2009. Water Erosion and Coservation. Tehran University Press, Iran.
26. Samadi Brojeni, H. . Evaluation of sedimentation in reservoirs of small dams in Chaharmahal va Bakhtiari province. Master thesis, Agriculture Faculty, Sharekord University, Iran (in Farsi).
27. Samadi Brojeni, H and R. Fattahi. 2011.Mapping the flooding of Chaharmahal va Bakhtiari province's Roads. Ministri of Road and Urban Construction, Vice chaiman of Training, research and technology. Transportation Reseach Centre, Water Research Centre of Shahrekord University (in Farsi).
28. Walkley, A. L. and Black A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromic acid. *Soil Analysis, Soil Science* 37(3): 29-38
29. Zarei, A. R. and M. J. Amiri. 2017. Evaluation of soil losses and sediment yield using modified PSIAC model. *Iran Agriculture Research* 36(1): 111-116
30. Zarei, M., T. Panagopoulos and L. Loures. 2017. Simulating the impacts of future land use changes on soil erosion in the Kasilan Watershed, Iran. *Land Use Policy* 67: 558-572.