

ارزیابی نرخ فرسایش و رسوب‌گذاری در حوضه آبریز سد رسوب‌گیر معدن مس در آلو در جنوب کرمان به روش مدل‌سازی MPSIAC و EPM

هدا باوی^۱ و حامد زندمقدم^{۲*}

۱- استاد مدعو گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

نویسنده مسئول: Zand1883@uk.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۳

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

فرسایش خاک به عنوان تهدیدی جدی برای آلودگی منابع آب، هدررفت خاک و انتشار آلودگی‌های زیست‌محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. از این‌رو لازم است که مناطق تولید رسوب به عنوان نقاط بحرانی فرسایش شناسایی شده و اقدامات لازم در جهت جلوگیری و مهار این پدیده زیست‌محیطی مخرب انجام شود. مدل پسیاک اصلاح شده (MPSIAC) و مدل EPM از جمله مدل‌های جهانی شناخته شده جهت ارزیابی نرخ فرسایش خاک و میزان ورودی سالانه رسوبات به پشت سدها هستند. هدف از این مطالعه ارزیابی شرایط فرسایش در حوضه بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس در آلو در جنوب کرمان و محاسبه میزان ورودی رسوب سالانه به محدوده پشت سد به دو روش MPSIAC و EPM است. نتایج پیمایش‌های صحرایی و داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که بر اساس پارامترهای مدل MPSIAC در حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن در آلو، این حوضه در دسته حوضه‌های با مقدار فرسایش کم قرار دارد. از میان ۹ عامل موثر در فرسایش خاک، فرسایش رودخانه‌ای در کل حوضه و زیرحوضه باختری به عنوان مؤثرترین عامل شناخته شده است. در زیرحوضه خاوری عامل توپوگرافی، بیشترین تاثیر را در افزایش بار رسوبی حمل شده نشان می‌دهد. از سوی دیگر عامل پوشش زمین کمترین تاثیر را در تولید رسوب حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن در آلو نشان می‌دهد. این امر نشان می‌دهد که براساس ارزیابی‌های مدل MPSIAC فعالیت‌های انسانی در این حوضه هنوز تاثیر چندانی بر تخریب سطحی و رسوب‌زایی حوضه ندارد. از سوی دیگر مدل EPM به دلیل نادیده گرفتن بسیاری از پارامترهای موثر شدت فرسایش را در حوضه مطالعاتی شدید تا بسیار شدید ارزیابی کرده است که با توجه به شرایط طبیعی حاکم بر منطقه، مقادیر ارزیابی شده به شدت اغراق‌آمیز و دور از واقعیت برآورد شده‌اند. بنابراین مدل MPSIAC با وجود پرهزینه و زمانبر بودن به شدت برای مطالعات فرسایشی حوضه بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس در آلو توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: فرسایش، رسوب‌گذاری، مدل MPSIAC، مدل EPM، معدن مس در آلو

۱- پیشگفتار

منشاء و خارج از آن ایجاد می‌کند. فرسایش خاک تا حدود زیادی تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی است (نصیری و همکاران، ۱۴۰۰؛ مورگان، ۲۰۰۵؛ پیمنتل، ۲۰۰۹؛ آوند و همکاران، ۲۰۲۳؛ ویللا و همکاران، ۲۰۲۳). به عنوان نمونه، کاهش حاصل‌خیزی و بهره‌وری خاک، انتشار مقادیر زیادی کربن آلی خاک (SOC) به جو عمدتاً به صورت دی‌اکسیدکربن (اثر گلخانه‌ای)، حذف و انتقال آلاینده‌ها، تغییر رابطه نفوذ و نگهداری آب، تغییر مسیرهای آب در مقیاس‌های بزرگ و کوچک، ناپایداری شیب و حرکت توده‌های بزرگ، تجمع رسوبات در پشت سدها، دریاچه‌ها و مسیر رودخانه‌ها و افزایش حوادثی مانند سیل، لاهار و

فرسایش خاک توسط رواناب‌ها یکی از مهم‌ترین مشکلات زیست‌محیطی و اشکال تخریب خاک است (کلارک، ۱۹۸۰؛ ستوتلوعلی و بکه‌دال، ۲۰۱۵؛ نوری و همکاران، ۲۰۱۶؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۶؛ ترنر و همکاران، ۲۰۱۸؛ رجبی و همکاران، ۲۰۲۲؛ آوند و همکاران، ۲۰۲۳؛ کازابل-گونزالس و همکاران، ۲۰۲۳؛ لتا و همکاران، ۲۰۲۳؛ ویللا و همکاران، ۲۰۲۳؛ علوی-نیا و متقیان، ۲۰۲۴؛ بشری و همکاران، ۲۰۲۴). هر ساله میلیون‌ها تن رسوب از محیط رسوب‌گذاری خود فرسایش یافته و به سمت مناطق پایین دست منتقل می‌شود، که این امر مشکلات بی‌شماری را در

خشکسالی. این چالش‌ها هزینه‌های تولید را افزایش داده و باعث ایجاد هزینه‌های اضافی و یا آسیب‌های زیست‌محیطی می‌شوند (ویجیاک و همکاران، ۲۰۱۲؛ ترنر و همکاران، ۲۰۱۸؛ کازابل-گونزالس و همکاران، ۲۰۲۳؛ دی‌ونته و همکاران، ۲۰۱۳؛ لتا و همکاران، ۲۰۲۳؛ ویللا و همکاران، ۲۰۲۳). در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک، مدیریت منابع آب هم برای جمعیت منطقه و هم برای سلامت محیط از اهمیت حیاتی برخوردار است. حوضه‌های آبریز به عنوان یک واحد فعال زیست‌محیطی، از اهمیت قابل توجهی برخوردار هستند؛ از سوی دیگر زیرحوضه‌ها هم به عنوان واحدهای برنامه‌ریزی برای فعالیت‌های مدیریتی مناسب جهت کاهش فرسایش و حمل رسوبات، هم برای جلوگیری از چالش‌های مرتبط و حفظ منابع موجود عمل می‌کنند. برای این منظور، داده‌های فرسایش رسوبات به عنوان ابزاری جهت پیش‌بینی و وضع الزامات اساسی و قانونی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های بهره‌برداری از منابع آب مفید هستند (رجبی و همکاران، ۱۳۹۱؛ مریت و همکاران، ۲۰۰۳؛ پارسونز و آبراهامز، ۲۰۰۵؛ هاریگوبین و همکاران، ۲۰۰۵؛ لازاری و همکاران، ۲۰۱۵؛ سنوتلوالی و همکاران، ۲۰۱۸؛ آوند و همکاران، ۲۰۲۳؛ کازابل-گونزالس و همکاران، ۲۰۲۳؛ بشری و همکاران، ۲۰۲۴؛ علوی‌نیا و متقیان، ۲۰۲۴؛ لتا و همکاران، ۲۰۲۳). متأسفانه در اقلیم‌های نیمه‌خشک، فرآیندهای فرسایشی به دلیل جنگل‌زدایی و تغییر کاربری زمین، چرای بیش از حد و مدیریت ناکافی کشاورزی گسترش بیشتری یافته‌اند است (چپس و گیسون، ۲۰۰۱؛ رجبی و همکاران، ۲۰۲۲). از این‌رو، برای حفاظت از حوزه‌های آبریز و زیرحوضه‌هایی که نیاز به مراقبت دارند و برای کاهش اثرات نامطلوب فرسایشی، ارزیابی خطرات فرآیندهای فرسایش از طریق مدل‌هایی که مبتنی بر فرآیندهای تجربی یا نیمه‌کمی هستند، ضروری است. از آنجایی که اکثر مدل‌های فرسایش مبتنی بر فرآیند، در مجموع ضعیف ارزیابی شده‌اند و به پارامترهای ورودی زیادی نیاز دارند، مدل‌های پیش‌بینی تجربی همچنان نقش مهمی در برنامه‌ریزی حفاظت خاک دارند (محمود آبادی، ۲۰۱۱). معروف‌ترین مدل‌های فرسایش نیمه‌کمی، مدل توسعه یافته توسط کمیته بین سازمانی جنوب غرب اقیانوس آرام (کمیته بین سازمانی جنوب غربی اقیانوس آرام، ۱۹۶۸)، مدل پسیاک اصلاح‌شده (جانسون و گبهارت،

۱۹۸۲) و مدل EPM هستند، که به ترتیب برای اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک جنوب باختری ایالات متحده و جنوب یوگوسلاوی به کار گرفته شدند. از آنجا که درک ساز و کار با این مدل‌ها آسان است، هر دو مدل برای شرایط محیطی مشابه در کشورهای دیگر مانند سوئیس (بیرپورتنر، ۱۹۹۸)، اسپانیا (د و نته و پوسن، ۲۰۰۵)، ایران (حسینی و همکاران، ۲۰۱۵؛ نوری و همکاران، ۲۰۱۶؛ آوند و همکاران، ۲۰۲۳؛ بشری و همکاران، ۲۰۲۴؛ علوی‌نیا و متقیان، ۲۰۲۴)، تانزانیا (ندومبا، ۲۰۱۳) و مکزیک (کازابل-گونزالس و همکاران، ۲۰۲۳) مناسب و موفق در نظر گرفته شد. در طراحی و محاسبه حجم و عمر مفید سدهای مخزنی لازم است که میزان فرسایش و رسوبدهی حوضه آبریز تعیین گردد. علاوه بر این، مدیریت صحیح منابع آب و خاک در یک حوضه آبریز مستلزم شناخت توان تولید رسوب آن بوده و از طرف دیگر جهت شناسایی دقیق عوامل تخریب خاک، نیاز به اطلاعات پایه‌ای دقیق است (جتن و همکاران، ۲۰۰۳؛ بشری و همکاران، ۲۰۲۴؛ علوی‌نیا و متقیان، ۲۰۲۴). اکثر حوضه‌های آبریز کوچک فاقد ایستگاه‌های رسوب‌سنجی بوده و احداث چنین ایستگاه‌هایی نیز پر هزینه است؛ لذا جهت برآورد میزان رسوب فرسایش یافته در منطقه و میزان ورودی سد رسوبگیر معدن مس درآلو، انتظار می‌رود مطالعه میزان فرسایش حوضه به روش MPSIAC و EPM ضمن عملی بودن از دقت لازم نیز برخوردار باشد. باید در نظر داشت که اساساً نمی‌توان عامل مشخص و معینی را به عنوان عامل اصلی فرسایش آبی در یک منطقه معرفی کرد، بلکه شرایط فرسایش موجود در منطقه را باید معلول تاثیرات متقابل مجموعه عوامل موثر در ایجاد فرسایش دانست؛ بطوریکه هر عامل، عامل دیگری را تقویت و یا از فعالیت آن جلوگیری می‌کند. هدف از این مطالعه شامل: ۱- بررسی شرایط فیزیولوژیکی و هیدرولوژیکی حوضه آبریز بالادست سد رسوبگیر معدن مس درآلو، ۲- مقایسه شرایط فرسایش در دو زیرحوضه و جمع‌آوری اطلاعات زمینه‌ای میزان فرسایش طبیعی منطقه پیش از راه‌اندازی کارخانه تغلیظ و فرآوری است، ۳- ارزیابی و مقایسه نرخ فرسایش و رسوب‌گذاری در منطقه صنعتی به روش مدل‌سازی MPSIAC و EPM. در آینده نه چندان دور با راه‌اندازی کارخانه تغلیظ و فرآوری معدن مس درآلو به دلیل تغییر در بسیاری از پارامترهای فرسایش بویژه تغییر در کاربری

و قابل ملاحظه است. پست‌ترین قسمت حوضه را خروجی حوضه در محل سد رسوب‌گیر شامل می‌شود که ارتفاعی معادل ۲۹۱۸ متر دارد. دو زیر حوضه‌ی بالادست سد رسوب‌گیر تقریباً در بخش میانی حوضه به یکدیگر می‌پیوندند و تشکیل یک آبراهه (بخش بالادست رودخانه چهارطاق) را می‌دهند که در نهایت این آبراهه وارد سد رسوب‌گیر می‌شود. آبراهه شرقی (آبراهه اصلی حوضه SB1) که طولانی‌ترین و پرآب‌ترین آبراهه حوضه بشمار می‌آید دارای طولی در حدود ۵۴۸۲ متر می‌باشد؛ از سوی دیگر آبراهه باختری (آبراهه اصلی حوضه SB2) که نسبت به آبراهه خاوری طول کمتر، انشعاب کمتر و در نتیجه میزان دبی کمتری دارد دارای طولی در حدود ۴۰۲۱ متر است. این آبراهه‌ها بعد از به هم پیوستن در صورتی که به پشت سد محدود نشوند مسیر خود را در امتداد جهت شمال ادامه داده و وارد بخش پایین‌دست رودخانه چهارطاق می‌شوند که از جمله رودخانه‌های مهم منطقه می‌باشد. آب رودخانه چهارطاق جهت شرب و کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز مورد مطالعه را در بین حوضه‌های آبریز اصلی کشور (درجه ۲) و موقعیت هیدرولوژیکی دو زیرحوضه خاوری و باختری مورد مطالعه را در بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو نشان می‌دهد.

۳- روش کار

در این پژوهش جهت ارزیابی پارامترهای حاکم بر میزان فرسایش و رسوب‌گذاری در مدل‌های MPSIAC و EPM مراحل مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

۱- تهیه نقشه پایه و چارچوب حوضه آبریز براساس نقشه توپوگرافی و آبراهه‌ها با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (سازمان نقشه‌برداری کشور)؛ پس از مرزبندی، حوضه بر روی تصاویر ماهواره‌ای مطابقت داده شد و محدوده مورد مطالعه بطور دقیق مکان‌یابی شد.

۲- برآورد پارامترهای مورفومتریک حوضه مورد مطالعه با استفاده از توابع تحلیلی GIS؛

۳- نمونه‌برداری از سامانه خاک (تعداد ۱۵ نمونه) برای ارزیابی عامل فرسایش‌پذیری خاک به روش نمونه‌برداری تصادفی؛

۴- تهیه نقشه زمین‌شناسی حوضه آبریز با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ بر اساس طیف‌سنجی‌های ماهواره‌ای،

اراضی، قطعاً شاهد افزایش میزان رسوب جابه‌جا شده و رسوب تحویلی در مکان سد رسوب‌گیر خواهیم بود. با توجه به اینکه فرسایش منطقه در کنار هدر رفت خاک و پرشدن مخزن سد، سبب جابجایی و پراکنش آلودگی‌های زیست‌محیطی در منطقه می‌شود؛ از این‌رو انجام فعالیت‌های کنترل‌کننده فرسایش پیش از هرگونه آسیب زیست‌محیطی لازم و ضروری بنظر می‌رسد.

۲- موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین‌شناسی منطقه

محدوده کانسار درآلو از نظر ساختاری در بلوک ایران مرکزی و در بخش جنوب‌شرقی کمان ماگمایی ارومیه-دختر، در زیر پهنه آتشفشانی-نفوذی دهج-ساردوئیه قرار دارد (باوی و همکاران، ۲۰۲۴). قدیمی‌ترین واحدهای سنگی محدوده مطالعاتی به سن ائوسن و جوان‌ترین واحدهای سنگی رسوبات غیرمنسجم به سن کواترنری هستند. این رسوبات قابل تفکیک به ۳ گروه پادگانه‌ها، رسوبات مخروط‌افکنه قدیمی و رسوبات واریزه‌ای هستند (باوی و همکاران، ۲۰۲۳). حوضه آبریز سد رسوب‌گیر معدن درآلو با وسعت ۱۴/۱۴ کیلومتر مربع و محیط ۱۹/۸۶ کیلومتر در استان کرمان، در جنوب حوضه آبریز دره انجیر و جنوب زیر حوضه قریه‌العرب قرار دارد. بلندی‌های محدود کننده حوضه آبریز سد رسوب‌گیر معدن درآلو جدا کننده دو حوضه بزرگ دره‌انجیر از حوضه جازموریان می‌باشد. ارتفاع متوسط این حوضه معادل ۳۰۶۸ متر از سطح آب دریا می‌باشد و جزو حوضه‌های مرتفع به شمار می‌آید. این حوضه در گستره ۵۰۶۴۲۶ تا ۵۱۲۳۶۷ طول‌خاوری و ۳۲۵۵۶۴۶ تا ۳۲۶۰۱۱۷ عرض شمالی واقع شده است. به منظور شناخت هرچه بهتر خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه آبریز سد رسوب‌گیر معدن درآلو، با در نظر گرفتن عواملی چون مساحت حوضه و همچنین وضعیت حاکم بر شبکه رودخانه‌ها، وضعیت ارتفاعات جدا کننده آبراهه‌ها و ارتباط شاخه‌های فرعی با آبراهه‌های اصلی، حوضه مطالعاتی به دو زیر حوضه خاوری و باختری (SB1 و SB2) تقسیم شد. سیمای طبیعی حوضه در بخش خاوری (زیرحوضه SB1) بیشتر کوهستانی، با ارتفاعات زیاد و در بخش باختری (زیرحوضه SB2) دارای نمای تپه مانند و پهنه‌های دشت مانند و کوهپایه‌ای است؛ با این وجود اختلاف ارتفاع در منطقه ۵۲۶ متر است که بسیار چشمگیر

۷- تهیه نقشه تراکم پوشش گیاهی و کاربری اراضی با استفاده از تصاویر ماهواره Sentinel-2A مربوط به آخرین تصویربرداری‌ها در سال ۲۰۲۰ و شاخص تفاضل پوشش گیاهی (NDVI)؛

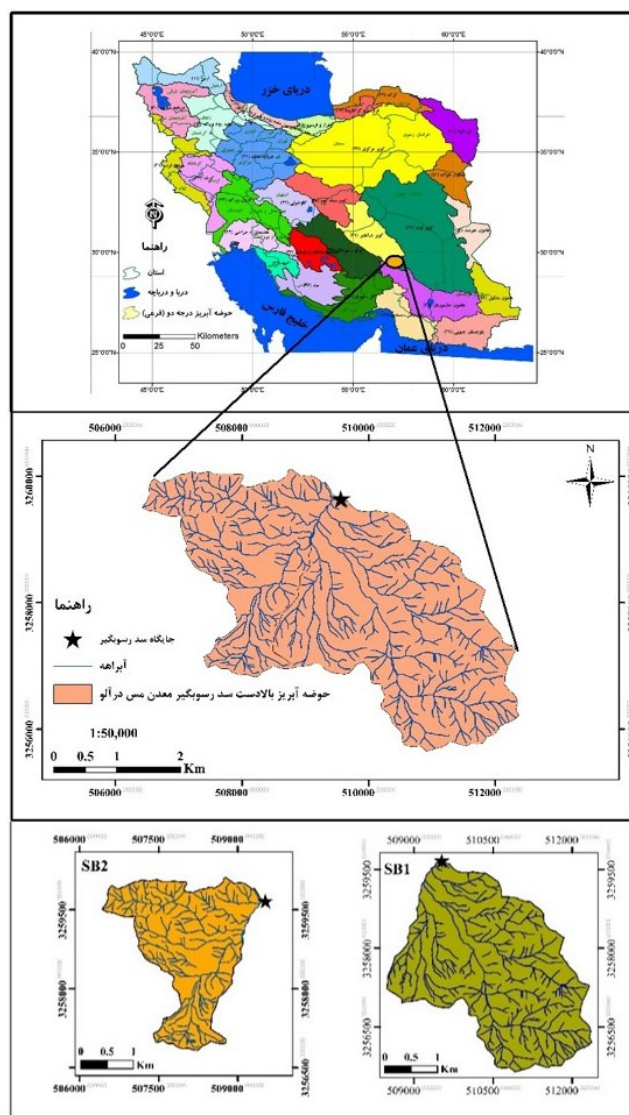
۸- تجزیه حوضه آبریز به دو زیرحوضه مطالعاتی خاوری و باختری و پلی‌گون کردن زیرحوضه‌ها و امتیازدهی به هر کدام از آن‌ها براساس پارامترهای موثر در هر مدل؛

۹- محاسبه مجموع امتیازات هر زیرحوضه و حوضه اصلی براساس میانگین‌گیری وزنی و ارزیابی میزان فرسایش و رسوبگذاری سالانه؛

بازدیدهای صحرایی، نمونه‌برداری واحدهای سنگی و مطالعات میکروسکوپی و انطباق داده‌ها با اطلاعات سنگ‌شناسی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ساردوئیه (زولنج و همکاران، ۱۹۷۲)؛

۵- استخراج نقشه شیب منطقه بصورت درصد از نقشه‌های ارتفاعی رقومی با استفاده از تابع Zonal Statistic as Table در محیط Arc Map؛

۶- ارزیابی وضعیت اقلیمی (دما و بارش) منطقه مورد مطالعه با استفاده از اطلاعات ایستگاه هواشناسی معدن و داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به حوضه مطالعاتی (شامل ایستگاه قریه‌العرب، راسک، ده مرتضی و باب کهنوج)؛



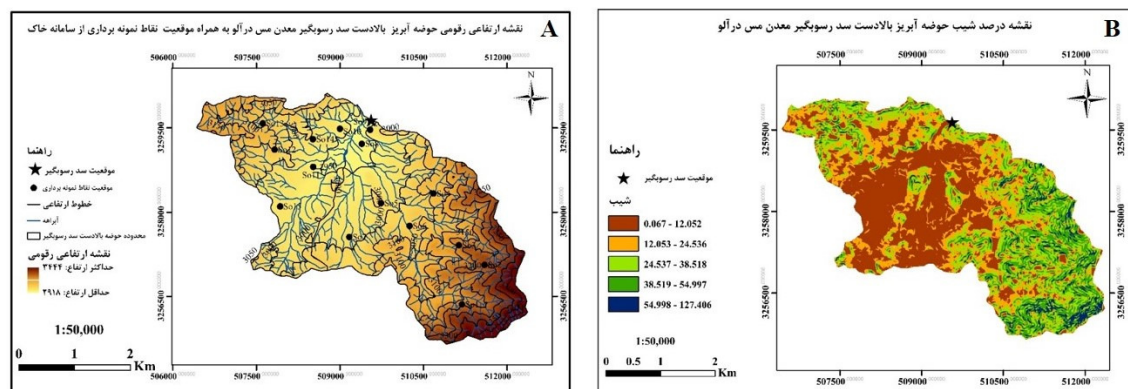
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز بالادست سد باطله معدن مس درآلو در بین حوضه‌های آبریز درجه ۲ کشور
Fig. 1. Geographical location of the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine among the 2nd-grade catchments

جدول ۱ پارامترهای مورفومتریک حوضه آبریز بالادست سد باطله معدن رسوب‌گیر سد درآلو آورده شده است. شیب تأثیر بسزایی در میزان حجم رواناب، مقادیر نفوذ و شدت فرسایش دارد، اثر شیب در خاک‌های قابل نفوذ کاهش می‌یابد زیرا آب پیش از سرعت گرفتن در داخل خاک نفوذ می‌کند. با افزایش شیب، پایداری خاک کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر نیروی انتقال ذرات به طرف پایین افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی انتقال، اصطکاک ذرات خاک کم شده و ذرات به حالت تعادل ناپایدار در می‌آیند (شکل ۲).

ارزیابی خصوصیات مورفومتری حوضه^۱ به این علت حائز اهمیت است که بین آن‌ها و رواناب حوضه همبستگی وجود دارد و در مورد حوضه‌هایی که در آن‌ها داده‌های اندازه‌گیری دبی وجود ندارد، می‌توان از این روابط استفاده نموده و مقدار رواناب یا شدت سیلاب‌ها را تخمین زد (برد و همکاران، ۱۹۹۰؛ چاندراشکارا و همکاران، ۲۰۱۵). خصوصیات مهم مورفومتری حوضه شامل: مساحت، محیط، طول آبراهه اصلی، شکل حوضه، شیب حوضه، ارتفاع حوضه و زمان تمرکز می‌باشد (علیزاده، ۱۳۷۷). در

جدول ۱. مشخصات مورفومتریک حوضه و زیرحوضه‌های آبریز بالادست سد باطله معدن مس درآلو
Table 1. Morphometric characteristics of the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine

پارامترهای هندسی	حوضه اصلی	زیرحوضه شرقی	زیرحوضه غربی
مساحت (کیلومترمربع)	۱۴/۱۴	۹/۰۸	۵/۰۶
محیط (کیلومتر)	۱۹/۸۶	۱۳/۷۷	۱۲/۶۴
طول رودخانه اصلی (متر)	۵۴۸۲	۵۴۸۲	۴۰۲۱
ضریب گرادیوس	۱/۴۸	۱/۳۸	۱/۵۷
حداکثر ارتفاع (متر)	۳۴۴۴	۳۴۴۴	۳۱۶۶
حداقل ارتفاع (متر)	۲۹۱۸	۲۹۱۸	۲۹۱۸
میانگین ارتفاع (متر)	۳۰۶۸	۳۱۰۰	۳۰۰۹
شیب (%)	۲۲/۵۷	۲۵/۹۲	۱۶/۶
زمان تمرکز (ساعت)	۰/۶۱	۰/۶۱	۰/۵۷



شکل ۲. (A) نقشه ارتفاعی رقومی (DEM) حوضه بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو و موقعیت نقاط نمونه‌برداری از سامانه خاک؛ (B) نقشه درصد شیب حوضه بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو

Fig. 2. Digital Elevation Map (DEM) of the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine and the location of soil samples, (B) Slope percentage map of the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine

۳-۱- انواع اشکال فرسایشی در منطقه
روند فرسایش و مقاومت در برابر آن در واحدهای سنگی موجود در زیرحوضه‌های آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن درآلو تفاوت زیادی با یکدیگر نشان نمی‌دهد. این عدم اختلاف به دلیل شباهت در سنگ‌شناسی و شرایط

اقلیمی در سطح حوضه می‌باشد؛ از این‌رو هر دو زیرحوضه مطالعاتی تحت تأثیر عوامل فرسایشی یکسان، اشکال فرسایشی مشابه با شدت و ضعف مختلف نشان می‌دهند. در ادامه به معرفی این اشکال فرسایشی می‌پردازیم:

^۱ Morphometry

سرعت و انرژی آن کاسته می‌شود. با توجه به اینکه خاک‌های زیرحوضه خاوری بسیار نازک و کم عمق است و در برخی مکان‌ها بویژه در ارتفاعات تقریباً وجود ندارد این لایه سخت غیر قابل نفوذ بسیار به سطح زمین نزدیک است؛ از اینرو شیارهای خیلی کم عمق که عرض آن‌ها چندین برابر عمقشان است بوجود آمده است. مجموعه شیارها به سمت بالادست به صورت پنجه‌ای دیده می‌شود که به سمت پایین‌دست عمیق‌تر و عریض‌تر شده و به هم وصل می‌شوند و آبراهه بزرگ‌تر دائمی را به وجود می‌آورند که نشان‌دهنده عمیق‌تر شدن پروفیل خاک است. این آبراهه‌ها بر روی سنگ بستر حرکت کرده و رسوبات دره‌ای از قطعات سنگی درشت تا دانه‌های در اندازه ماسه را با خود حمل می‌کنند که نشان‌دهنده سیلاب‌های ناگهانی منطقه بر اثر ریزش‌های شدید جوی و آب شدن سریع برف‌ها و افزایش ناگهانی قدرت حمل شیارهاست.

فرسایش خندقی^۴: خندق‌ها آبراهه‌های نسبتاً دائمی هستند که جریان‌های موقت آب در هنگام بارندگی از آن می‌گذرد و مقدار بسیار زیادی رسوب حمل می‌کند. در زیرحوضه باختری (SB2) خندق‌هایی دیده می‌شوند که به طور ناگهانی ظاهر شده‌اند و آن هنگامی است که تونل‌های زیرزمینی فرو ریخته‌اند. ابعاد خندق‌ها در حوضه مطالعاتی از کوچک‌تر از ۲ متر (خندق کوچک) تا بیش از ۱۰ متر (خندق بزرگ) دیده می‌شوند. تراکم این خندق‌ها در زیرحوضه باختری که دارای پروفیل خاک ضخیم با درجه فرسایش‌پذیری بالاست بیشتر دیده می‌شود. خاک‌های دیواره خندق‌ها در فصول خشک سال رطوبت خود را از دست داده و بصورت پوخته پوخته در می‌آیند؛ در فصل مرطوب با اولین ضربه قطرات باران، جریان ملایم آب و باد منتقل می‌شوند. ادامه این روند منجر به گسترش تدریجی عرض خندق شده است (شکل ۳- C و D).

فرسایش تونلی^۵: این نوع فرسایش که به فرسایش آبراهه‌های زیرزمینی^۵ نیز معروف است، غالباً در زیرحوضه باختری دیده شده است، خاک تحت الارض فرسوده شده و از محیط خارج شده است؛ در حالی که خاک سطح الارض در جای خود باقی مانده است. این نوع فرسایش در جایی رخ داده است که در زیر خاک نفوذپذیر یک لایه غیرقابل نفوذ یا با قابلیت نفوذ کم وجود دارد و در بالای این لایه

فرسایش بارانی^۱: در حوضه آبریز مورد مطالعه، قطرات باران پس از برخورد با خاک خشک قسمتی از خاکدانه‌ها و کلوخه‌های خاک را خرد و به ذرات ریز تبدیل کرده و خود جذب خاک شده‌اند. فشردگی سطح خاک در اثر ضربه قطرات باران و همچنین پر شدن منافذ خاک بوسیله ذرات ریز متلاشی شده، یک لایه با نفوذپذیری بسیار کم (اصطلاحاً سله) در سطح خاک ایجاد کرده است. در اثر تشکیل این لایه غیر قابل نفوذ مقدار آبدوی افزایش می‌یابد. مقدار این فرسایش در پای شیب‌ها به علت میزان آب زیاد در سطح خاک کم و در روی شیب‌ها، بیشتر است؛ این در حالی است که فرسایش ناشی از آبدوی در این دو محل کاملاً برعکس می‌باشد. میزان این نوع فرسایش در زیرحوضه خاوری (SB1) دارای شدت بیشتری نسبت به زیرحوضه باختری (SB2) است که دلیل آن را می‌توان در توپوگرافی مرتفع و ضخامت کم لایه آب در خاک زیرحوضه خاوری جستجو کرد. شکل ۳- A نشان دهنده علائم فرسایشی ناشی از برخورد قطرات باران با زمین‌های لخت در سطح حوضه است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود اثر فرسایش بارانی تنها در جاهایی قابل مشاهده است که پوشش گیاهی خاک‌های اطراف را پوشش نداده است و در نتیجه قطرات باران، خاک حمایت نشده اطراف را متلاشی کرده و سطح خاک را به پایین‌تر از سطح پوشش گیاهی رسانده است.

فرسایش شیار^۲: این نوع فرسایش بیشتر بر روی شیب‌های بالادست زیرحوضه خاوری و باختری جایی که آب باران یا آب‌های حاصل از ذوب برف‌ها از بلندی‌ها به سمت کوهپایه‌ها جریان پیدا کرده و به تدریج در فرورفتگی‌های سطح زمین جمع شده‌اند، دیده می‌شود. پس از اینکه فرورفتگی‌های خاک از آب پر شده آب از لبه پایین فرورفتگی‌ها با حجم زیادی جریان پیدا می‌کند و آبراهه‌هایی به شکل شیار در سطح زمین ایجاد کرده است (شکل ۳- B). این شیارها پس از شکل‌گیری، به طرف بالادست و پایین‌دست خود گسترش یافته‌اند. پسروی به سمت بالادست تا جایی ادامه پیدا کرده است که عوامل فرسایشی به یک لایه سخت غیرقابل نفوذ می‌رسند؛ در این صورت شیارها عریض گشته و معمولاً میزان فرسایش کاهش یافته است زیرا آب در سطح وسیعی پخش و از

⁴ Tunnel Erosion

⁵ Piping

¹ Splash Erosion

² Rill Erosion

³ Gully Erosion

آبراهه‌های زیرزمینی در مسیر خود ذرات سست لایه بالایی را حمل می‌کنند. به دنبال این امر آب به تدریج سرعت گرفته و مواد بیشتری را حمل می‌کند و آبراهه بزرگ‌تر می‌شود. و به این ترتیب تونلی در زیر خاک به وجود آمده است (شکل ۳- E).

یک لایه حساس به فرسایش قرار گرفته است. در این شرایط آب نفوذ یافته در لایه‌های شکاف‌ها در بالای لایه غیر قابل نفوذ جمع شده و تحت یک شیب هیدرولیکی^۶ بر روی لایه غیرقابل نفوذ به جریان خود ادامه داده است و از جای مناسبی مانند دیواره خندق خارج می‌شود. این



شکل ۳. انواع اشکال فرسایشی در حوضه آبریز بالادست سد باطله معدن مس در آلو. (A) فشرده شدن سطح خاک در اثر ضربه قطرات باران و سله بستن سطح خاک؛ (B) فرسایش شیاری بر روی شیب‌های بالادست حوضه و گسترش عمق و عرضشان در پایین شیب‌ها؛ (C و D) فرسایشی خندقی گسترش یافته در زیر حوضه باختری؛ (E) جریان آب در تونل‌های زیرزمینی و فرسایش خاک زیرسطحی؛ (F) فرسایش کناره‌ای در دیواره‌های آبراهه‌های متاندیری منطقه به صورت تشدید دیده می‌شود (در تمام تصاویر جهت شمال جغرافیایی به سمت بالا است).

Fig. 3. Types of erosion form in the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine. (A) Compression of the soil surface due to the impact of raindrops; (B) Rill erosion on the slopes and the expansion of their depth and width at the bottom of the slopes; (C and D) Extended gully erosion in the western sub-basin; (E) Water flow in underground tunnels and erosion of subsurface soil; (F) Stream-bank erosion in the walls of meandering streams is seen in an intensified manner.

قسمت‌های خارجی خمیدگی‌ها شدیداً فعال بوده که می‌تواند به دلیل ازدیاد نیروی برشی آب در این بخش از آبراهه‌ها باشد. فرسایش در امتداد کناره‌ها و بستر نهرهای

فرسایش کنار آبراهه‌ای! فرسایش کنار آبراهه‌ای معمولاً در دیواره‌های آبراهه‌های متاندیری منطقه به صورت تشدید دیده می‌شود (شکل ۳- F). این نوع فرسایش در

^۱ Stream-bank Erosion

^۶ Hydraulic gradient

بسته به شدت و ضعف هر عامل، عددی به آن نسبت داده می‌شود. سرانجام با در نظر گرفتن مجموع اعداد بدست آمده برای عوامل مختلف، میزان رسوبدهی حوضه برآورد می‌شود. هر یک از عوامل نه‌گانه فرسایش خاک و تولید رسوب در هر یک از زیرحوضه‌ها به ترتیب زیر مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

عامل زمین‌شناسی سطحی^۲: عامل زمین‌شناسی که شامل جنس لایه‌های سنگی و درجه حساسیت هر یک از سنگ‌های متفاوت به فرسایش است، نقش عمده‌ای در رسوب‌زائی یک حوضه دارد. سنگ‌های با جنس سخت و مقاوم دارای پتانسیل تولید رسوب کم و سنگ‌های سست و نرم معمولاً به سادگی فرسوده شده و نقش مهمی در تولید رسوب بر عهده دارند (نوری و همکاران، ۲۰۱۶). در روش پسیاک اصلاح شده امتیاز عامل زمین‌شناسی سطحی از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$X_1=Y_1 \quad \text{رابطه ۱}$$

X_1 امتیاز عامل زمین‌شناسی و Y_1 شاخص فرسایشی زمین‌شناسی سطحی است که بر اساس نوع سنگ، سختی، شکستگی و هوازدگی تعیین می‌شود. با توجه به حساسیت سنگ‌ها در مقابل عوامل فرسایش، واحدهای سنگی مختلف با امتیازات ۰ (برای تشکیلات سخت و فشرده) تا ۱۰ (لیتولوژی‌های سست) کدگذاری می‌شوند. برای تعیین مقدار عامل زمین‌شناسی سطحی در هر یک از زیرحوضه‌ها، مساحت تحت اشغال هر ترکیب سنگ‌شناسی مشخص و متوسط مقدار عامل زمین‌شناسی از طریق میانگین وزنی محاسبه می‌شود (نوری و همکاران، ۲۰۱۶).

عامل خاک^۳: فرسایش‌پذیری خاک به خصوصیات ذاتی خاک بستگی دارد. از طریق رابطه زیر می‌توان امتیاز عامل خاک را در مدل پسیاک اصلاح شده محاسبه کرد:

$$X_2=16.67K \quad \text{رابطه ۲}$$

X_2 امتیاز رسوب‌دهی خاک و K عامل فرسایش‌پذیری خاک در فرمول جهانی فرسایش است. یک روش برای تخمین عامل فرسایش‌پذیری (K)، روش ترسیمی است که برای محاسبه K از نمودارهای دوقلوی ویشمایر و اسمیت (ویشمایر و اسمیت، ۱۹۷۸) استفاده می‌شود. در این روش فرسایش‌پذیری خاک به عوامل زیر بستگی دارد:

دائمی همواره فعال است، در حالی که فرسایش‌های دیگر فقط در حین بارندگی یا کمی پس از شروع آن فعال هستند. از عوامل عمده که به وقوع این نوع فرسایش در منطقه می‌انجامد، می‌توان به سرعت زیاد جریان آب و تر و خشک‌شدگی متناوب خاک دیواره‌ها دانست که آبراهه‌ها را مستعد فرسایش می‌کند. در بخش میانی بسیاری از آبراهه‌ها جزایری دیده می‌شود که جهت جریان آب را تغییر داده و ممکن است به سمت دیواره‌ها هدایت کنند که در این حالت فرسایش بیشتر دیواره‌ها به وقوع می‌پیوندد. انتهای آبراهه‌ها به دریاچه‌های پشت سدی می‌رسد و رسوبات حمل شده را بصورت دلتاهای پنجه‌ای در ورودی دریاچه برجای می‌گذارند.

۳-۲- مدل MPSIAC

روش پسیاک (PSIAC) برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ میلادی توسط کمیته مدیریت آب در آمریکا برای محاسبه فرسایش خاک و تولید رسوب ایالات متحده آمریکا ارائه شد و در حوضه تحقیقاتی دره وانات واقع در جنوب شرق ایالت آریزونی آمریکا آزمایش شد. این مدل در ابتدا برای حوضه‌های وسیع ($>10 \text{ mile}^2$) پیشنهاد شد اما نویسندگان بسیاری به عملکرد خوب این مدل در حوضه‌های کوچک‌تر اشاره کرده‌اند (صفامانه و همکاران، ۲۰۰۶؛ حشمتی و همکاران، ۲۰۱۲؛ عیسی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۲؛ باقرزاده و منصوری دانشور، ۲۰۱۳؛ کازابل-گونزالس و همکاران، ۲۰۲۳). برای کم‌رنگ کردن نقش تجربه و سلیقه در مدل PSIAC، در سال ۱۹۸۲ طی تحقیقی جانسون و گبهارت عوامل نه‌گانه این روش را به صورت معادلات عددی درآوردند که در مطالعه حوضه آبریز از این معادلات استفاده می‌شود. معادلات جدید با نام مدل پسیاک اصلاح شده (MPSIAC) معرفی گردید که در آن هر یک از عوامل به صورت فرمولی محاسبه می‌شوند و ضرایب اصلاحی در نمرات هر یک از عوامل اعمال می‌گردد. روش پسیاک اصلاح شده در مقایسه با سایر روش‌های تجربی موجود بیشترین عامل مؤثر در فرسایش خاک جهت محاسبه فرسایش ویژه و تولید رسوب را در نظر گرفته است (جانسون و گبهارت، ۱۹۸۲).

در این روش تأثیر و نقش ۹ عامل مهم و مؤثر در فرسایش خاک و تولید رسوب در حوضه آبریز ارزیابی می‌گردد و

³ Soil erodibility

² Surface geology

خاک دانشگاه فردوسی مشهد اندازه‌گیری شدند. پارامترهای نفوذپذیری^۵ و ساختمان خاک^۶ نیز در همین آزمایشگاه محاسبه شدند. بر اساس این پنج ویژگی میزان K بدست آمده است. بر اساس نمونه‌برداری‌های انجام شده از خاک‌های هر کدام از زیرحوضه‌ها مشخص شده است که خاک‌های هر واحد از نظر عوامل موثر در فرسایش‌پذیری بسیار به یکدیگر نزدیک هستند (جدول ۲)؛ از اینرو، با توجه به عدم انطباق واحدهای هیدرولوژیکی، مقدار K از طریق میانگین‌گیری معمولی در هر زیرحوضه به دست می‌آید.

۱) درصد سیلت (ذرات با قطر ۰/۰۵ تا ۰/۰۲ mm) و ماسه ریز تا خیلی ریز (ذرات با قطر ۰/۱ تا ۰/۰۵ میلی‌متر)؛
۲) درصد ماسه درشت (ذرات به قطر ۱ تا ۲ mm)؛
۳) مقدار ماده آلی خاک؛ ۴) ساختمان خاک؛
۵) نفوذپذیری خاک؛
ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی نمونه‌ها نظیر درصد سیلت (Silt) و ماسه خیلی ریز (Very Fine Sand) به روش هیدرومتری (جی و بادر، ۱۹۸۶)، ماسه درشت (Sand) با استفاده از الک‌های ۱۰ و ۱۸ مش، مواد آلی^۴ (OM) به روش سوزاندن تر با بی‌کربنات پتاسیم در مجاورت اسید سولفوریک غلیظ (واکلی و بلک، ۱۹۳۴) در آزمایشگاه علوم

جدول ۲. موقعیت مکانی و مقدار شاخص نفوذپذیری نمونه‌های خاک برداشت شده از حوضه بالادست سد رسوب‌گیر

Table 2. Location and permeability index of soil samples taken from the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine

زیرحوضه	نمونه	E	N	K
زیرحوضه ۱	So1	۵۱۱۱۹۰	۳۲۵۶۳۵۹	۰/۳۶
	So2	۵۱۱۵۸۵	۳۲۵۷۰۶۵	۰/۳۸
	So3	۵۱۱۱۳۶	۳۲۵۷۴۱۱	۰/۴۵
	So4	۵۱۰۶۷۸	۳۲۵۸۳۳۳	۰/۴۱
	So5	۵۰۹۷۳۸	۳۲۵۸۱۶۱	۰/۴۷
	So6	۵۱۰۲۴۰	۳۲۵۷۷۶۷	۰/۴۷
	So7	۵۰۹۱۶۴	۳۲۵۷۵۶۰	۰/۴۲
زیرحوضه ۲	So8	۵۰۹۲۳۲	۳۲۸۵۹۵۵	۰/۴۵
	So9	۵۰۹۵۲۹	۳۲۵۹۴۹۲	۰/۴۲
	So10	۵۰۹۰۰۰	۳۲۵۹۴۸۶	۰/۴۲
	So11	۵۰۸۵۱۸	۳۲۵۸۸۰۴	۰/۴۵
	So12	۵۰۷۸۲۷	۳۲۵۹۱۱۵	۰/۴۸
	So13	۵۰۷۶۲۲	۳۲۵۹۵۸۵	۰/۴۳
	So14	۵۰۸۵۱۵	۳۲۵۹۳۰۰	۰/۴۴
	So15	۵۰۷۹۲۶	۳۲۵۸۱۰۳	۰/۴۸

بارندگی ۶ ساعته با دوره بازگشت ۲ ساله که بیشترین همبستگی را با فرسایش‌پذیری خاک دارد، استفاده می‌شود (کازابل-گونزالس و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به اینکه آمار بارندگی‌های ۶ ساعته به ندرت موجود است، از آمار بارندگی‌های ۲۴ ساعته با دوره بازگشت دو ساله استفاده می‌شود. معمولاً باران ۲۴ ساعته حدوداً ۱/۵ برابر باران ۶ ساعته در نظر گرفته می‌شود (علیزاده، ۱۳۷۷). در این حوضه براساس اطلاعات ایستگاه هواشناسی معدن و نزدیک‌ترین ایستگاه‌ها به حوضه آبریز متوسط بارندگی سالانه معادل ۳۰۵ mm برآورد شده است.

عامل آب و هوا: نوع اقلیم، برآیند عواملی است که به نحوی در حیات و زیست‌بوم‌های طبیعی مؤثر می‌باشند و یک همگنی منطقه‌ای را ایجاد می‌کنند (جتن و همکاران، ۲۰۰۳؛ لی و فانگ، ۲۰۱۶). از عناصر آب و هوایی که بر روی فرسایش تاثیر دارند، نزولات جوی (بویژه باران‌های شدید) و درجه حرارت هستند (آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات آمریکا، ۲۰۱۷). در روش پسیاک اصلاح شده عامل آب و هوا از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$X_3 = 0.2P_2 \quad \text{رابطه ۳}$$

X_3 امتیاز عامل آب و هوا و P_2 میزان باران شش ساعته با دوره بازگشت دو ساله (mm). برای ارزش‌دهی این عامل از

⁶ Soil Structure

¹ Climate

⁴ Organic Matter

⁵ Permeability

عامل هرزآب یا روان‌آب^۱: در مطالعه اثر رواناب بر فرسایش خاک، ارزیابی دبی ویژه یا آبدی در واحد زمان و سطح، معیار مناسبی برای ارزیابی عامل رواناب می‌باشد. در روش پسیاک اصلاح شده برای برآورد امتیاز عامل رواناب رابطه زیر ارائه شده است:

$$X_4 = 0.006R + 10Q_p \quad \text{رابطه ۴}$$

X_4 امتیاز حاصل از رواناب، R ارتفاع رواناب سالانه (mm) و Q_p دبی ویژه پیک ($m^3/s/km^2$) می‌باشد. دبی ویژه هر یک از واحدهای هیدرولوژیک از تقسیم دبی پیک سیلاب به مساحت آن (km^2) به دست می‌آید.

الف) تخمین ارتفاع رواناب (R): از روش‌های تجربی و محاسباتی مختلفی برای محاسبه آبدی متوسط سالانه حوضه‌هایی که در آن‌ها ایستگاه هیدرومتری وجود ندارد، استفاده می‌شود. در این پژوهش، برای محاسبه ارتفاع رواناب سالانه رابطه زیر بکار می‌رود (علیزاده، ۱۳۷۷):

$$R = CP \quad \text{رابطه ۵}$$

R ارتفاع رواناب (mm)، C ضریب آبدوی (بدون واحد) و P ارتفاع بارندگی (mm) است.

ب) تخمین حداکثر دبی جریان رواناب (Q_{max}): برای تعیین دبی ویژه پیک از روش استدلالی استفاده می‌شود (علیزاده، ۱۳۷۷).

$$Q_{max} = CIA/360 \quad \text{رابطه ۶}$$

Q_{max} دبی ویژه پیک (m^3/s)، C ضریب آبدوی (بدون واحد)، I شدت بارندگی (mm/hr) که زمان تداوم آن معادل زمان تمرکز حوضه یا بیشتر از آن است و A مساحت حوضه آبریز (ha).

ج) ضریب رواناب یا C : ضریب رواناب، عبارت است از نسبت میزان آبدوی به میزان بارندگی یعنی برابر است با (علیزاده، ۱۳۷۷):

$$C = \frac{\text{ارتفاع بارندگی متوسط سالانه}}{\text{ارتفاع آب جاری شده}} \quad \text{رابطه ۷}$$

ضریب هرزآب بین صفر و یک تغییر می‌کند. در اینجا ضریب C را بر حسب نوع پوشش سطح حوضه و نوع خاک استخراج می‌کنیم. با توجه به نوع کاربری زمین (مرتج و چراگاه) و نوع خاک (خاک‌های کم‌عمق روی سنگ‌های غیرقابل نفوذ) حوضه مطالعاتی عدد ۰/۴۵ را به عنوان

ضریب رواناب برای هر دو زیرحوضه آبریز (SB1 و SB2) این منطقه در نظر گرفته می‌شود.

د) زمان تمرکز حوضه^۲: از شروع رواناب تا زمانی که دبی به مقدار ثابت خود می‌رسد، مدتی طول می‌کشد که آن را زمان تمرکز (t_c) می‌نامند (نواکپو و همکاران، ۲۰۱۶). برای تخمین زمان تمرکز حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو، از روش کریچ (کریچ، ۱۹۴۰) استفاده شده است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود. روش کریچ برای حوضه‌هایی است که وسعت آن‌ها کوچک باشد.

$$t_c = 0.949(L^3/H)^{0.385} \quad \text{رابطه ۸}$$

t_c زمان تمرکز (hr)، L طول مسیر حرکت آب در داخل حوضه از ابتدا تا خروجی حوضه (km) و H اختلاف ارتفاع بین بلندترین نقطه در بالادست و پایین‌ترین نقطه (محل خروجی حوضه) (m) است.

ه) شدت بارندگی یا I : مقدار شدت بارندگی از رابطه زیر محاسبه شده است.

$$I = (1045/t_c)^{0.5} \quad \text{رابطه ۹}$$

در این رابطه I شدت بارندگی (mm/hr) و t_c (min) است. **عامل پستی و بلندی^۳:** این عامل در مدل پسیاک اصلاح شده، معمولاً با شاخص شیب (درجه شیب، طول شیب، شکل شیب و جهت شیب) سنجیده می‌شود. اهمیت شیب و توپوگرافی در فرسایش خاک باعث شده است که در روش MPSIAC امتیاز این عامل مهم بین ۰ تا ۲۰ در نظر گرفته شود. عدد صفر برای مناطق با شیب‌های کم و دشت‌های آبرفتی و دامنه‌ای (اراضی با شیب کمتر از ۹ درصد) و عدد بیست برای اراضی کوهستانی و با شیب زیاد (بیش از ۹۲ درصد) می‌باشد (نوری و همکاران، ۲۰۱۶؛ بات و همکاران، ۲۰۱۹). در روش پسیاک اصلاح شده برای تعیین امتیاز توپوگرافی از رابطه زیر بهره می‌گیرد:

$$X_5 = 0.33S \quad \text{رابطه ۱۰}$$

X_5 امتیاز حاصل از شیب و S شیب متوسط بر حسب درصد.

عامل پوشش زمین^۴: منظور از پوشش زمین هر گونه پوششی است که خاک را در مقابل عوامل فرساینده مانند ضربه قطرات باران، رواناب و هرزآب‌های سطحی محافظت می‌کند. پوشش زمین می‌تواند شامل پوشش گیاهی،

^۳ Topography

^۴ Ground cover

^۱ Run off

^۲ Time of Concentration

می‌دهند، امتیازدهی بین ۱۰- تا ۱۰+ متغیر است. بدین منظور بعد از آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای و اعمال تصحیحات لازم، شاخص NDVI بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

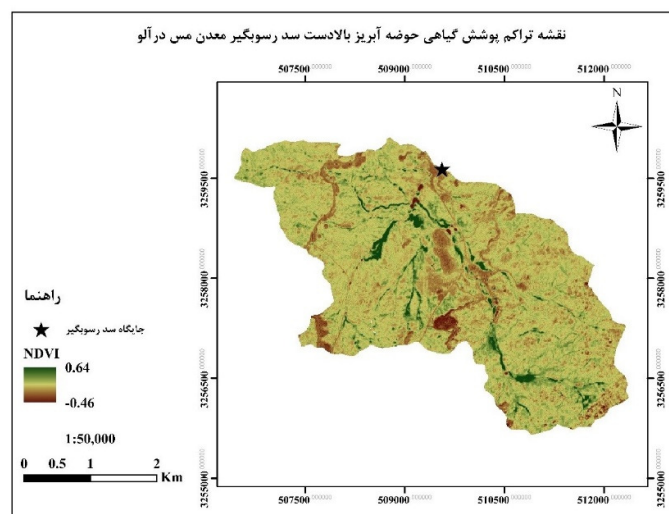
$$\text{رابطه ۱۲} \quad \text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Red})}{(\text{NIR} + \text{Red})}$$

نقشه حاصل با استفاده از نقاط کنترلی در بازدهی‌های میدانی و انطباق با تصاویر ماهواره SPOT صحت‌سنجی گردید. نقشه تراکم پوشش گیاهی حاصل در شکل ۴ نشان داده شده است. به منظور تعیین عامل پوشش زمین، درصد اراضی فاقد پوشش در هر زیرحوضه را که مکان ساخت تاسیسات و خاکبرداری‌ها و دامپ‌های منطقه است در معادله (۱۱) قرار داده و مقدار امتیاز این عامل را برای هر زیرحوضه بدست آوردیم. مقدار امتیاز عامل مذکور برای کل حوضه از طریق میانگین‌گیری وزنی از دو زیرحوضه به دست می‌آید.

پوشش لاشبرگ^۵ و پوشش سنگی^۶ باشد (بهنام و همکاران، ۲۰۱۱؛ خالدیان و همکاران، ۲۰۱۲؛ بات و همکاران، ۲۰۱۹). در پژوهش‌های باتنی و گریسمر (باتنی و گریسمر، ۲۰۰۰) و وینرایت و همکاران (وینرایت و همکاران، ۲۰۰۰)، درصد تراکم پوشش گیاهی به عنوان اصلی‌ترین فاکتور محدود کننده میزان فرسایش خاک اعلام شده است. تاجگردان و همکاران (۱۳۸۷) گزارش کردند که درصد تراکم پوشش گیاهی با میزان رسوب تولیدی مدل MPSIAC همبستگی منفی نشان می‌دهد. برای تعیین امتیاز حاصل از پوشش زمین در روش پسیاک اصلاح شده، رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\text{رابطه ۱۱} \quad X_6 = 0.2P_b$$

X_6 امتیاز عامل پوشش زمین و P_b درصد اراضی لخت و فاقد پوشش^۷ می‌باشند. با توجه به اینکه در این مدل اعداد منفی را به زمین‌های با پوشش گیاهی خوب اختصاص



شکل ۴. نقشه تراکم پوشش گیاهی حوضه آبریز بالادست سد رسوبگیر معدن مس در آلو
Fig. 4. Vegetation density map of the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine

$$\text{رابطه ۱۳} \quad X_7 = 20 - 0.2P_c$$

X_7 امتیاز عامل نحوه استفاده از اراضی و P_c مقدار تاج پوشش گیاهی بر حسب درصد می‌باشد. عامل وضعیت فعلی فرسایش در سطح حوضه آبریز^۱: برای بررسی نقش عامل فرسایش در تولید رسوب، فرسایش سطحی موجود در حوضه آبریز مانند فرسایش‌های بارانی، ورقه‌ای، شیری و خندقی (بجز فرسایش موجود در

عامل کاربری اراضی^۱: تحقیقات متعدد در ایران و جهان بیانگر آن است که از علل اصلی بالا بودن فرسایش و رسوبزایی می‌توان به بهره‌برداری غیر اصولی از منابع زیرزمینی و احداث معادن اشاره کرد (بهنام و همکاران، ۲۰۱۱؛ خالدیان و همکاران، ۲۰۱۲؛ بات و همکاران، ۲۰۱۹). برای تعیین عامل استفاده از اراضی در مدل پسیاک اصلاح شده از رابطه زیر بهره می‌گیرد:

¹ Land use

² Up land erosion

⁵ Litter

⁶ Rock fragment

⁷ Bare ground

پس از تعیین همه عوامل نه‌گانه در مدل MPSIAC و با به دست آوردن مجموع امتیازات، درجه رسوب‌دهی (R) هر زیرحوضه مشخص می‌شود. برای برآورد فرسایش و تولید رسوب در این مدل، از رابطه بین درجه رسوب‌دهی و میزان تولید رسوب به شرح زیر استفاده می‌شود:

$$Q_s = 18.6 e^{0.0353R} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

در این فرمول Q_s میزان رسوب‌دهی سالانه (m^3/km^2)، R درجه رسوب‌دهی یا مجموع امتیازات عوامل مختلف در مدل پسیاک اصلاح شده و $e = 2.718$ عدد نپر می‌باشد. رابطه فوق با درجه همبستگی $r = 0.9963$ از نظر آزمون آماری در سطح یک درصد معنی‌دار می‌باشد. در این روش با در دست داشتن وزن مخصوص متوسط رسوبات معلق و بار کف می‌توان وزن رسوبات سالانه را بر حسب تن در کیلومتر مربع برآورد نمود.

Q_s محاسبه شده، مقدار بار رسوبی^۵ حاصل از واحد سطح را نشان می‌دهد که مجموع بار معلق^۶ و بار بستر^۷ را شامل می‌شود. با توجه به این مهم که، کل فرسایش خاک در یک منطقه با مقدار بار رسوب در همان منطقه یکسان نمی‌باشد. به منظور تشریح امکان رسوب مواد فرسایش یافته و حرکت آن‌ها در شبکه کانالی و در نهایت رسوب‌گذاری در خروجی حوضه و دریاچه‌های پشت سد، نسبت تحویل رسوب^۸ محاسبه گردید (آلاتور و همکاران، ۲۰۱۰؛ وانمارک و همکاران، ۲۰۱۱). مقدار SDR برای هر واحد مطالعاتی را می‌توان بر اساس مساحت حوضه و بافت خاک از روی منحنی وضعیت سطح و تولید رسوب بدست آورد (رفاهی، ۱۳۹۳). از آنجا که تنها بخشی از خاک فرسایش یافته به رسوب پشت سدی تبدیل می‌گردد، لذا همواره مقدار SDR کوچک‌تر از ۱ می‌باشد. با در دست داشتن SDR مقدار فرسایش ناخالص هر واحد هیدرولوژیکی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$SDR = \frac{\text{تولید رسوب}}{\text{میزان فرسایش}} \quad \text{رابطه ۱۷}$$

۳-۳-۳ مدل EPM

از میان روش‌های مختلف برآورد فرسایش در حوضه‌های بدون ایستگاه‌های رسوب‌سنجی و فاقد آمار، مدل EPM به عنوان یک مدل تجربی توسط گاوریلوویچ (گاوریلوویچ،

آبراهه‌ها) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. در روش پسیاک اصلاح شده برای تعیین اعتبار عامل وضعیت فعلی فرسایش از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$X_8 = 0.25 \text{ S.S.F} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

X_8 امتیاز عامل وضعیت فعلی فرسایش و S.S.F امتیاز عامل سطحی خاک می‌باشد که با استفاده از روش اداره مدیریت اراضی آمریکا^۳ (BLM) حاصل می‌شود. در روش مدیریت اراضی، برای تعیین امتیاز عامل سطحی خاک از هفت عامل استفاده شده است؛ این هفت عامل شامل: حرکت توده خاک، پوشش لاشبرگ، پوشش سنگی سطح زمین، قطعات سنگی تحکیم یافته، شیارهای سطحی، فرم آبراهه‌ها و توسعه فرسایش خندقی است (صادقی، ۲۰۰۵). سازمان مدیریت اراضی آمریکا (BLM) وضعیت فرسایش را بر حسب جمع نمرات عوامل هفت‌گانه بین ۰ (فرسایش جزئی) تا ۱۰۰ (فرسایش خیلی زیاد) ارزیابی کرده است (صادقی، ۲۰۰۵). امتیازات ۷ عامل B.L.M در حوضه و زیرحوضه‌های مورد مطالعه بر اساس مشاهدات صحرایی و امتیازدهی به روش تجربی و پرسشنامه‌ای به دست آمده است.

عامل فرسایش رودخانه‌ای و انتقال رسوب^۴: فرسایش رودخانه‌ای، عمدتاً نتیجه تخریب و شسته شدن دیواره آبراهه‌هاست که این فرسوده شدن بیشتر در مواقع سیلاب و فصول پر آب صورت می‌گیرد (باقرزاده و همکاران، ۲۰۱۳). از جمله عوامل مؤثر در فرسایش رودخانه‌ای و حمل رسوب می‌توان شیب متوسط رودخانه‌ها، نوع سنگ‌های مسیر رودخانه و پتانسیل تخریبی جریان سیلاب‌ها را نام برد (نوری و همکاران، ۲۰۱۶). از جمله عوامل مؤثر در جلوگیری از فرسایش و حمل رسوب، می‌توان به پوشش گیاهی در داخل آبراهه‌ها اشاره کرد (باقرزاده و همکاران، ۲۰۱۳). در روش پسیاک اصلاح شده عامل وضعیت فعلی فرسایش از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$X_9 = 1.67 \text{ SSF.g} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

X_9 امتیاز فاکتور فرسایش رودخانه‌ای و SSF.g نمره نهایی فرسایش خندقی عامل فرسایش سطحی خاک در روش BLM (معادله فرسایش جهانی) می‌باشد.

⁶ Suspended load

⁷ Bed load

⁸ Sediment Delivery Ratio

³ Bureau of Land Management

⁴ Channel erosion and sediment transport

⁵ Sediment yield

Ru : ضریب رسوب‌دهی حوضه، L : طول حوضه آبریز (Km)، P : محیط حوضه آبریز (Km)، D : اختلاف ارتفاع (Km)، که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D = Dav - D0 \quad \text{رابطه ۲۳}$$

Dav معادل ارتفاع متوسط حوضه آبریز (Km)، $D0$: ارتفاع نقطه خروج در محل سد (Km)، در ادامه مقدار رسوب ویژه با استفاده از رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود:

$$Gsp = Wsp \cdot Ru \quad \text{رابطه ۲۴}$$

Gsp رسوب ویژه ($m^3/km^2/year$)، در نهایت میزان رسوب کل در یک حوضه آبریز از رابطه ۲۵ به دست می‌آید:

$$Gs = Gsp \cdot A \quad \text{رابطه ۲۵}$$

در رابطه‌ی فوق Gs رسوب کل ($m^3/year$) و A مساحت حوضه‌ی (km^2) است. در نهایت وزن رسوب با در نظر گرفتن وزن مخصوص رسوبات $1/4$ تن در مترمکعب به دست آمد.

۴- بحث

حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو، تنوع سنگ‌شناسی بالایی ندارد. سنگ‌شناسی غالب و پوشش-های سطحی شامل توف، آندزیت، داسیت-ریوداسیت و پهنه‌های وسیع ماسه‌ای و سیلتی-رسی می‌باشد؛ در این بخش، به شرح نهشته‌ها و واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده حوضه آبریز سد رسوب‌گیر می‌پردازیم (شکل ۵).

۱- نهشته‌ها و پوشش‌های رسوبی: این نهشته‌ها با گسترش زیاد در منطقه بصورت رسوبات ریزدانه به سن کواترنر دیده می‌شوند. ذرات تشکیل دهنده این واحد شامل کلیه ذراتی است که حاصل فرسایش واحدهای قدیمی‌تر موجود در داخل حوضه است که از مقاومت بسیار کم در برابر فرسایش و نفوذپذیری بالا برخوردارند.

۲- واحد سنگی توف: این واحد سنگی در بلندی‌های مرتفع زیر حوضه خاوری به خوبی گسترش یافته است به گونه‌ای که مساحت زیادی از این بلندی‌ها را به خود اختصاص داده است. با کاهش ارتفاع این واحد سنگی بصورت تپه‌های پراکنده دیده می‌شود که در انتهای دامنه‌ای این تپه‌ها شاهد حضور واریزه‌ها و نهشته‌های در اندازه ماسه می‌باشیم. دگرسانی در این ترکیب سنگ‌شناسی بسیار شدید دیده می‌شود.

(۱۹۸۸) پس از حدود ۴۰ سال تحقیقات علمی در زمینه فرسایش و رسوب‌گذاری در کشور یوگوسلاوی ارائه گردید و برای کاربرد در حوضه‌های آبریز با قابلیت سیلخیزی در جنوب و جنوب شرق یوگوسلاوی توسعه یافت. پس از آن مدل EPM در چندین کشور دیگر با شرایط آب و هوایی مختلف به کار گرفته شد. مدل EPM مدل ساده‌ای است که قادر به برآورد اولیه‌ی میزان رسوب حمل شده در آبراهه‌ها در طرح‌های مربوط به سدهای در حال احداث ارائه نماید (رنگزن و همکاران، ۱۳۸۷).

برای محاسبه میزان فرسایش بر اساس روش EPM از رابطه‌ی زیر استفاده می‌کنیم:

$$Wsp = T.H.\pi.Z^{1.5} \quad \text{رابطه ۱۸}$$

در این رابطه Wsp معادل فرسایش ویژه ($m^3/km^2/year$)، T : ضریب درجه حرارت هوا، H : ارتفاع متوسط بارندگی سالانه در حوضه آبریز (mm)، $\pi = 3/14$ و Z ضریب شدت فرسایش است. مقادیر T و Z از روابط ۱۹ و ۲۰ به دست می‌آیند:

$$Z = Y.Xa(\varphi + I^{0.5}) \quad \text{رابطه ۱۹}$$

که در این رابطه Z : ضریب شدت فرسایش، Y : ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش، Xa : ضریب استفاده از زمین، φ : ضریب فرسایشی و I : شیب متوسط حوضه آبریز ($^\circ$) است. بر اساس جداول استاندارد (احمدی، ۱۳۹۱)، پارامترهای ضریب حساسیت سنگ و خاک به فرسایش، ضریب استفاده از زمین و ضریب فرسایش در زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب $Y: 0.25$ و 0.5 ، $Xa: 0.5$ و 0.6 ، $\varphi: 0.7$ و 0.8 برآورد شده‌اند.

$$T = (t/10 + 0.1)^{0.5} \quad \text{رابطه ۲۰}$$

t : متوسط درجه حرارت سالانه ($^\circ C$)؛ بر اساس داده‌های دمایی ایستگاه هواشناسی معدن، متوسط درجه حرارت در منطقه $12^\circ +$ درجه سانتی‌گراد است. طبق رابطه ۲۱ فرسایش کل حوضه (Vp) معادل است با:

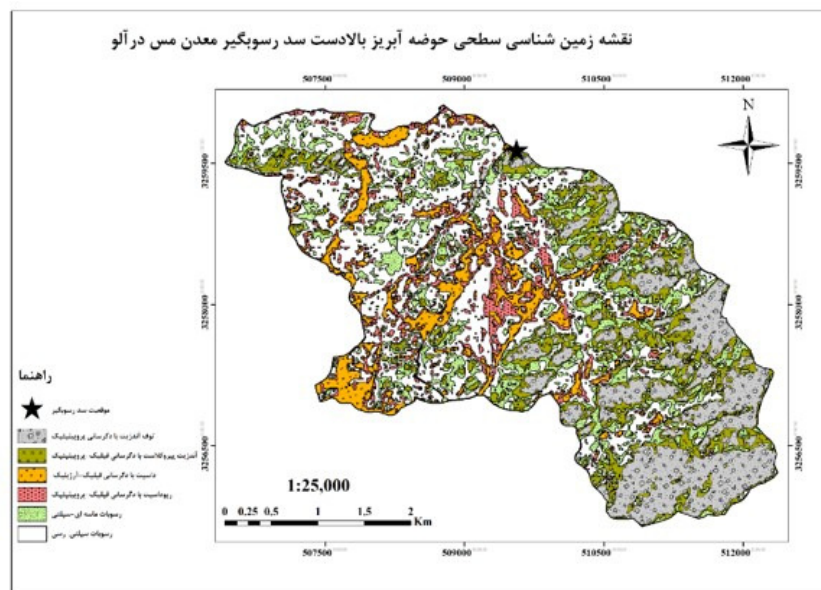
$$Vp = Wsp \cdot A \quad \text{رابطه ۲۱}$$

Vp : فرسایش کل حوضه ($m^3/year$) و A : مساحت حوضه (m^2)؛ جهت محاسبه میزان رسوب بر اساس مدل EPM در ابتدا باید ضریب رسوب‌دهی حوضه را بر اساس رابطه زیر استخراج کرد:

$$Ru = \frac{4(P.D)^{0.5}}{L+10} \quad \text{رابطه ۲۲}$$

۴- واحد سنگی داسیتی-ریوداسیتی: این لیتولوژی به دلیل شدت دگرسانی بالا (بیش از ۸۰ درصد) مقاومت کمی در مقابل عوامل فرسایشی نشان می‌دهد و دارای نفوذپذیری بالایی است؛ گسترش نفوذپذیری در نتیجه تأثیرات تکتونیک و عملکرد گسل‌های منطقه بر این سنگ‌ها ایجاد شده است. گسترش این واحد سنگی غالباً در میانه حوضه مورد مطالعه اغلب بصورت توده‌های نفوذی صخره‌ای و پراکنده دیده می‌شود.

۳- واحد سنگی آندزیتی: این واحد در بخش خاوری حوضه آبریز گسترش نسبتاً خوبی نشان می‌دهد. این واحد سنگی از نظر لیتولوژیکی متشکل از سنگ‌های با جنس پیروکلاستیک‌های آندزیتی، آندزیتی و مقدار کمی آندزیتی-بازالتی است. سیمای این واحد سنگی اغلب به صورت بلندی‌های مرتفع و صخره‌ای می‌باشد. اغلب نمونه‌های برداشت شده از این واحد سنگی به شدت دگرسان شده و اجزاء سازنده آن‌ها به سختی شناسایی شده‌اند.



شکل ۵. نقشه زمین‌شناسی سطحی حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو

Fig. 5. Surface geological map of the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine

جدول ۳. نحوه امتیازدهی به عامل زمین‌شناسی سطحی در حوضه بالادست سد باطله معدن مس درآلو

Table 3. scoring the surface geological index to the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine

$X_i = Y_i$		$X_i = Y_i$		$X_i = Y_i$		$X_i = Y_i$	
پارامتر	مساحت حوضه (km^2)	مساحت هر واحد لیتولوژی (km^2)	لیتولوژی هر زیرحوضه	مساحت (%)	Y_i	X_i	
کل حوضه	۱۴/۱۴	۲/۶۵	توف آندزیت	۱۸/۷۲	۷/۵	۸/۲۹	
		۱/۸۸	آندزیت پیروکلاستی	۱۳/۲۶	۷		
		۱/۲۵	داسیت	۸/۸۲	۶/۵		
		۱/۳۳	ریوداسیت	۹/۴	۶		
		۲/۴۱	رسوب ماسه‌ای-سیلتی	۱۷/۰۶	۹		
		۴/۶۳	رسوب سیلتی-رسی	۳۲/۷۴	۱۰		
حوضه آبریز شرقی	۹/۰۸	۲/۵۸	توف آندزیت	۲۸/۴۳	۷/۵	۸/۱	
		۱/۵۸	آندزیت پیروکلاستی	۱۷/۳۹	۷		
		۰/۵۵	داسیت	۶/۰۱	۶/۵		
		۰/۶۹	ریوداسیت	۶/۰۱	۶		
		۱/۵۵	رسوب ماسه‌ای-سیلتی	۱۷/۱۲	۹		
		۲/۱۳	رسوب سیلتی-رسی	۲۳/۴۶	۱۰		
حوضه آبریز غربی	۵/۰۶	۰/۰۶	توف آندزیت	۱/۳۸	۷/۵	۸/۶۳	
		۰/۳	آندزیت پیروکلاستی	۵/۸۵	۷		
		۰/۷	داسیت	۱۳/۸۷	۶/۵		
		۰/۶۴	ریوداسیت	۱۲/۶۳	۶		
		۰/۸۶	رسوب ماسه‌ای-سیلتی	۱۶/۹۵	۹		
		۲/۵	رسوب سیلتی-رسی	۴۹/۴۱	۱۰		

برای تعیین مقدار عامل زمین‌شناسی سطحی در هر یک از زیرحوضه‌ها، مساحت تحت اشغال هر واحد زمین‌شناسی در آن زیرحوضه مشخص و متوسط مقدار عامل زمین‌شناسی در کل حوضه و هر زیرحوضه از طریق میانگین‌وزنی محاسبه گردید؛ بر این اساس امتیاز عامل زمین‌شناسی برای کل حوضه مطالعاتی و زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب $۸/۲۹$ ، $۸/۱$ و $۸/۶۳$ محاسبه شده است. با توجه به عدم تنوع وسیع در سنگ‌شناسی حوضه آبریز سد رسوب‌گیر انتظار می‌رود که تنوع کمی نیز در خاک‌های منطقه از نظر بافتی دیده شود؛ زیرا خاک حاصل‌هوازدگی فیزیکی و شیمیایی شدید سنگ‌های زیرین خود است. نکته قابل توجه در مورد ارزیابی عامل خاک در میزان فرسایش منطقه این است که با توجه به شرایط اقلیمی سرد و خشک منطقه مطالعاتی در اغلب فصول سال، پروفیل خاک بصورت نازک و تکامل نیافته دیده می‌شود؛ به گونه‌ای که جریان‌های سطحی با کمی حفر بستر به سنگ مادر رسیده و بر روی سنگ بستر آذرین جریان پیدا می‌کنند. طبق نتایج اندازه‌گیری بافت خاک با روش هیدرومتری، خاک زیرحوضه خاوری (SB1) دارای بافت ماسه‌ای تا کمی سیلتی و خاک زیرحوضه باختری (SB2) دارای بافت غالباً سیلتی-رسی می‌باشد. با توجه به ریزبافت بودن خاک زیرحوضه باختری انتظار می‌رود قابلیت انتقال رسوبات در آن زیاد باشد؛ از طرف دیگر به دلیل خاصیت چسبندگی ذرات رس، در برابر فرسایش آبی مقاوم هستند؛ همچنین نتایج اندازه‌گیری ماده آلی نشان داد که متوسط ماده آلی در خاک حوضه باختری حدود $۰/۴۵$ می‌باشد؛ بنابراین با توجه به بافت سیلتی-رسی خاک و مقدار ماده آلی در آن انتظار فرسایش متوسط تا زیاد برای عامل خاک در زیر حوضه باختری می‌رود. با میانگین‌گیری وزنی امتیاز عامل خاک برای کل حوضه مطالعاتی استخراج می‌شود. بدین ترتیب امتیاز عامل خاک برای کل حوضه و زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب $۷/۱۷$ ، ۷ و $۷/۵$ محاسبه شده است.

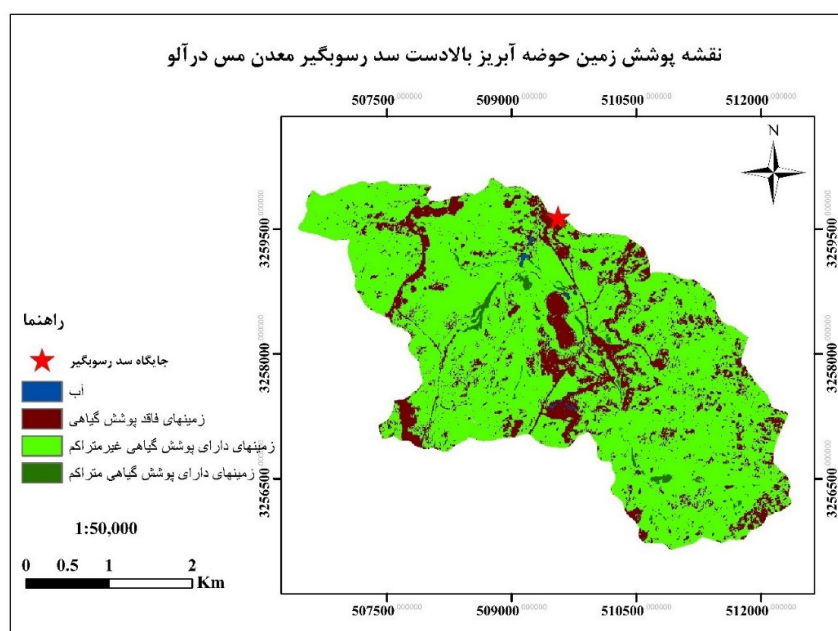
بر اساس آمار بارندگی‌های ۲۴ ساعته با دوره بازگشت دو ساله در نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هیدرومتری (معادل $۳۲/۸\text{mm}$)، مقدار بارندگی ۶ ساعته با دوره بازگشت دو سال در حوضه مورد مطالعه معادل $۲۱/۸۶\text{mm}$ محاسبه شده است. با توجه به اینکه حوضه آبریز مورد مطالعه جزو

حوضه‌های کوچک است و اختلاف اقلیم قابل توجه در بین زیرحوضه‌ها مشاهده نمی‌شود؛ از اینرو کل حوضه و هر کدام از زیرحوضه‌ها امتیاز یکسان معادل $۴/۳۷$ می‌گیرند. مقدار امتیاز عامل رواناب برای زیرحوضه‌های SB1 و SB2 به ترتیب $۷/۵۲$ و $۷/۷۲$ می‌باشد. علت بالاتر بودن امتیاز این عامل برای زیرحوضه SB2 کوچک‌تر بودن مساحت زیرحوضه و پایین بودن زمان تمرکز می‌باشد که به طور مستقیم بر مقدار شدت بارندگی در حوضه تاثیرگذار است؛ این عامل در کل حوضه با امتیاز $۷/۵۹$ نقش بالایی در فرسایش و تولید رسوب ایفا می‌کند.

میانگین شیب در هر زیرحوضه بر اساس معادلات و تحلیل‌های GIS محاسبه شد. تاثیر این عامل در فرسایش و حمل رسوبات در زیرحوضه خاوری که دارای اختلاف ارتفاع زیاد و شیب بیشتر است با امتیاز بالاتری ($۸/۵۵$) مشخص شده است؛ این امر می‌تواند به دلیل افزایش سرعت رواناب و کاهش نفوذپذیری خاک باشد. از سوی دیگر، این عامل در زیرحوضه باختری که دارای زمین‌های پست و شیب کمتر است در برآورد فرسایش امتیاز پایین‌تری ($۵/۴۸$) را کسب کرده است. بر اساس نقشه کاربری اراضی (جهاد دانشگاهی استان کرمان، ۱۳۹۵) پوشش سطحی حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن درآلو کاملاً از نوع مرتع شناسایی شده است. این پوشش‌ها غالباً از نوع گیاهان درمنه، گون، چمنزار می‌باشد. پوشش درختی و درختچه‌ای در منطقه به ندرت دیده می‌شود. امتیاز عامل پوشش زمین را برای کل حوضه و زیرحوضه‌های خاوری و باختری بالادست سد باطله معدن مس درآلو به ترتیب معادل $۳/۳۴$ ، $۳/۶۲$ و $۲/۸۴$ محاسبه شده است؛ همچنین شکل ۶ انواع پوشش سطحی زمین‌های حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر را نشان می‌دهد. با افزایش درصد پوشش زمین چه به صورت پوشش گیاهی چه به صورت پوشش سنگی و لاشبرگ از درصد زمین‌های لخت کاسته شده و اثر عوامل فرسایشی در جابه‌جایی رسوبات کاسته می‌شود. در نتیجه زیرحوضه باختری با دارا بودن درصد پوشش سطحی بالاتر امتیاز کمتری را در فرسایش منطقه به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر بیشتر پوشش گیاهی در زیرحوضه باختری از نوع چمنزار متراکم است که با درصد فراوانی بالایی نسبت به زیرحوضه خاوری دیده می‌شود؛ این چمنزارها بدلیل ارتفاع کم و تماس با خاک بیشتر از گیاهان دارای

عملیات خاک‌برداری و گسترش ساخت و ساز و تاسیسات انسانی در منطقه می‌توان شاهد کاهش درصد پوشش گیاهی و افزایش امتیاز فرسایش بود؛ بگونه‌ای که کاهش ۶ درصدی پوشش گیاهی در زیرحوضه خاوری نسبت به زیرحوضه باختری باعث افزایش حدود ۱/۲ امتیاز فرسایش شده است. همین مقدار افزایش در امتیاز می‌تواند تاثیر زیادی در بالا رفتن حجم رسوب حمل شده از سطح زیرحوضه خاوری داشته باشد. امتیاز عامل کاربری زمین برای کل حوضه و زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب معادل ۳/۶۵، ۴/۰۸ و ۲/۸۸ محاسبه شده است.

ارتفاع و بوته‌زارها که سطح زمین آن‌ها لخت است می‌توانند انرژی جنبشی باران را کاهش داده و فرسایش را کنترل کند. بر اساس نقشه کاربری اراضی (جهاد دانشگاهی استان کرمان، ۱۳۹۵) و مشاهدات صحرایی تنها کاربری طبیعی در حوضه مورد مطالعه مرتعداری است. مراتع با توجه به پارامتر تاج پوشش گیاهی منطقه از نوع مراتع خوب بشمار می‌آید که در کنترل هوازگی و فرسایش خاک تاثیر بسزایی دارند. با این وجود در حوضه بالادست سد باطله کارخانه تغلیظ معدن مس درآلو می‌توان شاهد ساخت و سازها و خاک‌برداری‌های مختلف بود که در از بین بردن پوشش گیاهی منطقه تاثیر بسزایی دارند. با افزایش



شکل ۶. نقشه پوشش زمین در حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو
Fig. 6. Land cover map of the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine

خمدار (مئاندري) در پایین‌دست مشاهده می‌شوند که در کف آن‌ها ذرات سیلت، شن و مواد کوهرفتی بصورت نهشته‌های درهم دیده می‌شوند. از سوی دیگر بیشترین عامل تشدید فرسایش در زیرحوضه باختری (SB2) علاوه بر فرم آبراهه‌های منطقه که بیشتر بصورت مئاندري دیده می‌شود، می‌توان به تعداد زیاد خندق‌ها در منطقه اشاره کرد؛ این خندق‌ها درصد زیادی از مساحت این زیرحوضه را اشغال کرده و تعدادی از آن‌ها کاملاً توسعه یافته و دارای فرسایش فعال می‌باشند. فعالیت‌های معدنکاری و ساختن جاده‌ها و تاسیسات منجر به فرسایش تشدید در این منطقه شده است. طبق نتایج به دست آمده وضعیت

مشاهدات و بازدیدهای صحرایی به عمل آمده از حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن درآلو نشان می‌دهد که روند فرسایش در منطقه از فرسایش بارانی و سطحی شروع شده و تا فرسایش شیاری و خندقی گسترش می‌یابد. مقدار امتیاز عامل وضعیت فرسایش برای زیرحوضه‌های SB1 و SB2 به ترتیب ۶/۵ و ۶/۲۵ می‌باشد. امتیاز کل حوضه برای وضعیت فرسایش فعلی حوضه با میانگین‌گیری وزنی ۶/۴۱ بدست آمده است. بیشترین عامل فرسایش در ارتفاعات شیب‌دار و تپه‌های زیرحوضه خاوری (SB1)، مربوط به فرم آبراهه‌های این منطقه است. آبراهه‌های این زیرحوضه به فرم آبراهه‌های مستقیم در بالادست تا پیچ و

خود اختصاص می‌دهد. امتیاز کل حوضه برای فرسایش رودخانه‌ای با میانگین‌گیری وزنی ۸/۴۶ بدست آمده است. در نهایت از مجموع امتیاز عوامل نه‌گانه مدل پسیاک اصلاح شده، درجه رسوب‌دهی (R) برای حوضه بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو و هر یک از زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب ۵۶/۷۴، ۵۶/۴۲ و ۵۷/۳۶ محاسبه شده است. همچنین با احتساب متوسط وزن مخصوص خاک اراضی منطقه در آزمایشگاه خاک که برابر است با ۱/۴ تن در مترمکعب، وزن رسوبات حمل شده در حوضه آبریز و زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب ۲۷۲۹، ۱۷۳۴ و ۹۹۷ تن در سال می‌باشد.

فرسایش متأثر از این فاکتور در کل حوضه به مقدار کم ($21 < S.S.F < 40$) می‌باشد. با توجه به کمبود حجم پوشش گیاهی در داخل آبراهه‌ها، فرسایش رودخانه‌ای در قسمت‌های خارجی خمیدگی آبراهه‌ها بشدت مشاهده می‌شود. از آنجا که امتیاز این عامل برای هر دو زیرحوضه مورد مطالعه براساس نمره نهایی فرسایش خندقی عامل فرسایش سطحی خاک در روش BLM محاسبه می‌شود. بنابراین زیرحوضه‌ای که دارای بیشترین فرسایش‌های خندقی باشد طبیعی است که بیشترین امتیاز را از عامل فرسایش رودخانه‌ای اتخاذ کند. بنابراین زیرحوضه باختری (SB2) بیشترین امتیاز از عامل فرسایش رودخانه‌ای (۱۱/۶۹) و زیرحوضه خاوری کمترین امتیاز (۶/۶۸) را به

جدول ۴. امتیازات عوامل فرسایشی در حوضه سد رسوب‌گیر معدن مس در آلو به روش MPSIAC

Table 4. Scores of erosive factors in the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine by MPSIAC method

پارامترهای مدل MPSIAC	امتیازات		
	کل حوضه	حوضه آبریز شرقی	حوضه آبریز غربی
زمین‌شناسی	۸/۲۹	۸/۱	۸/۶۳
خاک	۷/۱۷	۷	۷/۵
اقلیم	۴/۳۷	۴/۳۷	۴/۳۷
روئاب سطحی	۷/۵۹	۷/۵۲	۷/۷۲
توپوگرافی	۷/۴۵	۸/۵۵	۵/۴۸
پوشش زمین	۳/۳۴	۳/۶۲	۲/۸۴
کاربری اراضی	۳/۶۵	۴/۰۸	۲/۸۸
وضعیت فرسایش فعلی حوضه	۶/۴۱	۶/۵	۶/۲۵
فرسایش رودخانه‌ای	۸/۴۷	۶/۶۸	۱۱/۶۹
درجه رسوب‌دهی (R)	۵۶/۷۴	۵۶/۴۲	۵۷/۳۶
رسوب ویژه (t/year)	۲۷۲۹	۱۷۳۴	۹۹۷
فرسایش ویژه (t/year)	۶۳۴۹	۳۶۸۷	۱۹۵۷

شرایط زمین‌شناسی منطقه مقدار فرسایش ویژه محاسبه شده برای کل حوضه و زیر حوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب معادل ۱۱۱۸، ۶۶۷ و ۱۹۲۶ متر مکعب در کیلومتر مربع در سال است. از سوی دیگر، با در دست داشتن مقدار فرسایش ویژه و مساحت کل حوضه و زیر حوضه‌های مطالعاتی، مقدار فرسایش کل به ترتیب معادل ۷۳۷۶۵۴۰۴۸۰، ۶۰۵۶۳۶۰۰۰ و ۹۷۴۵۵۶۰۰۰۰ متر مکعب در سال برآورد شده است. در ادامه براساس اطلاعات جمع‌آوری شده ضریب رسوب‌دهی کل حوضه و زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب ۰/۲۷، ۰/۴۱ و ۰/۳۱ محاسبه شده است. نتایج حاصل از محاسبه مقدار رسوب ویژه براساس مدل EPM برای کل حوضه و زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب برابر با ۱۹۶، ۲۷۳ و ۵۹ مترمکعب در سال در کیلومتر مربع می‌باشد. در نهایت میزان کل رسوب معادل ۱۶۹۷، ۲۴۷۷ و ۲۹۸ متر

با در دست داشتن مقدار رسوب ویژه (Qs) و SDR میزان فرسایش ویژه برای کل حوضه آبریز و زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب ۶۳۴۹، ۳۶۸۷ و ۱۹۵۷ تن در سال محاسبه شده است. همانطور که از داده‌های محاسباتی مشخص است مقدار رسوب تولیدی در حوضه به مراتب بیشتر از مقدار رسوب خارج شده از حوضه است؛ این امر می‌تواند نگرانی‌های حاصل از فرسایش و آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از پر شدن مخزن سد باطله از فرسایش طبیعی را به حداقل برساند. جدول ۴ امتیازات عوامل فرسایشی در حوضه و زیرحوضه‌های بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو به روش MPSIAC را نشان می‌دهد. در ارزیابی میزان فرسایش بسیاری از فاکتورها و ریزفاکتورهایی که در مدل MPSIAC محاسبه می‌شوند در روش EPM نادیده گرفته شده‌اند. در مدل EPM بر اساس پارامترهای اقلیمی و

می‌باشد؛ این برآوردهای تا حدودی دور از واقعیت می‌تواند نتیجه حذف بسیاری از پارامترهای اساسی در محاسبه میزان فرسایش و حمل رسوبات در یک حوضه رسوبی باشد. با بزرگ‌تر شدن حوضه رسوبی انتظار می‌رود که درصد خطاهای عملی در این روش نیز افزایش یافته و مقادیری غیرواقعی و چندبرابری از پارامترهای فرسایشی را نشان دهد. مدل MPSIAC به دلیل در نظر گرفتن بسیاری از ریزفاکتورهای موثر، نتایج بهتر و قابل قبول‌تری را در برآورد میزان فرسایش و رسوب‌گذاری حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو نشان می‌دهد.

مکعب در سال به ترتیب برای کل حوضه و زیرحوضه‌های خاوری و باختری برآورد شده است. با در نظر گرفتن وزن مخصوص رسوبات منطقه، مقدار کل وزن رسوبات حمل شده در مدت یک سال برای حوضه آبریز مطالعاتی و زیرحوضه‌های خاوری و باختری به ترتیب ۲۰۹۷۶، ۳۱۴۸۸ و ۲۱۱۳ تن در سال محاسبه شده است. جدول ۵ امتیازات عوامل فرسایشی در حوضه و زیرحوضه‌های بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو به روش EPM را نشان می‌دهد. تمامی نتایج بدست آمده از روش EPM در مقایسه با روش MPSIAC حاکی از نوعی اغراق در برآورد میزان فرسایش و میزان رسوبات حمل شده در پشت سد

جدول ۵. امتیازات عوامل فرسایشی در حوضه سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو به روش EPM

Table 5. Scores of erosive factors in the watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo copper mine by EPM method

پارامترهای مدل EPM	امتیازات		
	کل حوضه	حوضه آبریز شرقی	حوضه آبریز غربی
فرسایش ویژه (year/km ² /m ³)	۱۱۱۸	۶۶۷	۱۹۲۶
فرسایش کل (year/m ³)	۷۳۷۶۵۴۰۴۸۱	۶۰۵۶۳۶۰۰۰۰	۹۷۴۵۵۶۰۰۰۰
ضریب رسوبدهی حوضه	۰/۲۷	۰/۴۱	۰/۰۳۱
رسوب ویژه (year/km ² /m ³)	۱۹۶	۲۷۳	۵۹
رسوب کل (year/m ³)	۱۶۹۷	۲۴۷۷	۲۹۸
وزن رسوب (t/m ³)	۲۳۷۶	۳۴۶۸	۴۱۸
وزن رسوب (t/year)	۲۰۹۷۶	۳۱۴۸۸	۲۱۱۳
شدت فرسایش	۰/۹۸	۰/۷۲	۱/۴۶

این حوضه هنوز تاثیر چندانی بر تخریب سطحی و رسوب‌زایی حوضه ندارد. در راستای مدیریت صحیح حوضه آبریز و برای تضعیف عوامل مساعد فرسایش طرح‌ها و برنامه‌های مختلف به شرح زیر پیشنهاد می‌شود.

۱- کنترل فرسایش خندقی فعال: این امر در منطقه از طریق انحراف آب‌های بالادست و جلوگیری از ورود آنها به خندق، استقرار پوشش گیاهی مناسب و احداث سازه‌های سبک و غیرصلب در نزدیکی راس خندق امکان‌پذیر است.

۲- مدیریت منابع آب و کنترل رواناب قبل از اینکه سرعت جریان به سرعت آستانه فرسایش برسد؛ اینکار از طریق پایدارسازی شیب‌ها و افزایش نفوذپذیری خاک (بوسیله استقرار، حفاظت و یا احیای پوشش گیاهی)، ذخیره‌سازی آب‌های سطحی و هدایت آب‌های اضافی به طرف مجاری خروجی، مهار سیلاب با عملیات بیولوژیکی و مکانیکی و تعیین کاربری مناسب برای هر محل امکان‌پذیر است.

راهکارهای مدیریتی حوضه آبریز سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو

در مدل نزدیک به واقعیت MPSIAC بر اساس شدت رسوب‌دهی (R) و میزان تولید رسوب سالانه (Qs) در حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن درآلو، این حوضه در دسته حوضه‌های کلاس دو با میزان فرسایش کم قرار می‌گیرد؛ بنابراین ضرورت دارد که در برخی از عرصه‌ها، اجرای برنامه‌های حفاظت آب و خاک مورد بررسی قرار گیرد. از میان عوامل مؤثر بر فرسایش، عامل فرسایش رودخانه‌ای در کل حوضه و زیرحوضه باختری به عنوان مؤثرترین عامل، بالاترین درجه امتیاز را به خود اختصاص داده است. در زیرحوضه خاوری عامل توپوگرافی، بیشترین تاثیر را در افزایش بار رسوبی حمل شده نشان می‌دهد. از سوی دیگر عامل پوشش زمین کمترین تاثیر را در تولید رسوب حوضه آبریز بالادست سد رسوب‌گیر معدن درآلو دارد. این امر نشان می‌دهد که فعالیت‌های انسانی در

۵- نتیجه‌گیری

سدهای رسوب‌گیر مناطق صنعتی باید در موقعیت‌های مکانی با حداقل میزان ورودی سالانه رسوب احداث شوند؛ از اینرو ارزیابی میزان فرسایش و رسوب‌گذاری خاک در حالت طبیعی مکمل سایر مطالعات مکان‌یابی سد است. در این مطالعه به دلیل فقدان ایستگاه رسوب‌سنجی در ورودی سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو، از مدل MPSIAC و EPM به عنوان مدل‌های مطابق با واقعیت جهت ارزیابی میزان فرسایش و رسوب‌گذاری حوضه بالادست سد استفاده شده است. بر طبق نتایج مطالعات به روش MPSIAC، شدت رسوب‌دهی در هر دو زیرحوضه مطالعاتی به میزان کم (حوضه خاوری و باختری به ترتیب ۵۶/۴۲ و ۵۷/۳۶) و میزان تولید رسوب سالانه هر دو زیرحوضه معادل ۲۷۲۹ تن در سال محاسبه شده است. بر اساس بیشترین تاثیر عوامل فرسایش در حوضه (فرسایش رودخانه‌ای در زیرحوضه باختری و عامل توپوگرافی در زیرحوضه خاوری) و در راستای مدیریت صحیح حوضه آبریز، استقرار پوشش گیاهی، ذخیره‌سازی آب‌های سطحی و اصلاح شیوه‌های کاربری پیشنهاد می‌شود. از سوی دیگر برآورد میزان فرسایش و تجمع رسوبات در پشت سد رسوب‌گیر معدن درآلو به روش EPM حاکی از درجه فرسایش شدید تا خیلی شدید در حوضه آبریز مطالعاتی است که هیچگونه تطابقی با نتایج روش MPSIAC نشان نمی‌دهد. به عبارتی، روش EPM به دلیل محدود بودن فاکتورهای موثر، نوعی اغراق در برآورد نتایج نشان می‌دهد و نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل MPSIAC در جهت برآورد پارامترهای فرسایشی در حوضه آبریز سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو به شمار آید. این مطالعه اطلاعات ارزشمندی در زمینه فرسایش طبیعی منطقه پیش از راه‌اندازی کارخانه و تأسیسات در حوضه بالادست سد رسوب‌گیر معدن مس درآلو ارائه می‌دهد و بکارگیری نقش داده‌های مکانی در حوزه‌های فاقد ایستگاه‌های رسوب‌سنجی را در پروژه‌های حفاظت خاک و منابع طبیعی را پررنگ‌تر می‌کند.

۶- تشکر و قدردانی

در پایان پژوهش حاضر، نویسندگان لازم می‌دانند که از تمام همکاری‌های علمی و حمایت‌های مادی و معنوی گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد از طریق کمک

هزینه شماره ۳/۵۰۳۱۱ تشکر و قدردانی کنند. بی‌شک این تحقیق بدون حمایت‌های بخش تحقیق و توسعه صنایع مس سرچشمه و معدن مس درآلو قابلیت اجرایی پیدا نمی‌کرد. از اینرو، از مدیریت و کارشناسان محترم معدن مس درآلو برای همکاری در نمونه‌برداری‌ها کمال تشکر را داریم. در پایان از گروه‌های زمین‌شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان جهت حمایت‌های علمی و فراهم آوردن شرایط ویژه جهت آماده‌سازی نمونه‌ها و مطالعات مربوطه کمال تشکر را داریم.

References

- Ahmadi, H (2012) Applied Geomorphology: Water Erosion. 8th edition, Tehran University Press, 688p, (in persian).
- Alatorre, L. C., Beguería, S., García-Ruiz, J. M (2010) Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. Journal of Hydrology, 391: 109-123.
- Alavinia, S. H., Motaghian, M (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: 792. doi.org/10.1007/s10661-024-12973-9.
- Alizadeh, A (1998) Principles of applied hydrology. 10th edition, Astan Quds Razavi Publishing, 636 p, (in persian).
- Avand, M., Khiavi, A. N., Mohammadi, M., Tiefenbacher, J. P (2023) Prioritizing sub-watersheds based on soil-erosion potential by integrating RUSLE and game-theory algorithms. Advances in Space Research, 72: 471-487. doi.org/10.1016/j.asr.2023.03.031.
- Bagherzadeh, A., Mansouri Daneshvar, M. R (2013) Evaluation of sediment yield and soil loss by the MPSIAC model using GIS at Golestan watershed, northeast of Iran. Arabian Journal of Geosciences, 6: 3349-3362.
- Bashari, H., Boali, A., Soltani, S (2024) Accommodating uncertainty in soil erosion risk assessment: Integration of Bayesian belief networks and MPSIAC model. Natural Hazards Research, 4: 34-147. doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.009.
- Bavi, H., Mahmudy Gharaie, M. H., Moussavi-Harami, R., Zand-Moghadam, H., Mahboubi, A., Tohidi, M. R (2023) Spatial dispersion hot spots of contamination and human health risk assessments of PTEs in surface sediments of streams around porphyry copper mine, Iran. Environmental Geochemistry and Health, 45: 3907-3931 doi.org/10.1007/s10653-022-01471-x.

- Bavi, H., Moussavi-Harami, R., Mahmudy Gharaie, M. H., Zand-Moghadam, H (2024) A Comparative Study on Speciation and Availability Risk of Toxic and Potentially Toxic Elements in Different Groups of Sediments in the Dar-E-Allo Copper Mine, SE Iran. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 33: 1619–1651. doi.org/10.1080/15320383.2024.2320793.
- Behnam, N., Parehkar, M., Pazira, E (2011) Sensitivity analysis of MPSIAC model. *Journal of Rangeland Science*, 1: 295–302. doi.org/10.1007/s12517-012-0573-y.
- Beyer Portner, N (1998) Erosion des basins versant alpins scusses par ruissellement de surface. Ph.D Thesis, Laboratoire de Constructions Hydrauliques-LCH, No. 1815, lausanne, Switzerland.
- Bird, S. C., Walsh, R. P. D., Littlewood, I. G (1990) Catchment characteristics and basin hydrology: their effects on streamwater acidity. *Acid Waters in Wales*, 66: 203–221.
- Casabella-González, M. J., Borselli, L., García-Meza, J. V (2023) Improved MPSIAC model for soil erosion rate assessment in semiarid zones. *Journal of Arid Environments*, 212: 104946. doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.104946.
- Chandrashekara, H., Lokeshb, K. V., Sameenac, M., roopad, J., ranganna, G (2015) GIS-Based morphometric analysis of two reservoir catchments of Arkavati River, Ramanagaram District, Karnataka. *Aquatic Procedia*, 4: 1345 – 1353. doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.175.
- Chess, C., Gibson, G (2001) Watersheds are not equal: exploring the feasibility of watershed Management1. *Journal of the American Water Resources Association*, 37: 775–782. doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb05510.x.
- Clark, R. D (1980) Erosion Condition Classification System (Technical Note No. 346). United States Department of the Interior - Bureau of Land Management, Denver, Colorado.
- De Vente, J., Poesen, J (2005) Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. *Earth-Science Reviews*, 71: 95–125, doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.02.002.
- De Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Govers, G., Vanmaercke, M., Van Rompaey, A., Arabkhedri, M., Boix-Fayos, C (2013) Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? *Earth-Science Reviews*, 127: 16–29, doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.014.
- Eisazadeh, L., Amani, R. S., Pazira, E., Homaeae, M., Oskuee, R. S (2012) Comparison of empirical models to estimate soil erosion and sediment yield in micro catchments. *International Journal of Agricultural Research*, 2: 303–307.
- Gavrilovic, Z (1988) The use of empirical method (erosion potential method) for calculating sediment production and transportation in staded or torrential streams, *International Conference on Rriver Regime – Joh*, Wiley and Sons, 12: 411–422.
- Gee, G. W., Bauder, J. W (1986) Particle-Size Analysis. In: Klute, A., Ed., *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, Agronomy Monograph No. 9, 2nd Edition, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison, WI, 383–411.
- Haregeweyn, N., Poesen, J., Nyssen, J., Verstraeten, G., de Vente, J., Govers, G., Deckers, S., Moeyersons, J (2005) Specific sediment yield in Tigray-Northern Ethiopia: assessment and semi-quantitative modelling. *Geomorphology*, 69: 315–331. doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.02.001.
- Heshmati, M., Arifin, A., Shamshuddin, J., Majid, N.M (2012) Predicting N, P, K and organic carbon depletion in soils using MPSIAC model at the Merek catchment. *Geoderma*, 175–176: 64–77.
- Hoseini, F. Z., Rezaei, K., Bajestan, M. S (2015) Comparing calculations of sediment yield in Masjed Soleyman dam (SW, Iran) using the MPSIAC and hydrographic models. *Journal of Scientific Research and Development*, 2: 157–165. doi.org/ 10.22055/aag.2016.12708.
- Jetten, V., Govers, G., & Hessel, R (2003) Erosion models: Quality of spatial predictions. *Hydrological Processes*, 17: 887–900. doi.org/10.1002/hyp.1168.
- Johnson, C., Gebhardt, K (1982) Predicting sediment yields from Sagebrush Rangelands [Pacific Southwest Inter-Agency Committee prediction procedure, southwest Idaho]. *Agricultural Reviews and Manuals*, www.agris.fao.org.
- Johnson, C. W., Gebhardt, K. A (1982) Predicting sediment yields from Sagebrush Rangelands. In: *Proceedings of the Workshop on Estimating Erosion and Sediment Yield on Rangelands*, Western Series. Agricultural Research Service (Western Region). U.S. Department of Agriculture, Oakland, Calif. 94612, Tucson, 145–156.
- Khaledian, Y., Kiani, F. & Ebrahimi, S (2012) The effect of land use change on soil and water quality in northern Iran. *J. Mt. Sci*, 9: 798–816. doi.org/10.1007/s11629-012-2301-1.
- Kirpich, Z. P (1940) Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10: 362p.
- Lazzari, M., Gioia, D., Piccarreta, M., Danese, M., Lanorte, A (2015) Sediment yield and erosion rate estimation in the mountain catchments of the Camastra artificial reservoir (Southern

- Italy): a comparison between different empirical methods. CATENA, 127: 323-339. doi.org/10.1016/j.catena.2014.11.021.
- Leta, M. K., Waseem, M., Rehman, K., Tränckner, J (2023) Sediment yield estimation and evaluating the best management practices in Nashe watershed, Blue Nile Basin. Ethiopia. Environmental Monitoring and Assessment, 195: 716.
- Li, Z. and Fang, H (2016) Impacts of climate change on water erosion: A review. Earth-Science Reviews, 163: 94-117. doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.004.
- Mahmoodabadi, M (2011) Sediment yield estimation using a semi-quantitative model and GIS-remote sensing data. Int. Agrophys, 25: 241-247.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., Jakeman, A. J (2003) A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software, 18: 761-799.
- Morgan, R. P. C (2005) Soil Erosion and Conservation, third ed. Blackwell Science Ltd.
- Nasiri, Y., Taqdisi Nikbakht, S., Mahmoudi Qaraei, M.H., Mahboubi, A., Khanehbad, M., Sedaghat Nia, M., Pasban, A (2022) Evaluation of soil erosion and sediment production by using MPSIAC model and GIS in Eshgabat-Sole watershed (southwest of Qochan). Applied Sedimentology, 9: 17: 65-82 (in persian).
- Ndomba, P. M (2013) Validation of PSIAC model for sediment yields estimation in Ungauged catchments of Tanzania. International Journal of Geosciences, 1101-1115. doi.org/10.4236/ijg.2013.47104, 04.
- Noori, H., Siadatmousavi, S. M., Mojaradi, B (2016) Assessment of sediment yield using RS and GIS at two sub-basins of Dez Watershed, Iran. International Soil and Water Conservation Research, 4: 199-206. doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.06.001.
- Nouwakpo, S. K., Williams, Ch. J., Al-Hamdan, O. Z., Weltz, M. A., Pierson, F., Nearing, M (2016) A review of concentrated flow erosion processes on rangelands: Fundamental understanding and knowledge gaps. International Soil and Water Conservation Research, 4: 75-86. doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.05.003.
- Pacific Southwest Interagency Committee, P.S.I.A.C (1968) Report of the Water Management Subcommittee on Factors Affecting Sediment Yield in the Pacific Southwest Area and Selection and Evaluation of Measures for Reduction of Erosion and Sediment Yield, p. 98 (No. HY12). ASCE.
- Rajabi, A. M., Yavari, A., Cheshomi, A (2022) Sediment yield and soil erosion assessment by using empirical models for Shazand watershed, a semi-arid area in center of Iran. Nat Hazards 112: 1685-1704, doi: 10. 1007/s11069-022-05244-8.
- Refahi, H (2014) Water erosion and its control. 7th edition, Tehran University Press, 671 p, (in persian).
- Parsons, A. J., Abrahams, A. D (2005) Overland Flow: Hydraulics and Erosion Mechanics. Routledge, London; New York. doi.org/10.1201/b12648.
- Pimentel, D (2009) World Soil Erosion and Conservation. Cambridge University Press.
- Sadeghi, S. H. R (2005) A semi-detailed technique for soil erosion mapping based on BLM and Satellite Image applications. Agricultural Science and Technology, 7: 133-142.
- Safamanesh, R., Sulaiman, W. N. A., Ramli, M. F (2006) Erosion risk assessment using an empirical model of pacific south west inter agency committee method for zargeh watershed, Iran. Journal of Spatial Hydrology, 6.
- Seutloali, K. E., Beckedahl, H. R (2015) Understanding the factors influencing rill erosion on roadcuts in the south eastern region of South Africa. Solid Earth, 6: 633-641. doi.org/10.5194/se-6-633-2015.
- Seutloali, K. E., Dube, T., Sibanda, M (2018) Developments in the remote sensing of soil erosion in the perspective of sub-Saharan Africa. Implications on future food security and biodiversity. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 9: 100-106. doi.org/10.1016/j.rsase.2017.12.002.
- Tajgardan, T., Ayoubi, Sh (2008) Estimation of erosion and sedimentation using satellite data and geographic information system using the MPSIAC model (case study: Ziarat watershed). Scientific-research journal of research and construction in natural resources, Ministry of Jihad Agriculture, Tehran, 21: 45-37, (in persian).
- Turner, B. L., Fuhrer, J., Wuellner, M., Menendez, H. M., Dunn, B. H., Gates, R (2018) Scientific case studies in land-use driven soil erosion in the central United States: why soil potential and risk concepts should be included in the principles of soil health. International Soil and Water Conservation Research, 6: 63-78. doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.12.004.
- University Jihad of Kerman Province (2016) The second phase of the study of Kerman Province. Kerman Province Management and Planning Organization's land improvement project, 133 p, (in persian).
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Verstraeten, J., Vente, J., Ocakoglu, F (2011) Sediment yield in Europe: Spatial patterns and scale dependency. Geomorphology, 130: 142-161. doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.010.
- Vigiak, O., Borselli, L., Newham, L.T.H., McInnes, J., Roberts, A. M (2012) Comparison of

- conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. *Geomorphology*, 138: 74–88. doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.026.
- Villela, J. M., Anache, J. A., Watanabe, A. M., Flanagan, D. C., Wendland, E. C., Crestana, S (2023) Performance evaluation of a water erosion tracer using plot-scale experiments and process-based modeling. *International Soil and Water Conservation Research*. 11: 622-632. doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.05.003.
- Wainwright, J., Parsons, A. J., Abrahams, A. D (2000) Plot-scale studies of vegetation, overland flow and erosion interactions: case studies from Arizona and New Mexico. *Hydrological Processes*, 14: 2921-2943.
- Walkley, A. L., Black, A (1934) An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of chromic acid in soil analysis. *Soil Science*, 79: 29-38. doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003.
- Wang, B., Zheng, F., Guan, Y (2016) Improved USLE- K factor prediction: a case study on water erosion areas in China. *International Soil and Water Conservation Research*, 4: 168–176. doi. org/10.1016/j.iswcr.2016.08.003.
- Wishmeier, W. H., Smith, D. D (1978) Predicting rainfall erosion losses, A guide to conservation planning. USDA. Agricultural Research Service, Handbook, 537 p.
- Zolanj, S., Dimitrijevic, M. N., Cvetic, S., Dimitrijevic, M. N (1972) Geological Map of Sarduiyeh, 1: 100,000 Series Sheet 7448. Ministry of Economy, Geological Survey of Iran.

Evaluation of erosion and sedimentation rate in the catchment basin of Dar-e-Allo copper mine waste dam in the south of Kerman by MPSIAC and EPM modeling

H. Bavi¹ and H. Zand-Moghadam^{2*}

1- Visiting Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

2- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

* Zand1883@uk.ac.ir

Received: 2024.6.15 Accepted: 2024.11.13

Abstract

Soil erosion is considered a serious threat to the pollution of water sources, soil wastage and the spread of environmental pollution in arid and semi-arid areas. Therefore, it is necessary to identify sediment production areas as erosion critical points and take necessary measures to prevent and control this destructive environmental phenomenon. The modified PSIAC (MPSIAC) and EPM models are global models for evaluating soil erosion and annual sediment input behind dams. The purpose of this study is to evaluate the erosion rate in the watershed of the tailing dam of Dar-e-Allo copper mine and calculate the amount of annual sediment input behind the dam. The results of the field study and laboratory data show that based on the MPSIAC model parameters, the watershed of the waste dam of Dar-e-Allo mine is in the category of basins with low erosion. Among the nine effective factors in soil erosion, river erosion is known as the most effective factor in the whole watershed and the western sub-basin. The topographic factor has the greatest effect in increasing the transported sediment load, in the eastern sub-basin. On the other hand, the land cover factor shows the minimum effect on the production of sediment in the catchment basin. This shows that human activities in this watershed do not have much effect on the surface soil degradation. On the other hand, the EPM model evaluated the severity of erosion in the study area as severe to very severe due to the ignoring of many effective parameters. The evaluated values are highly exaggerated and far from reality by considering the natural conditions prevailing in the area. Therefore, the MPSIAC model is highly recommended for erosion studies in the upstream watershed of the tailings dam of Dar-e-Allo Cu despite being expensive and time-consuming.

Keywords: Erosion, Sedimentation, MPSIAC, EPM, Dar-e-Allo copper mine

Introduction

Soil erosion by runoff is one of the most important environmental problems and soil degradation. Unfortunately, in semi-arid climates, erosion processes are more widespread due to deforestation land use change and insufficient agricultural management. Therefore, to protect the watersheds that need care and to reduce the adverse effects of erosion, it is necessary to assess the risks of erosion through models that are based on empirical or semi-quantitative processes. The most famous semi-quantitative erosion models are the modified Psiak and EPM models (Johnson and Gebhardt, 1982; Gavrilovic, 1988), which were applied to the arid and semi-arid climates of the southwestern United States and southeast of Yugoslavia. In designing and calculating the volume of reservoir dams, it is necessary to determine the amount of erosion and sedimentation of the watershed. Therefore, to

estimate the amount of eroded sediment in the area and the amount of inflow of the Dar-e-Allo copper mine waste dam, the study of the erosion rate of the basin using the MPSIAC and EPM methods, while being practical. The purpose of this study includes: 1- Investigating the physiological and hydrological conditions of the catchment area of the Dar-e-Allo copper mine sedimentation dam, 2- Collecting background information on the amount of natural erosion in the area before setting up other mining facilities and changing the land use of the basin, and 3- evaluation and comparison of erosion and sedimentation rate in industrial area by MPSIAC and EPM modeling. We predict that, due to the change in many erosion parameters, especially in land use, we will see an increase in delivered sediment to the dam. Considering that the erosion of the area, along with the waste of soil and the filling of the reservoir of the dam, causes the distribution of environmental pollution;

Therefore, it seems necessary to carry out erosion control activities before any environmental damage.

Materials & Methods

1- watershed with a scale of 1:25000; 2- Estimation of the morphometric parameters of the watershed by using GIS analytical functions; 3- Sampling of the soil system (fifteen samples) to evaluate the permeability index; 4- Preparing a geological map of the catchment area with a scale of 1:25000; 5- extracting the digital elevation maps and the slope map of the watershed; 6- Evaluation of the climatic condition of the watershed using the data of the mine meteorological station and the data of the closest meteorological stations; 7- Preparing a map of vegetation density and land use using the vegetation difference index (NDVI); 8- Dividing the watershed into two study sub-basins, and scoring each of them based parameters of the MPSIAC and EPM model; 9- Calculating the total scores of each sub-basin and main watershed based on weighted averaging and assessing the amount of annual erosion and sedimentation.

Results and Discussion

The similarity in lithology and climatic conditions in the entire watershed has caused both sub-basins to be affected by the same erosion factors, similar erosion forms with different intensities and weaknesses. The main forms of basin erosion include: 1- Splash erosion, Rill erosion, Gully erosion, Tunnel erosion and Stream-bank erosion.

Compared to other existing experimental methods, the MPSIAC method is considered the most effective in soil erosion and sediment production. In this method, the role of 9 factors in soil erosion of the watershed is evaluated. Finally, by calculating the sum of the numbers obtained for different factors, the sedimentation rate is estimated. The catchment of Dar-e-Allo copper mining dam does not have high lithological diversity. Dominant lithologies include tuff, andesite, dacite-rhyodacite, and wide sandy and silty clay areas. To determine the amount of surface geological factor in each sub-basin, the area occupied by each geological unit in that particular sub-basin and the average amount of geological factor in the total watershed and each sub-basin were calculated by weighted average; Based on this, the geological factor score for the entire study basin and the eastern and western sub-basins has been calculated as 8.29, 8.1 and 8.63, respectively. According to the results of soil texture, the soil of the eastern sub-

basin (SB1) has a sandy texture and the soil of the western sub-basin (SB2) has a silty-clay texture. Considering the fine texture of the western sub-basin, it is expected that the ability to transport sediments is high; On the other hand, due to the sticky properties of clay particles, they are resistant to water erosion; Therefore, according to the silty-clay texture of the soil and the amount of organic matter (0.45) in it, moderate to high erosion is expected for the soil factor under the western basin. In this way, the soil factor scores for the whole basin and the eastern and western sub-basins has been calculated as 7.17, 7 and 7.5 respectively.

Based on the statistics of 24-hour rainfall with a two-year return period (32.8 mm), the amount of 6-hour rainfall with a two-year return period in the studied basin is equivalent to 21.86 mm. Considering that the significant climate differences are not observed among the sub-basins; Therefore, the total watershed and each of the sub-basins get the same score of 4.37. The runoff score for SB1 and SB2 sub-basins is 7.52 and 7.72, respectively. The reason for the higher score of this factor for the SB2 is the smaller area and the low concentration time, which directly affects the amount of rainfall intensity in the basin; This factor plays a high role in erosion and sediment production in the watershed with a score of 7.59. The influence of the slope on the erosion and transport of sediments in the eastern sub-basin, which has a large height difference and a higher slope, has been identified with a higher score (8.55); This can be due to the increase in runoff speed and decrease in soil permeability. On the other hand, this factor has obtained a lower score (5.48) in the estimation of erosion in the western sub-basin, which has low elevation and less slope.

The ground cover of the watershed of Dar-e-Allo waste dam is pasture-type. The ground cover score for the total watershed, the eastern and western sub-basins of the waste dam has been calculated as 3.34, 3.62 and 2.84, respectively; The western sub-basin, having a higher percentage of ground cover, therefore, has a lower score in the region's erosion.

According to the density of vegetation, the pasture of the watershed is considered to be a good pasture that has a significant effect on controlling weathering and soil erosion. The score of the land use factor for the total watershed and the eastern and western sub-basins has been calculated as 3.65, 4.08 and 2.88, respectively. The erosion score for SB1 and SB2 is 6.5 and 6.25, respectively. The total score of the watershed for the upland erosion is 6.41. The most prominent erosion factor in the highlands of

the eastern sub-basin (SB1) is related to the form of streams. On the other hand, the most significant factor of upland erosion in the western sub-basin (SB2) in addition to the shape of the waterways, which is mostly seen as a meander, can be the large number of gully in the region; Mining activities and construction of roads and facilities have led to intensified erosion in this area. According to the obtained results, the state of erosion affected by this factor in the watershed is low ($S.S.F. > 21 > 40$).

The channel erosion and sediment transport score for both sub-basins is calculated based on the final score of gully erosion in the BLM method. Therefore, it is natural that the sub-basin that has the most gully erosions takes the most scores from the river erosion factor. Therefore, the western sub-basin (SB2) has the highest score of the channel erosion and sediment transport erosion factor (11.69) and the eastern sub-basin has the lowest score (6.68). The total score of the watershed is obtained with a weighted average of 8.46. Finally, the degree of sedimentation (R) for the watershed of the waste dam and the eastern and western sub-basins are 56.74, 56.42 and 57.36, respectively. Also, according to the average specific weight of soil (1.4 t/m³), the weight of the sediments transported in the watershed and the eastern and western sub-basins is 2729, 1734 and 997 tons per year, respectively. According to the specific sediment (QS) and SDR, the specific erosion for the watershed and the eastern and western sub-basins has been calculated as 6349, 3687 and 1957 tons per year, respectively. The amount of sediment produced in the watershed is far more than the sediment eroded from the watershed; This can minimize the concerns of erosion and environmental pollution caused by the filling of the reservoir with tailings from natural erosion. For the management of the watershed, various programs are suggested as follows. 1- control active gully erosion through the diversion of streams, the establishment of suitable vegetation and the construction of light structures near the head of the gully. 2- Water resource management and runoff control before the flow rate reaches the erosion threshold; This is possible through stabilizing the slopes and increasing the permeability of the soil, storing surface water and directing excess water to the outlet channels, controlling floods with biological and

mechanical operations and determining the appropriate land use. In evaluating the erosion rate, many factors and micro-factors calculated in the MPSIAC model are ignored in the EPM method. In the EPM model, based on the climatic parameters and geological conditions of the watershed, the specific erosion calculated for the entire basin and the eastern and western sub-basins is 1118, 667 and 1926 m³/km²/year, respectively. In the following, considering the specific weight of the sediments, the total weight of the transported sediments in one year for the study catchment and the eastern and western sub-basins has been calculated as 20976, 31488 and 2113 t/year respectively. All the results obtained from the EPM method compared to the MPSIAC method indicate a kind of exaggeration in the estimation of the amount of erosion and the sediments transported behind the dam; These estimates, which are somewhat far from reality, can be the result of omitting many basic parameters in calculating the erosion in the watershed. The MPSIAC model shows better and more acceptable results in estimating the erosion and sedimentation of the catchment of the Dar-e-Allo copper mine sedimentation dam due to the consideration of many effective micro-factors.

Conclusions

Evaluating soil erosion in the natural state is complementary to other studies on the location of waste dams. According to the results of the MPSIAC, the intensity of sedimentation is low and the annual sediment production of the watershed is calculated as 2729 t/year. On the other hand, the estimation of the erosion and accumulation of sediments behind the dam of Dar-e-Allo mine using the EPM method indicates the degree of severe to very severe erosion in the catchment, which does not show any agreement with the results of the MPSIAC method. In other words, due to the limited effective factors, the EPM method shows an exaggeration in the estimation of the results and cannot be considered a suitable substitute for the MPSIAC model to estimate the erosion in the watershed of the Dar-e-Allo Cu mine dam. Based on the greatest impact of erosion factors in the basin and to properly manage the watershed, it is recommended to establish vegetation, store surface water and modify the usage practices.