

Evaluation of the Sensitivity of the Empirical Model of MPSIAC Parameters on Sediment Yield in the Basin

Mehdi Hayatzadeh^{1*}, Vahid Moosavi², Esmaeil Soheili³

1- Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Ardakan University, Ardakan, Iran.

2- Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- Department of Agricultural Engineering, Faculty of Basic Sciences, University of Darab, Shiraz university, Iran.

*Corresponding Author: mhayatzadeh@ardakan.ac.ir

(Received: 03 December 2023

Revised: 24 January 2024

Accepted: 06 February 2024)

Extended Abstract

Introduction: The study of erosion and sedimentation is a crucial aspect and an integral part of watershed studies in a basin. The methods employed to prevent erosion and sedimentation play a significant role in basin management planning. However, due to the lack of accurate statistics on erosion and sediment amounts, it becomes necessary to utilize estimation models for assessing erosion and sedimentation. These models are often region-specific and may have a wide range of uncertainty in different areas. One notable benefit of modeling, regardless of its type, is its ability to analyze natural processes within the basin. On the other hand, understanding erosion and sedimentation processes in a region can be an effective step in managing, planning, and prioritizing available resources. In this research, the aim was to determine the sensitivity of the MPSIAC model to the relationships among its parameters. Additionally, the goal was to assess the model's sensitivity to changes in these parameters and their impact on sedimentation. By identifying the influential ground and atmospheric parameters, it becomes possible to prioritize their effect on water sedimentation in the region.

Materials and methods: Through the sensitivity analysis of the model, it is possible to identify the flexibility of the model to the changes of its various parameters. It is also possible to determine the relationships between model variables and prioritize the parameters affecting the model output. Sensitivity analysis can be used in the calibration stage, in such a way that results are accurate, and time and cost are saved. In this study, to analyze the sensitivity of the MPSIAC model, first, the nine parameters of the model were examined. Then, according to the arrangement of different parameters in the structure of this model, the parameters were numbered from X1 to X9. Then, the score range of each parameter was entered in its calculation table according to the modified model of PSIAC. In this step, the average of each parameter was calculated according to its upper and lower limits. To achieve this, the nine parameters of the model were standardized, and the sedimentation rate was estimated by varying each parameter within its lower and upper limits while keeping the other parameter(s) fixed at their averages. With each change, the sediment discharge was calculated.

Results and Discussion: In the analysis of the results, the slope of the curves of the standardized parameters relative to the dependent variable (specific sediment) is considered. So that, any part of the curve that has more slope changes means that the model is more sensitive to minor changes in that parameter in that interval. In this study, the results of this sensitivity analysis reveal that the slope factor and runoff volume have a considerable influence on sediment yield. For slopes up to approximately 15%, the slope parameter has a relatively smaller impact compared to other parameters. However, as the slope value increases, its effect becomes more pronounced, indicating that high slopes (greater than 15%) have the greatest impact on sedimentation. The runoff factor exhibits a sudden increase in sensitivity at higher flow rates.

Conclusion: In examining the effect of different parameters on the model performance, the parameters that had the largest slope of changes can be considered as the most effective parameters in sedimentation of the basin. In other words, the model demonstrates high sensitivity to slight changes in specific peak discharge values above 20 m³/s/km². Therefore, implementing integrated (biomechanical) management measures to control slope steepness and reduce runoff volume can be an effective strategy for mitigating sedimentation. Therefore, based on the results, the role of land factors is very important, such as slope and then runoff, in the erodibility and sediment production in basins. Of course, it should be noted that climatic parameters directly and indirectly affect the amount of peak flood discharge and should not be neglected for their importance and influence in flooding and subsequently the erodibility of the watershed.

Keywords: Sensitivity Analysis, MPSIAC Model, Sediment Yield, Water Erosion

Citation: Hayatzadeh, M., Moosavi, V., & Soheili, E. (2024). Evaluation of the Sensitivity of the Empirical Model of MPSIAC Parameters on Sediment Yield in the Basin. *Integrated Watershed Management*, 4(1), 76-90. doi: 10.22034/iwm.2024.2016898.1117

Copyrights:

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





ارزیابی میزان حساسیت پارامترهای مدل تجربی MPSIAC بر رسوبدهی حوزه آبخیز

مهدی حیات زاده*^۱، وحید موسوی^۲، اسماعیل سهیلی^۳

۱- گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران

۲- گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، ایران

*نویسنده مسئول: mhayatzadeh@ardakan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲

چکیده مبسوط

مقدمه: مطالعه فرسایش و رسوب یکی از پارامترهای اصلی و جزء تفکیک‌ناپذیر مطالعات آبخیزداری یک حوزه آبخیز به شمار می‌رود. روش‌های جلوگیری از پدیده فرسایش و رسوب، پیکره برنامه‌ریزی مدیریت حوزه آبخیز را تشکیل می‌دهد. از طرفی عدم وجود آمار دقیق از مقدار فرسایش و رسوب، استفاده از مدل‌های برآورد فرسایش و رسوب را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. چنین مدل‌هایی اغلب منطقه‌ای بوده و در سایر مناطق می‌تواند بازه عدم قطعیت زیادی داشته باشد. یکی از دستاوردهای مهم مدل‌سازی فارغ از نوع آن، کمک به تحلیل فرایندهای طبیعی در حوزه آبخیز است. از طرفی آگاهی از فرایندهای فرسایش و رسوب در یک منطقه می‌تواند گام مؤثری در مدیریت، برنامه‌ریزی و اولویت‌بندی منابع موجود باشد. به‌طور کلی در این تحقیق سعی شده تا با آنالیز حساسیت مدل تجربی پسیاک اصلاح‌شده (مدل برآورد فرسایش و رسوب) نسبت به پارامترهای به‌کاررفته در آن، حساسیت مدل نسبت به تغییرات پارامترهای آن‌ها شناسایی و تأثیر آن‌ها بر رسوبدهی مشخص شود. از طرفی با مشخص شدن پارامترهای زمینی و جوی تأثیرگذار می‌توان به اولویت‌بندی میزان اثرگذاری آن‌ها بر میزان رسوبدهی آبی منطقه اقدام نمود.

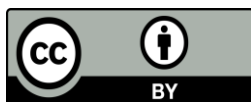
مواد و روش‌ها: آنالیز حساسیت روشی است که به وسیله آن، اثر تغییر ضرایب پارامترهای موجود در مدل‌ها را بر خروجی مدل می‌توان بررسی نمود و نیز روابط بین متغیرهای مدل با یکدیگر را تعیین و پارامترهای مؤثر بر خروجی مدل را اولویت‌بندی کرد. آنالیز حساسیت را می‌توان در مرحله واسنجی مورد استفاده قرار داد، به‌گونه‌ای که موجب دقت نتایج و صرفه‌جویی در وقت و هزینه گردد. بدین منظور با استفاده از استاندارد نمودن پارامترهای ۹ گانه مدل، میزان رسوبدهی از طریق تغییر مقادیر هر یک از پارامترها بین حد پایین و بالای آن برآورد گردید و پارامتر دیگر (یا پارامترهای دیگر) در میانگین خود ثابت و با هر تغییر، دبی رسوب محاسبه گردید.

نتایج و بحث: در تحلیل نتایج، میزان شیب منحنی‌های استاندارد شده پارامترهای مختلف نسبت به متغیر وابسته (رسوب ویژه) در نظر گرفته می‌شود؛ به‌طوری‌که هر قسمت از منحنی که تغییرات شیب بیشتری داشته باشد، حاکی از آن است که مدل نسبت به تغییرات جزئی آن پارامتر در آن بازه حساس‌تر است. نتایج حاصل از این آنالیز حساسیت حاکی از تأثیرگذاری بالای فاکتور شیب و حجم رواناب در رسوبدهی است؛ به‌طوری‌که تأثیر مقادیر پارامتر شیب تا حدود شیب ۱۵ درصد در خروجی مدل از دیگر پارامترها کمتر ماست، از طرفی با بالا رفتن مقدار شیب وضعیت تغییر کرده به‌طوری‌که می‌توان گفت شیب‌های بالا (بیش از ۱۵ درصد)، بیشترین تأثیر را در میزان رسوب تولیدی حوزه آبخیز دارند. تأثیر عامل رواناب نیز به‌یک‌باره در مقادیر دبی‌های بالا شیب تندی به خود گرفته است.

نتیجه‌گیری: پس از تفسیر و مطالعه گراف‌های حاصل از تغییرات رسوب ویژه و پارامترهای استاندارد شده مؤثر بر مقدار خروجی، پارامترهایی که گراف‌هایی با بیشترین مقدار شیب را نشان دادند؛ به‌عنوان مؤثرترین پارامترهای تأثیرگذار بر رسوبدهی حوزه آبخیز انتخاب شدند. به‌عبارت‌دیگر، مدل نسبت به تغییرات جزئی در میزان دبی اوج ویژه در مقادیر بالاتر از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه در کیلومتر مربع حساسیت بالایی را از خود نشان می‌دهد. لذا توجه به اقدامات مدیریتی در دامنه‌ها به‌صورت تلفیقی (بیومکانیکی) در جهت تعدیل شیب دامنه و کاهش حجم رواناب می‌تواند گامی مؤثر در جهت کاهش رسوبدهی حوزه آبخیز به شمار آید. این اقدام با توجه به ماهیت فیزیکی هر حوزه آبخیز می‌تواند در دامنه‌های منتهی به سرشاخه‌ها صورت پذیرد. لذا در تفسیر نتایج تحقیق حاضر می‌توان نقش فاکتورهای زمینی مثل شیب و به دنبال آن رواناب را در فرسایش‌پذیری و تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز را بسیار بااهمیت دانست. البته لازم به ذکر است که پارامترهای اقلیمی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در میزان دبی اوج سیل تأثیرگذار بوده و نباید از اهمیت و تأثیرگذاری آن‌ها در سیل‌خیزی و به دنبال آن فرسایش‌پذیری حوزه آبخیز غافل شد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، مدل پسیاک اصلاح‌شده، رسوبدهی، فرسایش آبی

استناد: حیات‌زاده، م، موسوی، و؛ و سهیلی، ا. (۱۴۰۲). ارزیابی میزان حساسیت پارامترهای مدل تجربی MPSIAC بر رسوبدهی حوزه آبخیز. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز (۱)، ۴(۱)، ۷۶-۹۰.



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

مقدمه

نسبت به سایر روش‌های تجربی از عوامل بیشتری که در فرسایش خاک و رسوب‌زایی مؤثر هستند، استفاده نموده است. از معایب این روش می‌توان به لزوم ارزیابی صحیح هر یک از فاکتورها و اولویت‌بندی آنها از نظر مؤثر بودن در تولید رسوب اشاره کرد که این مهم نیز با به‌کارگیری تجربه علمی و عملی فراوان در زمینه شناخت عوامل مختلف مؤثر در فرسایش خاک و رسوب‌زایی، قابل مرتفع کردن است و در صورت به کار بردن امتیاز صحیح هر فاکتور، این مشکل نیز برطرف خواهد شد (Shojaei et al., 2017).

در زمینه روابط تجربی برآورد فرسایش و رسوب، فعالیت‌های تحقیقی زیادی صورت گرفته است. شرکت عمران و منابع آب آمریکا در ایران طی سال‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، روش پسیاک را برای مطالعه فرسایش و رسوب در حوزه آبخیز دز به کار برد و به دلیل دقت نسبتاً خوب این روش در مقایسه با سایر روش‌ها، این مدل در اکثر حوزه‌های آبخیز کشور مورد استفاده قرار گرفت. Hasanlo (۲۰۰۳) با بررسی نقش عوامل ژئومورفولوژیکی در فرسایش آبی بخشی از حوزه آبخیز زنجان‌رود با استفاده از GIS نشان داد که با استفاده از مدل MPSIAC و سیستم اطلاعات جغرافیایی می‌توان میزان فرسایش و رسوب را برآورد نمود و فرمول MPSIAC را برای مناطق مختلف واسنجی نمود، به طوری که رابطه به‌دست آمده همبستگی خوبی با نتایج مشاهداتی داشت. Khoda Rahimi (۲۰۰۵) با بررسی کارایی روش‌های EPM و MPSIAC در برآورد فرسایش و رسوب حوزه آبخیز خارستان فارس، به برتری مدل MPSIAC نسبت به مدل EPM در این حوزه آبخیز دست‌یافت. Nourani و Mohsenzadeh (۲۰۱۷) در تحقیقی اقدام به برآورد رسوب ماهانه ایستگاه‌های حوضه آبی‌چای با استفاده از مدل پسیاک اصلاح‌شده و ریزمقیاس‌نمایی آبشاری نمودند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد بین بار رسوب برآورد شده با

هیچ پدیده خاکی در مقیاس جهانی مخرب‌تر از فرسایش ناشی از باد و آب نیست. پیامدهای فرسایش خاک توسط برخی از پژوهشگران به حدی خطرناک قلمداد شده است که شکوفایی و نابودی تمدن‌های پیشین را به این پدیده نسبت داده‌اند. امروزه نیز عقیده بر این است که فرسایش خاک توسط آب یکی از مسائل مهم و اصلی بازدارنده برای تحقق توسعه اقتصادی و اجتماعی به دلیل تخریب منابع زیست‌محیطی افزون بر عامل بازدارنده در دستیابی به امنیت غذایی در جهان است (Barker et al., 2006).

درواقع فرسایش در مقابل خاک‌سازی^۱ قرار دارد. تا زمانی که میزان این دو باهم برابر است، تعادل برقرار است؛ ولی وقتی فرسایش بیشتر شد، خطرناک می‌شود (Refahi., 2003). اصولاً برآورد نزدیک به واقعیت مقدار فرسایش و رسوب در یک ناحیه موضوع مهمی است که همواره چگونگی برآورد آن مورد توجه پژوهش‌گران بوده است؛ بنابراین مدل‌های مختلف به‌مرور تجدید شده و ضرایب و عوامل آنها به‌وسیله تحقیقات مختلف بررسی و اصلاح شده‌اند. به همین علت مدل‌های بسیاری توسعه یافته‌اند که هر یک تعدادی از عوامل مؤثر فرسایش و رسوب را در بر دارد. یکی از این روابط، مدل پسیاک^۲ است که در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشور کاربرد دارد (Hasanlo., 2003). مدل پسیاک در سال ۱۹۶۸ میلادی توسط کمیته آب آمریکا ارائه شد. این مدل در سال ۱۹۸۲ توسط دانشمندان آمریکایی مورد تجدیدنظر قرار گرفت و برای هر یک از عوامل ۹ گانه، ضرایبی در نظر گرفته شد که مدل پسیاک اصلاح‌شده^۳ نام‌گذاری شد (Zabihi Silabi & Khaledi., 2021). در این روش بیشترین و مهم‌ترین عوامل مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در محاسبات وارد می‌گردد. برای محاسبه مقدار رسوب تولیدی، نیاز به ضریب خاص هیدرولوژیکی منطقه یا رسوب‌زایی نیست. این روش

1. Pedogenes
2. PSIAC
3. MPSIAC

دابی چین مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه با استفاده از سنجش‌ازدور و GIS و با توجه به پارامترهای بارندگی، خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی، مدل اجرا شد. نتایج نشان داد که فرسایش‌پذیری خاک وابسته به نوع خاک و پوشش گیاهی است.

Khaledian و Niknami (۲۰۱۷) در تحقیقی به تعیین نقش بهینه‌سازی کاربری اراضی بر کاهش پتانسیل فرسایش و رسوب با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی در حوضه چهل‌گزی سنندج پرداختند. نتایج تحلیل حساسیت سناریوها در این تحقیق نشان داد که در صورت بهینه‌سازی کاربری اراضی، پتانسیل فرسایش در وضعیت فعلی ۸۵ درصد افزایش می‌یابد؛ ولی در وضعیت اعمال مدیریت اراضی، ۱۷ درصد و در وضعیت استاندارد، ۳۲ درصد کاهش می‌یابد. نتایج تحلیل حساسیت در هر سه گزینه نشان داد که تغییر در مساحت اراضی مرتعی بیشترین تأثیر را در تغییرات پتانسیل فرسایش حوضه دارد. Memarian و Dehghan (۲۰۱۹) با استفاده از روش تصادفی مونت کارلو اقدام به برآورد عدم قطعیت و تحلیل حساسیت معادله منحنی سنج‌رسوب در ایستگاه هیدرومتری زشک نمودند. نتایج تحلیل حساسیت معادله سنج‌رسوب در رژیم جریان پرآب، کم‌آب و نرمال نشان‌دهنده تأثیرپذیری بالای مدل سنج‌رسوب نسبت به تغییرات ضریب a است، درحالی‌که این تأثیرپذیری نسبت به تغییرات ضریب b اندک است؛ ولی در رژیم جریان حداکثر معادله سنج‌رسوب تأثیرپذیری منظم‌تر غیرخطی و بالایی را نسبت به تغییرات ضریب b نشان می‌دهد. معادله سنج‌رسوب عدم قطعیت بسیار بالایی را در رژیم جریان حداقل (کمتر از ۰/۳ مترمکعب بر ثانیه) نشان داد به طوری‌که در این نوع از جریان تقریباً هیچ‌یک از داده‌های مشاهداتی رسوب در محدوده تخمین باند عدم قطعیت مدل قرار نمی‌گیرند.

لذا به‌منظور استفاده از مدل‌ها و روش‌های مختلف برآورد فرسایش و رسوب به‌ویژه مدل‌ها و روش‌های

مدل پسیاک اصلاح‌شده و ریزمقیاس شده با مدل آبشاری، با نتایج مشاهداتی و ثبت‌شده به ترتیب همبستگی ۰/۷۲ و ۰/۶۵ وجود دارد. از طرفی بین عوامل نه‌گانه مدل پسیاک اصلاح‌شده، دو عامل فرسایش رودخانه‌ای و فرسایش سطحی بیشترین تأثیرگذاری را دارند. MotamediRad و همکاران (۲۰۲۳) به‌منظور برآورد میزان فرسایش و رسوب در حوزه آبریز کال اسماعیل دره از مدل‌های RUSLE و پسیاک اصلاح‌شده استفاده نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها، ضمن تأیید کارایی هر دو مدل مورد استفاده، شدت رسوب‌دهی و میزان فرسایش در منطقه مورد مطالعه را در بازه خیلی کم نشان داد.

فرآیند آنالیز حساسیت مدل‌های تجربی که اطلاعات مفیدی در رابطه با خصوصیات عوامل به‌کاررفته و میزان وابستگی خروجی مدل به این عوامل ارائه می‌نماید، مرحله مهمی در واسنجی و بهینه‌سازی مدل‌ها برای شرایط مختلف به شمار می‌رود (Jamali, 2001). پژوهش‌هایی توسط محققان مختلفی در این زمینه صورت گرفته است. به‌عنوان مثال، Chi و همکاران (۲۰۰۵) اقدام به تحلیل حساسیت دو مدل هیدرولوژیکی (SEAD و GURUH) نمودند و به این نتیجه رسیدند که این کار واسنجی مدل را به‌مراتب ساده‌تر و دقیق‌تر کرده و کاربرد آن را در حوزه‌های آبخیز دیگر بیشتر نموده است. Bahremand و همکاران (۲۰۰۷) در استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa در حوزه آبخیزی در اسلواکی اقدام به تحلیل حساسیت پارامترهای آن نمودند و دریافتند که برخی از پارامترها در نتایج مدل از حساسیت به‌مراتب بیشتری برخوردارند. Foglia و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند که تحلیل حساسیت مدل بارش- رواناب TOPKAPI و ارزیابی پارامترهای آن باعث افزایش چشم‌گیر کارایی مدل و نیز سادگی و دقت واسنجی آن می‌گردد. Zhang و همکاران (۲۰۱۳)، حساسیت پارامترهای فرسایش‌پذیری خاک را در منطقه کوهستانی تونگبای

تجربی، علاوه بر کسب اطلاعات دقیق از مشخصات و ویژگی‌های حوزه‌های آبخیز مورد مطالعه، شناخت شرایط و فاکتورهای دخیل در مدل‌های مورد نظر و تأثیر هر یک از آن‌ها در خروجی مدل نیز لازم است (Avarand *et al.*, 2006)؛ بنابراین با توجه به هدف مطالعات و امکانات موجود، مناسب‌ترین روش یا مدل که بیشترین تطبیق را با منطقه دارد، انتخاب می‌گردد. با توجه به کاربرد زیاد مدل MPIAC در سال‌های اخیر در برآورد فرسایش در کشور (به‌ویژه در بخش اجرا) اقدام به شناسایی حساسیت پارامترهای مختلف آن گردید. از آنجاکه اهمیت مدل‌سازی در فرسایش به‌جز مقادیر کمی آن، تحلیل فرایندهای آن است این تحقیق جهت آگاهی از فرایند فرسایش و رسوب و شناسایی مؤثرترین فاکتورها صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق، مدل تجربی MPSIAC که کارایی آن در تحقیق‌های متعددی در نقاط مختلف کشور ایران به اثبات رسیده است (Daneshafraz *et al.*, 2017) مورد ارزیابی و آنالیز حساسیت قرار گرفته است (Ebrahimi., 2019 و Borooshke *et al.*, 2018).

مدل MPSIAC

مدل پیشنهادی اولیه برای تعیین هر فاکتور، حدود تغییراتی را مشخص کرده است که تا حدودی انتخابی بوده و متناسب با فاکتور رسوب‌دهی نیاز به قضاوت کارشناسی دارد. طی تحقیق Johnson و Gebhardt (۱۹۸۲)، فاکتورهای نه‌گانه این روش به‌صورت معادلات عددی درآمد. به‌عنوان مثال در مناطقی که به علت شرایط آب و هوایی و یا سایر عوامل خاک‌زایی مناسب، قشر سطحی زمین از خاک پوشیده شده باشد، دو عامل پوشش زمین و استفاده از زمین تأثیر قابل توجهی در فرسایش خاک و تولید رسوب دارند و به همین جهت است که نمرات آن‌ها از ۱۰- تا ۱۰+ متغیر است. علامت منفی این دو عامل، نشان‌دهنده تأثیر منفی آن‌ها در تولید رسوب است. به‌عبارت‌دیگر،

این دو عامل باعث کاهش تولید رسوب ناشی از ۵ عامل اول می‌شوند. البته در مدل اصلاح‌شده MPSIAC، امتیازهای منفی حذف گردیده است و مجموعه امتیازات بدون علامت منفی، درجه رسوب‌دهی را نشان می‌دهد. در بخش‌هایی از کشور که دارای بارندگی سالانه بیش از ۳۰۰ میلی‌متر هستند، این عامل اقلیمی به دلیل کشت و کار غیراصولی در اراضی کشاورزی و بخصوص اراضی دیم و همچنین چرای مفرط و بی‌رویه مراتع، بیشترین تأثیر را در فرسایش خاک و تولید رسوب دارا است (Ebrahimi., 2019).

بهره‌برداری غلط و غیراصولی از زمین مانند چرای مفرط و عملیات بیش‌ازحد کشاورزی در روی زمین زراعی (استفاده بیش‌ازحد و خارج از استعداد زمین)، نقش عوامل پستی‌وبلندی، وضعیت و فرسایش در سطح حوزه آبخیز و فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب (به ترتیب عوامل ردیف‌های ۵، ۸ و ۹) بیشتر نمایان می‌گردد و به همین دلیل هم تغییرات امتیاز این سه عامل از عوامل زمین‌شناسی سطحی، خاک، آب‌وهوا، رواناب (به ترتیب عوامل ردیف‌های ۱ تا ۴) بیشتر است. برای استفاده از مدل MPSIAC در برآورد وضعیت فرسایش و تولید رسوب در هر یک از واحدهای کاری و نهایتاً واحد هیدرولوژیک، ۹ عامل مؤثر در فرسایش و رسوب‌زایی برحسب شدت و ضعف نقش آن‌ها در فرسایش خاک و تولید رسوب باید مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار گیرند. نمره نهایی حاصل از مجموع ۹ عامل گفته‌شده در هر یک از واحدهای کاری، بیان‌گر شدت فرسایش خاک و میزان رسوب‌زایی در آن واحد است. در بررسی هر منطقه باید مشخص نمود که از ۹ عامل مربوطه، چه عواملی بیشترین تأثیر را در تولید رسوب دارا هستند و ترتیب عوامل نه‌گانه چگونه است. این عمل در دقت بررسی و ارزیابی آن تأثیر شایان توجهی داشته و باید توجه خاصی به آن معطوف داشت (Shojaei *et al.*, 2017). پس از به دست آوردن جمع امتیازات ۹ گانه (R) با فرمول پیشنهادی مدل (رابطه

(۲)، عوامل ۹ گانه پسیاک و جدول طبقه‌بندی شدت فرسایش پسیاک را نشان می‌دهد.

فرایند آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت به منظور تجزیه و تحلیل یک رابطه یا در حقیقت یک مدل خاص است. با تجزیه و تحلیل روابط یا مدل‌ها می‌توان تأثیر هر یک از پارامترها یا متغیرها را در خروجی مدل ارزیابی کرد (Talebi et al., 2010). با آنالیز حساسیت می‌توان به رابطه یا روابط بین پارامترها و فاکتورهایی که در خروجی مدل تأثیرگذار هستند، پی برد.

(۱)، مقدار رسوب‌دهی برحسب مترمکعب در کیلومتر مربع معلوم می‌گردد.

$$Q_s = 38.77e^{0.035R} \quad (1)$$

البته برای شرایط ایران فرمول Johnson & Gebhardt (۱۹۸۲) که بر اساس تجزیه و تحلیل داده‌های منطقه‌ای به دست آمده بود، پیشنهاد شده است (Khaledian & Niknami., 2017). مقدار رسوب‌دهی در این رابطه برحسب تن در هکتار به صورت رابطه (۲) تغییر یافته است:

$$Q_s = 0.253e^{0.036R} \quad (2)$$

در این معادله، Q_s مقدار رسوب‌دهی حوضه برحسب تن بر هکتار، e عدد نپرین و R جمع عوامل ۹ گانه مدل MPSIAC یا درجه رسوب‌دهی است. جدول‌های (۱) و

جدول ۱- پارامترهای نه‌گانه مدل پسیاک (اصلاح‌شده)

Table 1- The nine parameters of the MPSIAC model

شماره	عامل مؤثر در فرسایش (اصلاح شده)	ضریب اصلاح‌شده (MPSIC)	شرح و تفسیر
1	زمین‌شناسی سطحی با سنگ‌شناسی	$X1 = Y1$	در این عامل، تغییری داده نشده است
2	خاک	$X2 = 16.67K$	$K =$ عامل فرسایش‌پذیری خاک در فرمول USLE است. این ضریب را می‌توان از روی منحنی نیز به دست آورد که در این صورت، پنج عامل خاک شامل درصد سیلت، شن ریز، درصد شن، درصد مواد آلی، ساختمان خاک و قابلیت هدایت آب اندازه‌گیری می‌شود (این موارد بیشتر در مورد خاک‌های کشاورزی قابل استفاده است و از نظر آبخیزداری، همان فرمول اولیه قابل قبول است).
3	آب هوا	$X3 = 0.2 P2$	$P2 =$ بارندگی در مدت ۶ ساعت با دوره بازگشت ۲ ساله
4	رواناب (جریان‌های سطحی)	$X4 = 0.006R + 10Qp$	$Qp =$ دبی اوج ویژه سالانه (مترمکعب بر ثانیه بر کیلومتر مربع) $R =$ حجم رواناب سالانه (مترمکعب)
5	پستی‌وبلندی	$X5 = 0.33S$	$S =$ شیب متوسط حوزه آبخیز برحسب درصد
6	پوشش سطح زمین	$X6 = 0.2 Pb$	$Pb =$ درصد اراضی لخت و فاقد پوشش حوزه آبخیز (درصد)
7	استفاده از زمین	$X7 = 20 - 0.2Pc$	$Pc =$ درصد تاج پوشش
8	وضعیت سطح خاک و فرسایش	$X8 = 0.25 SSF$	$SSF =$ وضعیت سطح خاک و فرسایش به روش BLM، در این ضریب هفت عامل دخالت دادند که عبارت‌اند از فرسایش سطحی، لاشبرگ سطحی، پوشش گیاهی، آثار تخریب خاک و گیاه، فرسایش شیاری و ابعاد آن، جریان‌های سطحی و رسوبات آن، اشکال فرسایش خندقی و درصد آن
9	فرسایش رودخانه‌ای	$X9 = 1.67 SSFg$	$SSFg =$ فرسایش خندقی و به‌ویژه خندق‌های ایجادشده در مناطق کم شیب و مجاور رودخانه

خروجی مدل مشخص کرده و پارامترهایی را که حساس‌تر بوده و نیاز به توجه بیشتری دارند، نمایان می‌سازد. در این روش فرض بر این است که برآوردها، در روش تجربی مذکور صحیح بوده و تنها حساسیت فاکتورها در قالب کلی مدل سنجیده می‌شود (Dastorani & Hayatzadeh, 2010).

تأثیر هر یک از پارامترها در یک مدل شامل تأثیر آن‌ها به صورت منفرد و همچنین تأثیر جمعی آن‌ها در خروجی است. در حالت دوم میزان حساسیت مدل به تغییرات پارامترها، بسته به کنش و واکنش آن‌ها نسبت به هم متفاوت است. این روش تأثیر تغییرات هر یک از پارامترها به تنهایی و در ارتباط باهم را در تغییرات

جدول ۲- طبقه‌بندی شدت رسوبدهی مدل پسیاک

Table 2- Classification of sedimentation intensity of PSIAC model

تولید رسوب		مجموع ۹ عامل مؤثر (درجه رسوبدهی)	طبقه‌بندی کیفی فرسایش	کلاس فرسایش
Ton/Km ²	M ³ /Km ²			
> 2500	> 1450	زیاد	خیلی زیاد	1
1500-2500	450-1450	75-100	زیاد	2
500-1500	250-450	50-75	متوسط	3
200-500	95-250	50-250	کم	4
< 200	< 95	0-25	ناچیز (خیلی کم)	5

هم‌خوانی داشته باشند. مثلاً در مورد فاکتور خاک مقدار x_2 وابسته به مقادیر عامل فرسایش‌پذیری خاک (K) است که این مقادیر در بازه معقولی باید در نظر گرفته شود. مقادیر لحاظ شده برای متغیرهای مستقل که متغیرهای وابسته (X) را رقم می‌زند، برای مدل MPSIAC در جدول (۳) مشاهده می‌شود.

تعیین مقادیر ورودی پارامترها

آنالیز حساسیت روی داده‌های غیرحقیقی صورت می‌پذیرد. مقادیر به هر پارامتر، شامل بازه‌ای از آن پارامتر (حد پایین و بالا و محدوده بین این دو حد) می‌شود که جزء ساختاری مدل MPSIAC است. مقادیر ورودی این پارامترها باید با اصل و ذات رابطه

جدول ۳- تعیین مقادیر ورودی پارامترها برای مدل MPSIAC

Table 3- Determining the input values of the parameters for the MPSIAC model

میانگین	حد پایین	حد بالا	پارامترها (متغیر وابسته)
5	0	10	زمین‌شناسی سطحی (X1)
8.34	0	16.67	خاک (X2)
5	0	10	آب‌وهوا (X3)
125	0	250	رواناب (X4)
16.5	0	33	پستی‌وبلندی (X5)
10	0	20	پوشش زمین (X6)
10	0	20	استفاده از زمین (X7)
12.28	0	25	وضعیت فعلی فرسایش در سطح حوزه (X8)
11.8	0	25.05	فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب (X9)
میانگین	حد پایین	حد بالا	پارامترها (متغیر مستقل)
0.5	0	1	عامل فرسایش‌پذیری خاک (K)
25	0	50	بارش 6 ساعته با دوره بازگشت 2 سال (p2)
25	0	50	ارتفاع رواناب سالانه (R)
12.5	0	25	دبی پیک ویژه سالانه (Qp)
50	0	100	شیب متوسط حوزه (S)

پارامترها (متغیر وابسته)	حد بالا	حد پایین	میانگین
درصد زمین لخت (pb)	100	0	50
درصد تاج پوشش (Pc)	100	0	50
SSF	100	0	50
SSSg	15	0	7.5

آنالیز حساسیت

با توجه به جدول (۳) و حد پایین و بالا و میانگین هر پارامتر، میزان رسوب‌دهی بدین گونه محاسبه می‌شود که یک پارامتر بین حد پایین و بالای خود تغییر می‌نماید، در صورتی که پارامتر (یا پارامترهای) دیگر در میانگین خود ثابت باقی می‌مانند و با هر تغییر، دبی رسوب محاسبه می‌گردد (Kousari *et al.*, 2010). بدین ترتیب می‌توان اثرات تغییر یک پارامتر بر روی خروجی (دبی رسوب) را به دست آورد. به‌عنوان مثال نحوه محاسبات به این شکل است که پارامتر زمین‌شناسی سطحی در حد بالا و پایین خود به‌صورت منظم تغییر می‌کند، در حالی که ۸ پارامتر دیگر در میانگین خود ثابت مانده و اثر این تغییرات بر دبی رسوب ثبت می‌شود. از طرف دیگر در فاز بعدی محاسبات، هر یک از پارامترها در حدود خود تغییر و سایر پارامترها در میانگین خود ثابت می‌مانند. سپس لازم است که مقادیر استاندارد شده پارامترها محاسبه شود. دلیل این کار این است که فاکتورها و پارامترهای مستقل به‌کاررفته در این روش، ذاتاً با یکدیگر چه از لحاظ اندازه و چه از لحاظ واحد تفاوت دارند (Kousari *et al.*, 2010) مثلاً فاکتور دبی پیک ویژه برحسب مترمکعب در کیلومتر مربع بوده، در حالی که میزان تاج پوشش برحسب درصد است و برای اینکه بتوان روابط بین آن‌ها را بررسی و روی نمودار به نمایش گذاشت، باید مقادیر هر ۹ پارامتر را استاندارد نمود. استاندارد کردن مقادیر متغیرهای وابسته ضمن اینکه باعث هم‌وزنی یا در حقیقت هم‌خوانی بهتر آن‌ها برای به نمایش درآوردن روی نمودار می‌شود، از خطای احتمالی (غیرواقعی شدن مقادیر محور y) که ایجاد خواهد شد، جلوگیری می‌کند.

استاندارد کردن پارامترها

از آنجاکه وزن هر یک از پارامترهای مستقل موردنیاز برای برآورد دبی رسوب و همچنین اندازه و مقدار پارامترها با یکدیگر متفاوت هستند، لذا نمایش هم‌زمان تغییرات دبی رسوب در برابر تغییرات پارامترهای ورودی روی یک محور مختصات را مشکل می‌سازد. بدین منظور، پارامترها (بین دو حد پایین و بالا) را باید استاندارد و بدون بعد نمود. ابتدا باید داده‌ها نرمال‌سازی گردد که از رابطه (۳) برای این کار استفاده شده است.

$$n = \frac{(X_i - \bar{X})}{S_{td}} \quad (3)$$

در این رابطه، X_i متغیر نام پارامتر ورودی، \bar{X} و Std، به ترتیب میانگین و انحراف معیار ورودی موردنظر هستند.

برای استاندارد کردن پارامترها، قدر مطلق فاصله غیرتجمعی در محور y ها یعنی همان مقادیر دبی رسوب ($|QS_2 - QS_1|$) برآورد می‌گردد و مقادیر قدر مطلق فاصله غیرتجمعی در محور x ها یعنی پارامترهای استاندارد شده محاسبه می‌گردد. در نهایت با تقسیم مقادیر محور y ها یعنی همان مقادیر دبی رسوب ($|QS_2 - QS_1|$) بر مقادیر محور x ها تغییرات شیب در محور y ها حاصل می‌گردد. برای هر یک از پارامترها نیز به همین ترتیب عمل شده است.

محاسبه تغییرات پارامترها

محاسبه تغییرات پارامترها برای نمایش هم‌زمان تغییرات دبی رسوب در برابر تغییرات هر پارامتر است. در این روش، محور y ها مربوط به تغییرات رسوب ویژه و محور x ها، مقادیر مربوط به پارامترهای استاندارد شده هستند. نمودار حاصل برای مقایسه کلی اثر تغییرات

رسوب ویژه در برابر تغییرات پارامترهای ورودی مناسب است، به طوری که هر منحنی یا هر قسمت از هر منحنی که شیب بیشتری داشته باشد، تأثیر بیشتری بر خروجی دارد.

نتایج

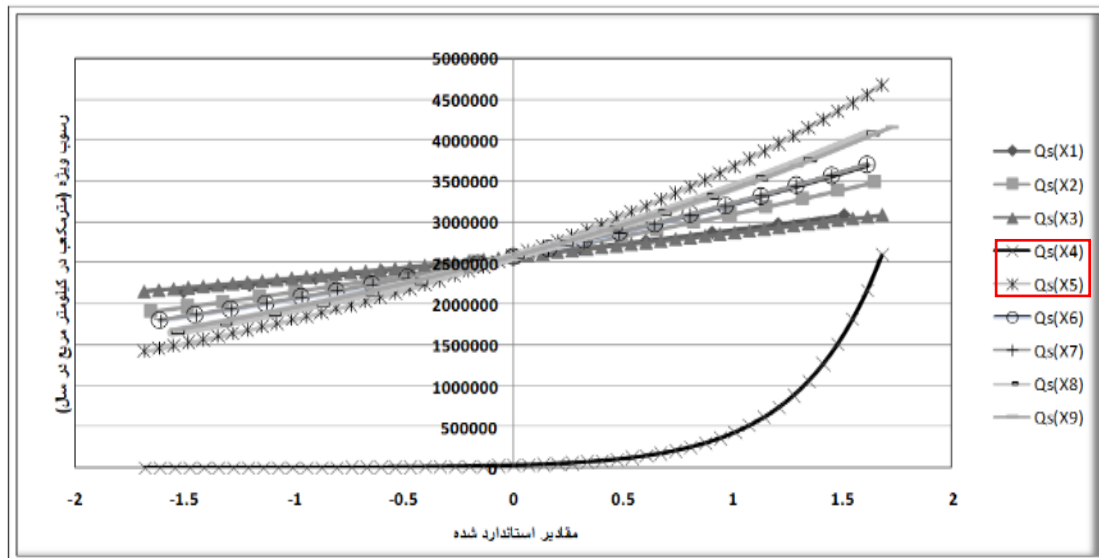
همان طور که اشاره شد، در مرحله اول میزان رسوب ویژه (QS) به ازای تغییرات هر یک از پارامترهای ۹ گانه و ثابت ماندن دیگر پارامترها (۸ پارامتر) در میزان متوسط خود، محاسبه گردیده است. ضمناً در همین مرحله از کار، پارامترهای متغیر به صورت گام به گام و طبق رابطه (۳) استاندارد شدند. جدول (۴) بخشی از محاسبات را نشان می‌دهد. شکل (۱) حساسیت مدل را نسبت به تغییرات پارامترهای نه گانه نشان می‌دهد. با بررسی و مشاهده شکل (۱) که تغییرات شیب خط پارامترهای نه گانه را نشان می‌دهد می‌توان دریافت که هر چند تأثیر تغییرات عامل شیب (البته در مقادیر زیاد) در خروجی مدل از دیگر فاکتورها بالاتر است، اما فاکتور رواناب (X4) نیز از این امر مستثنی نیست. شکل (۱)

جهت مقایسه نسبی تغییرات شیب پارامترهای مختلف کاربرد دارد و از طریق تغییر هر پارامتر بین حد بالا و پایین و ثابت ماندن سایر پارامترها در میانگین خود از طریق رابطه (۲) محاسبه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود شیب خط پارامتر شیب (X5) و مقادیر بالای پارامتر رواناب (X4) در مقایسه با سایر پارامترها بیشتر است. مطابق شکل (۱)، تأثیر تغییرات پارامتر رواناب برای مقادیر بالا، در خروجی مدل سیر صعودی تندشونده با فرکانس بالایی دارد که این امر ناشی از تأثیرگذاری بسیار زیاد تغییرات پارامتر دبی پیک ویژه (QP) در خروجی مدل است. در این مطالعه برای درک بهتر این موضوع (تأثیر تغییرات جزئی دبی پیک در مقادیر رسوب برآوردی حوزه آبخیز از این مدل)، سعی شد تا این مهم به صورت شماتیک نمایش داده شود. بدین منظور بازه تغییرات فاکتور دبی پیک نسبت به مرحله قبلی به میزان کمی تغییر داده شد و از ۰-۲۵ به ۰-۳۰ افزایش داده شد. شکل (۲) حساسیت مدل را نسبت به تغییرات فاکتور رواناب که به عنوان یک متغیر وابسته به مقادیر دبی پیک است، نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقادیر رسوب ویژه به ازای تغییر پارامترهای X1, X8, X9

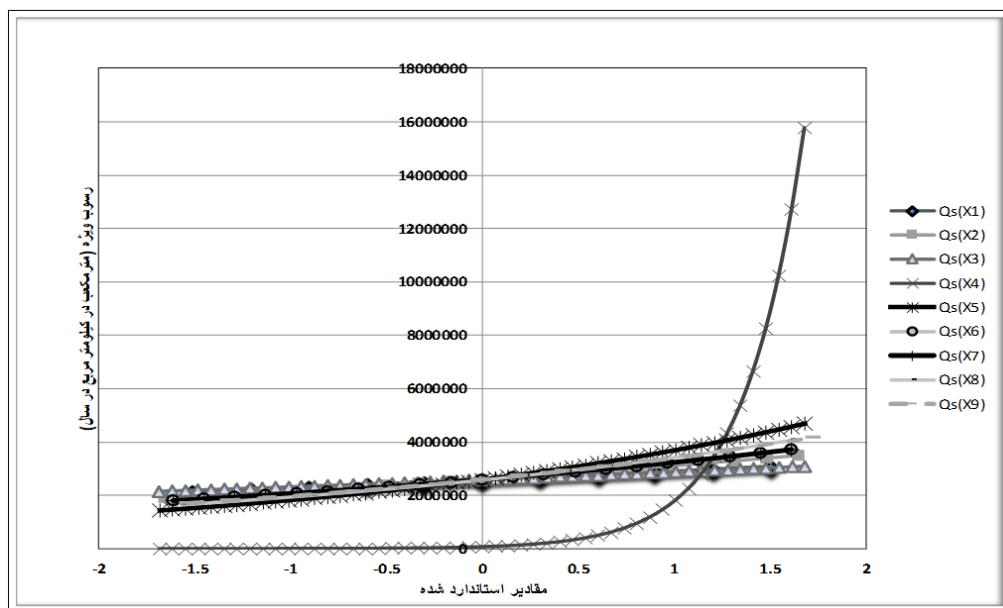
Table 4- Values of specific sediment for changing parameters X1, X8, X9

QS (X9)	Standard (x9)	QS (X8)	Standard (x8)	QS (X1)	Standard (x1)
1691180.924	-1.538634941	1662091.677	-1.558798646	2160305.548	-1.507556723
1795962.02	-1.32090352	1770160.682	-1.336717428	2239485.018	-1.206045378
1907235.076	-1.103172099	1885256.321	-1.114636209	2321566.571	-0.904534034
2025402.317	-0.885440678	2007835.466	-0.892554991	2406656.576	-0.603022689
2150890.887	-0.667709257	2138384.691	-0.670473773	2494865.298	-0.301511345
2284154.397	-0.449977836	2277422.213	-0.448392555	2586307.043	0
2425674.561	-0.232246415	2425499.937	-0.226311336	2681100.31	0.301511345
2575962.941	-0.014514993	2583205.658	-0.004230118	2779367.937	0.603022689
2735562.791	0.203216428	2751165.386	0.2178511	2881237.266	0.904534034
2905051.025	0.420947849	2930045.835	0.439932319	2986840.308	1.206045378
3085040.302	0.63867927	3120557.071	0.662013537	3096313.911	1.507556723
3276181.239	0.856410691	3323455.325	0.884094755
3479164.763	1.074142112	3539545.999	1.106175973
3694724.608	1.291873533	3769686.863	1.328257192
4166738.326	1.727336375	4087704.393	1.613790187



شکل ۱ - آنالیز حساسیت متغیرهای مدل MPSIAC

Figure 1 - Sensitivity analysis of MPSIAC model variables



شکل ۲ - آنالیز حساسیت متغیرهای مدل MPSIAC نسبت به تغییر فاکتور رواناب

Figure 2- Sensitivity analysis of MPSIAC model variables to the change of runoff factor

شیب یک آبراهه در بازه‌های مختلف آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. منحنی که در یک بازه مشخص شیب بیشتری داشته باشد، تأثیر آن بر رسوب ویژه بیشتر است. این تأثیر می‌تواند در جهت افزایش یا کاهش رسوب ویژه باشد. مثلاً شیب منحنی تغییرات رسوب

برای مقایسه بهتر اولویت تأثیر هر پارامتر بر خروجی رابطه، باید تغییرات شیب هر یک از این منحنی‌ها، در قسمت‌های مشابه با یکدیگر مقایسه گردند یعنی به ازای دامنه مشخصی از محور Xها، تغییرات محور Yها (برای هر منحنی) محاسبه گردد. دقیقاً مانند حالتی که

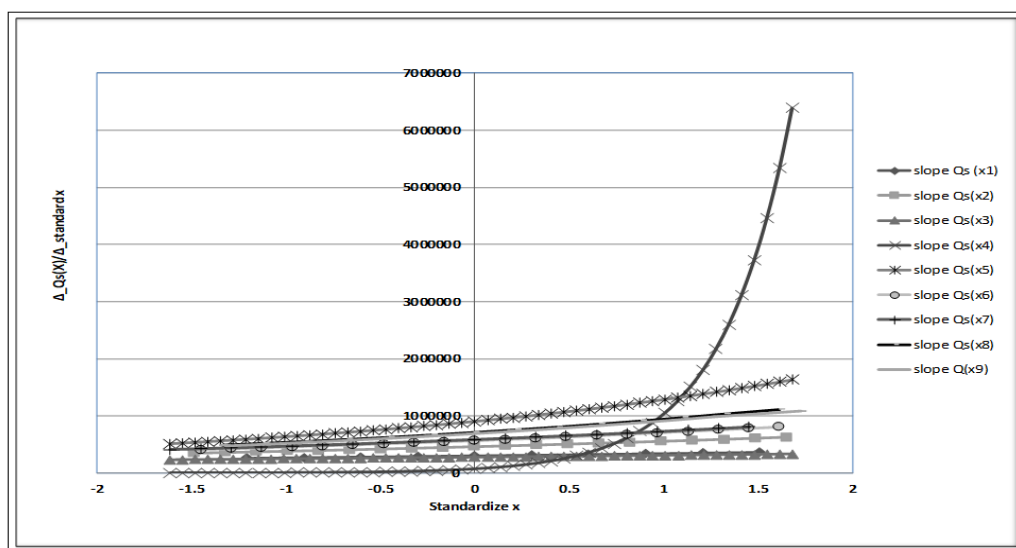
همان‌طور که در شکل (۳) قابل‌مشاهده است شیب جزئی منحنی‌های شیب (X4)، رواناب (X5) از همه بیشتر است درحالی‌که شیب منحنی فرسایش رودخانه‌ای (X9) کمتر از سایر پارامترها است. نتایج حاصله از این آنالیز حساسیت حاکی از آن است که عامل رواناب (X4) شرایط نسبتاً متفاوتی با سایر پارامترها دارد (شکل ۳). به‌عبارت‌دیگر مدل MPSIAC نسبت به تغییرات جزئی در میزان دبی اوج در مقادیر بالاتر از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه در کیلومتر مربع حساسیت بالایی را از خود نشان می‌دهد.

ویژه در برابر متغیر پستی‌وبلندی (شیب)، ابتدا به‌صورت خطی و سپس به‌صورت صعودی تندشونده است. پس برای مقایسه شیب‌های جزئی، باید از قدر مطلق شیب‌های جزئی خطوط استفاده گردد تا اولویت تأثیر بر رسوب ویژه چه به‌صورت کاهشی و چه به‌صورت افزایشی در بازه موردنظر مورد ارزیابی قرار گیرد. برای درک بهتر موضوع تغییرات جزئی شیب منحنی هر یک از فاکتورها، به‌عنوان نمونه محاسبات صورت گرفته برای فاکتور زمین‌شناسی سطحی در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵- اندازه‌گیری شیب‌های جزئی در منحنی فاکتور زمین‌شناسی سطحی

Table 5- Measurement of partial slopes in the surface geological factor curve

$\Delta_Qs(X1)/\Delta_standard$	$\Delta_standard$	$\Delta_Qs(X1)$	QS (X1)	Standardize x1
0	0	0	2160306	-1.507556723
262608.591	0.301511345	79179.47	2239485	-1.206045378
272233.715	0.301511345	82081.55	2321567	-0.904534034
282211.6189	0.301511345	85090	2406657	-0.603022689
292555.2327	0.301511345	88208.72	2494865	-0.301511345
303277.9604	0.301511345	91441.75	2586307	0
314393.6972	0.301511345	94793.27	2681100	0.301511345
325916.8478	0.301511345	98267.63	2779368	0.603022689
337862.3446	0.301511345	101869.3	2881237	0.904534034
350245.6675	0.301511345	105603	2986840	1.206045378
363082.8637	0.301511345	109473.6	3096314	1.507556723



شکل ۳- تغییرات شیب پارامترهای نه‌گانه مدل MPSIAC

Figure 3- Slope changes of the nine parameters of the MPSIAC model

بحث

با انجام تحلیل حساسیت مدل پسیاک اصلاح‌شده به‌منظور مدیریت صحیح دامنه از نظر اولویت عملیات اصلاحی و دامنه مجاز پارامترها و اثر آن‌ها بر پتانسیل فرسایش، نتایج نشان داد که در بین پارامترهای به‌کاررفته در مدل، پارامتر پستی‌وبلندی و یا به عبارتی فاکتور شیب، جزء بالاترین تغییرات به همراه فاکتور رواناب است (شکل ۳). لذا به‌طور کلی می‌توان اذعان نمود که مدل مذکور به تغییرات این دو پارامتر در محدوده تغییرات مجاز آن‌ها از نظر ساختاری مدل، حساس است. طبق یافته‌های این تحقیق، تأثیر مقادیر پارامتر شیب تا حدود شیب ۱۵ درصد در خروجی مدل از دیگر پارامترها کمتر است. از طرفی با بالا رفتن مقدار شیب، وضعیت تغییر کرده است؛ به‌طوری‌که می‌توان گفت شیب‌های بالا (بیش از ۱۶ درصد)، بیشترین تأثیر را در میزان رسوب تولیدی حوزه آبخیز دارند.

از آن‌جاکه بارش و رواناب از اجزاء اصلی تولید رسوب در یک حوزه آبخیز هستند و با توجه به ساختار مدل MPSIAC می‌توان به این نتیجه رسید که هرگاه در یک حوزه آبخیز شرایط نسبتاً ایده‌آلی حکم‌فرما باشد، یعنی مقادیر دبی، شیب، رواناب و... در حد کم یا بهینه خود باشند؛ عامل بارش ۶ ساعته با دوره بازگشت ۲ سال بیشترین تأثیر را در رسوب تولیدی حوزه دارا است. در هر حال تغییرات فاکتور بارش در یک بازه مشخص دارای شیب کمی است (شکل ۳). به‌عبارت‌دیگر، حساسیت مدل به ازای تغییرات جزئی در مقادیر بارش ۶ ساعته پایین‌تر از سایر پارامترها است. عامل زمین‌شناسی سطحی نیز شرایط مشابه عامل اقلیم (بارش) را دارا است. نتایج حاصله از این آنالیز حساسیت حاکی از آن است که عامل رواناب (X4)، شرایط نسبتاً متفاوتی با سایر پارامترها دارد. با توجه به ساختار مدل مشاهده می‌شود که برای عامل دبی اوج ویژه، ضریب بالایی در نظر گرفته شده است (ضریب ۱۰) که نشان از اهمیت بالای این فاکتور در

میزان رسوب خروجی حوزه آبخیز است؛ بنابراین عامل رواناب که خود وابسته به فاکتورهای رواناب سطحی و مهم‌تر از آن فاکتور دبی اوج ویژه است، به‌یک‌باره در مقادیر دبی‌های بالاتر شیب تندی به خود گرفته است (شکل ۳). تحقیقاتی در همین راستا در تعیین مؤثرترین عوامل بر فرسایش آبی در راستای نتایج تحقیق حاضر می‌باشند. در همین راستا Ghaderi و همکاران (۲۰۱۵) در آنالیز حساسیت مدل‌های تجربی برآورد سرعت جریان، نقش بالای فاکتورهای فیزیکی آبراهه را در میزان سرعت جریان گزارش نمودند. همچنین Kamali Maskoni و همکاران (۲۰۱۶) در شناسایی عوامل مؤثر بر فرسایش شیاری پارامترهای طول شیب و میزان شیب دامنه را به‌عنوان مؤثرترین عوامل در توسعه شیارها معرفی نمودند. با توجه به حساسیت فرایند تولید رسوب به تغییرات فیزیکی سطح دامنه و به دنبال آن میزان رواناب، می‌توان نتیجه گرفت که تأثیر عملیات مدیریتی در عرصه نسبت به شرایط آب و هوایی، زمین‌شناسی و سایر پارامترها کم‌اهمیت‌تر نمی‌باشد همان‌طور که برخی از محققین به نتیجه مشابهی با این تحقیق دست یافتند. Maghsoudi و همکاران (۲۰۱۲)، Nikpour و همکاران (۲۰۱۷) و Khaledian و Niknami (۲۰۱۷).

نتیجه‌گیری کلی

از آن‌جاکه کارایی مدل MPSIAC در ایران به‌ویژه در حوزه‌های آبخیز وسیع به اثبات رسیده است (Nourani & Mohsenzadeh, 2017) در تحقیق حاضر پارامترهای ساختاری این مدل بررسی و مورد آنالیز حساسیت قرار گرفته است. مدل MPSIAC نسبت به تغییرات جزئی در میزان دبی اوج در مقادیر بالاتر از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه در کیلومترمربع حساسیت بالایی را از خود نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی حساسیت مدل به تغییرات پارامترهای آن می‌توان نتیجه‌گیری کرد که انجام عملیات اصلاحی در

غافل شد؛ بنابراین با توجه به اهمیت موضوع فرسایش از جنبه‌های مختلف اقتصادی و اجتماعی و همچنین در مقیاس‌های مختلف محلی، منطقه‌ای و ملی، آگاهی از این فرایند پیچیده حائز اهمیت است. لذا با توجه به شناخت پارامترهای حساس در مدل MPSIAC در برآورد میزان فرسایش، به‌ویژه در مناطق فاقد آمار پیشنهاد می‌گردد تا در زمینه امتیازدهی به پارامترهای پستی‌وبلندی، رواناب و میزان فرسایش فعلی حوزه آبخیز بیش از سایر موارد، دقت لازم به عمل آید.

دامنه‌های بالادست مثل ایجاد انواع بانکت‌ها و کنترتورفاروها در صورت فراهم بودن شرایط لازم به همراه اقدامات بیولوژیک، از اهمیت ویژه‌ای در زمینه مدیریت و کنترل فرسایش برخوردار است. لذا در تفسیر نتایج تحقیق حاضر می‌توان نقش فاکتورهای زمینی مثل شیب و به دنبال آن رواناب در فرسایش‌پذیری و تولید رسوب در حوزه‌های آبخیز را بسیار بااهمیت دانست. البته لازم به ذکر است که پارامترهای اقلیمی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در میزان دبی اوج سیل تأثیرگذار بوده و نباید از اهمیت و تأثیرگذاری آن‌ها در سیل‌خیزی و به دنبال آن فرسایش‌پذیری حوزه آبخیز

References

- Avarand, R., Torabi Poodeh, H. & Farzaei, A. (2006). Analysis of sensitivity of HEC-1 model to input parameters, *7th International Seminar on River Engineering*. (In Persian)
- Barker, D. W., Sawyer, J. E., Al-Kaisi, M. M. & Lundvall, J. P. (2006). Assessment of the amino sugar-nitrogen test on Iowa soils: II. Field correlation and calibration. *Agronomy journal*, 98(5), 1352. <https://doi.org/10.2134/agronj2006.0034>.
- Borooshke, E., & Sokouti, R. (2018). Comparative efficacy of some empirical models to sediment yield in small catchments. *J. Agri. Forest*, 64 (2), 163-173. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.64.2.12>
- Bahreman, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y. B., Poórová, J., Velcická, L. & Kuniková, E. (2007). WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods by in Margecany–Hornad watershed, Slovakia. *Water Resour. Manag*, 21, 1373–1391. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9089-0>.
- Chi, M. Ho., Roger, A. Cropp and Roger D. Braddock. (2005). On the Sensitivity Analysis of Two Hydrologic Models. *Congress on Modelling and Simulation (CMS)*.
- Daneshafraz, R., Rahmati, M. & Akbari Moghanji, Q. (2017). Soil erosion and sediment mapping in Aidoghmouth watershed using MPSIAC model and GIS and RS technologies. *J. Environ. Resour. Re*, 5(1), 35-49. <https://doi.org/10.22069/ijerr.2017.9991.1119>.
- Dastorani, M. T. & Hayatzadeh, M. (2010). Reviews the Most Important Factors in the Maximum Flood Discharge by Sensitivity Analysis Empirical. *Arid Biom Scientific and Research Journal*. 1(1), 1-12. <https://doi.org/20.1001.1.2008790.1389.1.1.1.5>
- Ebrahimi, N. (2019). Estimation of erosion and sediment production with MPSIAC model (Case Study: Banrahan Basin, Ilam Province), *Proc. 14th Int. Conf. Watershed Management Science and Engineering of Iran with the focus on watershed management and comprehensive soil and water management, Urmiah, Iran* (In Persian).
- Ghaderi, M., Dastorani, M.T. & Saber, K. (2015). Sensitivity analysis of two flow velocity formulae and evaluation of important factors effecting of flow velocity. *Watershed Management Researches* (Pajouhesh-Va-Sazandegi), 28(107), 73-83. <https://doi.org/10.22092/WMEJ.2015.107087>.
- Hasanlo, M. (2003). Determining the intensity of soil erosion and sedimentation in the Taham Chay watershed using the PSIAC model and GIS. *Geomatic conference*.
- Jamali, A. (2001). Investigating the sensitivity of a number of experimental hydrological methods for estimating the peak flood discharge with respect to the watershed level in some watersheds of Iran. *Master thesis of Tarbiat Modares University*. (In Persian)
- Johnson, C.W. & Gebhardt, K.A. (1982). Predicting sediment yields from

- saga brush rangeland, Proceedings of the workshop on estimating erosion and sediment yield on rangeland, Tucson, Arizona. US department of agriculture, *Agricultural Reviews and manuals*, Western series, 26, 145-156.
- Foglia, L., Hill, M. C., Mehl, S. W. & Burlando, P. (2009). Sensitivity analysis, calibration, and testing of a distributed hydrological model using error-based weighting and one objective function. *Water Resources Research*, 45(6).
<https://doi.org/10.1029/2008WR007255>.
- Khaledian, H. & Nikkami, D. (2017). Optimization of land use to reduce the potential of erosion and sediment using linear programming model (Case study: Chehel-Gazi basin of Sanandaj). *Journal of Water and Soil Science*. 21 (1), 95-111.
<https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.21.1.95>
- Khoda Rahimi, R. (2005). Investigating the effectiveness of EPM and MPSIAC experimental methods in estimating erosion and sedimentation in Kharestan watershed, Fars. *Master's thesis*, Mazandaran University.
- Kousari, M. R., Saremi Naeni, M. A., Tazeh, M. & Frozeh, M. R. (2010). Sensitivity analysis of some equations for estimating of time of concentration in watersheds. *Journal of Arid Biome*, 1(1), 57-67.
<https://doi.org/10.1001.1.2008790.1389.1.1.6.0>. (In Persian).
- Kamali Maskooni, E., Adelpour, A. A. & Pirnia, A. (2016). Evaluation of the effect of slope gradient on threshold of erosion (gully) in flood spreading projects. *Watershed Management Research Journal*, 29(4), 20-29.
<https://doi.org/10.22092/WMEJ.2017.115315>. (In Persian).
- Maghsoudi, M., Shadfar, p. & Abbasi, M. (2012). Landslide sensitivity zoning to gully erosion in Zavaryan basin of Qom province. *Quantitative Geomorphology Researches*, 1(2), 35-52.
<https://doi.org/10.1001.1.22519424.1391.1.2.3.7>. (In Persian).
- Memariyan, H., & Dehghan, H. (2019). Sensitivity and uncertainty analysis of sediment rating equation coefficients using the Monte-Carlo simulation (Case study: Zoshk-Abardeh watershed, Shandiz). *Jwmseir*; 13 (44), 90-102.
<https://doi.org/20.1001.1.20089554.1398.13.44.11.3>.
- Motamedirad, M., Zangane Asadi, M. A. & 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. (In Persian).
<https://doi.org/10.22034/GMPJ.2022.360813.1374>.
- Nikpour, N., Fotohi, S., Negaresh, H. & Sistani, M. (2017). Morphometric of gully erosion (ditch) and factors affecting the development of the basin plains on southern west Ilam Cham Fazel. *Spatial analysis of environmental hazards*, 4 (1), 97-112. (In Persian).
- Nourani, V. & Mohsenzadeh, S. (2017). Monthly Sediment Load Estimation of Aji Chay Basin Stations Using MPSIAC Model and Cascade Exponential Sub-cales. *Hydrogeomorphology*, 4(11), 83-103.
<https://doi.org/20.1001.1.23833254.1396.4.11.5.6>
- Refahi, H. (2003). *Water erosion and its Control*. Tehran University Press. (In Persian).
- Shojaei, S. H., Nora, M. & Habibi, S. (2017). Estimation of sedimentation and erosion using MPSIAC and FSM experimental models and direct measurement method (Case study: Gabrik watershed, southeast of Iran). *J. Environ. Erosion Res*, 8(4), 82-100.
<https://doi.org/20.1001.1.22517812.1397.8.4.5.8>. (In Persian).
- Talebi, A., Poormohammadi, S. & Rahimian, M. (2010). Investigation of Effective Factors on Reference Evapotranspiration using Sensitivity Analysis of FAO-Penman-Monteith Equation (Case-study: Yazd, Tabas and Marvast stations). *Physical Geography Research Quarterly*, 42(73), 97-109. (In Persian).
- Zhang, R., Liu, X., Heathman, GC. Yao, X., Hu, X. & Zhang, G. (2013). Assessment of soil erosion sensitivity and analysis of sensitivity factors in the Tongbai–Dabie mountainous area of China. *CATENA*, 101, 92-98.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.10.008>

Zabihi Silabi, M. & Khaledi Darvishan, A. (2021). Qualitative Evaluation of IntErO, EPM, MPSIAC and RUSLE Models in

Order to Select the Optimal Models for Different Conditions for Description of Detailed-Executive Watershed Management Services. *Extension and Development of Watershed Management*, 9(32), 52-66.